

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA**

**DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA**

**XXIII CICLO – ANNO 2011**

**La geochimica isotopica applicata a reperti scheletrici  
fossili di mammiferi terrestri: considerazioni  
paleoclimatiche e paleoambientali**

**Coordinatore: Chiar.mo Prof. Renzo Valloni**

**Tutor: Chiar.ma Prof.ssa Paola Iacumin**

**Dottoranda: Antonietta Di Matteo**

*Solo a Giovanni*

# INDICE

## INTRODUZIONE

## PARTE I: CENNI DI GEOCHIMICA ISOTOPICA PER LA RICOSTRUZIONE DEGLI AMBIENTI DEL PASSATO

<b>1. Gli isotopi</b> .....	2
1.1: Caratteristiche generali.....	2
1.2: Il frazionamento isotopico.....	3
1.3: Gli standard internazionali di riferimento.....	6
<b>2. La ricostruzione dei climi e degli ambienti del passato     mediante la geochimica isotopica.....</b>	<b>10</b>
2.1 : Le ossa.....	10
2.2 : I denti.....	14
2.3 : La ricostruzione del paleoclima mediante gli isotopi dell'ossigeno: il $\delta^{18}\text{O}$ nel fosfato e nel carbonato dei reperti scheletrici.....	17
2.3.1: Fattori e meccanismi che influenzano il $\delta^{18}\text{O}$ delle precipitazioni.....	22
2.3.2: Effetti metabolici e comportamenti alimentari che influenzano il valore del $\delta^{18}\text{O}$ della bioapatite.....	27
2.4: La ricostruzione del paleoambiente e della paleodieta mediante gli isotopi del carbonio e dell'azoto.....	28
2.4.1: Il $\delta^{13}\text{C}$ dell'apatite e del collagene.....	28
2.4.2: Il $\delta^{15}\text{N}$ del collagene.....	36
2.5: Fenomeni di diagenesi nei campioni osteologici.....	38
2.6: Analisi dello stato di conservazione delle ossa: indicatori chimici, fisici e microbiologici.....	41

## PARTE II: MATERIALI E METODI

<b>3. I reperti scheletrici dei siti italiani.....</b>	<b>45</b>
3.1: L'Olocene: variazioni climatiche ed evoluzione umana	
dal Mesolitico all'Età del Bronzo.....	45
3.2: I campioni dei siti della Pianura Padana.....	49
3.2.1: Le Mose (PC).....	50
3.2.2: Benefizio.....	53
3.2.3: Collecchio.....	54
3.2.4: Gaione.....	56
3.2.5: Via Guidorossi (PR).....	58
3.2.6: Ponte Taro.....	60
3.2.7: Ponte Ghiara.....	62
3.2.8: Vicofertile.....	63
3.2.9: Via Traversetolo (PR) .....	64
3.3: Il sito costiero delle Arene Candide (SV).....	68
3.4: Il sito dell'Italia meridionale di Masseria Candelaro (FG).....	71
<b>4. I reperti scheletrici del sito di Al Khiday (16-D-4) (Sudan Centrale).....</b>	<b>74</b>
4.1: Variazioni climatiche in Africa durante l'Olocene:	
implicazioni per l'evoluzione culturale umana .....	75
4.2: Gli scavi archeologici nell'area di El Salha.....	77
4.3: Al Khiday 1 (16-D-5).....	79
4.4: Al Khiday 2 (16-D-4).....	80
4.5: Inquadramento geomorfologico .....	82
<b>5. Metodologie analitiche.....</b>	<b>85</b>
5.1: Procedura di pre-trattamento dell'apatite e di estrazione della CO <sub>2</sub> .....	86
5.2: Procedura chimica di estrazione del collagene.....	88
5.3: Procedura chimica per la precipitazione e	
fluorurazione del fosfato d'argento.....	90
5.4: Principi di spettrometria di massa: lo spettrometro di massa	
per elementi leggeri.....	93
5.5: La spettrometria di massa a flusso continuo d'elio.....	98
5.6: La calibrazione dei dati.....	103

<b>6. Principi di statistica applicati per l'elaborazione dei dati</b> .....	105
6.1: Generalità ... ..	105
6.2: La rilevazione dei dati .....	106
6.3: La rappresentazione dei dati .....	106
6.4: L'elaborazione dei dati .....	108
6.4.1: Misure di tendenza centrale.....	108
6.4.2: Misure di dispersione.....	109
6.4.3: Gli indici di forma... ..	110
6.5: I Box-Plot. ....	112
6.6: La Cluster analysis.....	114
6.6.1 I metodi gerarchici .....	115
6.7: I test di inferenza statistica... ..	115
6.7.1: Il test t di Student per dati indipendenti .....	116
6.8: ANOVA.....	118
6.8.1: Analisi della varianza ad un criterio di classificazione.....	118
6.9: La regressione e la correlazione .....	121

### **PARTE III: PRESENTAZIONE E DISCUSSIONE DEI DATI**

<b>7. I siti italiani.....</b>	124
7.1: Valutazione dello stato di conservazione dei reperti ... ..	125
7.2: La composizione isotopica del carbonio dell'apatite.....	128
7.3: La composizione isotopica del carbonio del collagene.....	142
7.4: La composizione isotopica dell'azoto del collagene. ....	150
7.5: La composizione isotopica dell'ossigeno dell'apatite.....	156
7.6: Le faune.....	165
7.7: Ricostruzione della paleodieta.....	168
7.8: Ricostruzione paleoclimatica e paleoambientale.....	172

<b>8. I siti di El Salha</b> .....	182
8.1: Valutazione dello stato di conservazione dei reperti.....	183
8.2: La composizione isotopica del carbonio dell'apatite.....	187
8.3: La composizione isotopica dell'ossigeno dell'apatite .....	193
8.4: Le faune .....	197
8.5: Le piante attuali.....	206
8.5: Ricostruzione della paleodieta.....	207
8.6: Ricostruzione paleoclimatica e paleoambientale.....	211
<b>9. Conclusioni</b> .....	220
<b>Bibliografia</b> .....	225

## **Appendice**

## *INTRODUZIONE*

La ricostruzione delle caratteristiche dei climi e degli ambienti del passato è fondamentale per la comprensione delle influenze che le variazioni climatiche hanno sull'evoluzione della biosfera. Molti sistemi naturali, infatti, sono dipendenti dal clima ed è possibile applicare loro varie metodologie di indagine al fine di ottenere importanti informazioni paleoclimatiche. Tra queste vi è la geochimica isotopica.

In questo progetto di ricerca i principi e le tecniche della geochimica degli isotopi stabili vengono applicati ad un particolare record paleoclimatico rappresentato dai reperti scheletrici fossili dei mammiferi terrestri: umani e animali. Su tale materiale è possibile misurare, tra gli altri, i valori isotopici di C, N, e O nella frazione minerale (carbonato-idrossiapatite) e in quella organica (collagene) di ossa e denti. Questi parametri risultano per svariati motivi indicatori, diretti o indiretti, delle condizioni ambientali nelle quali gli organismi vivevano e possono quindi fornire importanti informazioni paleoclimatiche. Inoltre, permettono di ricostruire le paleo-diete e le economie di sussistenza, le quali, seppure indirettamente, ci consentono di analizzare le caratteristiche ambientali in contesti antichi. Alcuni di questi parametri poi, possono essere utilizzati per individuare la mobilità e le migrazioni degli individui magari in risposta ai cambiamenti climatici che influenzano tutta la biosfera.

I campioni analizzati in questo studio provengono da una serie di siti della provincia di Parma e Piacenza, dal sito della Caverna delle Arene Candide (SV) e da quello di Masseria Candelaro (FG). Sono quindi rappresentate tre aree diverse: la Pianura Padana, un sito costiero dell'Italia Settentrionale e un sito dell'Italia Meridionale. Essi coprono l'intervallo cronologico che va dal Neolitico inferiore (~ 7500 BP) fino al Bronzo antico (4200-3600 BP).

Per questa parte del progetto ci si è avvalsi della collaborazione della Dott.ssa Maria Bernabò Brea, funzionario della Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Emilia Romagna e direttrice del Museo Archeologico di Parma, e della Dott.ssa Loretana Salvadei, antropologa del Museo Nazionale Preistorico Etnografico "L. Pigorini" di Roma.

Inoltre, sono stati considerati anche una serie di reperti provenienti dalla località del Sudan Centrale di El Salha, i quali coprono un ampio intervallo cronologico che va da un periodo,

definito su basi archeologiche, come pre-Mesolitico (> 9000 BP) fino al Meroitico (2100-1500 BP). In questo caso ci si è avvalsi della collaborazione della Dott.ssa Donatella Usai e del Dott. Sandro Salvatori dell'I.S.I.A.O. (Istituto Italiano per l'Africa e l'Oriente).

In definitiva sono state considerate due macro-aree terrestri molto diverse fra loro ma che, almeno in parte, coprono lo stesso intervallo temporale.

Lo scopo che questo studio si prefigge è quello di ricostruire, mediante l'integrazione delle informazioni ottenute dai differenti parametri isotopici e l'utilizzo di alcuni test statistici, le caratteristiche ambientali delle aree prese in esame e le variazioni climatiche che si sono verificate nell'intervallo cronologico considerato. Su tali basi si è cercato, infine, di confrontare le diverse zone laddove vi sia una sovrapposizione temporale.

Questo lavoro di tesi si articola in tre parti fondamentali.

Nella prima vengono illustrati i principi teorici sui quali si basa la geochimica isotopica per le ricostruzioni paleoclimatiche.

La seconda parte è dedicata alla descrizione dei materiali e delle tecniche analitiche e statistiche utilizzate per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati.

Infine, nella terza parte vengono illustrati e discussi i risultati ottenuti.

## **PARTE I**

# **CENNI DI GEOCHIMICA ISOTOPICA PER LA RICOSTRUZIONE DEGLI AMBIENTI DEL PASSATO**

# ***CAPITOLO 1***

## **GLI ISOTOPI**

*In questo capitolo sono illustrati i principi teorici generali sui quali si basa la geochimica degli isotopi stabili. Inoltre, vengono descritte in maniera dettagliata le caratteristiche degli Standard Internazionali di riferimento rispetto ai quali si esprimono i valori di composizione isotopica.*

### ***1.1: CARATTERISTICHE GENERALI***

Gli elementi chimici naturali sono costituiti in gran parte da atomi di specie atomiche diverse detti *isotopi*, i quali possiedono lo stesso numero di protoni ed elettroni e un diverso numero di neutroni. Queste diverse specie atomiche sono in definitiva caratterizzate dallo stesso numero atomico (Z) ma da un differente numero di massa (A).

Gli isotopi di un elemento manifestano un analogo comportamento chimico, avendo lo stesso numero di elettroni nella medesima posizione orbitale, ma presentano un diverso comportamento fisico dovuto alla differenza di massa tra le varie specie. Questo però non significa che in tutti i processi chimici i diversi isotopi di un elemento si comportino esattamente nello stesso modo, ad esempio la velocità di reazione tra due forme isotopiche è leggermente diversa.

In natura sono noti circa 1500 isotopi diversi dei quali meno di 300 sono stabili, conservano cioè inalterata nel tempo la propria composizione nucleare, mentre gli altri (1200 circa) sono non stabili o radioattivi, poiché si trasformano spontaneamente fino ad assumere una configurazione stabile attraverso un processo noto come decadimento radioattivo.

Solo 21 elementi chimici naturali (tra cui il sodio, il fluoro e il berillio) possiedono un solo isotopo stabile, nella maggior parte dei casi essi possiedono più di una forma isotopica.

La geochimica degli isotopi stabili è la disciplina che si occupa della determinazione dei rapporti di abbondanza degli isotopi nei diversi composti e dello studio dei processi fisici e chimico-fisici che ne hanno determinato la composizione isotopica.

## 1.2: IL FRAZIONAMENTO ISOTOPICO

La ripartizione non proporzionata degli isotopi di uno stesso elemento tra due sostanze o tra due fasi della stessa sostanza è definito *frazionamento isotopico*. La selettività isotopica è strettamente correlata alla differenza di massa fra gli isotopi; ne consegue che a parità di altre condizioni i frazionamenti isotopici saranno più rilevanti per gli isotopi degli elementi leggeri (come l'idrogeno la cui differenza di massa tra gli isotopi è del 100%) piuttosto che per quelli pesanti. Questo fenomeno è, infatti, legato alla diversa energia di legame che caratterizza gli isotopi degli elementi, per cui quelli con numero di massa maggiore necessitano di una quantità di energia più elevata per dissociarsi rispetto agli isotopi leggeri. Ne risulta una concentrazione non proporzionata di una forma isotopica rispetto ad un'altra nei composti coinvolti nel processo chimico o chimico-fisico.

I processi di frazionamento naturale sono legati a equilibri chimici (soprattutto nelle reazioni di ossido-riduzione) o biochimici (reazioni di riduzione batterica), a processi fisici quali i cambiamenti di stato della materia, o ancora a fenomeni di diffusione atomica o a processi cinetici.

Di seguito sono riportate le distribuzioni medie di alcuni isotopi sulla terra:

$^1\text{H}$ : 99,984%	$^2\text{H}$ : 0,01557%		
$^{12}\text{C}$ : 98,89%	$^{13}\text{C}$ : 1,11140%		
$^{14}\text{N}$ : 99,64%	$^{15}\text{N}$ : 0,36630%		
$^{16}\text{O}$ : 99,76%	$^{17}\text{O}$ : 0,04%	$^{18}\text{O}$ : 0,20004%	
$^{32}\text{S}$ : 95,02%	$^{33}\text{S}$ : 0,75%	$^{34}\text{S}$ : 4,21500%	$^{36}\text{S}$ : 0,02%

Le abbondanze relative degli isotopi di uno stesso elemento variano nei diversi composti e dipendono dal processo naturale subito. Il rapporto di abbondanza isotopica (R) di un elemento in un composto chimico descrive la proporzione tra l'isotopo più pesante posto al numeratore (generalmente il più abbondante in natura) e quello più leggero al denominatore. Ad esempio nel caso dell'anidride carbonica si avrà:

$$R = \frac{({}^{13}\text{CO}_2)}{({}^{12}\text{CO}_2)} = \frac{({}^{13}\text{C})}{({}^{12}\text{C})} \text{CO}_2$$

Per valutare l'entità del frazionamento nell'ambito di un determinato processo si utilizza il fattore di frazionamento  $\alpha$ , il quale rappresenta la distribuzione relativa degli isotopi in due fasi all'equilibrio (Urey, 1974). Ad esempio, nel sistema anidride carbonica-metano il fattore di frazionamento sarà uguale a:

$$\alpha = \frac{R_{\text{CO}_2}}{R_{\text{CH}_4}} = \frac{({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{CO}_2}}{({}^{13}\text{O}/{}^{12}\text{O})_{\text{CH}_4}}$$

Solitamente  $\alpha$  è maggiore di 1, poiché si preferisce mettere al numeratore il composto o la fase che ha il più elevato valore di R.

Poiché le variazioni di composizione isotopica per i composti naturali sono molto piccole, in genere per esprimerle si ricorre al cosiddetto fattore di arricchimento  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon\text{‰} = (\alpha - 1) * 1000$$

Se si considera, ad esempio il sistema  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  in condizioni di equilibrio a  $25^\circ\text{C}$ , il valore di  $\alpha$  sarà:

$$\alpha = \frac{({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{CO}_2}}{({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{H}_2\text{O}}} = 1,0412$$

da cui risulta che  $\varepsilon\text{‰} = 41,2\text{‰}$ , ovvero che il rapporto  ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$  è maggiore del 41,2‰ rispetto al valore dello stesso rapporto nell'acqua.

Lo spettrometro di massa rende difficile determinare con precisione le abbondanze isotopiche assolute ma consente di definire con maggiore accuratezza quelle relative ad una sostanza standard di riferimento a composizione isotopica nota. Per esprimere la differenza del rapporto isotopico misurato in un determinato composto rispetto allo stesso rapporto determinato in uno standard opportunamente selezionato si utilizza il parametro  $\delta$  che è definito come:

$$\delta = \frac{(R_{campione} - R_{standard})}{(R_{standard})} * 1000$$

Questa notazione è particolarmente utile perché mette immediatamente in evidenza quanto il campione sia arricchito o impoverito in isotopi pesanti rispetto allo standard di riferimento. Ad esempio, se misuriamo un valore di  $\delta$  di +3‰ per il rapporto  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  di un campione d'acqua significa che il contenuto in  $^{18}\text{O}$  è del 3‰ più elevato rispetto a quello dello standard.

Per due composti in equilibrio isotopico i valori del  $\delta$  e il fattore di frazionamento sono legati dalla relazione:

$$\varepsilon \cong \delta_A - \delta_B \cong 10^3 \log \alpha_{A-B}$$

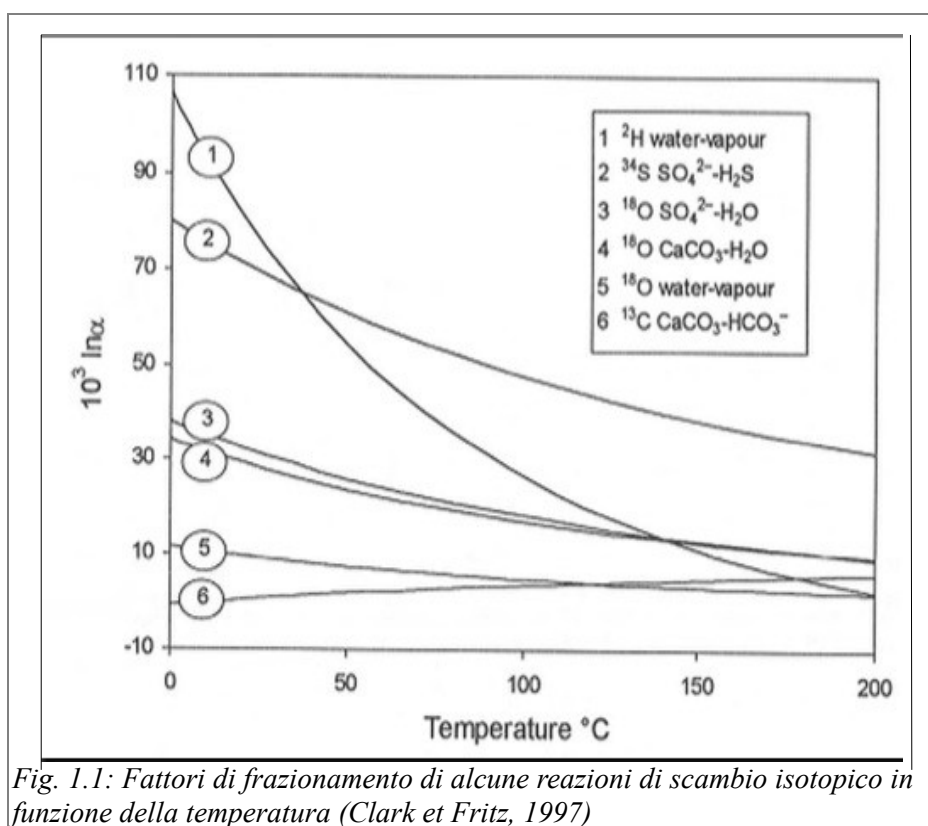
Generalmente si considera il frazionamento in condizioni di equilibrio isotopico ovvero quando la reazione procede nei due sensi con la stessa velocità, cessano le variazioni delle concentrazioni delle specie isotopiche coinvolte e la distribuzione resta costante. Tali condizioni permettono di calcolare sperimentalmente i fattori di frazionamento. Il periodo di tempo necessario al raggiungimento dell'equilibrio è funzione della temperatura e della pressione e varia in funzione del tipo di reazione, in relazione alla natura e alla stabilità dei legami chimici delle molecole coinvolte nello scambio.

La temperatura, in particolare, riveste un ruolo determinante per cui, ad esempio, nel caso dei gas perfetti è valida la seguente relazione:

$$\ln \alpha = a T^{-2} + b T^{-1} + c$$

A basse temperature  $\ln \alpha$  varia proporzionalmente ad  $1/T$ , mentre in sistemi ad alta temperatura dipende da  $1/T^2$ . È stata anche dimostrata l'esistenza di relazioni lineari tra  $10^3 \ln \alpha$  e la

temperatura nel caso di fattori di frazionamento determinati sperimentalmente tra coppie di minerali o tra minerali ed acqua (Fig. 1.1)



### 1.3: GLI STANDARD INTERNAZIONALI DI RIFERIMENTO

La misura della composizione isotopica in un campione è una misura relativa che viene riferita ad uno standard di riferimento ovvero ad un composto a composizione isotopica nota ed accettata universalmente da tutti i laboratori di geochimica isotopica. Solo in questo modo, infatti, i valori ottenuti da laboratori diversi sono confrontabili tra loro anche se misurati con apparecchiature diverse o ottenuti con tecniche di preparazione differenti.

Le caratteristiche principali di uno standard internazionale sono:

- ✓ grande purezza per ridurre al minimo gli inconvenienti tecnici durante la preparazione;
- ✓ omogeneità affinché non vi siano differenze isotopiche tra porzioni prelevate in momenti diversi;
- ✓ facile reperibilità in natura;
- ✓ costo limitato e ampia disponibilità in maniera da garantire la richiesta dei vari laboratori.

La catalogazione e la distribuzione di questi materiali sono gestite in collaborazione da due organizzazioni internazionali “*The United International Atomic Energy Agency*” (IAEA) a Vienna (Austria) e “*The National Institute of Standards and Technology*” (NIST), a Gaithersburg, Maryland (USA).

Per ottenere misure accurate è opportuno scegliere uno standard che abbia un rapporto isotopico non troppo diverso rispetto a quello del campione che si intende analizzare.

Gli standards si suddividono in tre categorie:

1. **PRIMARY REFERENCE STANDARDS:** sono standard di riferimento universali costituiti da sostanze naturali. Tra i diversi standard internazionali utilizzati per riportare le variazioni dei rapporti isotopici di ossigeno, carbonio e azoto, quelli più utilizzati sono:

- V-SMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*)

Questo standard fu preparato da Craig verso la fine degli anni '60 mescolando campioni diversi di acqua oceanica distillata. I rapporti isotopici D/H e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  corrispondono, per definizione, al valore medio ponderato della composizione isotopica dell'acqua oceanica stessa. Viene utilizzato per la determinazione del rapporto isotopico di ossigeno e idrogeno in campioni d'acqua e i suoi valori assoluti sono:

$$\begin{aligned} \text{D/H} &= (158 \pm 2) \cdot 10^{-6} \\ ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} &= (1993,4 \pm 2,5) \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

- PDB-1 (*Pee Dee Belemnite*)

Ricavato da un rostro calcareo di una belemnite appartenente alla formazione sedimentaria Pee-Dee del Cretaceo nel Sud Carolina. Tale standard può essere utilizzato per le misure isotopiche del carbonio e dell'ossigeno e i suoi valori assoluti sono:

$$\begin{aligned} ^{13}\text{C}/^{12}\text{C} &= 11237,2 \cdot 10^{-6} \\ ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} &= 2079,0 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

- $N_2$  (*Azoto atmosferico*)

Viene utilizzato per la determinazione del rapporto isotopico dell'azoto e il suo valore assoluto è (Mariotti et al., 1984):

$$^{15}N/^{14}N = 3,677 \cdot 10^{-3}$$

2. CALIBRATION MATERIALS: si tratta di standard creati e distribuiti da IAEA per far fronte alla carenza dei Primary Reference Standards. Sono composti naturali o di sintesi che ricalcano la composizione isotopica degli standard primari contro i quali sono calibrati e che rappresentano lo “zero” sulla scala del  $\delta$ . Ciò consente la possibilità di un continuo controllo interno dei risultati. A questa categoria appartengono, tra gli altri, il V-SMOW e il V-PDB, preparati in maniera da ottenere un valore praticamente identico a quelli teorici.
3. INTERCOMPARISON MATERIALS: noti anche come working standards, consentono il controllo incrociato tra laboratori. Realizzati e distribuiti da IAEA possiedono un valore di composizione isotopica calcolato sulla media delle misure effettuate periodicamente da diversi laboratori.

Oltre a questi ogni laboratorio utilizza degli standards interni a composizione isotopica nota e con un valore simile a quello dei campioni da misurare.

Il laboratorio di geochimica isotopica dell'Università di Parma utilizza una serie di standard interni, di cui si parlerà dettagliatamente in seguito, a seconda del materiale da analizzare tra questi vi è un  $CaCO_3$  proveniente da un blocco di marmo di Carrara la cui composizione isotopica è:

$$\begin{aligned}^{13}\delta &= + 2,45 \text{ PDB-1} \\^{18}\delta &= - 2,43 \text{ PDB-1} \\^{18}\delta &= + 28,33 \text{ V-SMOW}\end{aligned}$$

Il valore isotopico del campione è rapportato a quello dello standard interno di laboratorio, e quindi allo standard internazionale, attraverso la formula di conversione:

$$\delta_{xB} = \delta_{xA} + \delta_{AB} + \delta_{xA}\delta_{AB} \cdot 10^{-3}$$

Dove:

$\delta_{xB}$ : è la nostra incognita è rappresenta la differenza espressa in per mille tra la composizione isotopica del campione x e lo standard B

$\delta_{xA}$ : è la composizione isotopica del campione espressa rispetto allo standard di lavoro A

$\delta_{AB}$ : è la differenza espressa in per mille tra lo standard di lavoro A e lo standard di riferimento

## **CAPITOLO 2**

### **LA RICOSTRUZIONE DEI CLIMI E DEGLI AMBIENTI DEL PASSATO** **MEDIANTE LA GEOCHIMICA ISOTOPICA**

*I reperti scheletrici fossili dei mammiferi terrestri rappresentano, al pari di altri record paleoclimatici, un ottimo archivio dei climi e degli ambienti del passato. In questo capitolo analizzeremo dapprima le caratteristiche della microstruttura di ossa e denti e in seguito descriveremo le modalità con cui la geochimica isotopica può essere applicata a tali matrici con lo scopo di ricostruire le caratteristiche dell'habitat e le variazioni climatiche nell'area e al tempo in cui gli individui vivevano. Inoltre, è anche possibile ottenere informazioni sulle economie di sussistenza e sui fenomeni migratori che hanno interessato le popolazioni del passato.*

#### **2.1: LE OSSA**

I vertebrati, compreso l'uomo, possiedono una robusta struttura interna rappresentata dal sistema scheletrico il quale svolge le funzioni di sostegno del corpo, di protezione degli organi vitali e, insieme ai muscoli, permette il movimento.

Le ossa possono essere distinte in funzione della morfologia in quattro tipologie principali: lunghe, brevi, piatte e irregolari.

Dal punto di vista strutturale (Fig.2.1), invece, le ossa sono costituite in generale da una superficie esterna compatta, molto dura e resistente, e da un interno cavo o spugnoso, contenente un tessuto molle (midollo).

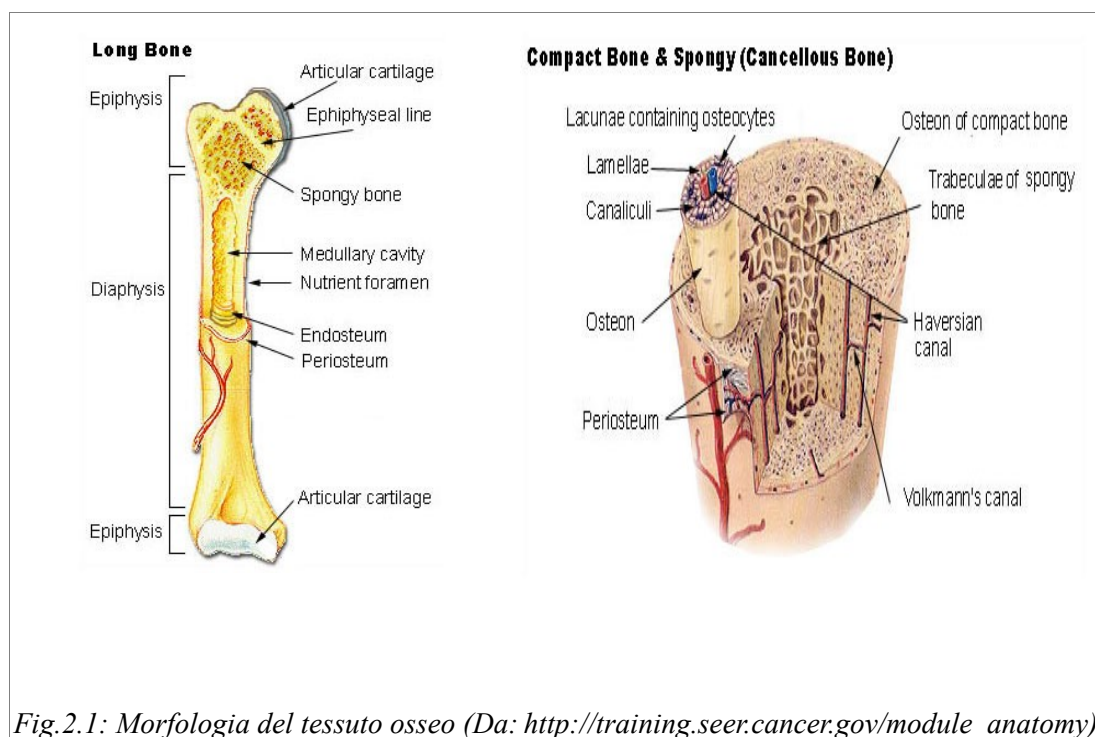


Fig.2.1: Morfologia del tessuto osseo (Da: [http://training.seer.cancer.gov/module\\_anatomy](http://training.seer.cancer.gov/module_anatomy))

La parte dura superficiale è formata da cristalli di idrossiapatite immersi in una matrice di collagene la quale non costituisce un sistema omogeneo e compatto ma è organizzata in una serie di tubuli e lamine di tessuto osseo (osteoni) che racchiudono cellule e linfa. A seconda della disposizione delle lamelle si distingue l'osso spugnoso da quello compatto: nel primo tipo le lamelle sono organizzate in maniera tale da formare tante trabecole, variamente intrecciate tra loro come un'intelaiatura; in quello compatto, invece, esse si addossano strettamente le une alle altre.

Nonostante siano in parte costituite da fasi minerali, le ossa sono organi a tutti gli effetti, infatti, la frazione inorganica viene all'interno costantemente rinnovata da due tipi di cellule: gli osteoclasti che distruggono l'idrossiapatite e gli osteoblasti che invece generano nuovi cristalli per rimpiazzare quelli vecchi.

L'apparato scheletrico, proprio per la sua struttura e composizione mineralogica, rappresenta un'importante riserva di calcio, il quale risulta indispensabile all'organismo per

alcune funzioni vitali come ad esempio le contrazioni muscolari e in generale la funzionalità delle cellule. Il processo di ricambio cellulare, descritto in precedenza, è fondamentale proprio perchè le ossa tendono a rilasciare il calcio nel sangue indebolendosi nel tempo. In definitiva, possiamo quindi affermare che le ossa sono costituite da una frazione minerale inorganica e da una parte organica.

La componente inorganica riferita ad un osso attuale è costituita principalmente da calcio, combinato con ossigeno, fosforo e idrogeno a formare una molecola cristallina chiamata idrossiapatite  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ . Tale composto minerale si presenta sotto forma di sottili cristalli a forma di prismi, della lunghezza di 20nm e dello spessore di circa 2nm e rappresenta circa il 65-70% in peso del tessuto osseo. La percentuale di carbonato di calcio nell'idrossiapatite varia ampiamente tra la parte compatta (3,8%) e spugnosa (2,3%) nonché tra un individuo e l'altro.

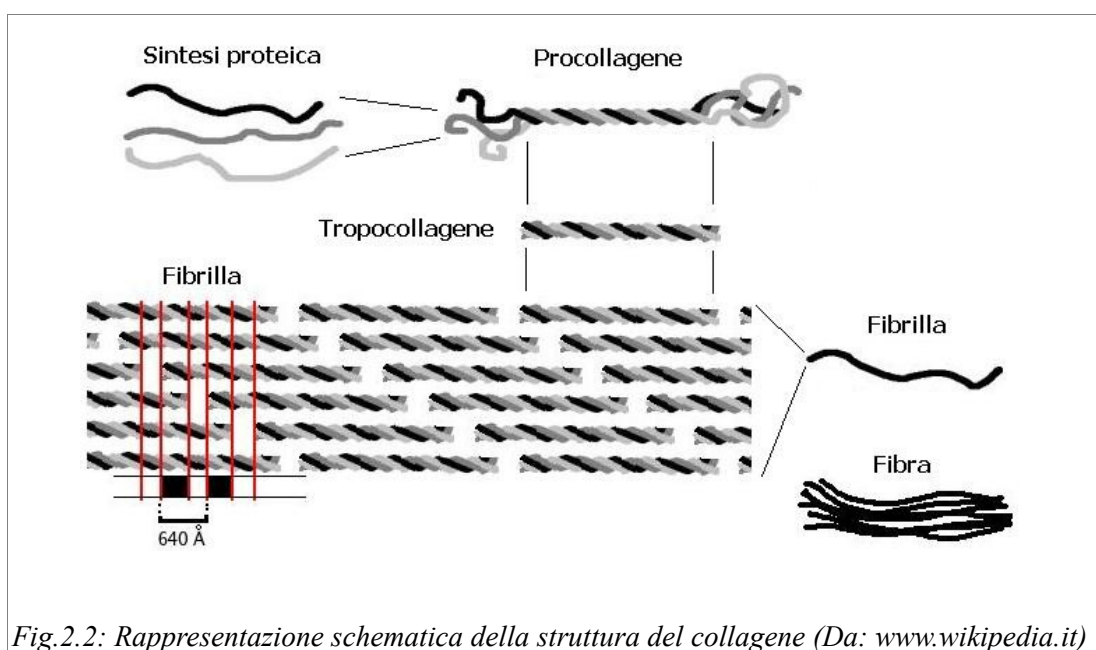
Poiché le analisi isotopiche non riguardano ossa attuali ma antiche occorre tenere presente che esse possono essere state interessate da fenomeni di alterazione. Le modalità con le quali i processi chimici possono determinare anche profondi mutamenti della composizione e della struttura dell'osso sono:

- reazioni di soluzione e sostituzione all'equilibrio, omoionica o eteroionica, all'interno del reticolo cristallino della matrice dell'osso (Herrman et Newesely, 1982). Poiché questo tipo di scambi non influenzano le microstrutture dell'osso in genere non possono essere identificate al microscopio (Lambert et al., 1983);
- dissoluzione parziale dell'idrossiapatite e processi di ricristallizzazione, isomorfi o eteromorfi, in funzione del pH dei suoli (Christensen et Muller, 1975);
- combinazioni tra sostituzioni eteroioniche e ricristallizzazioni eteromorfiche.

Con il passare del tempo nella matrice ossea si verifica comunque una ricristallizzazione dell'apatite: il gruppo idrossido, infatti, viene facilmente sostituito da ioni fluoro ( $\text{F}^-$ ) provenienti dal terreno, formando così la fluoroapatite, un minerale estremamente stabile e con cristalli di dimensioni maggiori.

La frazione organica in un osso attuale è rappresentata principalmente da collagene ( $\text{COOH}/\text{H}-\text{C}-\text{R}/\text{NH}_2$ ) il quale costituisce il 20-30% in peso dell'osso. Il collagene è una macromolecola dalla struttura fibrillare (Fig.2.2), costituita da catene polipeptidiche di circa 1400 amminoacidi le quali nell'osso adulto si dispongono secondo un'organizzazione precisa ed ordinata, a costituire dei fasci intrecciati che a loro volta formano una struttura a tripla elica

che aumenta la resistenza e la compattezza del tessuto.



A seconda della sequenza degli amminoacidi si distinguono ben 19 tipi di collagene tra i quali i più importanti sono:

- il collagene di tipo I, il quale rappresenta il 90% del collagene totale ed entra nella composizione dei principali tessuti connettivi come pelle, tendini, ossa e cornee;
- il collagene di tipo II che va a formare la cartilagine, i dischi intervertebrali e il corpo vitreo;
- il collagene di tipo III, fondamentale per il sistema cardiovascolare;
- Il collagene di tipo IV che compone la membrana basale.

Poiché il collagene di tipo I forma fibre abbastanza spesse e costituisce un elemento fondamentale della struttura di ossa, dentina e cemento, ovvero dei materiali più resistenti all'azione di degradazione del tempo, risulta quello più studiato nel campo delle analisi isotopiche per scopi paleoambientali.

Il collagene si conserva più difficilmente rispetto all'apatite in quanto è più suscettibile all'attacco batterico ed enzimatico. Una volta che l'osso è sepolto i processi chimici che subisce sono essenzialmente legati al pH del suolo, alle caratteristiche dell'acqua presente nel terreno e alla temperatura.

## 2.2: I DENTI

L'apparato dentario con le sue formazioni primordiali appare negli esseri umani molto precocemente: già alla sesta-settima settimana di vita endouterina, prima ancora che si formino le ossa mascellari, compaiono le formazioni cellulari che preludono alla costituzione dei denti.

Anatomicamente possiamo distinguere la corona, che è la parte visibile al di sopra delle gengive, e la radice che invece è situata negli alveoli delle ossa mascellari (Fig.2.3).

La corona dei denti è formata da una sostanza ossea, denominata dentina, ricoperta da uno strato molto resistente di smalto.

La radice, alla cui base è presente un'apertura attraverso cui passano i vasi sanguigni ed i nervi che si immettono nella cavità interna della corona occupata dalla polpa dentaria, è ricoperta da una struttura simile a quella dell'osso chiamata cemento.

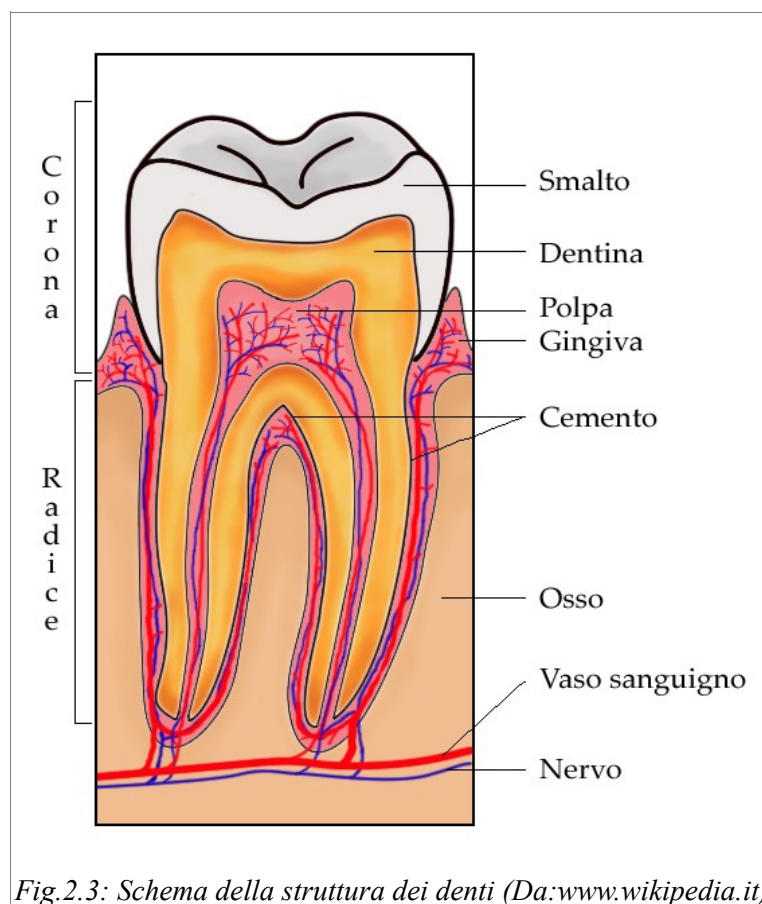


Fig.2.3: Schema della struttura dei denti (Da:www.wikipedia.it)

Lo smalto, la dentina e il cemento sono composti da sostanze organiche e minerali in proporzioni variabili.

Lo smalto riveste la corona, le dà il colore e ne limita l'usura; è un tessuto durissimo, poiché fortemente mineralizzato (i cristalli di idrossiapatite sono più grandi di quelli presenti nell'osso), ma che diventa alquanto fragile quando viene a mancare il sostegno della dentina sottostante per un processo carioso. Il suo spessore è massimo in corrispondenza delle cuspidi e diminuisce progressivamente avvicinandosi al colletto del dente, che è la zona dove inizia la radice, e in corrispondenza dei solchi intercuspidali. Lo smalto è costituito per il 97-98% da sali inorganici e per il 2-3% da sostanza organica. Quest'ultima è costituita essenzialmente da acqua e da una proteina insolubile acido-resistente somigliante alla cheratina. La parte inorganica è costituita per il 90% da minerali di fosfato di calcio, in forma di apatite, e per la frazione rimanente da carbonato di calcio, fosfato di magnesio, fluoruro di calcio e piccole quantità di sali di sodio e di potassio (Riolo, 1976).

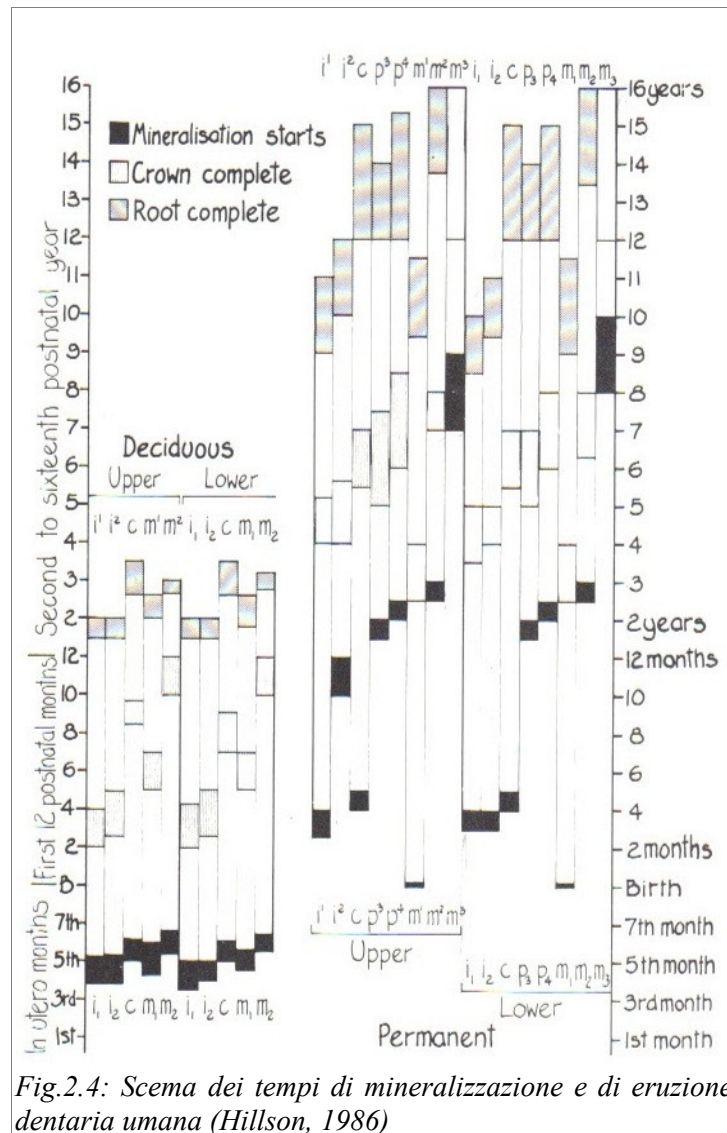
La dentina è una sostanza meno calcificata dello smalto (70% di materia organica) i cui cristalli di apatite sono molto più simili, per dimensione, a quelli delle ossa. La struttura è costituita da tanti piccolissimi tubuli collegati fra di loro da sostanza organica (30%), nel cui lume corrono fibre provenienti dalla polpa, che raggiungono la parete più interna dello smalto e talvolta penetrano in esso. In un dente attuale la dentina è un materiale molto duro mentre diventa talvolta particolarmente fragile nel caso di reperti fossilizzati probabilmente a causa della perdita di collagene.

Per la specie umana si riconoscono diversi gruppi di denti, variabili per forma, dimensione e funzione ovvero: gli incisivi, i canini, i premolari e i molari.

La dentatura umana può essere di due tipi:

- decidua: costituita da 20 elementi dentari (4 incisivi, 2 canini e 4 molari per arcata) ed è caratteristica dell'infanzia. L'eruzione comincia attorno ai sei mesi e si completa in genere entro il ventottesimo mese d'età.
- permanente: consta di 32 elementi (4 incisivi, 2 canini, 2 premolari e 6 molari per arcata). L'eruzione dentaria inizia normalmente tra il sesto ed il settimo anno e prosegue fino ai 18-25 anni quando compaiono i terzi molari (Ubelaker, 1989).

Nonostante l'eruzione dentaria inizi tipicamente verso il sesto mese di vita, gli elementi dentali iniziano a formarsi già durante i primi mesi di vita embrionale (Fig.2.4).



Il meccanismo con il quale erompono i denti permanenti segue un *iter dentis* che prevede lo sviluppo di un tessuto connettivo lasso che unisce il germe dentale alla sotto-mucosa gengivale favorendo la fuoriuscita del dente. Questi, una volta che raggiungono le radici del rispettivo dente deciduo, generano una pressione sulla radice che attiva gli osteoclasti, i quali riassorbono le radici del deciduo fino a fargli perdere i rapporti con l'osso e a determinarne la caduta. All'età di sei anni dunque un bambino ha già formati all'interno delle ossa mascellari quasi tutti i denti definitivi con la sola esclusione dei terzi molari (Hillson, 1986).

L'analisi isotopica dei denti implica una maggiore attenzione in termini di valutazione dei dati raccolti. Diversamente dall'osso per cui i tessuti sono continuamente distrutti e ricostruiti,

lo smalto dei denti non si rinnova una volta che la mineralizzazione è terminata. Questo significa che i denti decidui e alcuni denti permanenti, cristallizzando già in una fase embrionale, forniscono informazioni sul nutrimento della madre o al massimo dei primi anni di vita dell'individuo condizionati dal periodo dell'allattamento. I molari (a parte il primo), sono rappresentativi, invece, delle fasi adolescenziali/giovanili della vita di un individuo. Basandosi su questa caratteristica peculiare delle informazioni ricavabili da ossa e denti, un confronto tra i valori isotopici dei due elementi può mettere in evidenza fenomeni di eventuali migrazioni che coinvolgono i singoli individui.

### **2.3: LA RICOSTRUZIONE DEL PALEOCLIMA MEDIANTE GLI ISOTOPI DELL'OSSIGENO: IL $\delta^{18}\text{O}$ DEL FOSFATO E DEL CARBONATO DEI REPERTI SCHELETRICI**

L'ossigeno possiede tre isotopi stabili, rispettivamente con numero di massa 16, 17 e 18 (Fig.2.5), e dieci isotopi radioattivi tutti con tempi di decadimento inferiori ai tre minuti (Bandoli et al., 1999).

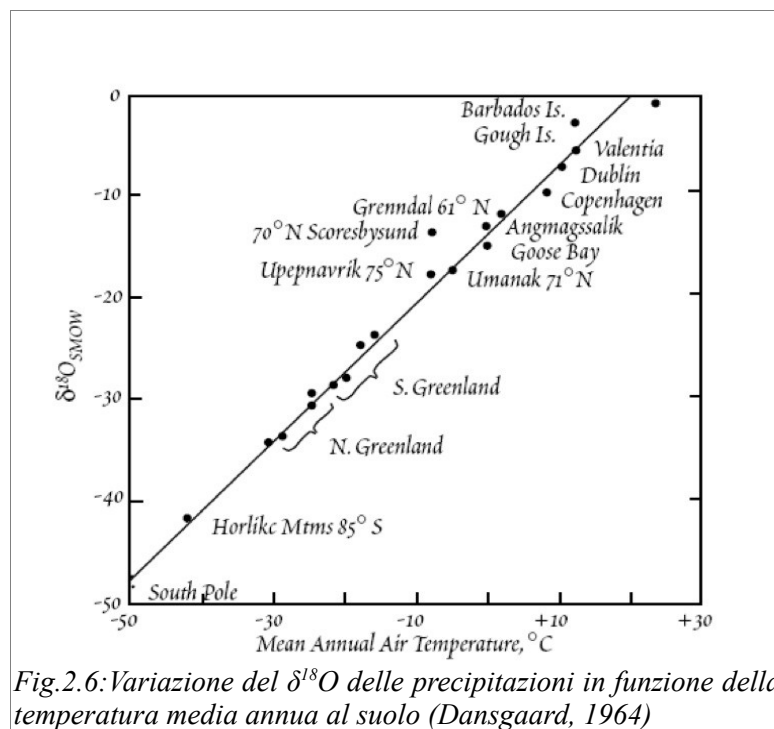
<b>Isotopo</b>	<b>Abbondanza in natura</b>	
$^{16}\text{O}$	99,763%	stabile con 8 neutroni
$^{17}\text{O}$	0,0375 %	stabile con 9 neutroni
$^{18}\text{O}$	0,1995 %	stabile con 10 neutroni

Fig.2.5: *Abbondanza in natura dei tre isotopi stabili dell'ossigeno*

In questo studio viene esaminato il valore del rapporto isotopico tra  $^{18}\text{O}$  e  $^{16}\text{O}$  misurato nell'apatite biologica per ricavare informazioni sul clima e sull'ambiente.

L'ossigeno entra negli organismi viventi principalmente attraverso l'acqua, bevuta o assunta con il cibo, la respirazione e le molecole organiche dei macronutrienti. Tuttavia, mentre l'ossigeno assunto mediante la respirazione ha un valore fisso pari a +23‰, quello introdotto sotto forma di acqua o legato ai cibi risulta piuttosto variabile perchè strettamente legato alle condizioni ambientali e, in particolare, alla temperatura di condensazione delle precipitazioni. Poiché la formazione dell'idrossiapatite delle ossa e dei denti dei mammiferi avviene in condizioni di equilibrio con l'acqua corporea, e quindi con quella meteorica (Luz et

al., 1984) e ad una temperatura pressoché costante (37°C per l'uomo), ne consegue che il  $\delta^{18}\text{O}$  della frazione inorganica dei reperti scheletrici risulta strettamente correlato con quello dell'acqua meteorica locale. Quest'ultimo è a sua volta legato da una relazione lineare e positiva con il valore della temperatura media annua al suolo (Dansgaard, 1964) come mostrato nella Fig.2.6.



Naturalmente, parte dell'ossigeno immesso nell'organismo viene eliminato con la respirazione e l'espulsione dei liquidi metabolici di scarto, questo implica l'esistenza di un frazionamento metabolico specifico per ogni specie di mammifero (Longinelli et Deganello, 1999).

L'evidenza che l'ossigeno dell'acqua corporea è legato a quello dell'acqua assunta è stata dimostrata attraverso uno studio condotto sui ratti (Longinelli et Peretti Paladino, 1980) dal quale si è osservata una positivizzazione del  $\delta^{18}\text{O}$  del sangue in correlazione con l'arricchimento del  $\delta^{18}\text{O}$  dell'acqua somministrata. Il fatto che il valore dell'ossigeno misurato nel sangue non rispecchi esattamente quello dell'acqua ingerita dimostra, inoltre, l'esistenza di un frazionamento isotopico dovuto ad effetti di tipo metabolico (Fig.2.7).

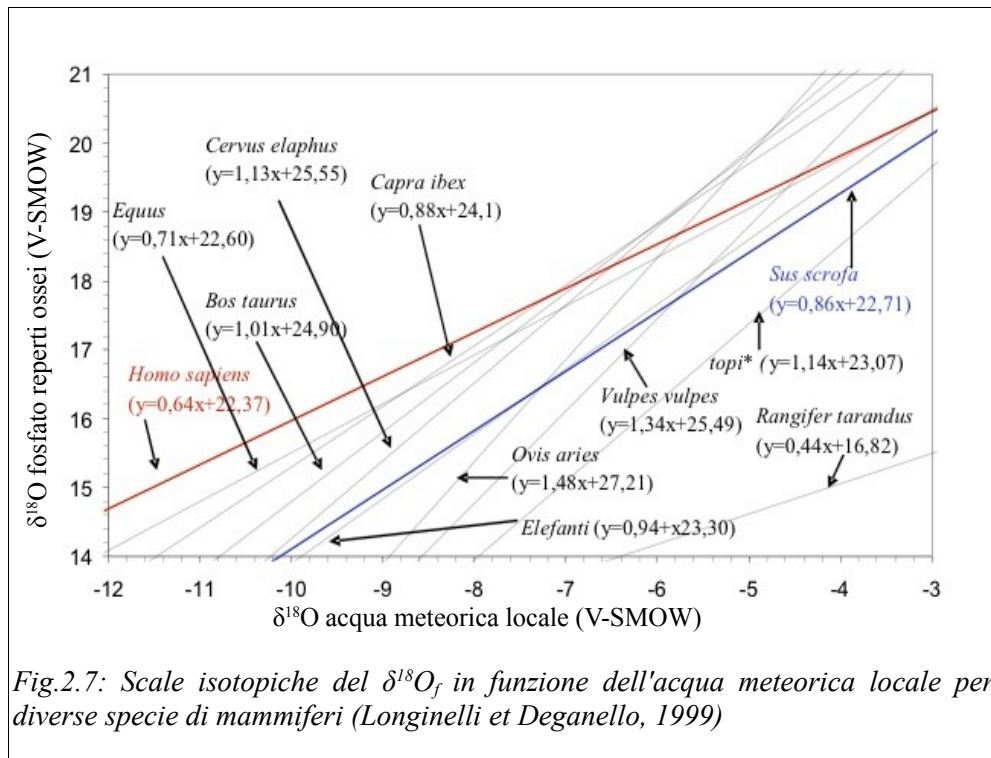


Fig.2.7: Scale isotopiche del  $\delta^{18}O_f$  in funzione dell'acqua meteorica locale per diverse specie di mammiferi (Longinelli et Deganello, 1999)

Al pari del  $\delta^{18}O$  del fosfato, anche quello misurato nel gruppo carbonato dell'idrossiapatite presenta una correlazione con i liquidi corporei; ciò è dovuto ad alcuni enzimi presenti nel sangue (l'ATPase) e l'anidrasi carbonica i quali catalizzano la reazione determinando un frazionamento all'equilibrio tra l'ossigeno dei liquidi corporei, del fosfato e del carbonato. In definitiva possiamo affermare che esiste una relazione tra il valore del  $\delta^{18}O$  dei gruppi carbonato e fosfato dell'idrossiapatite e le caratteristiche dell'ambiente nel quale l'essere vivente è vissuto (Longinelli, 1984; Iacumin et al., 1996).

Ad esempio nel caso del cervo le rette:

$$\delta^{18}Op = 1,0691 \delta^{18}Ow + 25,059$$

$$\delta^{18}Oc = 0,9982 \delta^{18}Ow + 33,623$$

descrivono rispettivamente la correlazione tra  $\delta^{18}\text{O}$  del gruppo fosfato e dell'acqua; tra  $\delta^{18}\text{O}$  del gruppo carbonato e dell'acqua. Il fatto che la retta fosfato-acqua abbia un'intercetta diversa rispetto a quella carbonato-acqua è legata al maggior potere di frazionamento dell'ossigeno da parte del carbonato. Fra le due variabili esiste quindi una relazione che è di circa 9% (Fig.2.8).

Il vantaggio di usare il  $\delta^{18}\text{O}$  del carbonato rispetto a quello del fosfato risiede nella maggiore facilità di preparazione, nei minori costi di analisi, nella maggiore precisione e infine nel fatto che è possibile ottenere contemporaneamente il valore isotopico per l'ossigeno e per il carbonio. Per contro il gruppo carbonato presenta una maggiore alterabilità a contatto con l'acqua rispetto al fosfato a causa dei legami più deboli tra carbonio e ossigeno rispetto a quelli tra fosforo e ossigeno. In entrambi i casi, comunque, il contatto tra acqua e reperto porta alla negativizzazione del valore isotopico dell'ossigeno della matrice minerale.

Qualora sussistessero dei dubbi sulla diagenesi subita dal campione, una misura comparata tra i due gruppi minerali può rappresentare una verifica sull'eventuale presenza di alterazione: se esiste correlazione tra il  $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$  e il  $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_3^{2-})$  dettata dalla retta su vista molto probabilmente non c'è stata alterazione, in caso contrario il fosfato, avendo legami più forti potrebbe non essere ancora alterato (Fig.2.9). È, infatti, alquanto improbabile che un processo diagenetico per contatto con acqua ad una temperatura diversa da quella corporea, possa determinare un riequilibrio simultaneo di entrambi i parametri con l'acqua stessa (Iacumin et al., 1996).

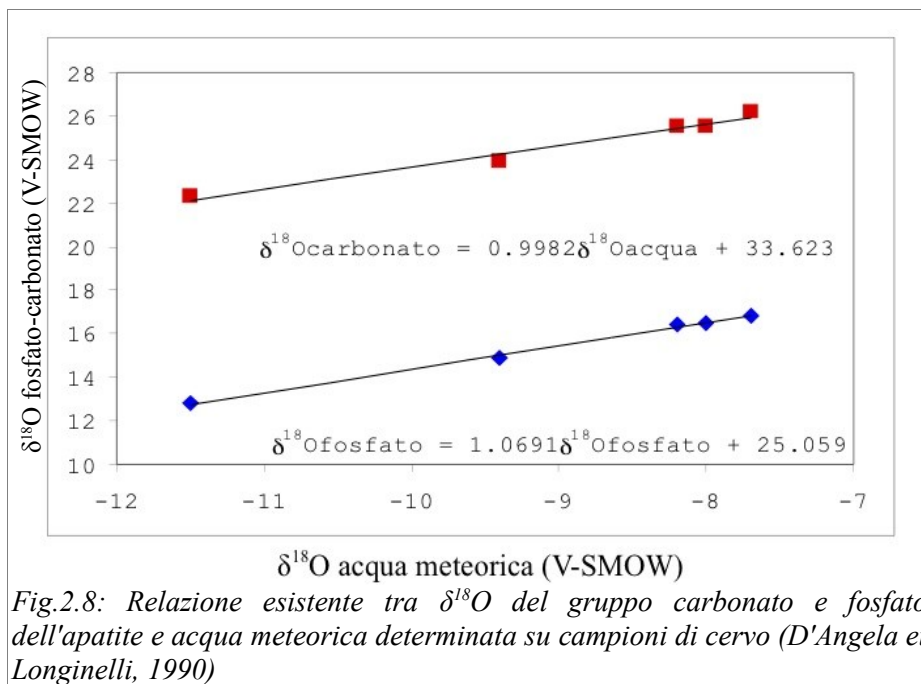
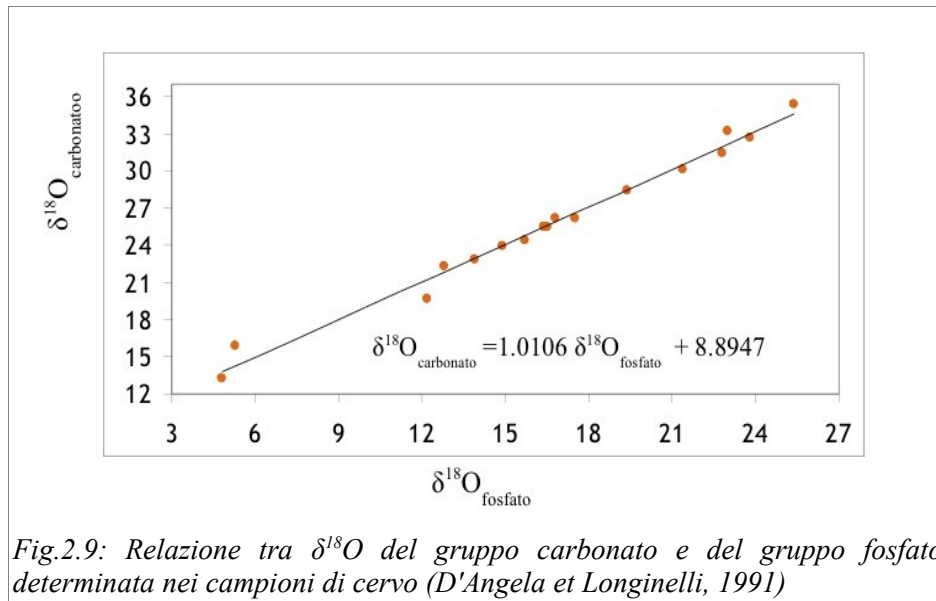


Fig.2.8: Relazione esistente tra  $\delta^{18}\text{O}$  del gruppo carbonato e fosfato dell'apatite e acqua meteorica determinata su campioni di cervo (D'Angela et Longinelli, 1990)



A questo proposito, nel caso dei mammiferi terrestri, è stata messa a punto la seguente retta di equilibrio tra  $\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}}$  e  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}}$  (Iacumin et al., 1996):

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}} = 0,98(\pm 0,031) * \delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}} - 8,5(\pm 0,806)$$

Più recentemente Zazzo et al. (2004) hanno formulato un retta valevole per gli ippopotami:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}} = 0,97(\pm 0,044) * \delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}} - 9,117(\pm 1,346)$$

Nuovi studi, non ancora pubblicati, stanno dimostrando che questo tipo di relazioni sarebbero influenzate da effetti metabolici dipendenti dalla specie. Questo significa che nel caso dell'uomo, ad esempio, la retta di equilibrio tra questi due parametri potrebbe essere diversa.

### **2.3.1: FATTORI E MECCANISMI CHE INFLUENZANO IL VALORE DEL $\delta^{18}\text{O}$ DELLE PRECIPITAZIONI**

Nell'analisi paleoclimatica e paleoambientale la conoscenza dei fattori e dei meccanismi che influenzano il valore del  $\delta^{18}\text{O}$  delle precipitazioni, e quindi quello dell'acqua ambientale, riveste un'importanza fondamentale per una corretta interpretazione.

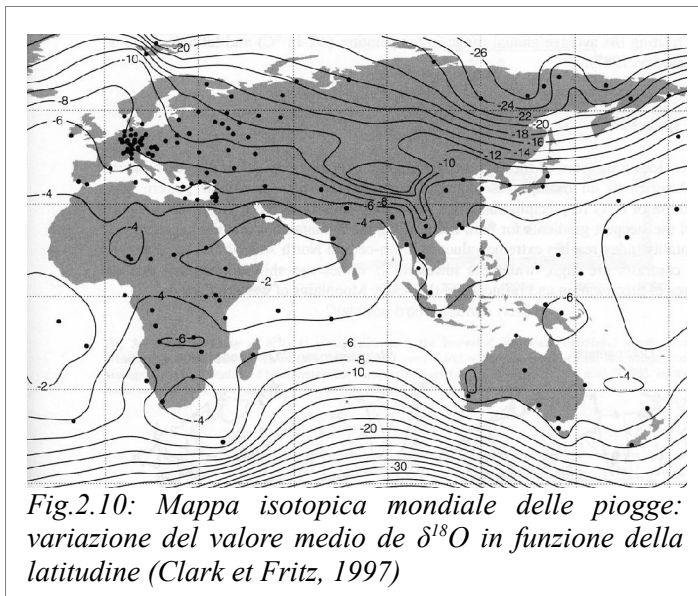
I principali sono (Clark et Fritz, 1997):

- **Latitudine**

La temperatura di condensazione delle precipitazioni varia in funzione della latitudine: è più bassa alle alte latitudini per poi diminuire progressivamente a latitudini inferiori. Ci si aspetta quindi che anche la composizione isotopica segua lo stesso andamento, con un contenuto in isotopi pesanti variabile da un minimo sulle aree polari ad un massimo nelle aree tropicali.

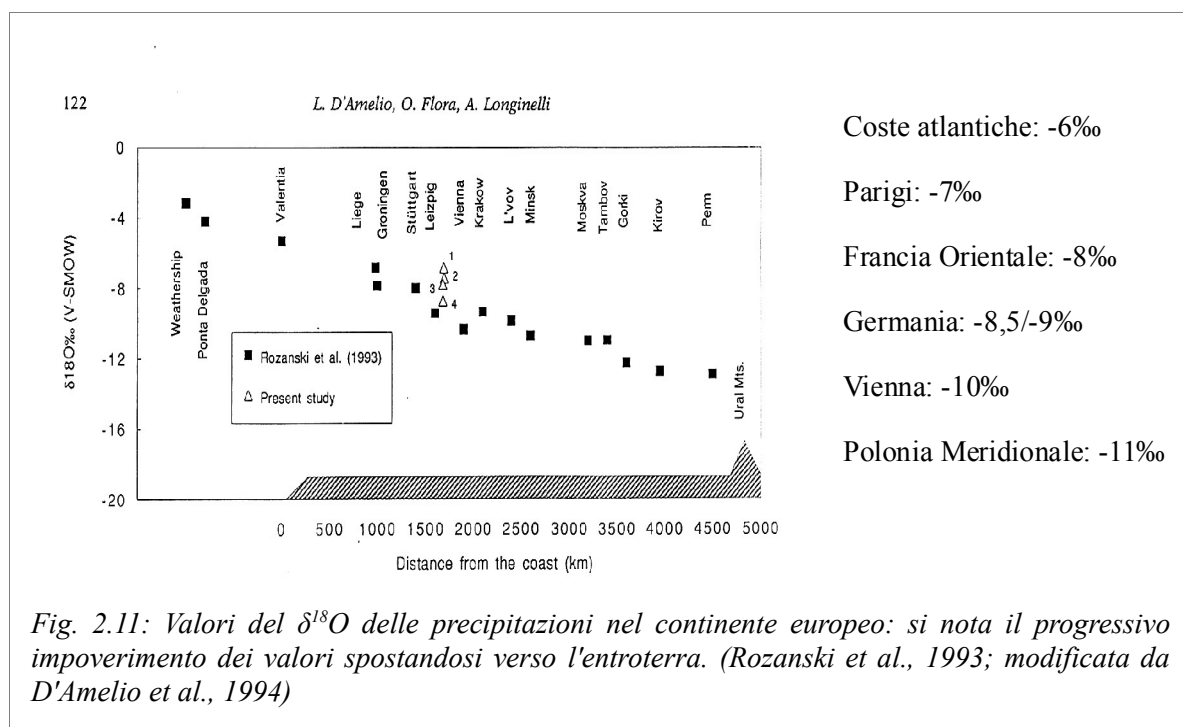
All'aumentare della latitudine i valori nelle precipitazioni si fanno sempre più negativi ed il gradiente di variazione del  $\delta^{18}\text{O}$  aumenta progressivamente. Nelle regioni tropicali e subtropicali i valori di  $\delta^{18}\text{O}$  variano tra 0 e -5‰, nelle regioni temperate sono compresi tra -4/-5‰ e -10/-20‰, per scendere a valori estremamente negativi, dell'ordine di -20/-30‰ ed anche inferiori, nelle aree polari (Fig.2.10). La temperatura media annua al suolo determina quindi una prima discriminazione isotopica sulla composizione media annua delle precipitazioni (Gat, 1980).

La carta mondiale delle precipitazioni mostra questo tipo di andamento anche se si possono osservare delle diversità per alcune zone che sono influenzate da altri fattori.



- **Continentalità**

Quando una massa di vapore si allontana dalla costa e si muove sulla superficie di un continente subisce una serie di condensazioni parziali che impoveriscono progressivamente il valore residuo, per cui le precipitazioni tendono ad assumere valori di  $\delta^{18}\text{O}$  sempre più negativi. Tale fenomeno riflette le forti variazioni stagionali di temperatura tipiche delle zone continentali dovute all'effetto della latitudine e delle distanza dal mare. Nel continente europeo, dove la maggior parte delle perturbazioni è spinta da correnti atlantiche e segue traiettorie dirette da ovest verso est, si osserva proprio una progressiva negativizzazione delle precipitazioni procedendo dalle coste atlantiche verso l'entroterra continentale (Rozanski et al., 1993). I dati isotopici confermano questo andamento e mostrano variazioni significative del valore del  $\delta^{18}\text{O}$  che passa, ad esempio, da -6‰ per le coste atlantiche francesi a -7‰ alla longitudine di Parigi, a -8‰ nella Francia orientale fino a raggiungere valori di -8/-9‰ in Germania (Fig.2.11).



- **Altitudine**

Una massa d'aria satura di vapore acqueo che si sposta sulla terraferma e incontra un rilievo montuoso tende ad innalzarsi raggiungendo quote più elevate e caratterizzate da pressioni atmosferiche progressivamente inferiori. La massa d'aria tenderà quindi ad espandersi in maniera adiabatica causando una diminuzione delle temperature e una parziale condensazione. Le precipitazioni che ne derivano saranno impoverite in <sup>18</sup>O rispetto a quelle che si verificano ai piedi del rilievo o presso le aree costiere, così come quelle che si formano dopo il superamento del rilievo che avranno valori isotopici più negativi rispetto alle piogge che cadono alla medesima quota nel versante opposto. Questo comportamento è causato dal cosiddetto “effetto ombra” che consiste nel mantenimento in quota delle masse di vapore e nel loro ulteriore impoverimento in isotopi pesanti a causa delle condensazioni avvenute durante le fasi di ascesa.

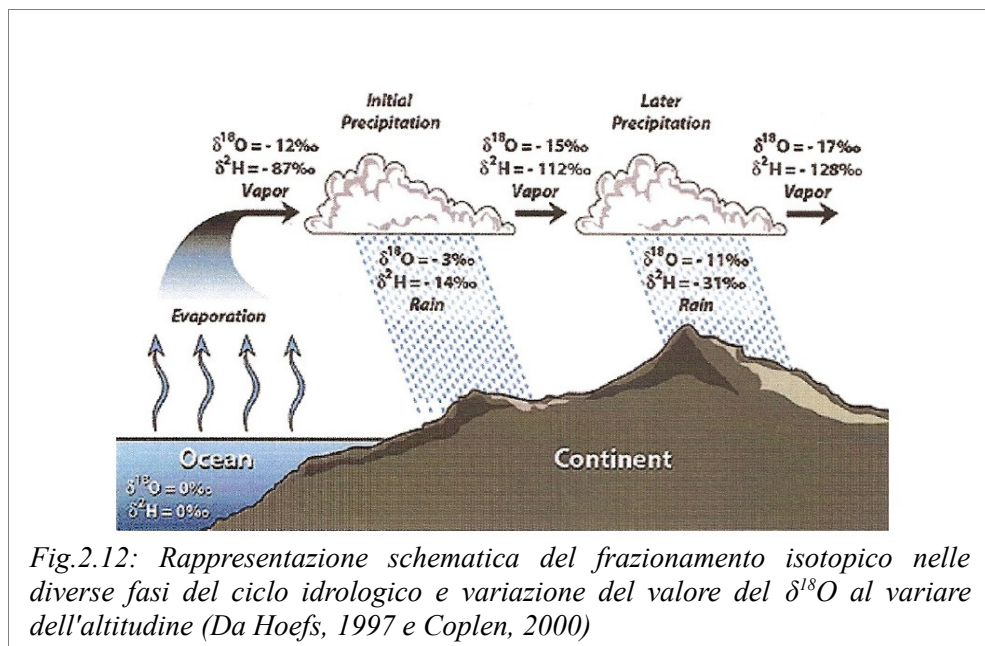
Il gradiente isotopico verticale associato alle precipitazioni ha un valore medio per l'ossigeno compreso tra -0,15 e -0,5‰ ogni 100 metri di quota, ma può variare localmente in funzione di particolari condizioni geografico-ambientali.

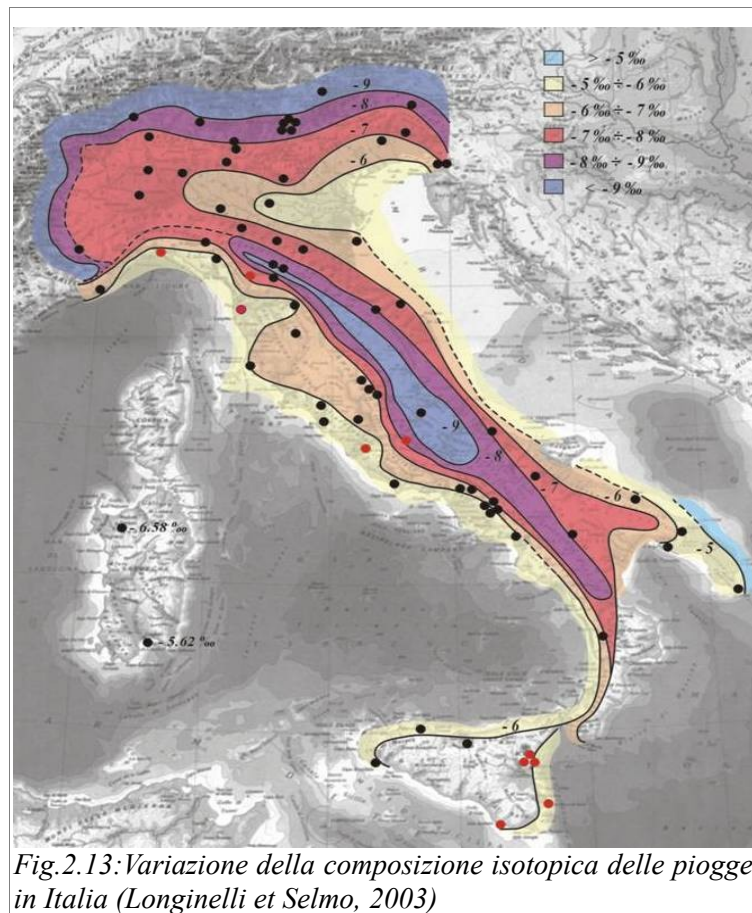
- **Stagionalità**

Anche le variazioni stagionali della temperatura influiscono sulla composizione isotopica delle precipitazioni: in una stessa località, infatti, si riscontra un arricchimento in isotopi pesanti nelle precipitazioni estive rispetto a quelle invernali. Le variazioni di composizione isotopica sono più evidenti nelle aree caratterizzate da forti escursioni termiche stagionali, di conseguenza saranno massime ai poli e minime all'equatore.

Nella Fig.2.12 vengono riassunti gli andamenti descritti i quali, in definitiva, sono tutti fortemente dipendenti dalla temperatura. Si osserva, infatti, come la massa d'aria che si origina dall'acqua oceanica (convenzionalmente con  $\delta^{18}\text{O}$  paria a 0) subisce una prima negativizzazione a seguito dell'evaporazione, le piogge che da essa si originano saranno invece arricchite rispetto al vapore. Quest'ultimo risulterà quindi progressivamente impoverito in isotopi pesanti in relazione anche alla latitudine, alla posizione rispetto ad una massa continentale, all'altitudine e alla stagionalità.

In Italia (Fig.2.13) il valori più negativi delle precipitazioni si registrano sulle Alpi e sugli Appennini, mentre quelli meno negativi sono relativi alle aree costiere anche a causa dell'azione mitigante del mare.





- **Abbondanza delle precipitazioni**

Le precipitazioni abbondanti determinano una variazione nei rapporti isotopici, in particolare durante un singolo evento il valore isotopico non si mantiene costante ma diventa progressivamente più negativo. Tuttavia, se l'evotraspirazione nell'area è notevole si può avere un'attenuazione di tali variazioni isotopiche poiché mediante questo processo si restituisce all'atmosfera vapore acqueo a composizione isotopica pressoché costante.

Ciò supporta le tesi per cui nelle zone che non rispondono a variazioni significative di temperatura nel corso dell'anno, l'abbondanza delle precipitazioni rappresenta il fattore responsabile delle variazioni stagionali di composizione isotopica delle precipitazioni (Gonfiantini, 1982).

### **2.3.2: EFFETTI METABOLICI E COMPORAMENTI ALIMENTARI CHE INFLUENZANO IL VALORE DEL $\delta^{18}\text{O}$ DELLA BIOAPATITE**

Oltre ai fattori sopra descritti, per una corretta analisi paleoambientale è necessario valutare anche i comportamenti alimentari e gli effetti metabolici. Ad esempio, le faune rispetto all'uomo presentano generalmente valori del  $\delta^{18}\text{O}$  arricchiti a causa della diversa fonte di approvvigionamento d'acqua. Gli animali, infatti, si abbeverano anche presso bacini ristretti e pozze d'acqua i quali essendo sottoposti ad una maggiore evaporazione risultano maggiormente arricchiti in  $\delta^{18}\text{O}$  rispetto agli uomini che invece utilizzano prevalentemente acqua corrente. L'acqua di pozzo o di fiume possiede bacini di alimentazione situati a quote elevate e quindi, a causa delle minori temperature di condensazione, l'acqua risulta più negativa rispetto a quella che cade a valle. È su questo principio che è anche possibile monitorare gli spostamenti degli individui sfruttando la diversa informazione registrata dal  $\delta^{18}\text{O}$  di ossa e denti. In effetti, migrazioni anche ristrette in altitudine o verso l'interno comportano una negativizzazione dei valori isotopici la cui entità è correlata con quella degli spostamenti stessi.

In caso di scarse precipitazioni il  $\delta^{18}\text{O}$  presenta una correlazione inversa con l'umidità. Studi condotti sui conigli in Spagna e Somalia e su macropodi australiani (Ayliffe et Chivas, 1990; Huertas et al., 1995) hanno dimostrato che il valore del  $\delta^{18}\text{O}$  del fosfato non era rapportabile a quello dell'acqua meteorica locale ma mostrava una proporzionalità inversa con il valore dell'umidità relativa. Questo andamento sarebbe legato al fatto che, per quelle specie che assumono acqua prevalentemente cibandosi di erba, i valori isotopici misurati possono essere incompatibili con quelli dell'acqua ambientale a causa del notevole frazionamento isotopico che si verifica in seguito alla maggiore evotraspirazione delle foglie.

Un altro aspetto importante è quello legato ai primi periodi di vita di un mammifero, nei quali il  $\delta^{18}\text{O}$  è messo in relazione con la dieta a base di latte materno il quale risulta isotopicamente arricchito. Questa informazione non viene conservata nelle ossa a causa del continuo rinnovamento cellulare a cui sono sottoposte ma rimane registrata nei denti che mineralizzano durante i primi mesi di vita come, ad esempio, il primo molare.

## **2.4: LA RICOSTRUZIONE DEL PALEOAMBIENTE E DELLA PALEODIETA MEDIANTE GLI ISOTOPI DEL CARBONIO E DELL'AZOTO**

Vogel e van der Merwe nel 1978 hanno dimostrato per primi l'utilità degli isotopi stabili per la ricostruzione dei regimi alimentari delle popolazioni antiche. Agli inizi degli anni '80 De Niro e Epstein hanno dimostrato come la composizione isotopica della frazione organica dei tessuti scheletrici è strettamente controllata dai valori isotopici della dieta. Questo tipo di informazioni, opportunamente interpretate, possono fornire indicazioni su alcune caratteristiche dell'habitat.

### **2.4.1: IL $\delta^{13}\text{C}$ DELL'APATITE E DEL COLLAGENE**

Il carbonio appartiene al quattordicesimo gruppo della tavola periodica, è un elemento non metallico, tetravalente. In natura presenta 4 isotopi radioattivi ( $^{10}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$  e  $^{15}\text{C}$ ) e 2 stabili, rispettivamente il  $^{12}\text{C}$  e il  $^{13}\text{C}$  (Fig.2.14).

<b>Isotopo</b>	<b>Abbondanza in natura</b>	
$^{12}\text{C}$	98,892%	stabile con 6 neutroni
$^{13}\text{C}$	1,108 %	stabile con 7 neutroni

Fig.2.14: Abbondanza in natura degli isotopi stabili del carbonio

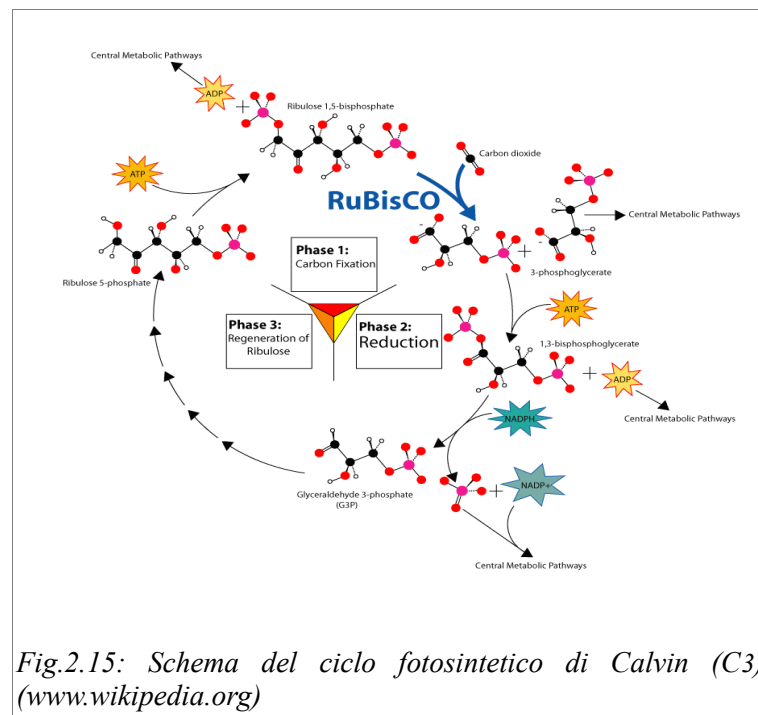
Questo elemento è presente negli scheletri dei mammiferi sia nella parte organica (il collagene) che nella frazione minerale (idrossiapatite).

Il valore del  $\delta^{13}\text{C}$  dei reperti scheletrici è strettamente legato a quello delle piante che compongono la dieta e quindi può essere molto utile per ricostruire le caratteristiche della copertura vegetale presente nell'area che a sua volta può essere un buon indicatore ambientale.

A seconda del procedimento di fissazione del carbonio nel corso dell'attività fotosintetica, le piante terrestri vengono suddivise in tre grandi gruppi, C3, C4 e CAM, i quali sono caratterizzati da valori isotopici distintivi.

Le piante C3 (o a ciclo di Calvin) sono generalmente piante indicative di climi temperati e sono caratterizzate da valori del  $\delta^{13}\text{C}$  compresi tra -35‰ e -21‰ (Smith, 1972). In questo

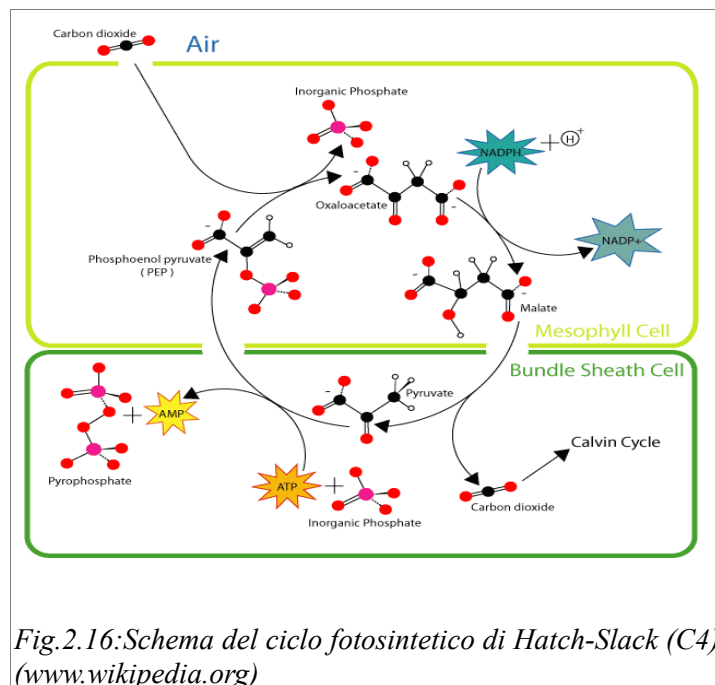
gruppo sono comprese l'80% delle piante esistenti in natura, ovvero quelle fotosinteticamente attive di giorno e che chiudono gli stomi durante la notte. Appartengono a questa categoria, ad esempio, tutti gli alberi e la maggior parte delle piante commestibili. Le piante C<sub>3</sub> effettuano efficacemente la fotosintesi a temperature temperate perchè tenendo aperti gli stomi di giorno nel caso di una temperatura eccessiva evaporerebbe troppa acqua. Sono chiamate in questo modo perchè il primo composto organico della fotosintesi è una catena carboniosa a 3 atomi di carbonio: l'acido 3-fosfoglicerico (Fig.2.15). Questo mediante l'azione di un enzima (ribulosio-1,5-difosfato, detto anche RuDP), viene trasformato in una molecola a tre atomi di carbonio, il G3P (gliceraldeide-3-fosfato) che, dirottata nel citoplasma, è utilizzata per la biosintesi del glucosio e di altre molecole organiche (Postlethwait et al., 1992; Arms et Camp, 1998).



Le piante C<sub>4</sub> (o a ciclo di Hatch-Slack) come il mais, il sorgo, la canna da zucchero e le piante tropicali sono tipiche di climi caldi e resistono bene anche in condizioni di estrema aridità ambientale. Esse presentano valori isotopici meno negativi rispetto alle piante C<sub>3</sub> e variabili tra -14 e -9‰ (Smith, 1972).

Queste piante hanno sviluppato una via alternativa al ciclo di Calvin di fissazione della  $\text{CO}_2$ , organizzata sulla presenza di due cloroplasti funzionalmente e morfologicamente diversi. La fotosintesi  $\text{C}_4$  costituisce, insieme a quella CAM, un meccanismo di adattamento di alcune specie di piante a condizioni di maggiore aridità ambientale per riuscire a risparmiare acqua nella fase di fissazione del carbonio.

Nelle piante  $\text{C}_4$  la fissazione della  $\text{CO}_2$  avviene mediante l'azione di un altro composto in sostituzione dell'enzima RuDP cioè l'acido fosfoenolpiruvico, denominato PEP, il quale converte la molecola di ossalacetato a quattro atomi di carbonio che danno il nome al ciclo (Fig.2.16).



Nelle piante di tipo  $\text{C}_4$  il tasso di fotosintesi per unità di area fogliare ( $\text{CO}_2$  assorbita/peso in mg della clorofilla) raggiunge il suo massimo intorno ai 40 gradi con elevata intensità luminosa, mentre nelle  $\text{C}_3$  tale picco si verifica intorno ai 20 con moderata intensità luminosa. L'efficienza fotosintetica delle prime è maggiore delle seconde, così come lo è il fattore di resistenza alle alte temperature (Arms et Camp, 1998).

Le piante CAM (Crassulacean Acid Metabolism) possiedono un ciclo metabolico di fissazione del carbonio che consente di ottimizzare l'attività fotosintetica in ambienti estremi, quali quelli desertici e presentano valori isotopici del  $\delta^{13}\text{C}$  intermedi tra quelli tipici delle

piante C3 e delle piante C4 (tra -30 e -10‰). Nella dieta umana queste piante rivestono una importanza marginale considerato che l'unica piante CAM commestibile è l'ananas.

Il meccanismo di fotosintesi CAM, attuata nelle Crassulaceae, nelle Cactaceae e alcune altre piante (Ananas, Agave ecc...) avviene anche con gli stomi chiusi. Nelle vie metaboliche ordinarie delle piante C3 e C4 la fotosintesi necessita, invece, dell'apertura degli stomi affinché si svolgano gli scambi gassosi (ingresso della CO<sub>2</sub> e uscita dell'O<sub>2</sub>). In caso di chiusura degli stomi, infatti, le piante non svolgono la fotosintesi.

Nelle piante a metabolismo CAM si verifica una via metabolica alternativa che rappresenta una evoluzione adattativa del ciclo di Calvin per cui nell'ambito di un processo fotosintetico simile a quello delle C4 l'ingresso della CO<sub>2</sub> e la sua fissazione definitiva avvengono in due momenti distinti del giorno (fase luminosa e fase di buio) riducendo così al minimo la perdita d'acqua.

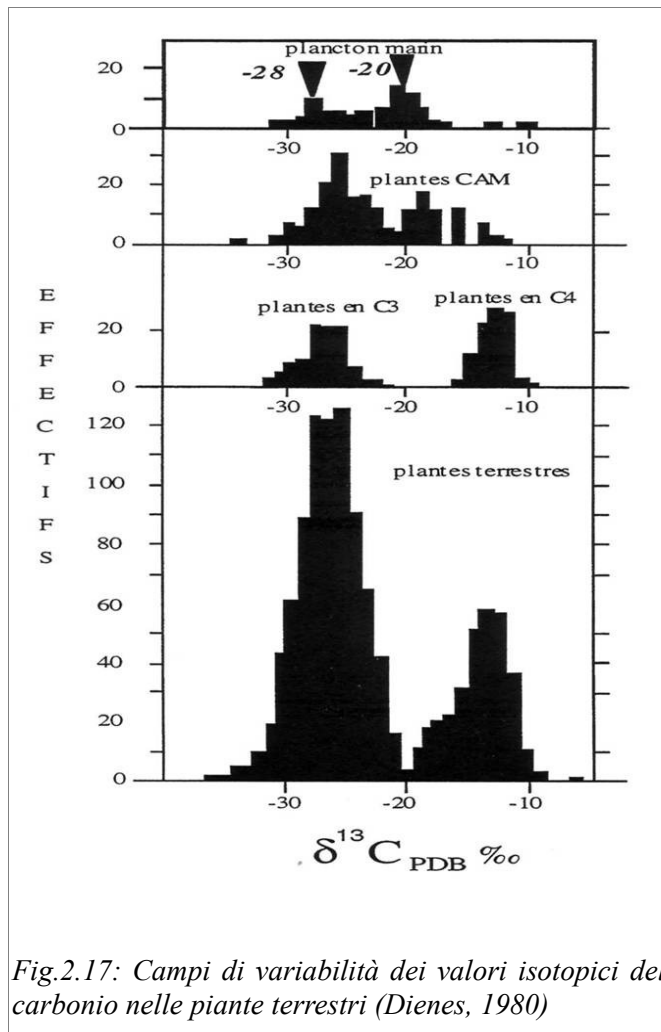


Fig.2.17: Campi di variabilità dei valori isotopici del carbonio nelle piante terrestri (Dienes, 1980)

La risorsa di carbonio delle piante è la CO<sub>2</sub> atmosferica che attualmente ha un valore di circa -7,8‰ (Marino et McElroy, 1991). Le piante C<sub>3</sub> sono più discriminanti verso il δ<sup>13</sup>C atmosferico rispetto alle C<sub>4</sub>; le prime hanno un valore medio di -26,5‰ mentre le seconde di -12,5‰ (Smith, 1972) senza alcuna sovrapposizione tra i due gruppi. Le piante CAM presentano invece dei valori di composizione isotopica del carbonio intermedi (Fig.2.17).

Come precedentemente affermato a partire dalla seconda metà degli anni '70 la ricostruzione della dieta e dell'ambiente del passato era prerogativa delle analisi isotopiche condotte sul collagene (De Niro et Epstein, 1978). Successivamente è stato dimostrato che anche i valori del carbonio misurati nella frazione inorganica poteva dare informazioni simili grazie all'individuazione di una relazione lineare che lega il valore del δ<sup>13</sup>C della parte minerale con quello del collagene delle ossa di uno stesso individuo (Sullivan et Krueger, 1981). Questa relazione risulta di notevole interesse in quanto permette di risalire alle informazioni sulla dieta anche quando il collagene non risulta preservato. Diversi studi hanno individuato che sussiste una differenza pressoché costante tra il δ<sup>13</sup>C del carbonato e quello del collagene pari a +7‰ per gli erbivori e + 4‰ per i carnivori (Krueger et Sullivan, 1984). I valori di composizione isotopica ricavate dal collagene forniscono informazioni diverse rispetto a quelli misurati nell'idrossiapatite: i primi riflettono l'abbondanza isotopica delle sole proteine, mentre i secondi approssimano tutte le componenti della dieta.

La differenza tra composizione isotopica del δ<sup>13</sup>C del carbonato e del collagene è anche influenzata dal livello trofico al quale l'essere vivente appartiene: gli erbivori, la cui dieta è essenzialmente basata su carboidrati mostrano una grande differenza tra questi due parametri, mentre i carnivori e gli onnivori presentano una differenza minore a causa dell'arricchimento in <sup>13</sup>C che subisce il collagene in seguito ad una dieta ricca di proteine.

Studi più recenti hanno dimostrato che, rispetto alla composizione isotopica della dieta, il δ<sup>13</sup>C del collagene risulta arricchito di un fattore pari a +5‰, mentre per il carbonio dell'apatite l'arricchimento è dell'ordine del 12-14‰ per gli erbivori e del 9-10‰ per i carnivori (Fig.2.18). Questi valori sono il risultato della media di tutti i valori riportati da numerosi studi sperimentali. In realtà l'arricchimento del δ<sup>13</sup>C è, nel caso degli animali, anche funzione della taglia: i piccoli mammiferi presentano un valore compreso tra 0,5 e 4,6‰, mentre quelli di taglia superiore mostrano un fattore di arricchimento che va dal 4,7‰ al 6,6‰.

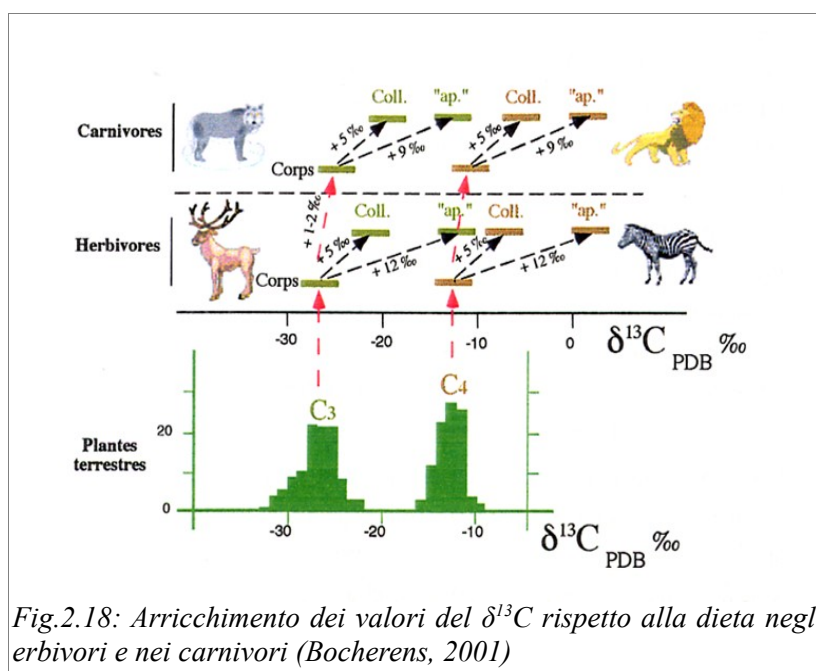
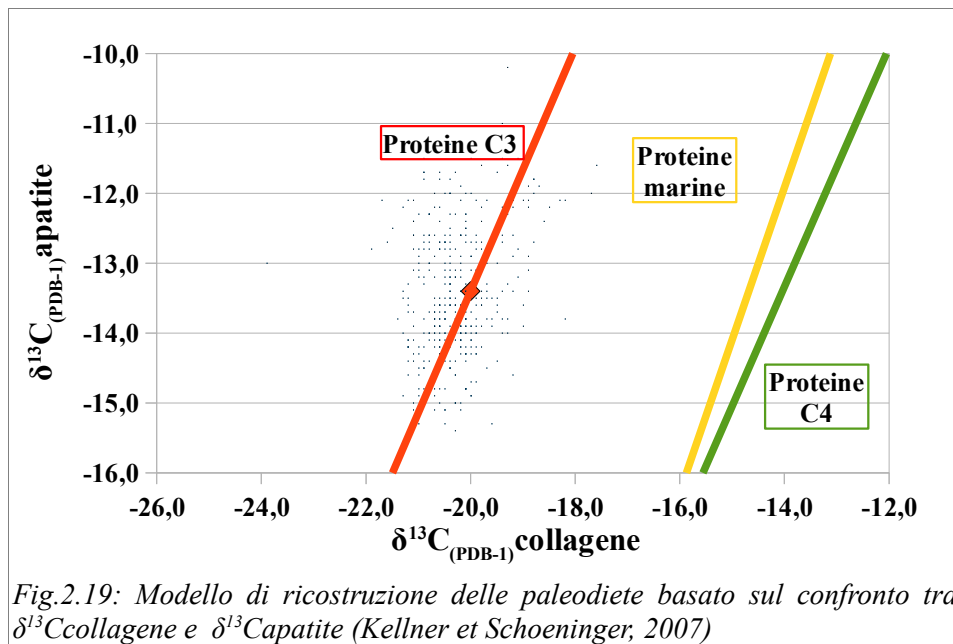


Fig.2.18: Arricchimento dei valori del  $\delta^{13}\text{C}$  rispetto alla dieta negli erbivori e nei carnivori (Bocherens, 2001)

La variazione del  $\delta^{13}\text{C}$  del collagene è, inoltre, legata alla composizione biochimica dei tessuti, ad esempio nel caso di un tessuto ricco in lipidi i valori di composizione isotopica del carbonio sono più bassi rispetto ad uno che ne è povero (Tieszen et al., 1983) in quanto il grasso, essendo un tessuto metabolico più attivo è caratterizzato da un processo di rinnovamento del carbonio più veloce (dell'ordine di qualche settimana o mese). Per questo motivo, i lipidi risultano essere impoveriti del 3-4‰ rispetto alla dieta, a differenza delle proteine che ne sono arricchite del 2-3‰ e dei glucidi che mantengono valori simili a quelli del nutrimento.

Tutti questi parametri ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagene}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$  e  $\Delta_{\text{coll-ap}}$ ) ci permettono di risalire alle caratteristiche fondamentali della dieta degli individui ma ognuno di essi ci fornisce una informazione diversa e influenzata da vari fattori (effetti trofici, taglia dell'animale...).

Nel 2007 Kellner e Schoeninger proposero un nuovo modello per la ricostruzione delle diete delle popolazioni preistoriche basato sull'individuazione di tre rette di correlazione tra il  $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagene}}$  e il  $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$  in grado di discriminare tra proteine C3, proteine C4 e proteine marine (Fig.2.19). Nessun tipo di effetto trofico, né di dipendenza dalle dimensioni dell'individuo sembrerebbero interferire con queste relazioni.



Questo modello permette, dunque, di ottenere in maniera semplice ed immediata delle informazioni sulla tipologia prevalente di proteine introdotte con la dieta

Nel 1985 Schwarcz et al., hanno individuato una formula, valida per le specie umane e animali, che permette il calcolo delle percentuali di piante C4 assunte attraverso la dieta:

$$\% C_4 = \frac{[\delta_{coll} - \delta_3 - (\delta_{coll} - \delta_{dieta})]}{(\delta_4 - \delta_3)} * 100$$

dove:

$\delta_{coll}$  = valore di composizione isotopica del carbonio misurato nel collagene

$\delta_3$  = valore medio delle piante C3 della zona

$\delta_4$  = valore medio delle piante C4 della zona

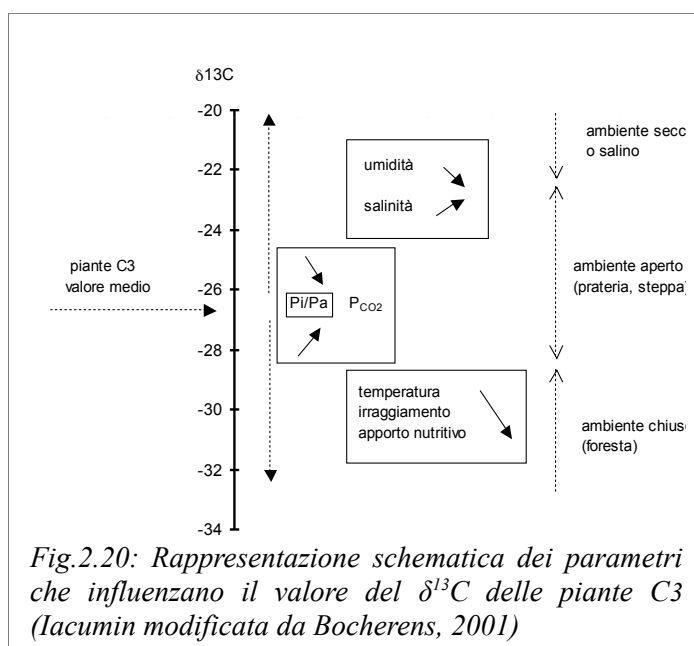
$\delta_{dieta}$  = valore del frazionamento tra dieta e collagene

Nel caso delle piante C<sub>3</sub>, i valori isotopici del carbonio devono essere valutati in considerazione dei fattori ambientali che possono influenzarne il valore (Fig.2.20). Innanzitutto occorre considerare l'apporto idrico, in quanto la vegetazione cresciuta in condizioni di stress idrico presenta valori del  $\delta^{13}\text{C}$  più elevati fino al 3-12‰ rispetto alle medesime piante cresciute in ambienti con elevata disponibilità idrica.

Anche l'irraggiamento solare influisce sul rapporto isotopico giacché è strettamente legato al processo di fotosintesi: ad un tasso di irraggiamento inferiore corrisponde una negativizzazione del  $\delta^{13}\text{C}$  (Farquhar et al., 1982; Macdowall et Lowdon, 1989).

La temperatura e l'umidità si rivelano due fattori particolarmente importanti e in particolare all'aumentare dell'una e al diminuire dell'altra, si avranno valori di composizione isotopica del carbonio più elevati (Stuiver et Brazunias, 1987).

Una diminuzione della pressione di CO<sub>2</sub> atmosferica comporta, invece, un minore frazionamento da parte della pianta con una conseguente positivizzazione dei valori del  $\delta^{13}\text{C}$  rispetto a condizioni ambientali caratterizzate da una maggiore presenza di CO<sub>2</sub> (O'Leary, 1981). È necessario, inoltre, valutare l'apporto di elevate quantità di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera, molto ricca in <sup>12</sup>C, a partire dal XIX secolo in seguito al maggiore utilizzo dei combustibili fossili. Questo fenomeno ha determinato una riduzione del  $\delta^{13}\text{C}$  della CO<sub>2</sub> atmosferica dell'1,4‰, di conseguenza, misure su resti scheletrici precedenti a questa data devono essere sottoposti ad una correzione dell'1,5‰ circa quando si calcola il valore della dieta (Friedli et al., 1986; van der Merwe et Medina, 1989). Un altro effetto collegato con la pressione di CO<sub>2</sub> è il cosiddetto "canopy effect": nella foresta equatoriale, ma anche in alcune foreste temperate, le piante del sottobosco sono costrette ad usufruire della CO<sub>2</sub> isotopicamente impoverita rilasciata dalle piante più alte, le quali costituiscono un ostacolo al miscelamento della CO<sub>2</sub> prodotta con quella atmosferica, che invece presenta valori meno negativi (Medina et Minchin, 1980).



### 2.4.2: IL $\delta^{15}N$ DEL COLLAGENE

L'azoto è il costituente fondamentale delle molecole organiche più importanti dal punto di vista biochimico (DNA, proteine, vitamine), di composti inorganici estremamente diffusi e rappresenta il 78% dell'atmosfera terrestre.

Questo elemento è presente in natura con due isotopi stabili ( $^{14}N$  e  $^{15}N$ ) e vari isotopi radioattivi tutti con un tempo di dimezzamento brevissimo (Fig.2.21). Mediante le analisi dei rapporti di abbondanza dei due isotopi stabili sui reperti scheletrici è possibile ottenere informazioni sulla dieta e sull'ambiente (Bandoli et al., 1999).

Isotopo	Abbondanza in natura	
$^{14}N$	99,634%	stabile con 7 neutroni
$^{15}N$	0,0366 %	stabile con 8 neutroni

*Fig.2.21: Abbondanza in natura degli isotopi stabili dell'azoto*

L'azoto, presente nella frazione organica di ossa e denti, è strettamente correlato con la dieta e in particolare con il tenore delle proteine le quali rappresentano l'unica fonte di azoto

nell'alimentazione. A tal proposito, una delle informazioni più importanti che il valore del  $\delta^{15}\text{N}$  ci può fornire è il livello trofico nel quale l'individuo si trova, considerando un arricchimento del 3-5‰ in  $^{15}\text{N}$  per ogni passaggio di livello. Ne consegue che i carnivori risultano arricchiti in azoto rispetto agli erbivori di cui si nutrono e questi, risultano a loro volta più positivi rispetto alle piante che costituiscono la base della catena alimentare sia in ambiente terrestre, sia in quello marino.

Esistono una serie di parametri ambientali che possono influenzare il valore del  $\delta^{15}\text{N}$ , ad esempio alcuni autori hanno studiato le connessioni tra quantità di precipitazioni e valore isotopico dell'azoto dimostrando che gli organismi, se sottoposti a stress idrico, tendono a trattenere l'acqua. Di conseguenza attraverso l'urina verranno rilasciate maggiori quantità di urea, isotopicamente impoverita, favorendo così l'arricchimento in  $^{15}\text{N}$  dei tessuti (Stele et Daniel, 1978; Ambrose, 1986, 1991; Sealy et al., 1987).

La composizione isotopica dell'azoto misurata nel collagene risulta maggiore durante i primi anni di vita. Questo tipo di andamento è confermato dal fatto che il contenuto in  $^{15}\text{N}$  nella dentina che si forma durante il primo periodo di vita è di circa il 3‰ maggiore di quello presente nelle ossa, collocando così il neonato ad un livello trofico superiore rispetto all'adulto in seguito all'assunzione del latte materno (Bumsted, 1985).

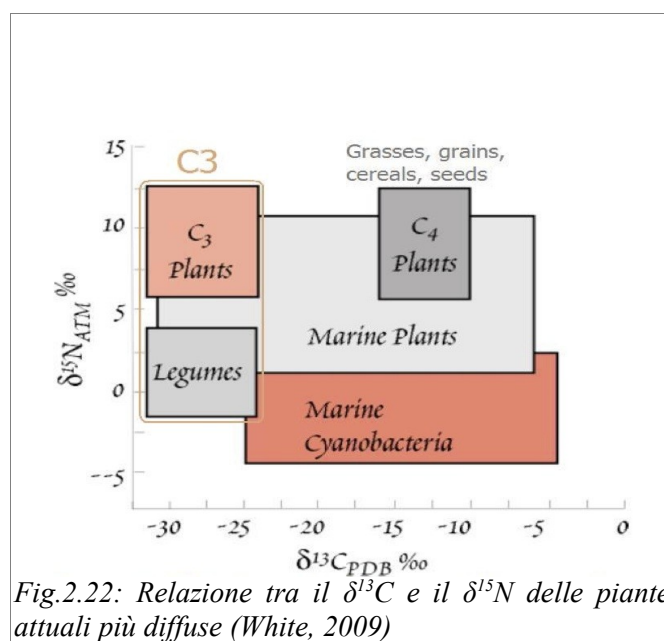
Il  $\delta^{15}\text{N}$  è anche un indicatore della presenza nella dieta di proteine marine, le quali comporteranno un arricchimento maggiore rispetto a quello determinato dal consumo di pesce d'acqua dolce. La discriminazione tra i due sarà rilevata dai valori di  $\delta^{13}\text{C}$  e vedrà un arricchimento in  $^{13}\text{C}$  nel primo caso ed un impoverimento nel secondo.

Infine, anche il valore di composizione dell'azoto permette di valutare il tipo di piante inserite nella dieta e quindi presenti sulla copertura vegetale. L'azoto atmosferico, a differenza dell'ossigeno e della  $\text{CO}_2$ , non può essere utilizzato direttamente dalla maggior parte delle piante verdi, ma deve essere trasformato affinché queste possano servirsene.

Le leguminose, a differenza delle altre piante, vivono in simbiosi con batteri anaerobici, localizzati nei pressi delle radici, i quali fissano l'azoto atmosferico riducendolo a ione ammonio  $\text{NH}_4^+$ . Poiché l'azoto utilizzato è quello di origine atmosferica le piante leguminose avranno valori del  $\delta^{15}\text{N}$  molto vicini allo zero. Le piante non leguminose invece, per riuscire a fissare l'azoto atmosferico, devono utilizzare gli ioni ammonio già presenti nel terreno dai quali quindi dipende il loro valore. Occorre ricordare che la presenza di fertilizzanti influenza notevolmente questi valori: a seconda che essi siano di sintesi o naturali presenteranno

rispettivamente valori prossimi allo zero o maggiori di esso.

Mediante questo parametro isotopico non è possibile distinguere tra le piante C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> (Fig.2.22), dal momento che i valori di composizione isotopica dell'azoto ricadono per entrambe le categorie nello stesso intervallo. In questo caso la discriminazione è basata sui diversi valori del  $\delta^{13}\text{C}$  caratteristici dei due gruppi (Medina et Minchin, 1980).



## 2.5: FENOMENI DI DIAGENESI NEI CAMPIONI OSTEOLOGICI

Tutti i reperti scheletrici possono essere soggetti ad agenti tafonomici che possono determinare cambiamenti nella struttura, nella composizione chimica o in entrambi. La comprensione dei processi diagenetici che interessano le ossa ed i denti è ancora ad uno stato poco avanzato, sebbene sia indiscutibile che ci siano fattori che riscontrano una marcata influenza sulla diagenesi: il pH del suolo, il grado di saturazione dell'acqua di falda rispetto agli ioni  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ , la mobilità delle acque sotterranee e l'aggressione da parte di microrganismi (Nielsen-Marsh et al., 2000).

Un fattore importante per la sopravvivenza di un reperto scheletrico è l'acidità del suolo: un pH del suolo inferiore a 6 porta ad una più facile dissoluzione dell'apatite biogenica, mentre i suoli alcalini garantiscono una migliore conservazione dei reperti osteologici, fermo restando la presenza di fosfati negli stessi. Un ruolo fondamentale è giocato anche dai microrganismi, sebbene non sia ancora chiaro quali ambienti deposizionali favoriscano la

presenza di funghi e batteri e di conseguenza i loro attacchi.

Durante l'interramento, quindi, un osso può andare incontro a numerosi cambiamenti nella sua struttura a causa di svariati processi tra i quali l'attacco microbiologico, lo scambio di ioni, l'assorbimento di sostanze presenti nell'ambiente circostante, l'alterazione e la perdita del collagene e della matrice minerale (Hedges, 2002).

#### ➤ PERDITA DEL COLLAGENE

La causa principale della perdita di collagene è legata agli attacchi microbici che possono però verificarsi solo quando la matrice minerale dell'osso viene rimossa, ad esempio a causa dell'elevata porosità nella sua struttura. Si presume quindi che in quelle regioni dell'osso nelle quali non ci sono evidenze di tale attacco, il collagene sia rimasto pressoché inalterato. Nei climi relativamente freddi del Nord Europa questo sembra essere il meccanismo più comune di perdita del collagene ma risulta essere comunque molto più evidente in ossa sepolte in regioni dal clima torrido, nelle quali si verifica un processo chimico-fisico fortemente dipendente dalla temperatura (Collins et al., 2002).

Anche se non è possibile fare un'analisi statistica sulla frequenza degli attacchi microbici a causa della grande diversità tra i siti, delle condizioni e del periodo d'interramento, non è ancora stato dimostrato che la loro frequenza o intensità sia proporzionale al tempo d'interramento. Varie osservazioni conducono però a considerare età superiori ai 500 anni come limite minimo dell'attacco microbico. Inoltre, il fatto che ossa di età compresa tra gli 8.000 e i 40.000 anni mostrino lo stesso processo di attacco delle ossa più giovani supporta la tesi secondo la quale l'attacco microbico si avrebbe durante le prime fasi della diagenesi dell'osso (Nielsen-Marsh, 1997). Di solito i siti permanentemente impregnati d'acqua e le aree stagnanti mostrano un attacco microbico assai debole (Bocherens et al., 1997).

Per quel che concerne l'attacco da parte dei contaminanti organici, particolare interesse rivestono le sostanze umiche, componente principale dell'humus ovvero del prodotto di degradazione biologica del suolo. Sono molecole eterogenee, scure, acide e molto complesse dal punto di vista chimico che rappresentano una frazione stabile del carbonio, regolano il ciclo del carbonio e il rilascio di nutrienti quali azoto, fosforo e zolfo. Hanno la funzione di sistema tampone per il mantenimento del pH stabile del suolo, regolano l'isolamento termico ed aumentano la capacità del terreno di trattenere acqua.

La quantità e le caratteristiche di queste sostanze non sono uguali ovunque, ma variano al

variare della temperatura, del pH, dei tipi di minerali presenti nel suolo stesso, dalla quantità di precipitazioni che interessa la zona etc. La loro distinzione principale prevede la presenza di acidi fulvici, acidi umici ed umina.

I primi (FA) hanno peso molecolare basso rispetto agli altri due, colore chiaro e sono solubili in acido.

Gli acidi umici (HA), hanno peso molecolare intermedio tra acidi fulvici ed umina e sono insolubili in acido ma solubili nelle basi.

L'umina invece, ha il peso molecolare maggiore e non è solubile né in acido né nelle basi. Si crea in seguito al legame della parte inorganica della materia con gli acidi umici e per questo motivo, ha una buona resistenza all'attacco batterico.

Dal punto di vista della diagenesi delle ossa fossili, l'attacco da parte delle sostanze umiche può avvenire o in seguito all'assorbimento di tali sostanze dal terreno di sepoltura oppure dal processo di umificazione della frazione organica dell'osso.

#### ➤ ALTERAZIONE DELL'IDROSSIAPATITE

La composizione chimica della struttura minerale delle ossa "fresche" è espressa attraverso la formula  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$ . Se consideriamo il gruppo  $\text{CO}_3^{2-}$ : nella struttura cristallina dell'idrossiapatite, tali ioni sostituiscono principalmente il gruppo  $\text{PO}_4^{2-}$ , ma possono sostituire anche gli ioni  $\text{OH}^-$  o essere intrappolati all'esterno, a causa di un adsorbimento superficiale, come ioni  $\text{HCO}_3^-$  o  $\text{CO}_3^{2-}$ . Tuttavia, la proporzione tra i radicali  $\text{CO}_3^{2-}$  sostitutivi, propri della struttura, e quelli  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  adsorbiti non è ben conosciuta (Poyart *et al.*, 1975; LeGeros, 1981; LeGeros *et al.*, 1983; Lee-Thorp and van der Merwe, 1991). Questo implica che, oltre all'idrossiapatite, nelle ossa fossili, possono esserci altre forme cristalline quali la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ). A seguito dei processi di diagenesi, si può anche avere uno scambio tra gli ioni carbonato dell'idrossiapatite e quelli presenti nell'acqua che si trova negli interstizi del terreno che si inseriscono nei siti  $\text{OH}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ . Agli ioni carbonato strutturali, si possono quindi aggiungere quelli presenti nelle acque freatiche che vanno a sostituirsi sia allo ione ossidrile sia allo ione fosfato.

## **2.6: ANALISI DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DELLE OSSA: INDICATORI CHIMICI, FISICI E MICROBIOLOGICI**

L'entità dei fenomeni di diagenesi può essere valutata utilizzando alcuni parametri di misura delle ossa, sperimentalmente determinabili e collegabili ai processi di degrado (Nielsen-Marsh et Hedges, 2000). Prima di effettuare qualsiasi analisi sul reperto occorre infatti verificare che esso sia ben conservato e non abbia subito processi diagenetici che ne possano falsare le analisi.

Tra i parametri più utilizzati per un controllo di qualità vi sono:

- ✓ *Misura del contenuto di proteine*: è basata sulla determinazione della percentuale di azoto presente nell'osso, è finalizzata a riflettere la quantità di collagene conservatosi, a condizione che la percentuale di N sia maggiore dello 0.4% in peso, ovvero che il collagene presente sia in quantità maggiori al 10% (Nielsen-Marsh et Hedges, 2000).
- ✓ *Cambiamenti di porosità*: sono legati ai cambiamenti nella struttura fisica dell'osso, i quali a loro volta, sono dovuti alla variazione dei componenti organici e non organici. La porosità, che rappresenta la capacità di un materiale di assorbire l'acqua, è, quindi, un importante indicatore di diagenesi strettamente legato ad altri fattori. Un aumento in porosità è indice di una perdita della matrice minerale; l'alterazione della porzione organica a sua volta espone il collagene agli attacchi dei batteri che ne hanno accesso più facile (Nielsen-Marsh et Hedges, 2000).
- ✓ *Indice di cristallinità (CI)*: è una proprietà che definisce il grado di ordine nel reticolo del cristallo, riferendosi da un lato alla grandezza dei cristalli, dall'altro all'assenza di difetti strutturali.

Da quanto esposto deriva, quindi, che la valutazione sperimentale del grado di cristallinità dell'osso consente di avere informazioni sul grado di diagenesi della frazione minerale.

Il processo di diagenesi e la fossilizzazione spesso determinano un aumento della cristallinità dell'idrossiapatite e una diminuzione della solubilità (Berna et al., 2004). L'aumento della cristallinità è dovuto a un processo che vede dapprima la dissoluzione dei cristalli più piccoli, quindi la successiva riprecipitazione come forme più cristalline e termodinamicamente stabili (Nielsen-Marsh et Hedges, 1997). Un indice di cristallinità alto è perciò indice di una fase cristallina più ampia e ordinata e quindi di una maggiore diagenesi. Questo parametro è stato largamente usato; tuttavia non esiste

una precisa correlazione tra la diagenesi della fase minerale e la conservazione di quella organica, come il collagene. Questo fenomeno sembra connesso alla decomposizione del collagene e alla perdita di carbonati. L'aumento di cristallinità, tuttavia, non si manifesta immediatamente, ma almeno dopo un migliaio di anni dall'interramento (Sillen, 1989).

- ✓ *Contenuto di collagene*: la perdita di collagene è legata in maniera evidente alle condizioni di sepoltura (temperatura, umidità e acidità dei terreni) (Hedges, 2002). Le ossa ben conservate hanno, di solito, una percentuale in peso di collagene pari o superiore al 2%, rispetto al 20% delle ossa moderne.

Alla diminuzione del contenuto di collagene può anche essere associato un processo di modificazione chimica per cui risulta necessario studiare, oltre la quantità, anche la qualità del collagene che dovrà essere analizzato.

Una verifica si ha attraverso la spettroscopia infrarossa. Con uno spettro FTIR-ATR si può avere evidenza dei picchi caratteristici del collagene attraverso l'individuazione delle bande specifiche di assorbimento caratteristiche di tutte le amidi secondarie, che sono comunemente chiamate amide A, amide B, amide I, II, III, IV, V, VI e VII (Susi et al., 1971).

- ✓ *Rapporto C/N in peso percentuale*: campioni che presentano un rapporto C/N compreso tra 2,9 e 3,6 hanno valori di  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  confrontabili con quelli del collagene delle ossa moderne e viceversa, ossa che hanno un rapporto C/N al di fuori di questo intervallo, presentano anche valori di  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  diversi da quelli delle ossa moderne suggerendo un'alterazione del contenuto isotopico del collagene (De Niro et Epstein, 1981).

Tali valori di C/N, tuttavia, possono di norma differire rispetto a quelli delle ossa moderne e questo suggerisce che devono essere valutati altri indicatori di qualità, come ad esempio il peso percentuale di azoto che, in un collagene ben conservato, deve essere superiore o uguale al 10% (Bocherens et al., 1995) e quello del carbonio, che deve essere circa pari al 40%.

Risulta utile anche guardare il rendimento del collagene, ovvero il peso della sostanza organica estratta rispetto a quello dell'osso sottoposto al processo di estrazione. Da un osso attuale è possibile estrarre fino a 250 mg/g di collagene; per le ossa antiche i valori si aggirano attorno ai 50 mg/g.

Per un ulteriore controllo sulla bontà dei valori isotopici misurati sul collagene può essere utile mettere in relazione il rendimento con il  $\delta$ , i quali non devono presentare alcuna correlazione tra di loro

## **PARTE II**

### **MATERIALI E METODI**

## **CAPITOLO 3**

### **I REPERTI SCHELETRICI DEI SITI ITALIANI**

*I reperti ossei analizzati nell'ambito di questo progetto di Dottorato provengono da tre diverse aree italiane e da un sito del Sudan Centrale.*

*In questo capitolo sono illustrati i materiali scheletrici italiani rinvenuti in vari siti della Pianura Padana (in provincia di Parma e Piacenza), nel sito ligure delle Arene Candide (SV) e presso la località pugliese di Masseria Candelarò (FG).*

*Nelle Tabelle in appendice viene riportato l'elenco completo dei reperti analizzati specificando per ognuno di essi i dati antropologici (sesso, età al momento della morte) e cronologici (fase culturale).*

#### **3.1: L'OLOCENE: VARIAZIONI CLIMATICHE ED EVOLUZIONE UMANA DAL MESOLITICO ALL'ETÀ DEL BRONZO**

L'Olocene costituisce il secondo periodo dell'Era Quaternaria e ha inizio al termine dell'ultima glaciazione pleistocenica (Würm).

La Commissione Internazionale di Stratigrafia ne ha fissato l'inizio a 11700 anni fa (ISChart, 2009), ma convenzionalmente il limite inferiore viene considerato a 10000 anni BP (Età al Radiocarbonio 14)

L'Olocene viene suddiviso, per l'area Europea e anche per l'Italia (Fig.3.1), in 5 cronozone (Ravazzi, 2003) individuate sulla base di uno studio paleobotanico (Mangerud et al., 1974) condotto sulle varve scandinave.

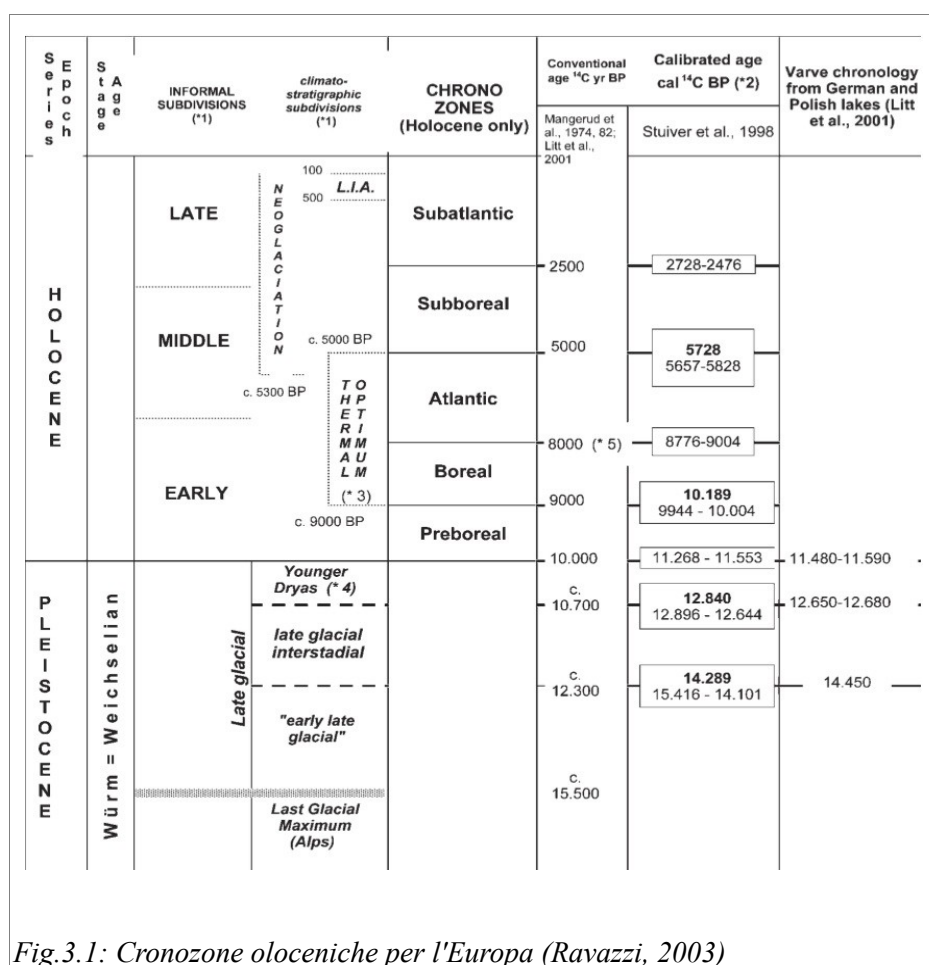


Fig.3.1: Cronozone oloceniche per l'Europa (Ravazzi, 2003)

Dopo l'ultimo evento glaciale del Pleistocene, tra il Pre-Boreale e il Boreale si verificò un progressivo aumento della temperatura il quale produsse la riduzione delle calotte glaciali con conseguente aumento del livello del mare e l'instaurarsi delle foreste sulle terre aperte. Mentre

il Pre-Boreale risultava ancora caratterizzato da un clima freddo e secco, durante il Boreale le condizioni ambientali divennero più calde e aride.

Durante il successivo periodo Atlantico si stabilirono condizioni climatiche calde e umide: in una prima fase (Atlantico antico) si registrarono ancora oscillazioni fresche o fredde, mentre nell'Atlantico recente si affermarono condizioni particolarmente favorevoli che definirono il cosiddetto “*optimum climatico olocenico*”.

Nel Sub-Boreale il clima diventò nuovamente meno propizio e caratterizzato da eventi, anche intensi, di freddo e aridità.

La successiva fase Sub-Atlantica, attualmente in corso, si presenta estremamente variabile, con frequenti oscillazioni (caldo/freddo, umido/arido), ma con un andamento verso condizioni più fredde e umide.

In tale contesto si inseriscono i progressi evolutivi, culturali e tecnologici dell'uomo.

All'inizio dell'Olocene erano ancora presenti gruppi umani di nomadi raccoglitori-cacciatori i quali, però, avviarono il passaggio (Mesolitico) verso condizioni semi-stanziali, indotte proprio dalle variazioni climatiche, che si concretizzarono in maniera definitiva durante il Neolitico.

Questo periodo, definito da Vere Gordon Childe (1925) come una vera e propria “Rivoluzione Neolitica”, fu caratterizzato da grandi cambiamenti sia da punto di vista tecnologico: introduzione della pietra levigata e della ceramica; sia sul piano economico, attraverso la transizione da un'economia parassitaria di caccia e raccolta a modalità di produzione del cibo (agricoltura e allevamento), e sociale: processi di sedentarizzazione delle comunità e stratificazione interna della società.

Il Neolitico ricade cronologicamente nel periodo Atlantico ma si sviluppa, in Europa, con modalità e tempi differenti. In particolare, in Italia il processo di neolitizzazione, con l'introduzione della cultura della ceramica impressa, secondo alcune datazioni comincerebbe a diffondersi soprattutto nelle aree del Tavoliere e della valle dell'Ofanto, in Puglia, ed in Basilicata alla fine del VII millennio.

Nell'Italia settentrionale, invece, la variante della cultura della ceramica impressa ligure, si affermò sulle coste della Liguria nella prima metà del VI millennio a.C. e si diffuse, con diverse varianti, in tutto il Nord: in Emilia Romagna e in Veneto con la cultura di Fiorano, nel mantovano e cremonese con quella del Vhò di Padiena e nel varesotto con l'Isolino Virginia.

La seconda fase della neolitizzazione in Europa vede l'affermarsi, nell'area della Pianura

Padana, della cultura dei Vasi a Bocca Quadrata (VBQ). Essa deve il suo nome alla forma dell'imboccatura di alcuni vasi, sempre presenti negli insediamenti e nelle sepolture (come elementi di corredo), tanto da costituire un "fossile guida".

La cultura VBQ durò circa 1000 anni, cioè dal 5000 al 3800 a.C., in datazione calibrata, e si articola in tre fasi: VBQ I, VBQ II e VBQ III.

Fu Luigi Bernabò Brea ad individuare nei vasi a bocca quadrata "il tipo ceramico più caratteristico del Neolitico medio" tale da definire una vera e propria cultura (Bernabò Brea, 1956). Egli identificò due facies: una più arcaica e formativa (VBQ I: fine del VI millennio - prima metà del V millennio a.C.) in cui compaiono vasi a bocca quadrilobata, ed una più evoluta (VBQ II: metà del V millennio a.C) nella quale sono presenti vasi ad imbocco realmente quadrato, apporti delle civiltà dell'Italia meridionale e influenze della sfera culturale danubiana avvertibili soprattutto attraverso gli elementi fittili.

L'ultima fase della cultura dei Vasi a Bocca Quadrata (VBQ III: fine del V millennio - inizio del IV millennio a.C.) sembra limitarsi alla Lombardia orientale, al Veneto, al Trentino e al Friuli, mentre il resto delle regioni dell'Italia settentrionale a partire dal 4300 a.C. è interessato da una nuova fase, detta Cultura della Lagozza.

Intorno ai 3500 a.C. si verifica in maniera graduale il passaggio all'Eneolitico o Età del Rame: cambiano le modalità di insediamento, l'economia, la produzione ceramica e il rito funerario. L'economia è sempre basata sull'agricoltura e sull'allevamento ma l'avvento della metallurgia provoca le prime forme di differenziazione sociale e l'introduzioni di importanti tecnologie (aratro, ruota).

Il periodo successivo dell'Età del Bronzo viene generalmente suddiviso, nell'area del Nord Italia, secondo le fasi descritte in Fig.3.2 (De Marinis, 1999):

Bronzo Antico	2200-1600 a.C.
Bronzo Medio	1600-1300 a.C.
Bronzo Recente	1300-1200/1150 a.C.
Bronzo Finale	1200/1150-900 a.C.

Fig.3.2 Cronologia dell'Età del Bronzo nel Nord Italia (De Marinis, 1999)

Occorre però precisare che tali datazioni risultano comunque approssimative e sono estremamente variabili da regione a regione.

I villaggi del Bronzo antico erano probabilmente molto piccoli, con una popolazione ristretta che non superava le 200/300 persone e risultavano per lo più collocati presso luoghi umidi (fiumi, laghi, ma anche paludi) più fertili e facili da coltivare. Probabilmente questa caratteristica era legata al peggioramento climatico, verso condizioni più fredde e aride, che si verificò durante il Sub-Boreale che costrinse le popolazioni a ricercare posizioni più vicine ai corsi d'acqua.

### 3.2: I CAMPIONI DEI SITI DELLA PIANURA PADANA

La maggior parte dei campioni è stata rinvenuta in varie località della provincia di Parma, a parte un gruppo di reperti, comunque numerosi, provenienti dal sito di Le Mose in provincia di Piacenza (Fig.3.3). Quest'area dell'Italia settentrionale, come già affermato, è nota per avere il maggior numero di testimonianze funerarie neolitiche appartenenti alla cultura dei Vasi a Bocca Quadrata (VBQ).

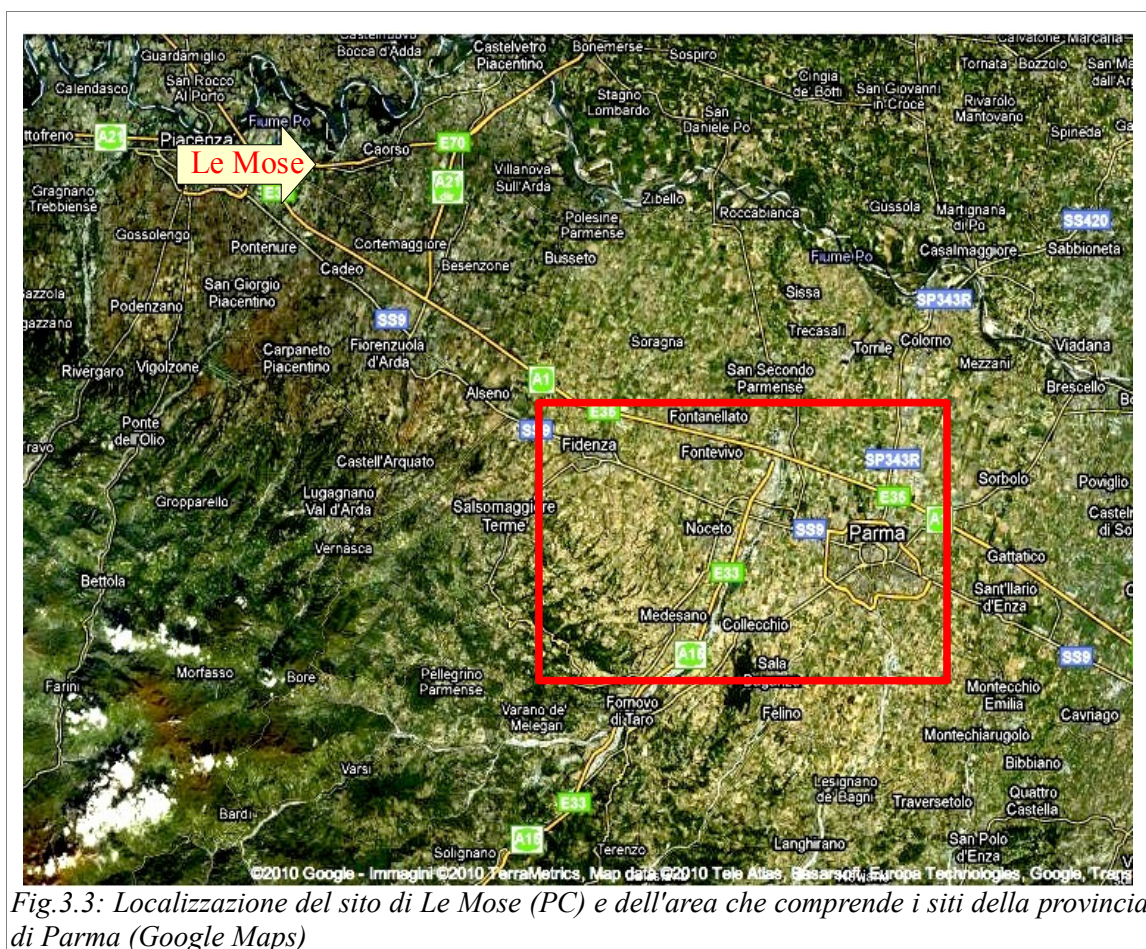


Fig.3.3: Localizzazione del sito di Le Mose (PC) e dell'area che comprende i siti della provincia di Parma (Google Maps)

Gli scavi, generalmente d'emergenza in occasione di lavori edili per uso civile, sono stati condotti dalla Dott.ssa Maria Bernabò Brea, funzionario della Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Emilia Romagna e direttrice del Museo Archeologico di Parma, in collaborazione con la Dott.ssa Loretana Salvadei, antropologa del Museo Nazionale Preistorico Etnografico "L. Pigorini" di Roma.

L'attribuzione cronologica dei reperti è stata effettuata, dove possibile, mediante datazione al Radiocarbonio 14; in alternativa sono state valutate le evidenze archeologiche: elementi di corredo, rito funerario.

Nei prossimi paragrafi verranno illustrati in dettaglio le caratteristiche dei reperti analizzati in questo progetto di ricerca in funzione del sito nel quale sono stati ritrovati.

### **3.2.1: LE MOSE (PC)**

In località Le Mose, al limite sud-orientale del comune di Piacenza, l'impianto di vasti cantieri per usi civili ha consentito di esplorare un'area molto vasta nelle quali sono state riconosciute testimonianze di frequentazione umana dall'Olocene antico fino all'età storica (Bernabò Brea et al., 2005).

Le prime tracce antropiche risalgono al IX millennio a.C. quando gruppi di cacciatori-raccoglitori Mesolitici occuparono la zona. La successiva fase di frequentazione Neolitica è riconducibile alle prime due fasi della cultura dei Vasi a Bocca Quadrata (prima metà e secoli centrali del V millennio a.C.), alla quale seguì un periodo di occupazione Eneolitica (IV millennio a.C.). I dati archeologici attestano comunque una continuità nella frequentazione del sito fino agli inizi del III millennio a.C..

La zona di Le Mose presenta attualmente una morfologia pianeggiante con una debole pendenza verso nord e nord-est; la sua formazione è dovuta ad un ambiente deposizionale di tipo fluviale caratterizzato da regimi torrentizi legati alle precipitazioni appenniniche. L'idrografia principale è rappresentata dal Nure, un torrente di tipo "braided", costituito da una fitta rete di canali che scorrono intrecciati all'interno di un alveo di larghezza variabile, dirigendosi prevalentemente da sud-ovest verso nord-est e sfociando nel Po circa 6 km a nord-est delle Mose (Bernabò Brea et al., 1998). Nell'area è stato individuato un esteso dosso fluviale riconducibile ad una conoide alluvionale pleistocenica (forse un paleo-Nure) sezionato da canali a stretto raggio di curvatura. Tali canali sono colmati da depositi a

tessitura fine (sabbia, limo e argilla), sedimentati da acque a bassa energia e pedogenizzati al tetto (Bernabò Brea et al., 1998).

La successione degli eventi sedimentari, erosivi e pedogenici è solo in parte databile attraverso le tracce di attività antropica. Durante un momento di stasi nei processi erosivi-sedimentari, all'interno dei canali in parte colmati da depositi limosi e sabbiosi, si forma un suolo palustre risalente al Mesolitico (tra il IX e il VII e VI millennio a.C.).

Una ripresa dell'attività fluviale erode in parte il suolo Mesolitico lasciando profonde incisioni, che successivamente sono colmate dai depositi provocati da due estesi episodi alluvionali, che coprono quasi completamente anche la sommità del dosso ghiaioso; al tetto di questo si evolve un suolo asciutto per le condizioni di buon drenaggio, che viene frequentato nel pieno Neolitico, verso la metà del V millennio a.C.. Pochi secoli dopo, quando la gente del Neolitico recente occupa ancora le stesse aree, i suoli di ambiente umido sembrano quasi scomparsi. Sigillano la stratigrafia precedente sedimenti alluvionali contenenti materiali dell'età del Ferro e Romani, che segnalano una certa ripresa dell'attività fluviale forse a partire dal I millennio a.C.

Complessivamente le sepolture messe in luce a Le Mose sono 44 di cui 37 riferibili all'intero arco temporale VBQ I-II (tra il  $5900 \pm 45$  BP e il  $5419 \pm 55$  BP in cronologia non calibrata) e 6 riconducibili, anche se con qualche incertezza, all'Eneolitico ( $4282 \pm 50$  BP e  $4386 \pm 50$  BP non calibrata). Di seguito si presentano le datazioni radiometriche ad oggi a disposizione delle sepolture delle Mose (Fig.3.4).

Campione	Età Radiocarbonio 14 (BP)	Età Calibrata	Fase Culturale
T.01	$5658 \pm 75$	4690-4350 a.C.	VBQ 1
T.5	$5543 \pm 55$	4500-4320 a.C.	VBQ 2
T.12	$5447 \pm 60$	4450-4220 a.C.	VBQ 2
T.16	$4282 \pm 50$	3030-2850 a.C.	ENEOLITICO
T. 24	$5766 \pm 50$	4730-4490 a.C.	VBQ 1
T. 27	$4386 \pm 50$	3120-2890 a.C.	ENEOLITICO
T. 28	$5900 \pm 45$	4910-4680 a.C.	VBQ 1
T.36	$5594 \pm 50$	4520-4340 a.C.	VBQ 2
T.37	$5419 \pm 55$	4360-4220 a.C.	VBQ 2

Fig.3.4: Datazioni radiometriche (non calibrate e calibrate) effettuate sui reperti ossei del sito di Le Mose (PC)

Il campione è, dal punto di vista antropologico, molto vario in quanto sono stati riconosciuti 26 individui adulti, 5 adolescenti e 8 bambini appartenenti ad entrambi i sessi.

Le tombe risultano tutte collocate sui fianchi di un dosso ghiaioso, in modo apparentemente casuale, ma probabilmente condizionato dalla morfologia del terreno e sono disposte in vari raggruppamenti almeno in qualche caso certamente intenzionali.

Gli inumati (Fig.3.5) si trovavano in fosse singole, secondo il tipico rituale Neolitico, deposti sul fianco sinistro, in posizione flessa o rannicchiata, alcuni con le mani congiunte davanti al volto, più raramente con un braccio piegato ed uno steso lungo il fianco.



Fig.3.5: Esempio di sepoltura a Le Mose (PC)  
(Bernabò Brea et al., 2009)

Da segnalare la sepoltura T.36 la quale appartiene ad un individuo maschile di 25-30 anni deposto con orientamento O-E in decubito laterale sul fianco destro conservato per i soli arti inferiori, e la Tomba T.37 di un individuo maschile di 30-40 anni deposto con orientamento ONO-ESE in decubito dorsale con arti inferiori in decubito laterale destro e volto a nord. Nonostante l'orientamento di queste due sepolture differisca da quello classico degli inumati Neolitici (E-O), le datazioni le riconducono alla frequentazione VBQ di II fase. Come vedremo nel capitolo di discussione dei dati, l'individuo T.36 presenta, anche dal punto di vista isotopico, delle particolarità che ci inducono a pensare che esso non appartenesse al gruppo. Tale ipotesi potrebbe anche spiegare il diverso rituale funebre.

Per questo studio sono stati analizzati i reperti osteologici umani (ossa e denti) provenienti da 40 sepolture per un totale di 87 campioni e tre esemplari di faune.

### **3.2.2: BENEFIZIO**

Il sito di Benefizio, situato alla prima periferia di Parma, lungo la strada che conduce a La Spezia, è stato individuato in occasione della realizzazione della tangenziale sud-ovest della città (Mazzieri et Grignano, 2009).

Le indagini hanno rilevato una serie di suoli, appoggiati su una morfologia articolata creata dai dossi di ghiaia di un paleo-alveo pleistocenico, i quali evidentemente testimoniano varie fasi di frequentazione: due riferibili a diversi momenti dell'Età del Rame, una databile al VBQ II (seppure scarsamente documentata), una pertinente alla prima fase VBQ e, infine, una fase avanzata della Ceramica Impressa tirrenica (Liseno et al, 2002; Bernabò Brea et al., 2006).

La stratigrafia individuata dall'alto al basso è la seguente:

- ✓ Suolo limoso di colore grigio, molto poroso, contenente numerose chiocciole e frustoli di carbone millimetrici con spessore compreso tra i 5 e i 30 cm. L'unità è stata individuata subito sotto l'arativo e raggiunge una profondità massima di 1 m (Eneolitico). In alcuni punti era visibile la distinzione di due suoli sovrapposti.
- ✓ Deposito alluvionale limoso giallo, ha uno spessore compreso tra 1 e 2 m. Suolo a carattere argilloso di colore bruno-nero con pedorelitti di argilla giallo ocra, presente solo in un'area dello scavo e individuato a una profondità di circa 2 m, scarsamente antropizzato, conteneva scarso materiale archeologico, all'interno sono state riconosciute solo due strutture (fosse ovali colmate di terreno parzialmente rubefatto) (VBQ II).
- ✓ Deposito alluvionale limoso sterile di colore giallo con spessore pari a circa 40 cm.
- ✓ Suolo argilloso nero con caratteristiche del tutto analoghe a quelle riscontrate per il suolo databile al VBQ II. Il tetto dell'unità aveva quote comprese tra 1,80-2,80 m, con una forte inclinazione in senso SE-NW. Lo strato ha restituito cospicue tracce di frequentazione (strutture, sepolture e numeroso materiale archeologico) relative sia al Neolitico antico che al medio (VBQ I).

L'occupazione pertinente alla cultura dei Vasi a Bocca Quadrata è rappresentata da una quarantina di strutture (pozzetti e fosse) distribuite su un'area di circa 8000 mq.

Risultano databili alla prima fase le 9 sepolture (Fig.3.6), in gran parte infantili e prive di corredo, che si rinvengono disposte su un'ampia area, isolate o riunite in piccoli gruppi. In generale si distinguono due gruppi principali: il primo è costituito da due sepolture (T.4 e T.5) affiancate, il secondo da 3 sepolture infantili disposte a semicerchio (T.8, T.9, T.10), distanti

circa 1 m e 2,50 m l'una dall'altra. Le altre quattro sepolture si rinvennero invece isolate in fossa semplice o all'interno di pozzetti, deposte in decubito laterale sinistro e con orientazione E-W.

In totale sono stati analizzati 20 reperti umani (ossa e denti) e 6 esemplari di fauna.



Fig.3.6: Sepoltura neolitica del sito di Benefizio (Mazzeri et Grignano, 2009)

### **3.2.3: COLLECCHIO**

A Collecchio strutture e sepolture pertinenti al periodo VBQ II, probabilmente in un momento iniziale, sono venute alla luce in due diverse zone, entrambe solo parzialmente esplorate: l'area della tangenziale, dove sono state rinvenute tre sepolture ed un'ampia struttura infossata a fondo irregolare, e presso la località Ca' Lunga con un totale di undici tombe (Bernabò Brea et Cattani, 1992).

Nel primo caso si tratta delle inumazioni relative ad un individuo adulto di sesso femminile, sepolto vicino alla tomba di un infante rinvenuta senza elementi di corredo (forse legati da qualche vincolo familiare) e ad un secondo individuo adulto di sesso maschile.

Nel secondo sito le strutture emerse si dispongono in modo sparso lungo i bordi di un paleo-canale ancora parzialmente attivo, e sono rappresentate da: tre pozzetti, alcune fosse ovali o articolate di modeste dimensioni, due gruppi di buche di palo in parte allineate, un probabile tratto di acciottolato che fiancheggiava per 13 metri la sponda del canale e undici sepolture ad inumazione (Cerchi, 2005). Queste ultime sono in parte isolate, in parte raggruppate ma non affiancate.

Gli inumati (Fig.3.7) sono rappresentati da sette individui adulti e da quattro infanti tutti disposti in decubito dorsale con gambe flesse a sinistra (a parte due eccezioni) secondo un'orientazione preferenziale NE-SW; inoltre, nello stesso contesto sono stati rinvenuti anche alcuni resti di faune.



Fig.3.7: Esempio di sepoltura rinvenuta presso il sito di Collecchio (Bernabò Brea et al., 2009)

Per quanto riguarda le datazioni assolute, per questo gruppo di campioni è disponibile solo un dato che colloca gli inumati nella seconda fase VBQ (Fig.3.8).

Campione	Età Radiocarbonio 14 (BP)	Età Calibrata	Fase culturale
T 5	5685±45	4690-4400 a.C.	VBQ 2

Fig.3.7: Datazione al Radiocarbonio 14 (calibrate e non calibrate) di un individuo del sito di Collecchio

Nell'ambito di questo studio sono stati analizzati 30 campioni tra ossa e denti appartenenti agli individui umani e due reperti ossei di animali (bue e ovi-caprino).

### **3.2.4: GAIONE**

La località di Gaione si trova in quella porzione di territorio parmense interessata dal torrente Cinghio, compresa tra la città di Parma a Nord, i torrenti di Parma e Baganza rispettivamente ad Est e ad Ovest, e il limite della fascia collinare a Sud. Le ricognizioni condotte tra il 1986 e il 1987 nella zona hanno portato all'individuazione di cinque siti riferibili al periodo del Neolitico medio (Libelli, 2009). Dopo un esame della cartografia del territorio, sono state indagate alcune aree partendo dal campus dell'Università di Parma.

A 4 km a S-O della città, lungo il torrente Cinghio, sono stati identificati due insediamenti Neolitici nelle località Gaione-Case Catena e Gaione-Villa Della Zoppa. La loro collazione geomorfologica e pedologica presenta alcuni fattori costanti, il cui riconoscimento ha favorito l'individuazione di altri tre siti della stessa epoca ubicati qualche km più a monte dei precedenti: S.Ruffino-Cascina Marana, S.Ruffino-Casa Bertoli e Carignano frazione Cinghio.

In questo studio sono stati presi in considerazione i reperti scheletrici provenienti dai siti di Gaione-Case Catena e Gaione-Cinghio.

Nel sito di Gaione Catena, considerata l'abbondanza di manufatti rinvenuti in superficie e la loro localizzazione in aree ben distinguibili, è stata effettuata una prospezione che ha previsto la raccolta dei materiali entro un reticolato prefissato: negli altri siti la dispersione dei manufatti e la loro limitata quantità ha indotto a procedere per raccolte non differenziate, senza impianto di quadrettature. Durante l'estate del 1987 in questo sito è iniziata una breve fase di scavo che ha purtroppo confermato la situazione già intuita in ricognizione: lo strato antropico era completamente sconvolto dalle arature praticate prima dell'individuazione del sito, mentre è possibile che il piano di campagna antico fosse già stato eroso, come del resto si è verificato in altri siti Neolitici padani (Biagi et al., 1978).

I numerosi resti umani (Fig.3.8) raccolti in affioramento possono essere ricondotti, in base all'analisi antropologica, ad un numero minimo di 18 sepolture, quattro delle quali riferibili ad incinerazione. Tutti i reperti sono attribuiti alla seconda fase VBQ.

Per le analisi isotopiche sono stati considerati in totale 11 campioni di denti appartenenti complessivamente a 7 individui.



*Fig.3.8: Esempio di sepoltura a Gaione Cinghio (Libelli, 2009)*

Lo scavo Gaione Catena risulta caratterizzato da una fitta serie di strutture abitative costituite da allineamenti di buche di palo, fosse, pozzetti e strutture da fuoco. In questo contesto sono stati individuati numerosi frammenti di ossa umane in affioramento, purtroppo spesso danneggiati e dispersi a causa delle profonde arature. In totale sono state individuate 12 sepolture riconducibili al periodo VBQ I, probabilmente in un momento abbastanza antico.

Le analisi isotopiche sono state condotte su 26 campioni (tra ossa e denti) mentre non erano presenti in nessun caso reperti attribuibili a specie animali.

### 3.2.5: VIA GUIDOROSI (PR)

L'insediamento di Via Guidorossi, ubicato lungo la via Spezia, alla prima periferia della città di Parma, è stato individuato nell'estate del 2006 durante i lavori di costruzione di una palazzina che avevano intaccato una grande fossa polilobata databile alla fase inoltrata della Cultura dei Vasi a Bocca Quadrata (Fig.3.9). Le indagini archeologiche sono proseguite in una vasta area limitrofa (10.000 mq) in occasione della realizzazione di un centro commerciale. L'insediamento ha restituito cospicue tracce databili tra il Neolitico medio (I e II fase VBQ), l'Eneolitico, l'età del Ferro e l'età Repubblicana (Mazzieri, 2009).



Fig.3.9: Fossa polilobata rinvenuta nel sito di Via Guidorossi (PR) (Mazzieri, 2009)

L'insediamento Neolitico si imposta su una serie di dossi, differenti per età e componenti litologiche, attribuibili al Baganza e con probabilità anche al Taro. La morfologia del sito, quindi, risulta molto articolata e alle volte difficilmente leggibile a causa di reiterati fenomeni di erosione nelle aree più alte e di trascinamento di suoli nelle zone più depresse. Indubbiamente l'abitato ha una vita piuttosto lunga che abbraccia gran parte del Neolitico medio.

Le strutture che meglio connotano il sito dal punto di vista culturale sono le grandi fosse polilobate ormai da ritenersi come un *marker* culturale della cultura VBQ e ben note da insediamenti come Pontetaro, Ponte Ghiara, Benefizio a partire fin dalla fase iniziale del Neolitico medio (Bernabò Brea et al., 2008). Quelle indagate nel sito di Via Guidorossi si distinguono per le diverse fasi di utilizzo, per cui si alternano periodi di uso (presenza di

pozzetti di stoccaggio e fosse di estrazione di argilla) con momenti di utilizzo per scopi sepolcrali e di abbandono (scarichi e colluvi).

Le sepolture individuate nel sito di Via Guidorossi sono in totale 58, di cui 56 ascrivibili al VBQ II e 2 all'età del Rame. Le età assolute disponibili sono riportate nella Tabella di Fig.3.10.

Campione	Età Radiocarbonio 14 (BP)	Età Calibrata	Fase culturale
T 24	5544±60	4510-4310 a.C.	VBQ 2
T 28	5520±45	4460-4320 a.C.	VBQ 2
T 29	5488±45	4450-4255 a.C.	VBQ 2

Fig.3.10: Datazioni assolute (calibrate e non calibrate) relative agli individui di Via Guidorossi (PR)

Le tombe risultavano distribuite lungo l'area del cantiere e non sono stati individuati grossi raggruppamenti ma solo gruppi composti da pochi individui (Fig.3.11). È il caso ad esempio degli inumati T.16, T.17 e T.22 i quali, come sarà illustrato nel capitolo di discussione dei dati, presentano delle differenze (insieme ad altri individui) dal punto di vista isotopico, in particolare per il valore del  $\delta^{18}\text{O}$ , che ci spingono a ritenerli "estranei" al resto del gruppo.

In generale, comunque, si suppone per la necropoli di Via Guidorossi una maggiore eterogeneità degli individui sulla base di considerazioni archeologiche: alcuni individui presentano ad esempio elementi del corredo tipici di altre zone italiane, i quali segnalano quantomeno la presenza di contaminazioni culturali; ma anche dalle indagini antropologiche (patologie dentarie) e, come vedremo, dalle analisi isotopiche.

In questo progetto sono stati analizzati complessivamente 97 campioni di ossa e denti umani riferibili a 36 individui Neolitici e 2 individui Eneolitici. Anche in questo caso il campione è antropologicamente molto rappresentativo e per i dettagli si rimanda all'Appendice.



*Fig.3.11: Esempio di sepoltura rinvenuta nel sito VBQ II di Via Guidorossi (Pr) (Mazzieri et al., 2009)*

### **3.2.6: PONTE TARO**

Il sito Neolitico di Ponte Taro copre una superficie di 500 mq, si trova ubicato a sud della via Emilia in podere Begherella, ed è stato individuato a due metri di profondità rispetto al piano di campagna attuale nel corso della realizzazione di un impianto per il gas metano (Bernabò Brea et al., 2009).

Sotto un suolo fortemente pedogenizzato sono state individuate numerose strutture: buche di palo, piccole aree acciottolate, pozzetti e soprattutto fosse di varie dimensioni, comprese alcune strutture infossate molto grandi e in alcuni casi polilobate.

Il sito è stato attivo per un lungo intervallo di tempo dalla prima fase VBQ fino alla seconda inoltrata.

In questo contesto sono state rinvenute 7 sepolture (Fig.3.12), tutte riconducibili alla prima fase VBQ, disposte lungo il perimetro, interno ed esterno, delle fosse e delle strutture polilobate e deposte secondo orientamenti variabili. Ai margini di una delle grandi fosse era anche sepolto un cane privo delle zampe posteriori.



Fig.3.12: Sepoltura rinvenuta a Ponte Taro (Bernabò et al., 2009)

Le datazioni al radiocarbonio effettuate per questo gruppo di individui sono illustrate nella Tabella di Fig.3.13.

Campione	Età Radiocarbonio 14 (BP)	Età Calibrata	Fase culturale
T1	5603±50	4530-4340 a.C.	VBQ 2
T2	5656±45	4600-4340 a.C.	VBQ 2

Fig.3.13: Datazioni relative ai reperti di Ponte Taro

Per le indagini isotopiche sono stati misurati 15 reperti umani di ossa e denti e 5 frammenti appartenenti a varie specie animali.

### 3.2.7: PONTE GHIARA

La località di Ponte Ghiara si trova posizionata a monte di Fidenza lungo la strada per Salsomaggiore, in una zona pedecollinare non lontana da sorgenti d'acque saline e da affioramenti fossiliferi pliocenici; nel 1995, a seguito dei lavori per un metanodotto, è stata esplorata parte di un sito caratterizzato da numerose strutture e sepolture inquadrabili nel momento iniziale della cultura VBQ I (Bernabò Brea et al., 2009). L'unica datazione assoluta disponibile per questo sito conferma tale evidenza (Fig.3.14)

Campione	Età Radiocarbonio 14 (BP)	Età Calibrata	Fase culturale
T 5	5842±40	4800-4580 a.C.	VBQ 1

Fig.3.14: Datazione al Radiocarbonio 14 di un individuo del sito di Ponte Ghiara

L'analisi micromorfologica dei sedimenti (Colombi et Ottomano, 1996) ha riconosciuto una sequenza di fasi d'utilizzo dell'area: ad una iniziale fase agricola, solo indirettamente indiziata, è seguita una fase abitativa e poi una di disuso a cui sembra da riferirsi, almeno prevalentemente, la deposizione di sepolture; infine sarebbe attestata un'ultima fase agricola dell'area, successiva all'abbandono. Nell'area di scavo si sono messe in luce 11 sepolture prive di corredo concentrate in un'area di quasi 200 mq, occupata anche da fitte strutture, costituite da una quindicina di fosse e grandi silos e da un acciottolato della larghezza di 4 m, che è stato messo in luce per quasi 15 metri.

Le sepolture ad inumazione sono molto variabili si trovavano, infatti, in fosse semplici (forse solo in un caso in una fossa plurima), all'interno di grandi pozzetti o al margine di un'ampia fossa già colmata. Queste sepolture appaiono eterogenee sia per la posizione che per l'orientamento dell'inumato, leggermente diverso in ogni sepoltura.

In questo studio sono stati considerati 8 reperti (ossa e denti) appartenenti a tre individui umani.

### **3.2.8: VICOFERTILE**

Nel 2005 uno scavo condotto in un cantiere edile a Vicofertile (Fig.3.15) ha messo in luce, in un'area di circa 300 mq, alcune strutture di tipo abitativo (un'ampia fossa subcircolare, un focolare a ciottoli combusti, una serie di buche di palo) e sei sepolture di inumati (Bernabò Brea, 2009).



Fig.3.15: Distribuzione delle sepolture nel sito archeologico di Vicofertile (Bernabò Brea et al., 2009)

I materiali raccolti consentono di datare il sito alla II fase VBQ, tale evidenza è stata quindi confermata dalle datazioni al radiocarbonio effettuata sui reperti ossei (Fig.3.16).

Campione	Età Radiocarbonio 14 (BP)	Età Calibrata	Fase culturale
T 3	5357±50	4275-4050 a.C.	VBQ 2

Fig.3.16: Datazione assoluta di un individuo rinvenuto nel sito di Vicofertile

Tra le sepolture si distingue quella di un bambino, priva di corredo, che appare isolata, mentre le altre cinque occupavano una fascia di circa 5 m x 10 lungo il margine nord-occidentale del cantiere, contigua alle strutture di tipo abitativo, ma interessata solo da evidenze funerarie. Gli inumati sono disposti secondo il rituale Neolitico in decubito laterale sinistro e con il capo tendenzialmente rivolto verso Est (Fig.3.17).



*Fig.3.17: Sepoltura femminile (con statuetta della Dea Madre) a Vicofertile (Benabò Brea, 2009)*

Dal punto di vista stratigrafico sia le strutture abitative, sia quelle funerarie si impostano al tetto di un suolo fortemente pedogenizzato.

Per questo sito sono stati complessivamente analizzati 13 reperti (ossa e denti) riferibili a 5 individui.

### **3.2.9: VIA TRAVERSETOLO (PR)**

I tumuli del Bronzo antico rinvenuti in località Sant'Eurosia (PR) situata lungo Via Traversetolo, devono la loro conservazione ai processi sedimentari e pedologici che furono caratteristici del tratto distale dei conoidi pedeappenninici durante il periodo Sub-boreale.

Con la fine del Pleistocene superiore, a causa del miglioramento climatico conseguente la deglaciazione, i conoidi pedeappenninici rallentano il loro progredire dal margine delle colline verso la pianura, come conseguenza della riduzione della portata dei corsi d'acqua e del loro carico solido, dovuti alla minore erosione nel comparto montano.

Sulla superficie delle conoidi, durante il periodo Atlantico, si formano suoli profondi e

pedologicamente complessi che vennero intensamente abitati e coltivati dalle comunità Neolitiche.

La ripresa della sedimentazione al margine esterno (verso la pianura), datata al tardo periodo Atlantico ed alla prima parte del Sub-boreale, condusse alla sovrapposizione sui conoidi ed i suoli su di essi formatisi, di sedimenti fini (sabbiosi, limosi ed argillosi) connessi ad alvei sinuosi in un ambiente di piana alluvionale, che si articolano in sequenze cicliche e sovrapposte, sigillate al tetto da un suolo debolmente evoluto.

In un simile contesto si trova il sito di Sant'Eurosia: in corrispondenza di un suolo di questo tipo, contenuto nei sedimenti fini che si sovrappongono alle ghiaie del conoide del Baganza (Fig.3.18).



*Fig.3.18: Disposizione dei tumuli nel sito di Sant'Eurosia in Via Traversetolo (PR) (Museo archeologico di Parma)*

L'osservazione di terreno e lo studio in sezione sottile hanno permesso di caratterizzare il suolo in relazione alle evidenze archeologiche: è poco evoluto e solo debolmente organico, i processi principali che lo hanno determinato sono decarbonatazione e bioturbazione; le figure pedologiche osservate (rivestimenti tessiturali limosi ed organici, carboni, carboni finemente suddivisi) indicano tuttavia una significativa impronta dell'attività umana che si è manifestata

mediante dissodamento ed incendio.

Dall'integrazione delle evidenze archeologiche con le caratteristiche del suolo si può affermare che i tumuli risultano situati in un'area già deforestata e probabilmente in parte coltivata, esse sarebbero stati costruiti scavando superficialmente e accumulando il suolo vegetale. Anche il riempimento dei fossi che circondano i tumuli è costituito da sedimenti di suolo ma più ricchi di sostanza organica, bioturbazioni e carbone.

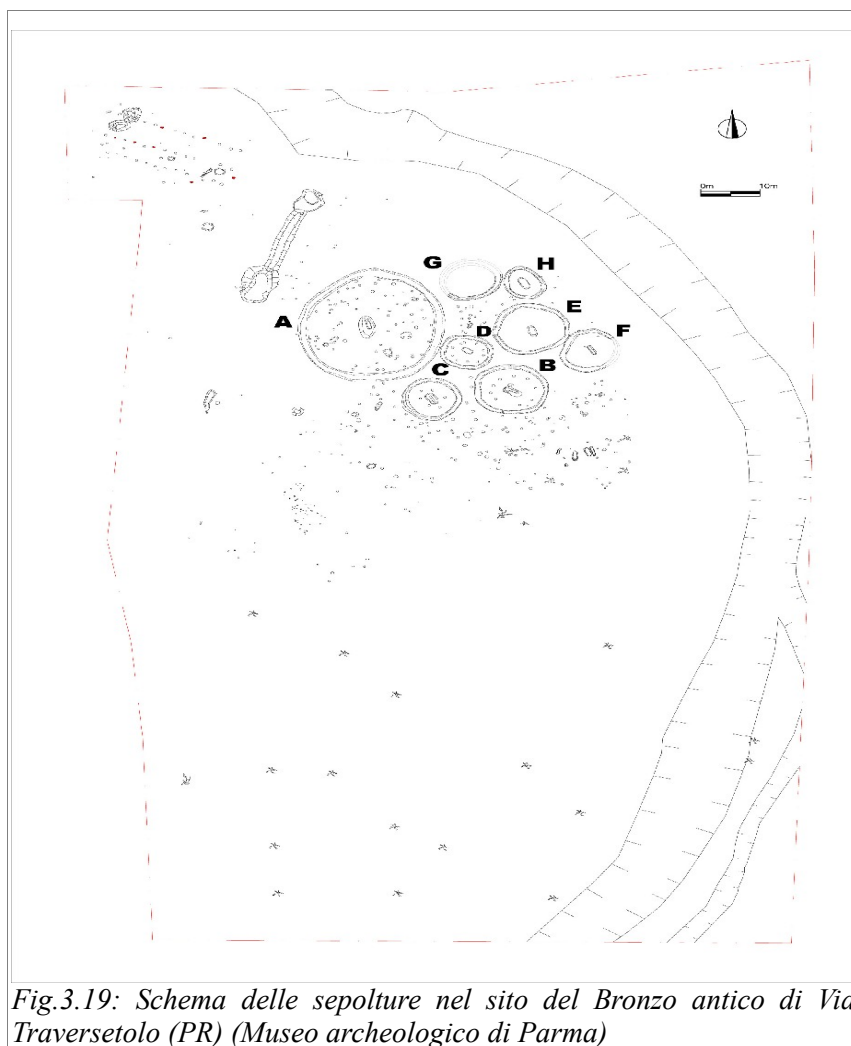


Fig.3.19: Schema delle sepolture nel sito del Bronzo antico di Via Traversetolo (PR) (Museo archeologico di Parma)

Complessivamente si tratta di 8 tumuli conservati per un'altezza modesta, ma ben identificabili in pianta; il maggiore ha un diametro di 24 metri, mentre gli altri sono compresi tra gli 8 e i 13 metri. Essi presentano al centro una tomba in fossa delimitata, talvolta coperta di ciottoli, e sono circondati da un canaletto nel quale spesso si trovano una o più inumazioni (Fig.3.19).

In totale le sepolture individuate in Via Traversetolo sono 36: le tombe centrali sono tutte di adulti (maschi e femmine), le altre sono sia di adulti, sia di infanti (Fig.3.20). La posizione di deposizione più frequente è supina, con gli arti leggermente flessi, più raramente sul fianco o prona. L'orientazione preferenziale varia da SW a NE.



Fig.3.20: Sepoltura del Bronzo Antico a Sant'Eurosia (Museo archeologico di Parma)

In questo progetto sono stati considerati per le analisi isotopiche 52 reperti (ossa e denti) riferibili a 23 individui.

### 3.3: IL SITO COSTIERO DELLE ARENE CANDIDE (SV)

Le “Arene Candide” costituivano una duna di sabbia quarzosa, bianca (da cui candide) addossata al promontorio della Caprazzoppa, presso Finale Ligure (SV) (Fig.3.21). La duna venne utilizzata per scopi industriali fino agli anni '20. La cava di sabbia quarzosa ha successivamente lasciato il posto ad una grande cava di calcare che ha determinato l'attuale situazione paesaggistica, alquanto degradata. L'ampia caverna che si apriva presso uno dei vertici della duna è entrata nella letteratura archeologica come la “Caverna delle Arene Candide” in seguito agli scavi che il geologo Arturo Issel vi condusse tra il 1864 e il 1876.



Fig.3.21: Localizzazione del sito delle Arene Candide a Finale Ligure (SV) (Google Maps)

La caverna (Fig.3.22) si trova oggi ubicata a 89 m sopra il livello del mare, e presenta tre ampie aperture rivolte verso sud che la rendono, oggi come in passato, ben illuminata e relativamente asciutta (Maggi, 1996). Gli scavi proseguirono negli anni '40 e '50 ad opera di Luigi Bernabò Brea e Luigi Cardini e condussero alla descrizione di una delle più articolate e complete stratigrafie del Mediterraneo: dal Paleolitico superiore Gravettiano fino all'epoca Bizantina (dal 26000 a.C. al VII secolo d.C.).

Il contesto ambientale di giacitura era estremamente favorevole alla buona conservazione dei reperti, soprattutto delle ossa e del materiale combusto, utili per le datazioni radiometriche.



Fig.3.22: Interno della Caverna delle Arene Candide

Il deposito olocenico è situato sopra alcuni metri di stratificazione pleistocenica e in effetti, la datazione relativa ad un cranio di cervo, rinvenuto al tetto del deposito pleistocenico, riporta il valore di  $9980 \pm 140$  BP che corrisponde alla cronologia generalmente accettata per l'inizio dell'Olocene.

Per quanto riguarda la frequentazione Neolitica si distinguono: una fase più antica, riconducibile alla Cultura della Ceramica Impressa, datata tra il 6900-6800 BP e il 6200-6150 BP seguita da un periodo di frequentazione riferita al Neolitico medio (Cultura dei Vasi a Bocca Quadrata) durante la quale la grotta veniva anche utilizzata per la stabulazione. Per quest'ultimo periodo le datazioni al radiocarbonio indicano per la I fase VBQ un'età di 5980  $\pm$  40 BP (4900-4820 cal. BC), mentre la II fase risalirebbe al 5600-5400 BP (4450-4250 cal. BC). Infine, durante il Neolitico superiore (Cultura Chassey) la caverna continuò ad essere frequentata durante il periodo compreso tra i 5300 BP (4200 cal. BC) e i 4800 BP (3700 cal. BC) circa.

I reperti scheletrici presi in considerazione per le analisi isotopiche sono 16 (ossa e denti) riferibili a 7 individui, ai quali sono stati aggiunti anche 4 esemplari di faune. Essi appartengono alla cultura VBQ ma non è specificato a quale delle due fasi.



*Fig.3.23: Calco di una sepoltura del Paleolitico superiore all'interno della Caverna delle Arene Candide*

### 3.4: IL SITO DELL'ITALIA MERIDIONALE DI MASSERIA CANDELARO (FG)

Il sito di Masseria Candelaro si trova in provincia di FG ed è collocato ai piedi del monte Aquilone su un'altura poco accentuata (25m slm) prospiciente la sponda destra del Torrente Candelaro (Fig.3.24).



Fig.3.24: Localizzazione del sito di Masseria Candelaro in provincia di Foggia (Google Maps)

L'area in cui sorge l'insediamento di Masseria Candelaro (FG) è posta a margine di due differenti domini geologici: l'Avampaese apulo, con la sua parte più settentrionale costituita dal Monte Gargano, e l'Avanfossa adriatica, con le coperture del Tavoliere (Cassano et Manfredini, 2005).

Nel complesso il Gargano costituisce un rilievo isolato, poggiante direttamente su crosta continentale, costituito da un'impalcatura di sedimenti calcareo-dolomitici di età triassico-cretacea, sui quali poggiano locali e modeste coperture calcarenitiche paleo-eoceniche, biocalcarenitiche neogeniche e terrigene quaternarie.

Dal punto di vista morfologico il sito di Masseria Candelaro ricade nella fascia compresa tra la spianata carbonatica della regione dei terrazzi meridionali del Gargano e la piana alluvionale costiera del Tavoliere di Puglia.

La regione dei terrazzi meridionali è conformata secondo ampi ripiani sub-orizzontali (Checchia Rispoli, 1916), i quali rappresentano lembi ribassati, per cause tettoniche, dell'altopiano centrale carsico. Tali ripiani, infatti, sono delimitati da ben marcate scarpate di

faglia e sono localmente incise da brevi e profondi solchi. Questi “valloni” si estinguono nella spianata sottostante in corrispondenza di estese conoidi di deiezione, attualmente in fase di reincisione.

La piana costiera attuale ampia circa 4-7 Km, tende ad ampliarsi fino a raggiungere le dimensioni di 20-25 Km raggiungendo i corsi d'acqua e in particolare il Torrente Candelaro. Questa grande spianata, di età post-wurmiana è stata a lungo caratterizzata dall'esistenza di una laguna, la cui evoluzione è stata fortemente condizionata dal clima, dai suoi corsi d'acqua immissari e dagli interventi antropici.

La presenza di numerosi corsi d'acqua è un elemento che contraddistingue il Tavoliere centrale: la maggior parte dei torrenti presenti nell'area nascono dall'Appennino e si immettono nel Candelaro.

In tale contesto si verifica, all'inizio del Neolitico, la prima fase di insediamento umano del sito. Complessivamente si possono distinguere tre momenti di frequentazione del villaggio: il Neolitico antico (Candelaro I), il Neolitico medio iniziale (Candelaro II) ed il Neolitico medio avanzato (Candelaro III).

Per il momento più antico della vita dell'insediamento non si dispone di datazioni assolute a causa dell'assenza di resti organici. L'unico riferimento cronologico, utilizzato come limite superiore, è costituito dalla datazione  $6555 \pm 45$ BP effettuata su semi rinvenuti in uno strato che costituisce il riempimento di una fossa che taglia i livelli del Neolitico antico.

Per quanto riguarda il momento di massimo sviluppo del villaggio (Candelaro II) sono disponibili quattro datazioni, riportate nella Tabella di Fig.3.25, le quali coprono un intervallo di tempo relativamente breve, compreso tra 6640 e 6510 BP, corrispondenti ai secoli centrali del VI millennio in cronologia calibrata.

Datazione Radiocarbonio 14 (BP)	Datazione Calibrata (a.C.)
$6640 \pm 95$	5630-5480
$6638 \pm 34$	5630-5480
$6605 \pm 45$	5620-5480
$6555 \pm 45$	5620-5380

Fig.3.25: Datazioni al Radiocarbonio 14 (non calibrate e calibrate) degli individui del sito Neolitico di Masseria Candelaro (FG)

Infine, per la fase Candelaro III, le datazioni disponibili sembrano coprire un arco temporale più ampio, consentendo di collocare l'ultima fase di occupazione del villaggio nella seconda metà del VI millennio in cronologia calibrata. La più altra fra questa, e con un'ampia deviazione standard, è di  $6510 \pm 95$  BP (5610-5360 a.C.).

I campioni analizzati per questo lavoro sono complessivamente 41 attribuibili a 19 individui, inoltre, sono stati considerati anche 4 esemplari di faune.

## **Capitolo 4**

### **I REPERTI SCHELETRICI DEL SITO DI AL KHIDAY 2 (16-D-4)** **(SUDAN CENTRALE)**

*In questo capitolo vengono descritte le caratteristiche delle sepolture rinvenute nel sito preistorico di Al Khiday 2 (16-D-4) nel Sudan Centrale. Tale inquadramento viene effettuato in relazione alle informazioni archeologiche e alle variazioni climatiche che hanno caratterizzato l'Africa durante l'Olocene.*

*Per le analisi isotopiche sono stati considerati solo frammenti ossei in quanto i denti si trovano attualmente in fase di studio antropologico. Oltre ai campioni umani è stata presa in considerazione anche una serie campionaria di faune rappresentativa di varie specie, sia terrestri che acquatiche.*

*In Appendice è presentata la tabella riepilogativa di tutti i campioni analizzati, nella quale vengono riportati i dati antropologici (sesso, età al momento della morte) e l'attribuzione cronologica, effettuata come vedremo su basi archeologiche*

#### **4.1: VARIAZIONI CLIMATICHE IN AFRICA DURANTE L'OLOCENE: IMPLICAZIONI PER L'EVOLUZIONE CULTURALE UMANA**

Mentre in Europa le variazioni climatiche che interessarono l'Olocene assunsero le connotazioni descritte nel Capitolo 3, in Africa la situazione si presenta profondamente diversa, in particolare per l'area del Sahara e del Sahel Orientale.

In queste zone, infatti, si sono succeduti durante l'Olocene numerosi eventi climatici di breve durata i quali hanno condotto complessivamente alla condizione iper-arida attuale, come conseguenza del declino delle piogge monsoniche estive e dello spostamento della Zona di Convergenza Intertropicale (ITCZ) (Roberts et al., 1994; Lamb et al., 1995; Gasse et Van Campo, 1994).

Tra gli 11500 e i 4500 anni BP il Sahara, e in generale tutta l'Africa Orientale, sperimentano condizioni climatiche particolarmente umide a seguito di una fase di estrema aridità che aveva interessato la fase finale del Pleistocene.

Durante questa fase piovosa il fronte settentrionale delle piogge monsoniche si trovava spostato di circa 700 km verso Nord (Haynes, 1987; Neumann, 1993). Questa condizione ha consentito la ricarica delle acque sotterranee, l'incremento del deflusso fluviale superficiale, la creazione di numerosi laghi nell'area sahariana e, in ultima analisi, ha permesso di facilitare i contatti culturali tra le varie regioni i quali erano stati interrotti, del tutto o in parte, a causa della forte aridità che aveva colpito questa zona durante il Pleistocene (tra i 13000 e gli 11500 BP). Questo intervallo umido fu tuttavia interrotto da numerosi intervalli aridi, riconosciuti da svariati autori, di più o meno breve durata a seconda dell'area indagata.

Ad esempio Roberts et al. (1994), studiando i sedimenti del lago Magadi, hanno individuato un periodo di siccità già verso i 10800 BP, mentre Hassan (1986) ha riscontrato nel Sahara egiziano una serie di intervalli aridi di breve durata negli anni: 9700-9350, 8700-8600, 7900-7700 e 7100-6900 BP.

Nel 1990 Wendorf ha riconosciuto anch'esso intervalli aridi negli anni: 8500-8260 e 7900-7700 BP, ma studi più recenti (Schild et Wendorf, 2002) hanno proposto una rivisitazione di tali periodi: 8850-8560, 8200-8000, 7300-7100, 6600-6550, 5800-5500 BP.

In generale possiamo riassumere che intorno ai 7500 anni BP si verificò un drammatico periodo di siccità (periodo Abyata) che interruppe l'umidità prevalente del primo Olocene, al quale seguirono nuove parentesi di aridità a 6000 BP (periodo Bougdouma/Oyo) e a 4500 BP (periodo Malha). Un'ulteriore fase estremamente arida si ebbe a circa 3700 BP (periodo

Egiziano) e altre, di minore entità, si verificarono a 3000 BP (periodo Kuruyange), a 2500 BP (periodo Tanganyka), a 1500 BP (periodo Abhe) e a 600 BP (periodo Arsi/Dega Sala).

In definitiva, a partire dall'Olocene medio, si è osservato un andamento della situazione climatica verso un trend di progressiva aridità ambientale, fino allo stabilirsi delle condizioni iper-aride che caratterizzano l'area attualmente.

Occorre, però, precisare che l'identificazione di alcuni di questi eventi è più certa di altri e che sussistono delle discrepanze nella loro datazione a causa della risoluzione cronologica di questi studi non sempre soddisfacente. Inoltre, bisogna anche considerare le possibili differenze climatiche dettate da fattori locali, dipendenti ad esempio dalla presenza di bacini idrografici e di rilievi montuosi, dalla sensibilità ai meccanismi biologici e dal fatto che questi intervalli improvvisi e di breve durata sono sovrapposti a fasi climatiche a lungo termine.

Nelle prime fasi dell'Olocene parecchie regioni sahariane godevano, dunque, di un clima tropicale umido con abbondanti precipitazioni che alimentavano una fitta rete idrografica e formarono numerosi laghi laddove attualmente si trova il deserto. La presenza di acqua rendeva possibile la vita di molti animali, mentre i pesci e i molluschi che popolavano i fiumi e i bacini lacustri, costituivano un'importante risorsa.

In un simile contesto ambientale si insediarono tra l'8000 e il 7000 a.C. (come attestano le evidenze archeologiche) le prime popolazioni che, con tutta probabilità vivevano di caccia e di pesca. La pratica dell'agricoltura non era ancora stata introdotta per cui questi individui si limitavano alla raccolta intensiva da ampie distese di graminacee selvatiche (sorgo e miglio).

A partire dal 5000 a.C. e fino al 3500 a.C. cominciò una fase arida, interrotta di tanto in tanto da qualche pulsazione umida.

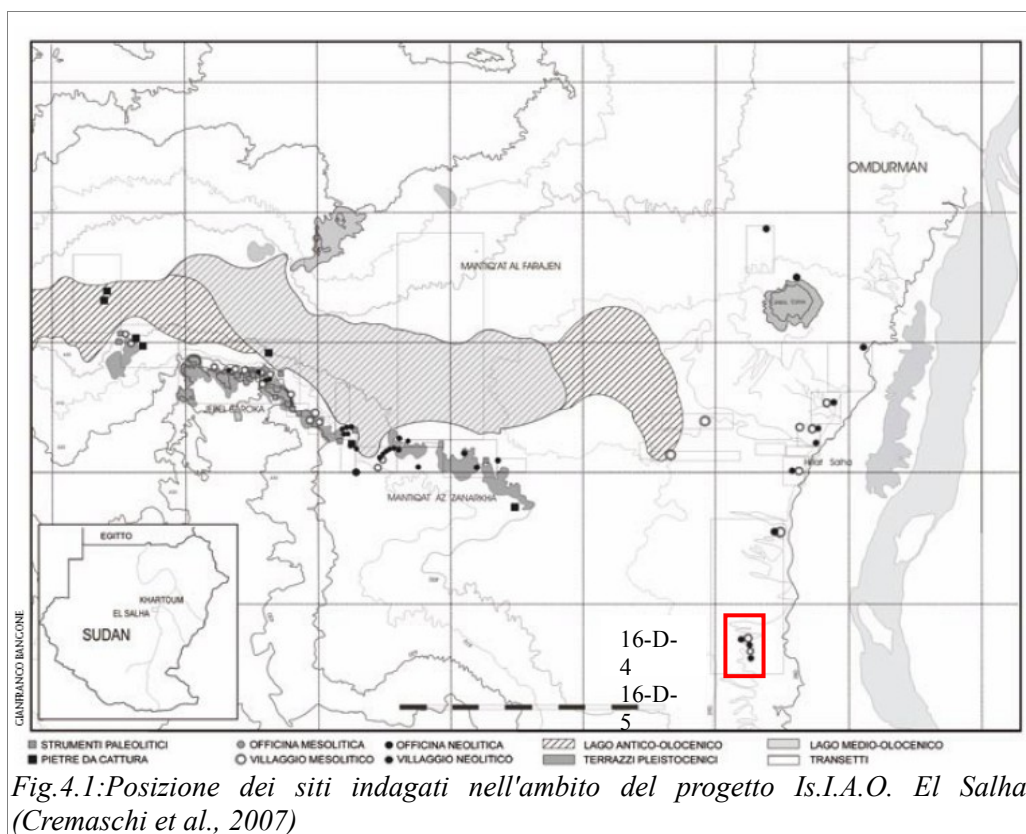
Proprio in concomitanza con tali eventi le popolazioni del Sahara e del Sudan cominciarono a praticare l'allevamento bovino, sviluppando quello che viene definito il Neolitico pastorale. Anche la pratica dell'agricoltura venne introdotta in seguito al deterioramento climatico, soprattutto nelle aree vicine ai corsi d'acqua (principalmente il Nilo), introducendo col tempo innovative opere di ingegneria idraulica al fine di incrementare l'economia agricola (Giusti, 1996).

La migrazione forzata dalle avverse condizioni climatiche condusse alla nascita delle grandi civiltà della valle del Nilo che fiorirono nelle epoche successive: Regno di Kerma (2500-1520 a.C.), Regno di Napata (650-310 a.C.) e Regno di Meroe (275 a.C.-450 d.C.).

## 4.2: GLI SCAVI ARCHEOLOGICI NELL'AREA DI EL SALHA

Il Sudan Centrale costituisce un'area particolarmente importante per lo studio dello sviluppo delle civiltà stanziate lungo il Nilo nel Pleistocene superiore e nell'Olocene antico e medio. Come altre regioni del Sudan, questa zona risulta ancora per lo più inesplorata dal punto di vista archeologico. Solo dalla metà del Novecento, infatti, sono stati intensificati gli sforzi e le risorse degli studiosi per cercare di comporre almeno un quadro generale della preistoria di questo paese. Recentemente gli scavi condotti dall'Università di Ginevra nell'area di El Barga e nel bacino di Kerma (Honegger, 2005; 2007), quelli effettuati dagli archeologi francesi nelle necropoli localizzate nel bacino di Wadi El Kowi (Reinold, 2001), e quelli dell'Istituto Italiano per l'Africa e l'Oriente (Is.I.A.O.) nella necropoli neolitica di R12 situata vicino a Kawa (Salvatori et Usai, 2002; 2008) e nel Sudan Centrale nell'area di El Salha, hanno fornito dati importanti sulle dinamiche di insediamento e su molti altri aspetti relativi alla preistoria dell'Africa Nord-Orientale.

A partire dal 2000, infatti, nell'ambito di un nuovo progetto dell'Is.I.A.O., si sono succedute annuali campagne di scavo che hanno interessato l'area che prende il nome di El Salha dal villaggio più importante presente immediatamente a sud di Omdurman (Usai et Salvatori, 2002; Usai, 2005; Usai et Salvatori, 2006; 2007; 2008).



L'area studiata (mai esplorata in maniera sistematica in precedenza) è situata a Sud di Omdurman e, a partire dalla sponda sinistra del Nilo, comprende una striscia di territorio di circa 35 Km che si estende verso Ovest fino al Jebel Baroka (Fig.4.1).

Il progetto in questione era finalizzato alla raccolta e all'analisi delle evidenze archeologiche presenti nell'area allo scopo di indagare le relazioni tra variazioni climatico-ambientali e la presenza umana nelle diverse fasi culturali.

L'esistenza di gruppi umani risalenti al Pleistocene superiore lungo la valle del Nilo, a nord della quarta Cateratta, era nota già da tempo, ma non si aveva alcuna indicazione sulla loro possibile presenza nel Sudan Centrale nell'arco temporale compreso tra i 4000 e i 1000 anni BP. D'altra parte, risultano relativamente abbondanti le informazioni relative al Mesolitico locale (Khartoum Mesolithic) caratterizzato da un'economia di sussistenza basata sulla caccia, pesca e raccolta, e al successivo periodo Neolitico nel quale si realizza il passaggio ad un'economia produttiva, apparentemente incentrata sull'allevamento e la pastorizia. Nonostante le attività di ricerca nell'area, si continuano ad avere notevoli problemi per l'intervallo di tempo compreso tra il III e il I millennio a.C..

Durante le prime fasi del progetto l'attenzione era stata focalizzata su una serie di siti (10-X-6, 10-X-8 e 10-X-5) praticamente scomparsi a causa della costruzione di infrastrutture. Il sito Mesolitico/Post-Meroitico 10-X-6 in particolare, aveva permesso la comprensione dei processi di formazione e di distruzione dei siti preistorici nella zona e di avviare nuove modalità di approccio allo scavo archeologico, nonostante le interferenze distruttive causate dall'impianto di nuovi cimiteri di epoca Post-Meroitica ed Islamica. I continui ritrovamenti di siti archeologici più o meno antichi hanno convinto le autorità locali ad estendere le concessioni di scavo ad un'area molto più estesa rispetto a quella originariamente stabilita.

Proprio durante una nuova ricognizione, lungo il percorso che dovrebbe condurre al nuovo aeroporto, sono stati individuati due importanti siti preistorici Al Khiday 1 e 2 (Fig.4.2) e una serie di tumuli di epoca Post-Meroitica (16-C-2).

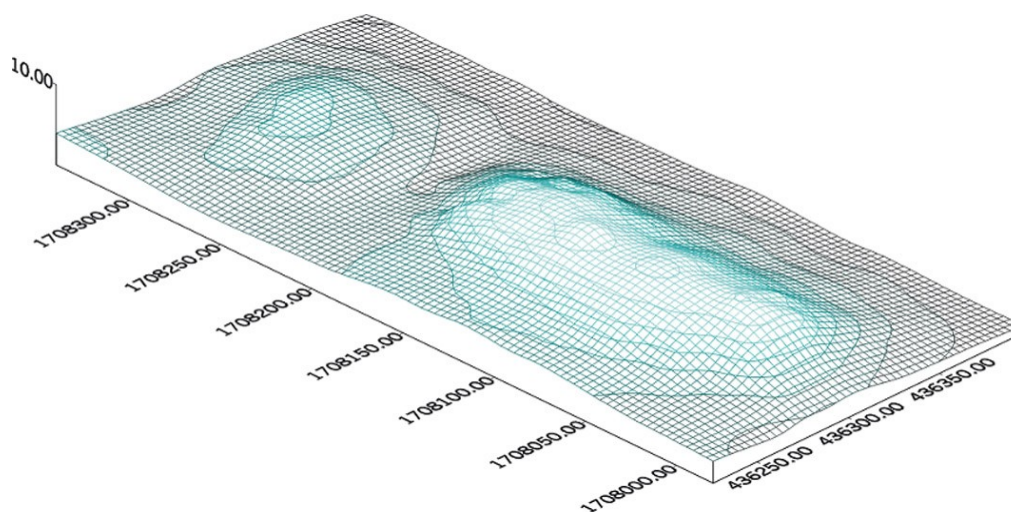


Fig.4.2: Rilievo della necropoli 16-D-4 (a sinistra) e dell'abitato 16-D-5 (a destra). (Usai et al., 2010)

### 4.3: AL KHIDAY 1 : 16-D-5

Questo insediamento Mesolitico, frequentato anche in epoca Neolitica e ancora qualche millennio più tardi, durante il tardo periodo Post-Meroitico, ha restituito evidenze strutturali particolarmente ben conservate (Usai et Salvatori, 2009). In particolare sono stati riportati alla luce residui di muretti di argilla i quali delimitavano gli spazi interni in cui venivano svolte le diverse attività domestiche, a testimonianza di un'idea di casa più elaborata di quanto ci si potesse aspettare.

Ai margini e all'interno di queste unità abitative sono stati individuati grandi focolari che hanno restituito, oltre a carboni e a ceneri, grandi quantità di materiale archeologico: ossa animali, frammenti di ceramica, frammenti di macine, pigmenti minerali.

La presenza di carboni ha consentito di datare i focolari a due momenti diversi per quanto vicini nel tempo: 7000-6600 a.C. e 6600-6500 a.C. corrispondenti ad espressioni culturali specifiche dal punto di vista della produzione ceramica.

Nella prima fase è presente sia la ceramica Wavy Line: scoperta per la prima volta nel 1947 a Khartoum, e caratterizzata dal tipico motivo decorativo ad onde, inciso mediante le spine del pesce gatto, almeno secondo il suo scopritore J. Arkell; sia quella ad impressione lunate profonde. La seconda fase vede un incremento della Wavy Line e la scomparsa di quella ad

incisioni profonde, sostituita da nuove varianti ad impressioni più superficiali.

I resti faunistici forniscono importanti indicazioni sull'attività di sussistenza di queste popolazioni: la pesca costituiva sicuramente una risorsa fondamentale (*Lates Niloticus* e *Claridae*) ed era affiancata dalla caccia sia di grandi mammiferi (elefante, ippopotamo), sia di mammiferi più piccoli rappresentati da varie specie di Bovidi.

L'assenza di animali domestici nei contesti tardo Mesolitici del Sudan Centrale suggerirebbe che l'adozione di pratiche di allevamento nell'Africa Settentrionale sia stata fortemente determinata dal deterioramento climatico che tra antico e medio Olocene, a partire dall'Africa Sahariana, porta ad un progressivo impoverimento ambientale. Il Sudan Centrale, comincerebbe a sentirne le conseguenze solo un migliaio di anni più tardi, verso la fine del VI - inizio del V millennio a.C., quando si sarebbero create le condizioni per il passaggio ad una economia di produzione del cibo (Neolitizzazione).

#### **4.4: AL KHIDAY 2: 16-D-4**

Il sito di Al Khiday 2 è stato utilizzato come necropoli durante epoche diverse, a cominciare da un periodo che, in assenza di datazioni sui reperti scheletrici, può essere definito come pre-Mesolitico. Una seconda fase di utilizzo cimiteriale viene inquadrata nel Neolitico (V millennio a.C.) grazie al rinvenimento di corredi funerari e, infine, una terza fase è rappresentata da un nucleo di sepolture Meroitiche datate tra il I secolo a.C. e gli inizi del II secolo d.C. (Usai et Salvatori, 2009; Usai et al., 2010).

Oltre all'evidente importanza come necropoli, questo sito è caratterizzato dalla presenza di una fase di abitato Mesolitico databile alla seconda metà del VII millennio. La presenza di numerosi pozzetti-focolare ricchi di resti faunistici, ceramici e litici fornisce indicazioni cronologicamente utili per determinare la sequenza temporale degli episodi cimiteriali che si sono susseguiti nel sito.

Al periodo pre-Mesolitico vengono attribuiti oltre 70 individui sepolti in fossa semplice, deposti in posizione distesa ventrale invece che dorsale. Tale modalità di sepoltura, documentata solo episodicamente in Africa (un singolo caso in Egitto, a Wadi Kubbaniya :Wendorf et Schild, 1986; e un numero ancora indeterminato a Jebel Moya, nella Gezira sudanese :Addison, 1949; Mukherjee, et al., 1955), sembra essere raramente attestata altrove (Fig.4.3 e Fig. 4.4).



Fig.4.3: Tomba pre-Mesolitica: sepoltura in posizione allungata ventrale (www.sudanplanet.org)



Fig.4.4: Tomba pre-Mesolitica: sepoltura in posizione allungata laterale (www.sudanplanet.org)

A causa del cattivo stato di conservazione del collagene non è stato possibile datare questi individui con il metodo del Carbonio 14, ma proprio grazie al rinvenimento dei resti di abitato, è stato possibile individuare una specie di livello guida che ha permesso la loro collocazione cronologica, seppure approssimativa.

Alcune fosse, infatti, contenenti un deposito grigio composto da ceneri, resti di faune e frammenti ceramici, intercettavano queste sepolture distruggendole parzialmente. Tra le faune presenti nel deposito alcuni esemplari di conchiglie (*Chambardia* e *Pila sp.*) sono stati datati a 6600-6500 a.C. costituendo così un *terminus ante quem* per queste antiche sepolture che possiamo di conseguenza datare ad un periodo precedente i 9000 anni BP.



Fig.4.5: Sepoltura con giacitura laterale flessa (www.sudanplanet.org)

Le sepolture Neolitiche sono caratterizzate da deposizioni in fossa semplice con gli individui deposti sul fianco sinistro, in posizione fortemente contratta ed iso-orientati ovest-est, con la testa ad ovest (Fig.4.5). In alcuni casi il defunto è accompagnato da un corredo di vasi e oggetti di ornamento. A questo proposito risultano particolarmente rilevanti gli elementi costitutivi di alcune collane, a forma di foglia di lauro, realizzati con valve di *Chambardia*, tipiche di una fase culturale che, nel Sudan Centrale, è chiamata Neolitico di Shaheinab datata intorno al 4700-4500 a.C..

Le tombe del periodo Meroitico, più complesse e grandi rispetto a quelle precedenti, hanno spesso fortemente danneggiato le sepolture più antiche. Esse si presentano con una discesa di accesso alla camera sepolcrale, di forma generalmente circolare o ellissoidale, che si trova ad una profondità compresa tra 1 e 1,20 m al di sotto del piano di campagna. Anche in questo caso gli inumati sono sepolti in posizione flessa ed orientati da ovest verso est, con la testa ad ovest. Possono essere o meno accompagnati da un corredo funebre relativamente ricco e spesso presentano una sorta di pietra-cuscino sotto la testa.

Oltre a queste sepolture sono stati anche rinvenuti alcuni individui, deposti in posizione flessa, i cui resti scheletrici presentavano uno stato di conservazione intermedio tra quello del periodo pre-Mesolitico e quelli appartenenti alla fase Neolitica. Queste tombe potrebbero appartenere alla prima fase di frequentazione Mesolitica documentata ad Al Khiday 1 (16-D-5), datata agli inizi del VII millennio a.C., ma considerando che il rituale funebre è molto simile a quello del Neolitico, la completa assenza di corredo non consente di discriminarle, appunto, dalle sepolture Neolitiche rinvenute prive di corredo.

Nell'ambito di questo progetto di Dottorato sono stati analizzati 127 esemplari umani e 51 campioni di faune, terrestri ed acquatiche.

#### **4.5: INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO**

Le fasi di frequentazione del sito abitativo di Al Khiday 2 (16-D-5) e di quello cimiteriale di Al Khiday 1 (16-D-4), devono essere messe in relazione con le variazioni climatiche e ambientali verificatesi tra il Pleistocene finale e l'Olocene, le quali hanno continuamente rimodellato la morfologia di questa regione, condizionando le scelte abitative di queste popolazioni.

Lo studio geomorfologico e geoarcheologico (Williams et Adamson, 1973; Cremaschi et al. 2007; Zerboni, 2010) ha dimostrato l'esistenza, almeno nell'Olocene antico, di vaste aree

lacustri ad ovest del Nilo Bianco e di un piccolo bacino palustre, proprio nell'area della necropoli e dell'abitato, che si intercala tra la fase più antica della necropoli di Al Khiday 2 e l'impianto del villaggio Mesolitico ad Al Khiday 1.



Fig.4.6: Localizzazione dei siti e della formazione paleo-lacustre dell'Olocene iniziale e medio. (Usai et al., 2010)

Il substrato della zona è costituito da basalti e da arenarie terziarie (Nubian sandstone). Essi formano dei rilievi isolati circondati da superfici debolmente ondulate: un peneplano che taglia in profondità i paleosuoli lateritici di colore rosso.

Quest'unità (Inselberg/Peneplain Unit) può essere correlata con la morfogenesi del Pleistocene iniziale, così come i siti tardo Paleolitici e Mesolitici, situati lungo il margine nord del Jebel Baroka. Le strutture Paleolitiche sembrano fortemente abrase dall'erosione del vento ed è probabile che siano state sottoposte ad un ambiente di forte aridità prima dell'Olocene.

Wadi Hab costituisce un'ampia zona pianeggiante delimitata dall'Inselberg/Peneplain Unit ricoperta da depositi sabbiosi-argillosi, di circa 40 cm di spessore ricchi di conchiglie di

molluschi. La posizione geomorfologica, le caratteristiche sedimentologiche e il contenuto faunistico suggeriscono un'origine lacustre o paludosa. L'età di questi sedimenti è ancora ipotetica, ma poiché i depositi coprono la Inselberg Unit è presumibile pensare che siano di età post-pleistocenica: Olocene iniziale e medio.

Verso Est sono state distinte alcune unità oloceniche legate alla sedimentazione del Nilo : l'unità Al Widay, formata da un'alternanza di lenti di sabbia-limosa grigia, depositi sabbiosi-argillosi verdi e rossi; e i vertisuoli organici neri, i quali rappresentano rispettivamente depositi di argine e alluvionali del Nilo. Un canale sepolto del paleo-Nilo è stato individuato al di sotto di tale unità.

L'unità di El Salha, in particolare, consiste di ghiaie ben arrotondate di diversa litologia, che può essere interpretata come una barra longitudinale del Nilo, giacente circa 10 m sopra l'attuale livello del fiume. Al top della formazione, ci sono diversi altri cumuli che formano i siti Mesolitici e Neolitici. Entrambe queste unità possono essere datate all'Olocene iniziale e medio.

La pianura alluvionale circostante è punteggiata da affioramenti di sabbia neri, ricchi di sostanza organica (datati  $7740 \pm 50$  bp) che rappresentano il deposito di un ex-palude, probabilmente formatasi in seguito alle esondazioni stagionali del Nilo.

L'unità Nile Terrace, che rappresenta la prima terrazza sopra l'attuale livello del fiume, è intensamente coltivata e composta da vertisuoli sabbiosi-argillosi neri e da barre sabbiose.

La morfogenesi olocenica dell'area sembra essere correlabile con una fase di aggradazione del Nilo, che ha condotto alla deposizione della ghiaie dell'Unità di El Salha e ai depositi di argine dell'Unità Wadi Hab.

Questi eventi geologici sono stati collocati durante il periodo umido dell'Olocene iniziale perchè essi richiedono un'elevata portata del Nilo. Ciò potrebbe spiegare la concentrazione dei siti archeologici lungo le sponde meridionali del bacino lacustre e sulla barra ghiaiosa (El Salha Unit) che separa il lago dal corso del fiume.

## *Capitolo 5*

### **METODOLOGIE ANALITICHE**

*La distribuzione omogenea delle frazioni strutturali delle ossa (apatite e collagene) non permette una discriminazione tra la porzione destinata agli studi sul collagene e quella destinata agli studi sull'apatite, come invece si rende necessario per le analisi condotte sui denti. Nei denti lo smalto e la dentina, distinguibili anche visivamente per la differente consistenza e colorazione, hanno anche una composizione diversa: nel primo, più compatto e di colore bianco traslucido, la netta prevalenza della frazione minerale lo rende più adatto agli studi sul carbonato; nella seconda, la percentuale maggiore di sostanza organica permette invece gli studi sul collagene.*

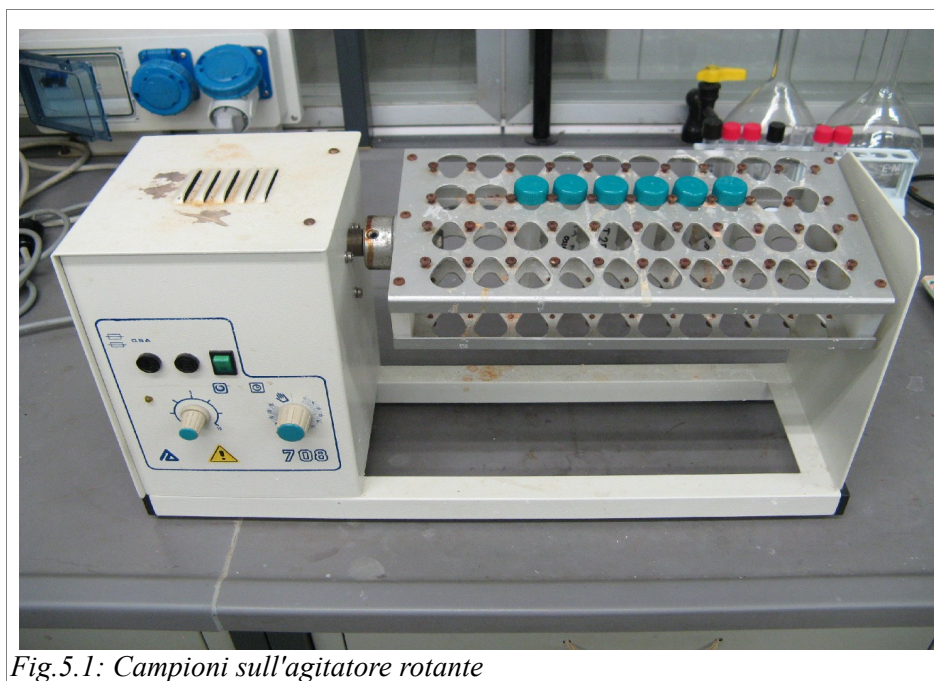
*Di seguito verranno descritte le procedure di preparazione e di analisi utilizzate per l'acquisizione dei dati isotopici dai reperti scheletrici*

### **5.1: PROCEDURA DI PRE-TRATTAMENTO DELL'APATITE E DI ESTRAZIONE DELLA CO<sub>2</sub>**

La procedura di purificazione dei campioni osteologici per gli studi sulla frazione carbonatica dell'idrossiapatite prevede una fase di rimozione meccanica dei macro-contaminanti presenti sulla superficie a cui fanno seguito una serie di trattamenti per l'eliminazione della sostanza organica e dei carbonati esogeni eventualmente presenti.

I campioni vengono sottoposti a pulitura dello strato superficiale mediante trapano elettrico, successivamente vengono prelevati 200 mg circa di campione per essere polverizzati in un mortaio d'agata.

Tale frazione è fatta reagire con NaClO al 2-3% per 24 ore su agitatore rotante al fine di rimuovere la fase organica presente (Fig.5.1). Al termine della reazione il campione viene risciacquato ripetutamente con acqua deionizzata fino a pH neutro con l'ausilio di una centrifuga (4000 giri/min per 5 min).



*Fig.5.1: Campioni sull'agitatore rotante*

La polvere è quindi fatta reagire con acido acetico 1M per 24 ore, sempre sull'agitatore rotante, in maniera tale da rimuovere i carbonati di adsorbimento i quali possono essere presenti nella matrice minerale a seguito dello scambio con gli ioni del terreno di deposizione durante il periodo dell'interramento. Il campione è nuovamente riportato a pH neutro

attraverso cicli di lavaggi in centrifuga con acqua deionizzata, quindi seccato in stufa a 60°C. Al termine di questo pre-trattamento fa seguito la procedura di estrazione e purificazione della CO<sub>2</sub>.

Circa 40 mg di polvere d'osso così trattata vengono inseriti in uno dei bracci di un dito di reazione appositamente costruito per tenere separati il campione dall'acido ortofosforico glaciale. Il dito viene collegato, per mezzo di un giunto munito di rubinetto, a una linea ad alto vuoto dove sia l'acido che la polvere subiscono un degassamento fino a una pressione di almeno 10<sup>-3</sup>-10<sup>-4</sup> mmHg. Dito e giunto vengono quindi immersi all'interno di un bagno termostatico a una temperatura di 50°C; qui, una volta che campione e H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> sono arrivati all'equilibrio con la temperatura dell'acqua, vengono messi a contatto reciproco e lasciati reagire per una notte. L'acido ortofosforico reagisce solo con la frazione carbonatica dell'apatite determinando un notevole frazionamento. Da ciascuna molecola di CaCO<sub>3</sub> si sviluppa infatti, una sola molecola di CO<sub>2</sub> con la conseguente perdita di uno dei tre atomi di ossigeno presenti.

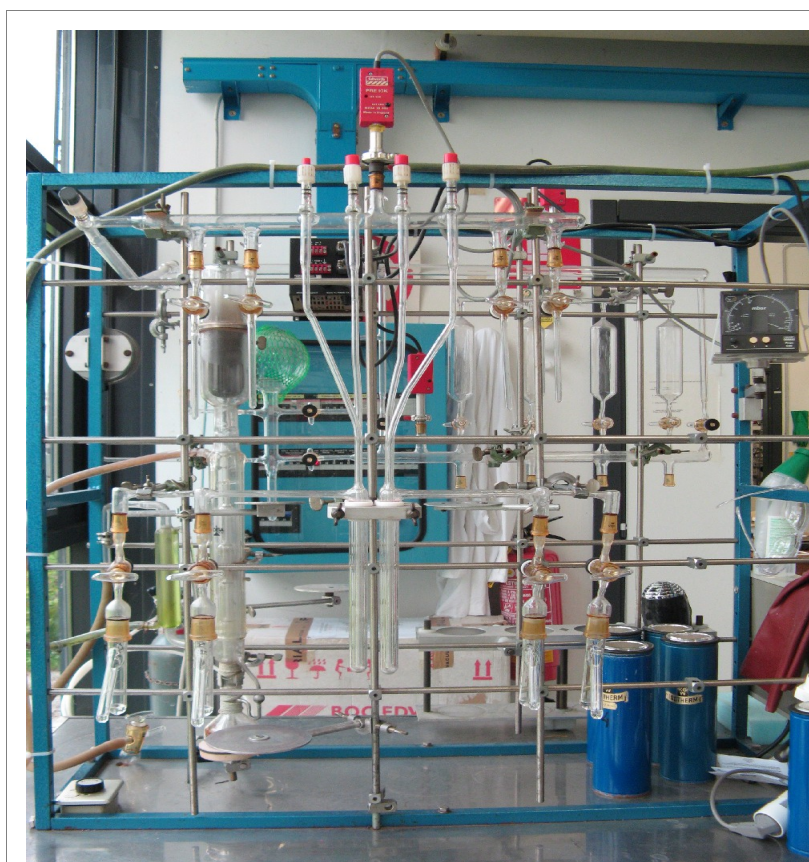


Fig.5.2: Linea a vuoto di purificazione ed estrazione della CO<sub>2</sub>

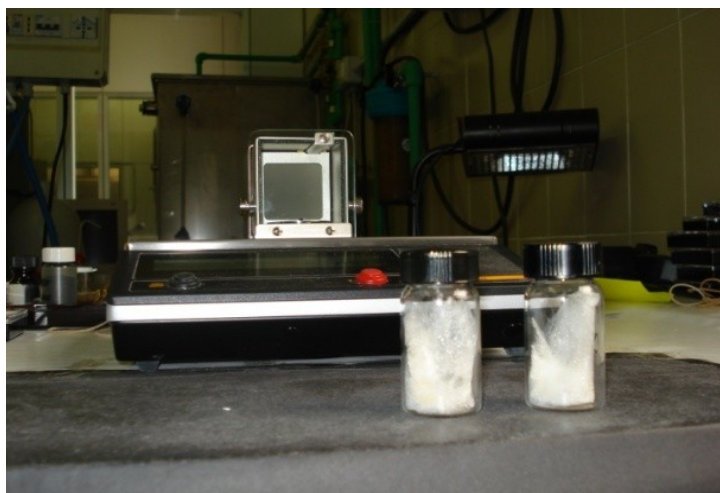
L'anidride carbonica sprigionata dalla reazione tra l'acido ortofosforico e la frazione carbonatica della polvere d'osso viene purificata sulla linea ad alto vuoto (Fig.5.2), utilizzando alternativamente azoto liquido ( $t = -196^{\circ}\text{C}$ ) ed una miscela criogenica ( $t = -80^{\circ}\text{C}$ ) formata da alcool etilico e azoto liquido. Al termine del processo di purificazione la  $\text{CO}_2$  priva dei componenti estranei condensabili in azoto liquido viene raccolta in appositi portacampioni in pyrex per l'analisi finale allo spettrometro di massa.

La stessa procedura di estrazione e purificazione della  $\text{CO}_2$  viene applicata anche ad un campione di carbonato di calcio standard alla stessa temperatura dei campioni in maniera tale da poter essere utilizzato direttamente per il confronto standard-campione senza dover ricorrere alle correzioni necessarie nel caso venisse usato uno standard preparato ad un'altra temperatura

## **5.2: PROCEDURA CHIMICA DI ESTRAZIONE DEL COLLAGENE**

La procedura prevede, anche in questo caso, la pulitura dei campioni per mezzo di un trapano elettrico e la triturazione grossolana; il campione, di un peso variabile tra i 150 e i 200 mg, viene inserito in provette di pyrex da 15 ml. All'interno di essa viene inserito acido cloridrico 0,5M per 72 ore alla temperatura di  $4^{\circ}\text{C}$  (l'acido viene sostituito con nuovo HCl 0,5M dopo le prime 48 ore e prosegue con altre 24 ore di reazione). La funzione dell'HCl è quella di sciogliere la frazione minerale del reperto scheletrico, dente o osso che sia, lasciando inalterato il collagene. I campioni così trattati sono portati a neutralità mediante una serie di lavaggi con acqua deionizzata e fatti reagire per 20 ore a temperatura ambiente con NaOH 0,125M. Al termine di questa reazione vengono nuovamente portati a neutralità e posti in stufa a  $100^{\circ}\text{C}$  per 17 ore. La soluzione così ottenuta viene trasferita in vials di pyrex, congelata e liofilizzata al fine di eliminare le molecole di acqua presenti. Alla fine del trattamento, il collagene estratto appare come una sostanza biancastra, di consistenza ovattata e aspetto filamentoso (Fig.5.3).

Il campione viene quindi pesato in piccole capsule di stagno ( $3,3 \times 5 \text{ mm}$ ) su una bilancia di precisione: per le analisi isotopiche sul carbonio sono prelevati 0,050 mg di sostanza, per quelle sull'azoto 0,250 mg. Per ogni campione la pesata è effettuata in doppio. A questo punto i campioni, pronti per l'analisi, sono introdotti nell'analizzatore elementare collegato in flusso continuo d'elio allo spettrometro di massa, per misurare la composizione isotopica di C e N e le relative abbondanze elementari.



*Fig.5.3: Esempio di collagene e bilancia di precisione utilizzata per pesare i campioni nelle capsule di stagno*

Nel caso dei reperti provenienti dalla necropoli di Al Khiday tale procedura è stata modificata (variando sia la quantità di campione da trattare, sia la durata delle reazioni e la concentrazione delle soluzioni) al fine di estrarre una quantità sufficientemente preservata di collagene per poter effettuare le analisi isotopiche.

In questo caso, quindi, si è deciso di prelevare un quantitativo di campione notevolmente superiore rispetto a quello richiesto dalla procedura standard (4-5 g a fronte dei 150-200 mg solitamente utilizzati). Dopo la pulitura iniziale i campioni sono stati posti all'interno di becker in vetro pyrex da 75 ml e trattati con 50 ml di HCl 0,5M a freddo ( $T=4^{\circ}\text{C}$ ) per 48 ore, cui hanno fatto seguito due cicli successivi (il primo di 48, il secondo di 96 ore) che hanno previsto la sostituzione dell'acido utilizzato con 25 ml di HCl 0,5 M, sempre a temperature attorno ai  $4^{\circ}\text{C}$ . I campioni così trattati sono stati portati a neutralità per mezzo di lavaggi con acqua deionizzata, a cui è seguito il trattamento con 25 ml di NaOH 0,125M per 20 ore a temperatura ambiente. I campioni, riportati a pH neutro, sono stati inseriti nelle provette da 15 ml e posti in stufa a  $100^{\circ}\text{C}$  per 17 ore. La soluzione così ottenuta è stata poi raffreddata, congelata e liofilizzata per poter infine eseguire le analisi al CHN.

Per le analisi isotopiche su carbonio e azoto si è deciso di prelevare quantitativi maggiori di campione rispetto a quanto fatto normalmente: per il C sono state fatte tre pesate, ognuna delle quali in doppio, di 0,100 mg, 0,250 mg e 0,500 mg; per l'N altre tre pesate, anche queste in doppio, di 0,250 mg, 0,500 mg e 0,800 mg.

Nonostante il maggiore quantitativo di campione analizzato, i dati si sono rivelati essere non significativi; si è deciso pertanto di mettere in atto una procedura veloce di estrazione del collagene.

I campioni, ripreparati utilizzando lo stesso procedimento già descritto di pulitura e triturazione, sono stati trattati con 50 ml di HCl 1M per circa 2 ore a temperatura ambiente. A effervescenza finita, i campioni sono stati sottoposti a lavaggi con acqua deionizzata fino a pH neutro, quindi fatti reagire con NaOH 0,125M per 20 ore a temperatura ambiente e portati nuovamente a neutralità per mezzo di lavaggi con acqua deionizzata. Il successivo procedimento di estrazione del collagene è invece rimasto invariato: dopo 17 ore a 100°C, i campioni sono stati raffreddati, congelati e liofilizzati. Si è quindi proceduto al prelievo di 0,500 mg di estratto per le analisi isotopiche sul carbonio e 1 mg per quelle sull'azoto (rispettivamente 10 e 4 volte di più rispetto al quantitativo normalmente prelevato per lo stesso tipo di analisi). Neanche questa volta, tuttavia, sono stati ottenuti dati soddisfacenti a causa dello scarso livello di conservazione del collagene.

### ***5.3: PROCEDURA PER LA PRECIPITAZIONE E LA FLUORURAZIONE DEL FOSFATO D'ARGENTO***

Dopo la consueta pulitura superficiale, il campione viene macinato in un mortaio d'agata in maniera tale da ottenere una polvere di granulometria inferiore ai 0,075 mm.

Questa polvere subisce una serie di trattamenti il cui scopo è la separazione quantitativa del fosfato e la sua purificazione eliminando tutti gli altri composti contenenti ossigeno come  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SiO}_2^4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , ecc.

Il procedimento utilizzato prevede che 40-50 mg di polvere d'osso vengano inseriti all'interno di una beuta da 100 ml nella quale si versano 50 ml di acqua ossigenata ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) al 30%. La beuta viene posta su una piastra elettrica termostabile ad una temperatura di 110°C per un periodo variabile a seconda dei campioni: indicativamente 2/3 giorni per campioni fossili, 1 o 2 settimane per quelli attuali.

Trascorso questo periodo di tempo la soluzione viene filtrata a freddo su filtri Millipore; il campione residuo viene quindi lavato abbondantemente con acqua deionizzata e seccato in stufa a 50°C. Dopo essere stato pesato, il campione viene inserito in una provetta in polipropilene da 15 ml nella quale si versano 2 ml di acido fluoridrico (HF) 2M. Per favorire l'inizio della reazione, la provetta viene immersa in un bagno ad ultrasuoni per un minuto

circa. Trascorse 24 ore si separa dalla soluzione il residuo solido di  $\text{CaF}_2$  e altre impurità, centrifugando le provette per 5 minuti ad una velocità di 4000 giri al minuto.

La soluzione viene versata in una provetta di nealgene da 50 ml, mentre il residuo solido, prima di essere eliminato, viene lavato tre volte con 2 ml di acqua deionizzata che viene aggiunta alla soluzione.

Per la separazione degli ioni fosfato dalla soluzione che li contiene, si usa la resina Amberlite (IRA 400 OH) che adsorbe gli ioni trivalenti ad un pH compreso tra 7 e 8; si modifica quindi il pH della soluzione da acido a basico, aggiungendo circa 2 ml di KOH e si introducono 2 ml di resina. Per facilitare l'adsorbimento le provette vengono poste su un agitatore rotante a bassa velocità. Dopo circa 24 h la soluzione acquosa viene gettata e l'Amberlite lavata tre volte con acqua deionizzata.

Affinchè l'Amberlite rilasci gli ioni fosfato, si versano 28 ml di nitrato d'ammonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) 0,5 M nelle provette che vengono nuovamente collocate sull'agitatore per altre 4 h; alla fine si separano resina e soluzione mediante un setaccio con fori di 0,0063 mm di diametro. La frazione liquida viene raccolta in un becker da 100 ml e la resina lavata prima con 10 ml e poi con 5 ml di acqua deionizzata per recuperare un eventuale residuo di fosfato rimasto adsorbito.

Dopo aver versato 15 ml di soluzione di nitrato d'argento ( $\text{AgNO}_3$ ) 0,2 M nel becker, questo viene messo in un bagno termostatico a  $70^\circ\text{C}$  per circa 7 ore, aggiungendo ogni 15 minuti 1-2 ml di acqua deionizzata.

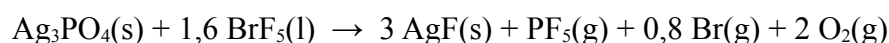
Con l'evaporazione dell'ammoniaca il pH della soluzione decresce e, quando raggiunge il valore di circa 8,5, l' $\text{Ag}_3\text{PO}_4$  comincia a precipitare sulla superficie della soluzione sotto forma di agglomerati di cristalli dendritici.

Il fosfato d'argento è uno dei pochi fosfati non igroscopici che precipita da una soluzione acquosa senza acqua di cristallizzazione (Baxter et Jones, 1910).

Terminata la precipitazione il campione viene filtrato a freddo ed asciugato in stufa a  $60^\circ\text{C}$  per un'ora.

La parte più delicata di tutto il procedimento è la reazione che consente l'estrazione dell'ossigeno dal fosfato d'argento. Essa avviene tra il fosfato d'argento ed una quantità di pentafluoruro di bromo ( $\text{BrF}_5$ ) superiore di 3-5 volte rispetto a quella stechiometrica: l'uso di questo reagente richiede alcune cautele dovute alla sua altissima tossicità e reattività.

L'equazione che rappresenta una reazione di questo tipo è la seguente:



Per realizzare questo procedimento è necessario disporre di una speciale linea di fluorurazione (Fig.5.4) che è normalmente composta da due parti: una in metallo (nichel puro o acciaio inossidabile) che comprende il sistema di reazione esposto all'azione del pentafluoruro di bromo, l'altra in vetro pyrex comprendente i tubi di collegamento, il sistema di raccolta dell'ossigeno liberato dalla reazione, la parte necessaria alla sua conversione a  $\text{CO}_2$  (camera di conversione) e il sistema di pompaggio per l'alto vuoto ( $10^{-5}$  mmHg) ottenuto mediante due pompe, una rotativa meccanica e una a diffusione di vapori d'olio (etere polifenilico). Il  $\text{BrF}_5$  liquido viene conservato in trappole di kel-f che offrono ottime caratteristiche di resistenza chimica e meccanica.

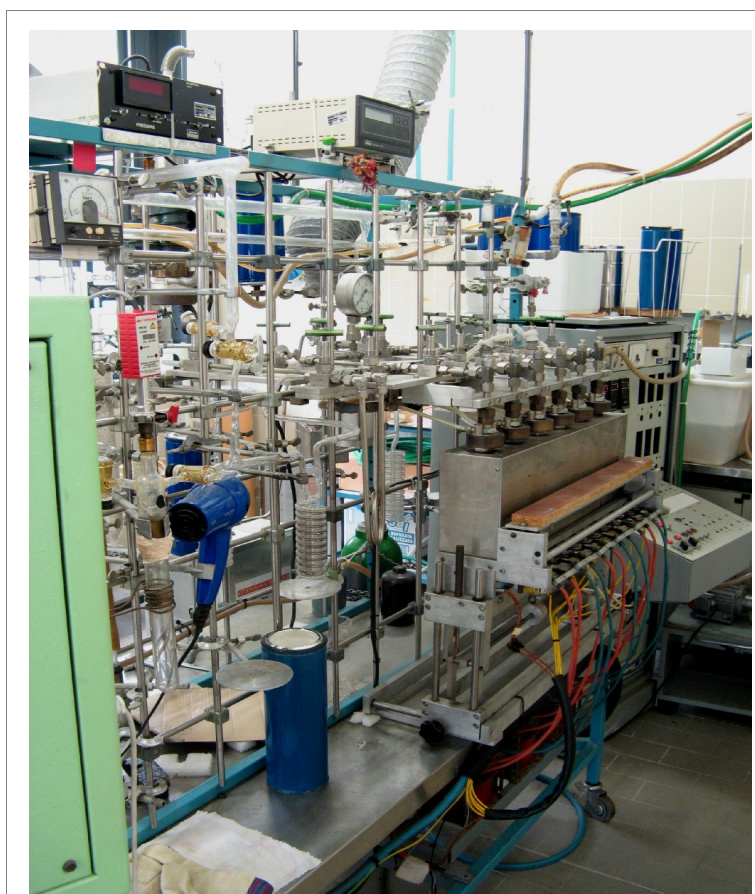
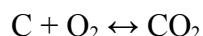


Fig.5.4: Linea di fluorurazione dei fosfati e di estrazione della  $\text{CO}_2$

Il procedimento seguito per la reazione di fluorurazione è il seguente: si fa espandere nella parte metallica della linea dell'argon puro anidro fino a raggiungere una pressione leggermente superiore a quella atmosferica in modo che, togliendo il coperchio dai tubi di reazione, il flusso di gas verso l'esterno impedisca l'entrata di aria e quindi il contatto tra vapor d'acqua atmosferico e superficie metallica interna dei tubi. A questo punto è possibile introdurre i campioni (circa 7-9 mg di  $\text{Ag}_3\text{PO}_4$ ) senza che il vapor acqueo atmosferico rischi di interferire con i risultati dell'analisi. Chiusi nuovamente i tubi, il gas inerte viene eliminato mediante il sistema di pompaggio.

Successivamente si introduce in ogni tubo di reazione una quantità di  $\text{BrF}_5$  circa cinque volte superiore a quella stechiometricamente necessaria alla reazione stessa e, con appositi forni, si scaldano i tubi fino alla temperatura di  $600^\circ\text{C}$  per circa 15 ore.

Al termine della reazione tutte le sostanze formatesi vengono condensate in azoto liquido ad eccezione dell'ossigeno, che rimane allo stato gassoso; quest'ultimo, trasferito nella camera di conversione viene trasformato in  $\text{CO}_2$  secondo la reazione:



Questa avviene mettendo in contatto l'ossigeno con un crogiolo di grafite riscaldata a  $700\text{-}800^\circ\text{C}$  per mezzo di un forno ad induzione a radiofrequenze. La temperatura della grafite non deve raggiungere valori troppo alti per evitare la formazione di monossido di carbonio ( $\text{CO}$ ) che falserebbe la misura isotopica. Man mano che la  $\text{CO}_2$  si forma viene condensata sulla parete interna della camera di conversione raffreddandola alla temperatura dell'azoto liquido. La reazione di conversione, che avrebbe una cinetica estremamente bassa, viene velocizzata grazie alla presenza di un catalizzatore costituito da un filo di platino avvolto attorno alla grafite stessa.

#### ***5.4: PRINCIPI DI SPETTROMETRIA DI MASSA: LO SPETTROMETRO DI MASSA PER ELEMENTI LEGGERI***

La spettrometria di massa è una tecnica analitica utilizzata sia per l'identificazione di sostanze sconosciute, sia per l'analisi di sostanze in tracce e può anche essere abbinata ad altre tecniche separative.

Lo spettrometro di massa, progettato nella sua prima elementare versione da Nier nel 1940

misura la composizione isotopica di composti diversi sfruttando la differenza di massa esistente tra le varie specie isotopiche. Gli spettrometri utilizzati nel campo della geochimica degli isotopi stabili e leggeri misurano i rapporti di abbondanza tra gli isotopi previa trasformazione del campione in un gas. Generalmente tali strumenti non determinano l'abbondanza assoluta di uno o più isotopi in un composto, ma forniscono con elevata precisione il rapporto tra gli isotopi rispetto allo stesso rapporto misurato in un composto standard al quale si riferiscono tutte le misure di quel tipo.

Lo spettrometro di massa (Fig.5.5) è essenzialmente costituito da un sistema per introdurre nell'apparecchio la sostanza da analizzare; un sistema per ionizzare la sostanza; un acceleratore che diriga gli ioni nell'apparato di misura; un sistema per separare gli ioni e registrare lo spettro di massa della sostanza.

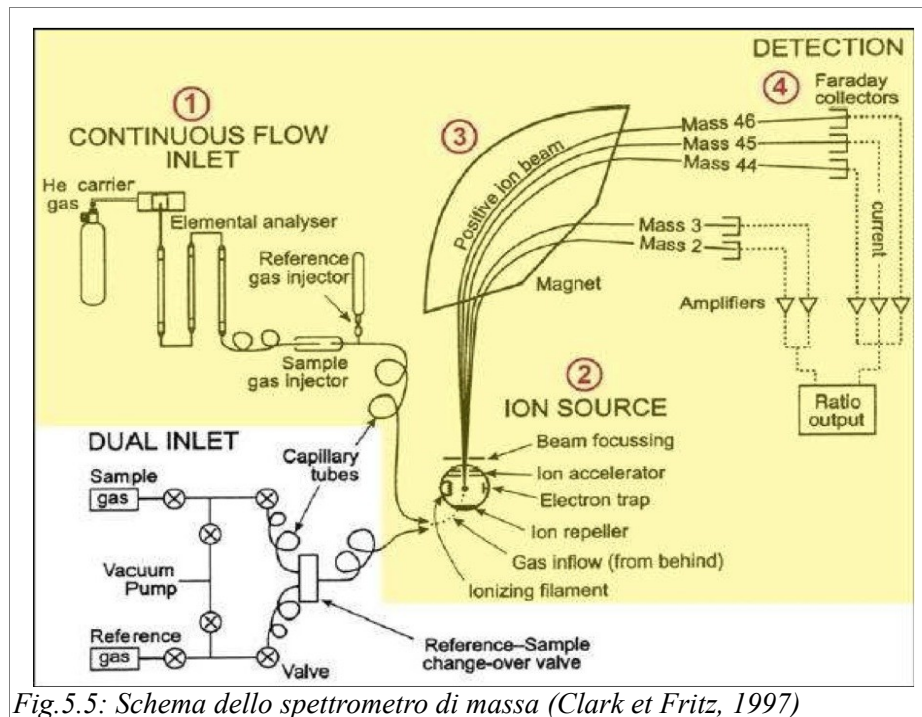


Fig.5.5: Schema dello spettrometro di massa (Clark et Fritz, 1997)

Per garantire una ragionevole accuratezza delle misure isotopiche, l'interno dello strumento deve trovarsi in condizioni di atmosfera estremamente rarefatta e ciò si ottiene mediante un opportuno sistema di pompaggio, generalmente realizzato negli strumenti moderni accoppiando una pompa turbomolecolare ad una pompa meccanica rotativa a doppio stadio utilizzata per il pre-vuoto. Questo sistema di pompaggio riesce a creare un "vuoto" all'interno dello spettrometro dell'ordine di  $10^{-8}$  mmHg in modo tale che le molecole del gas residuo,

presenti nel tubo analizzatore, risultino inferiori all'1% rispetto alle molecole di gas introdotte nel tubo stesso per l'analisi.

➤ **Sistema di ingresso del campione**

Viene anche definito iniettore e serve per permettere al campione in forma gassosa di accedere alla camera di ionizzazione

➤ **Camera di ionizzazione o sorgente**

Il campione gassoso viene bombardato da una corrente di elettroni di notevole energia cinetica (perpendicolare alla direzione di propagazione del gas) emessa da un filamento di tungsteno incandescente che ionizza le molecole del gas.

La frazione di elettroni che non urta contro le molecole è raccolta da una apposita trappola, mentre le molecole che non sono ionizzate vengono eliminate mediante il sistema di pompaggio.

Gli ioni così prodotti vengono accelerati con opportuni campi elettrici e focalizzati in modo da formare un pennello sottilissimo che entra nel tubo analizzatore.

L'accelerazione impone alle particelle una energia cinetica pari a :

$$Ve = \frac{1}{2} mv^2$$

dove:

m = massa dello ione

v = velocità acquisita

V = voltaggio del campo elettrico acceleratore

e = carica dello ione

➤ **Tubo Analizzatore e Campo Magnetico**

È costituito da un tubo metallico piegato ad U con un raggio di curvatura r variabile tra 30 e 18, il quale si trova immerso in un campo magnetico H orientato e di intensità variabile tra i 5000 e i 7000 Oersted, generato da un magnete permanente o da un elettromagnete.

Gli ioni che escono dalla camera di ionizzazione entrano nel tubo analizzatore e, per effetto del campo magnetico, subiscono una deflessione dal loro andamento rettilineo. La nuova traiettoria curvilinea ha un raggio di curvatura  $r$  che è direttamente proporzionale alla quantità di moto dello ione ( $mv$ ) e inversamente proporzionale al campo magnetico  $H$ .

Il tubo analizzatore viene attraversato dagli ioni accelerati; il campo magnetico sottopone la particella positiva ad una forza centripeta  $Hev$  che va ad opporsi a quella centrifuga  $mv^2/r$  derivante dall'accelerazione. Solo quando la forza centripeta bilancia perfettamente quella centrifuga la particella percorrerà una traiettoria circolare attraversando interamente il tubo ad  $U$  e giungendo al rivelatore.

L'azione del campo magnetico su ogni particella si può esprimere con la seguente equazione:

$$Hev = \frac{mv^2}{r}$$

dove:  $Hev$  = forza magnetica esercitata dal campo su ogni ione

$mv^2/r$  = forza centrifuga

Se sostituiamo  $v$  nella precedente relazione otteniamo:

$$r = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{2vm}{e}}$$

Da questa relazione risulta evidente che le particelle percorrono traiettorie con raggi di curvatura diversi a seconda del rapporto  $m/e$ : nel caso dei normali spettrometri per elementi leggeri la carica degli ioni è generalmente uguale ad uno, per cui l'elemento che ne determinerà il percorso, discriminandoli in fasci separati, sarà esclusivamente la massa ( $m$ ), in pratica a masse "piccole" corrispondono raggi "grandi" e viceversa.

➤ **Collettore**

E' costituito da una serie di fenditure poste in un cilindro di Faraday. All'uscita del campo magnetico il fascio di ioni si presenta suddiviso in pennelli caratterizzati da un ben determinato rapporto  $m/e$ , ognuno dei quali finirà per incidere sul collettore che gli compete. Modificando in modo opportuno l'intensità del campo magnetico e/o del campo elettrico di accelerazione, sarà possibile far variare la traiettoria della specie ionica considerata in modo tale da farla dirigere sul collettore desiderato.

➤ **Amplificatore**

E' costituito da un amplificatore elettronico, formato da una serie di elettrodi in cascata. Quando uno ione arriva sul primo elettrodo questo emette un fascio di elettroni che vanno a colpire il secondo elettrodo, il quale a sua volta emette una quantità maggiore di elettroni e così via. La corrente amplificata passa al registratore. Essa è direttamente proporzionale all'abbondanza dello ione con una particolare massa.

➤ **Detector e registratore**

Il risultato è una forte amplificazione del segnale che viene digitalizzato ed elaborato dal calcolatore dello spettrometro per la presentazione dello spettro di massa.

Gli spettrometri utilizzati in geochimica solitamente non riescono a leggere l'abbondanza assoluta degli isotopi degli elementi; la risposta che viene data è in effetti il rapporto tra due isotopi, riportato come differenza da uno standard.

In pratica, ogni specie ionica  $A_n^+$  trasporta una carica elettrica ed il flusso di tali cariche rappresenta una corrente che viene registrata e amplificata.

Di conseguenza, dette  $i_1$  e  $i_2$  le correnti trasportate dalle specie ioniche  $A_1^+$  e  $A_2^+$ , e  $A_1$  e  $A_2$  l'abbondanza relativa di due molecole isotopiche in un determinato composto si avrà che:

$$A_1/A_2 = i_1/i_2$$

Per ovviare alla presenza dell'errore strumentale associato ad ogni misura, la determinazione del  $\delta$  avviene attraverso un confronto costante tra il rapporto di abbondanza  $R$  del campione e dello standard di riferimento, ad esempio:

$$\delta^{18}O = \frac{m\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{campione}} - m\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{standard}}}{m\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{standard}}}$$

Per questo motivo vengono utilizzati spettrometri a doppio sistema di ingresso e a collettori multipli che permettono l'introduzione alternata nello strumento del gas campione e di quello standard. Lo spettrometro esegue così più volte il confronto tra i due gas e al termine dell'analisi fornisce un valore che corrisponde a quello medio di tutti i confronti eseguiti.

La precisione di questo valore dipende dall'abbondanza relativa dei due isotopi che vengono misurati e dalla riproducibilità interna dello strumento. Nel caso del rapporto  $^{18}O/^{16}O$  la riproducibilità dello strumento è dell'ordine di  $\pm 0,02\%$ . Inoltre per una buona accuratezza dell'analisi bisogna anche adottare standard il cui rapporto isotopico non si distanzi molto da quello del campione.

I risultati ottenuti vengono elaborati da un computer collegato allo spettrometro di massa; i tabulati riportano i valori corretti rispetto a PDB-1 e a V-SMOW.

Lo spettro di massa fornito dallo strumento, consiste in un cromatogramma che esprime i picchi relativi alle diverse masse degli isotopi investigati, riportando, in funzione del tempo di eluizione, l'intensità del segnale elettrico ovvero il rapporto tra la massa dell'isotopo più pesante e quella dell'isotopo più leggero.

Lo spettrometro utilizzato per le misure di carbonio e azoto nel collagene (collegato con l'analizzatore elementare CHN) è del tipo "a flusso continuo di elio" mentre quello utilizzato per le misure di ossigeno e carbonio nel carbonato è quello classico ad espansione del gas.

### **5.5: LA SPETTROMETRIA DI MASSA A FLUSSO CONTINUO D'ELIO**

Nello spettrometro di massa a flusso continuo, un flusso di elio viene fatto fluire a una velocità di circa 80 ml/min in modo continuativo nella sorgente dello spettrometro e trascina con sé i gas relativi a standard e campione.

Rispetto agli spettrometri convenzionali che operano immettendo i campioni in modo alternato e mantenendo all'interno dell'analizzatore una condizione di vuoto molto spinto ( $10^{-8}$  mmHg), quelli a flusso continuo lavorano ad una pressione di circa  $10^{-6}$  mmHg e ad una

velocità di pompaggio sufficiente a consentire l'eliminazione dell'elio.

Uno dei limiti maggiori che si riscontra nell'utilizzo di questo tipo di tecnica, è la minore precisione e accuratezza della misura dovuta al fatto che è possibile effettuare un solo confronto dei rapporti isotopici tra gas standard e gas campione, contro i diversi confronti possibili con l'uso del doppio sistema d'ingresso.

Per contro, la spettrometria di massa a flusso continuo rispetto al doppio sistema d'ingresso permette una drastica riduzione della quantità di gas campione necessaria per un'analisi, anche fino a valori inferiori di tre ordini di grandezza.

L'analisi del collagene è stata effettuata per mezzo di uno spettrometro di massa a flusso continuo collegato ad un analizzatore elementare.

L'analizzatore elementare (EA) consente la determinazione qualitativa e quantitativa di un dato elemento (quale carbonio, idrogeno, ossigeno o azoto), rivelandone l'abbondanza isotopica. Il dispositivo è dotato di un autocampionatore che permette l'introduzione fino a cinquanta campioni e facilitandone l'ingresso all'interno dello strumento.

Per l'analisi di carbonio e azoto, è stato utilizzato un analizzatore EA/NA-1100 configurato CHN (*Thermo Finnigan*) (Fig.5.6).

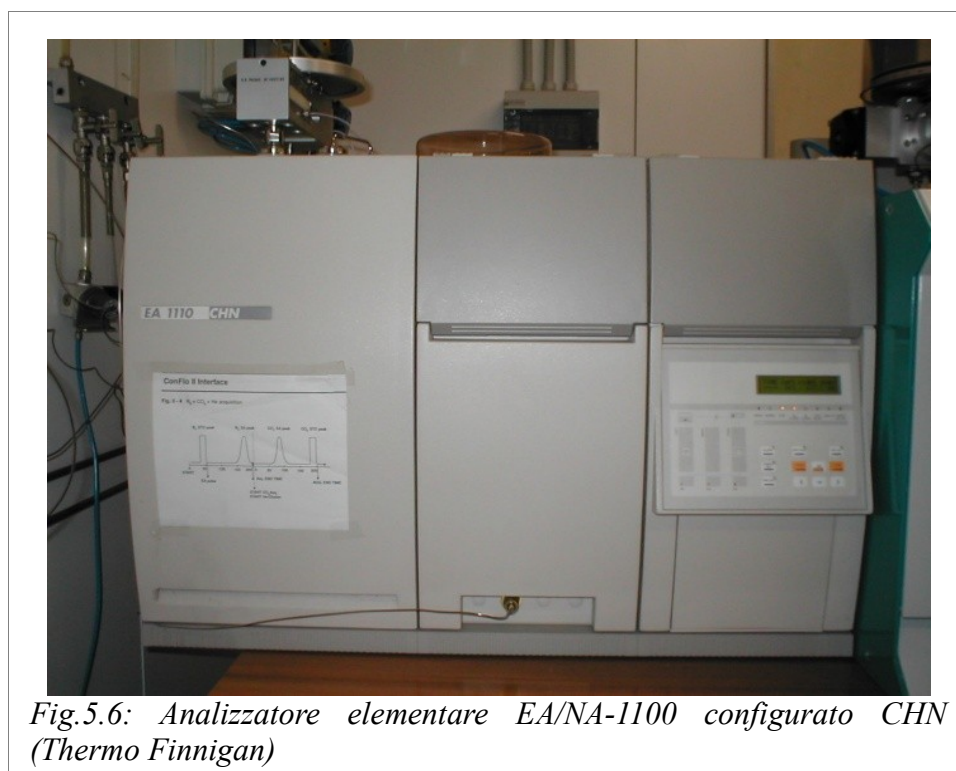


Fig.5.6: Analizzatore elementare EA/NA-1100 configurato CHN (*Thermo Finnigan*)

La tecnica utilizzata dall'analizzatore elementare si basa sulla messa a punto di due reazioni distinte che avvengono all'interno di due diversi tubi in quarzo (18,5 x 450 mm): una prima reazione di combustione controllata definita "flash combustion" (o ossidazione catalitica), quindi una di riduzione (Fig.5.7).

Il campione, dopo essere stato appropriatamente preparato, viene pesato all'interno di apposite capsule in stagno; e inserito in una precisa posizione dell'autocampionatore il quale lo farà cadere all'interno del primo reattore, contenente ossido di cromo e cobalto di argento. Qui il campione subirà la prima reazione (ossidazione) a una temperatura di 1025°C. L'introduzione preventiva di una quantità nota di ossigeno nel tubo trasportata dal flusso di elio, innesca una violenta reazione esotermica di combustione, che provoca la completa ossidazione del campione (comprese le sostanze termicamente più resistenti) e converte istantaneamente tutte le sostanze organiche, e alcune inorganiche, in una miscela di gas di combustione (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) e acqua a seguito dell'aumento della temperatura che raggiunge repentinamente i 1800°C (*flash combustion*).

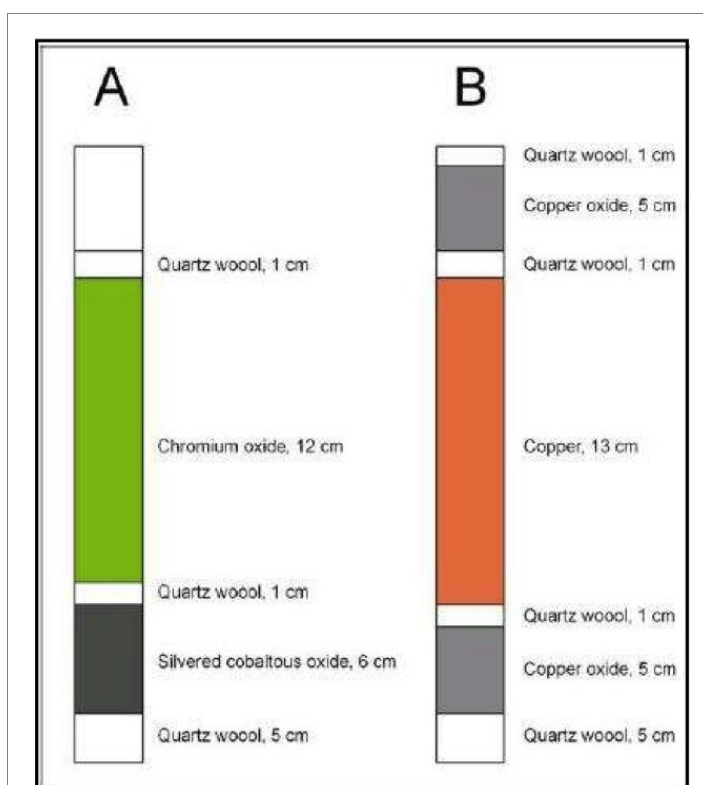


Fig.5.7: Rappresentazione schematica dei tubi di ossidazione (A) e di riduzione (B) del CHN (Thermo Finnigan, Operating Manual, 1998)

I prodotti di combustione così costituiti passano successivamente all'interno di un reattore di riduzione che lavora a una temperatura di 650°C e nel quale il rame nativo, ossidandosi, permette la riduzione in N<sub>2</sub> degli ossidi di azoto.

L'acqua e l'ossigeno in eccesso vengono bloccati all'interno di una trappola contenente magnesio perclorato anidro -Mg(ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>-, noto come *anidrone*, una sostanza igroscopica in grado di intrappolare l'acqua consentendone la separazione dal flusso dei restanti gas. La miscela di gas così sviluppata viene poi trasportata dal flusso di elio allo spettrometro di massa attraverso una colonna gascromatografica dalla quale i singoli gas, dapprima N<sub>2</sub> (in ordine standard e campione) e poi CO<sub>2</sub> (campione e standard) vengono eluiti in funzione della loro massa.

Per l'analisi di ossigeno e idrogeno viene invece utilizzato l'analizzatore elementare TC/EA (temperature combustion/elementar analysis) che prevede un solo reattore mantenuto a una temperatura di circa 1450°C, in carbonio all'interno e allumina all'esterno, preceduto da una trappola anidrone per bloccare l'acqua (Fig.5.8).



Fig.5.8: Analizzatore TC/EA (temperature combustion/elementar analysis)

Il campione, pesato in capsule d'argento questa volta, si decompone all'interno del reattore con conseguente formazione di CO (l'eccesso di carbonio presente nel reattore non permette

la formazione di CO<sub>2</sub>), H<sub>2</sub> e C libero, quest'ultimo bloccato da apposite trappole secondo la reazione:



Prima dello spettrometro IRMS, una colonna cromatografica separa idrogeno e monossido di carbonio; questi vengono quindi trasportati da un flusso di He verso lo spettrometro.

Per l'analisi di O e C del gruppo carbonato dell'idrossiapatite è invece utilizzato lo spettrometro di massa per elementi leggeri Finnigan Delta S (Fig.5.9). Ogni ciclo di studi su ossigeno e carbonio dei campioni analizzati è fatto in concomitanza a quello su campioni di marmo di Carrara, di composizione isotopica nota (<sup>13</sup>δ = +2,45 PDB-1; <sup>18</sup>δ = -2,43 PDB-1; <sup>18</sup>δ = +28,33 V-SMOW), utilizzato come standard. In questo caso le analisi sono condotte su campioni gassosi di CO<sub>2</sub> ottenuta dalla reazione tra il gruppo CO<sup>3-</sup> dell'apatite biogenica e l'acido ortofosforico glaciale con cui viene fatta reagire.



Fig.5.9: Spettrometro di massa Finnigan Delta S

Il carbonio e l'azoto adoperati come standard di laboratorio presso il laboratorio di geochimica isotopica dell'Università di Parma per l'analisi di campioni di sostanza organica (grado di purezza > 99,9995%), sono utilizzati in forma gassosa e per convenzione il loro valore isotopico, rispetto agli standard internazionali, è considerato pari a zero.

## 5.6: LA CALIBRAZIONE DEI DATI

La misura dei campioni è preceduta da quella di una serie di standard di calibrazione, i cui valori isotopici rispetto a quelli internazionali sono noti e per i quali si conosce la composizione percentuale di N e C. In tal modo si ha infatti la possibilità di rapportare i campioni agli standard internazionali.

Per l'analisi isotopica dell'azoto sono usati gli standard:

KNO <sub>3</sub>	$\delta^{15}\text{N} = 4,7 \pm 0,2$
IAEA N°1	$\delta^{15}\text{N} = 0,4 \pm 0,2$
IAEA N°2	$\delta^{15}\text{N} = 20,3 \pm 0,2$
USGS 25	$\delta^{15}\text{N} = 30,4 \pm 0,4$

Per quella del carbonio invece sono utilizzati:

USGS-24 (grafite)	$\delta^{13}\text{C} = -16,0 \pm 0,1$
IAEA-CH-6 (zucchero)	$\delta^{13}\text{C} = -10,4 \pm 0,2$
NBS 22 (olio)	$\delta^{13}\text{C} = -29,7 \pm 0,2$
Polietilene	$\delta^{13}\text{C} = -31,8 \pm 0,2$
Cellulosa	$\delta^{13}\text{C} = -25,54 \pm 0,2$

Per l'analisi elementare si usa l'UREA (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O) con percentuale di azoto e carbonio note, pari rispettivamente a 46,65% e 20%.

Per calcolare i valori reali isotopici dei campioni, si utilizza una retta di regressione attraverso la quale si correlano i valori di  $\delta$  degli standard di laboratorio misurati rispetto ai gas (C e N) utilizzati come standard di calibrazione ed i valori reali. In questo modo si evita il frazionamento che si potrebbe determinare nel tempo in seguito ai continui prelievi dei gas dalle bombole, permettendo una maggiore precisione delle misure isotopiche dei campioni rispetto agli standard internazionali. Al termine dell'analisi si effettua la calibrazione dei dati ottenuti attraverso il calcolo della retta di regressione secondo l'equazione:

$$\delta_{camp (PDB o N2)} = m * V_{camp (std bombola)} + q$$

Con:

$\delta$  = valore del  $\delta$  del campione calibrato contro lo standard internazionale;

$m$  = coefficiente angolare della retta di regressione (molto vicino a 1);

$V_{camp}$  = valore del  $\delta$  del campione misurato rispetto al gas standard di laboratorio;

$q$  = intercetta.

Si ha una buona significatività solo se il valore  $R^2$  della retta di regressione risulta essere molto vicino ad 1.

## **CAPITOLO 6**

### **ELEMENTI DI STATISTICA APPLICATI PER L'ELABORAZIONE DEI DATI**

*I dati isotopici acquisiti mediante le metodologie descritte nel capitolo precedente sono stati elaborati secondo alcune tecniche statistiche. In principio sono state determinate alcune misure di statistica descrittiva allo scopo di sintetizzare l'elevato numero di misure effettuate, in seguito sono stati applicati alcuni test di inferenza statistica per identificare la presenza di differenze significative tra i gruppi individuati.*

#### **6.1: GENERALITÀ**

Secondo la definizione di Giardina (1962): “La statistica, in senso moderno, è propriamente l'applicazione dei metodi scientifici alla programmazione della raccolta dei dati, alla loro classificazione, elaborazione, analisi e presentazione, e all'inferenza di conclusioni attendibili da essi”.

La statistica si suddivide in:

- **STATISTICA DESCRITTIVA**: che consiste nella rilevazione e in una prima elaborazione dei dati riguardanti i fenomeni collettivi (tabelle, grafici e indici che descrivono la distribuzione dei dati)
- **STATISTICA INFERENZIALE**: che permette di stimare le caratteristiche di un fenomeno collettivo partendo dall'analisi di un campione

Il metodo statistico, quindi, non si occupa di fenomeni singoli, ma di fenomeni collettivi allo scopo di ricavare le leggi che li governano, o almeno di evidenziare possibili regolarità per poterne preveder il comportamento futuro.

Le fasi fondamentali di un'indagine statistica sono tre:

- Rilevazione dei dati
- Rappresentazione dei dati
- Elaborazione dei dati

## **6.2: LA RILEVAZIONE DEI DATI**

La rilevazione dei dati consiste nel raccogliere le informazioni da una popolazione statistica secondo certi caratteri, ossia certi aspetti del fenomeno, e quindi nel raggrupparli.

I caratteri statistici si suddividono in

- *quantitativi*: espressi da numeri ottenuti da enumerazioni o da misurazioni
- *qualitativi*: espressi mediante aggettivi

## **6.3: LA RAPPRESENTAZIONE DEI DATI**

Dopo aver effettuato la rilevazione statistica i dati vengono rappresentati in forma di tabella e/o grafica (Soliani, 2009).

Le tabelle/matrici possono essere: a semplice entrata, a doppia entrata e tabelle composte, a seconda del numero di caratteri rilevati nella stessa popolazione statistica

Se il carattere rilevato è qualitativo la successione dei dati è detta *serie statistica*, se il carattere è quantitativo la successione è detta *seriazione statistica*.

Per alcune tabelle si parla di distribuzione statistica per indicare che la popolazione statistica è stata suddivisa tra le varie modalità sia qualitative, sia quantitative.

Fra le distribuzioni statistiche hanno particolare rilevanza la *distribuzione di frequenza*. Essa rappresenta l'insieme di possibili valori di una variabile con associata la frequenza osservata nel campione o nella popolazione statistica rilevata.

- *La frequenza assoluta*: rappresenta il numero ( $n_j$ ) di osservazioni corrispondenti ai diversi valori della variabile osservati
- *La frequenza relativa*: è il rapporto ( $p_j$ ) tra il numero di osservazioni corrispondenti ai diversi valori della variabile ( $n_j$ ) e le dimensioni del campione.

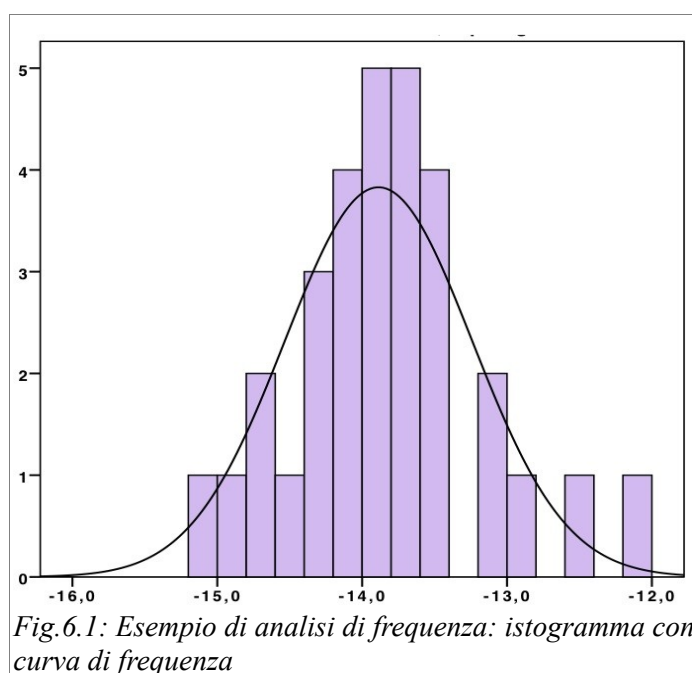
Le rappresentazioni grafiche servono per evidenziare, in maniera immediata, le quattro caratteristiche fondamentali di una distribuzione di frequenza:

- tendenza centrale o dimensione del fenomeno
- variabilità o dispersione
- simmetria
- curtosi

Le rappresentazioni grafiche che è possibile costruire sono numerose. Esse debbono essere scelte in rapporto al tipo di dati, quindi alla scala utilizzata.

In genere per dati quantitativi di norma si ricorre ad istogrammi o a poligoni.

Gli istogrammi sono grafici a barre verticali nei quali si riportano sull'asse orizzontale tanti intervalli consecutivi che individuano le classi, mentre sull'asse verticale è riportato il numero assoluto oppure la frequenza relativa (o percentuale), con le quali compaiono le frequenze di ogni classe (Fig.6.1).



Una rappresentazione grafica corretta permette di valutare con immediatezza se le classi costruite evidenziano le tre caratteristiche fondamentali della distribuzione dei dati: tendenza centrale, variabilità e forma.

Con poche eccezioni, le variabili quantitative dei fenomeni biologici e ambientali, mostrano una distribuzione normale, caratterizzata da un addensamento dei dati verso i valori centrali e da una dispersione simmetrica, con un declino regolare verso i due estremi.

#### **6.4: L'ELABORAZIONE DEI DATI**

Una serie di dati numerici è completamente descritta da tre proprietà principali:

- ✓ la tendenza centrale o posizione
- ✓ la dispersione o variabilità
- ✓ la formazione

##### **6.4.1: MISURE DI TENDENZA CENTRALE**

Le misure di tendenza centrale o di posizione servono per individuare il valore attorno al quale i dati sono raggruppati. Le misure sono tendenzialmente tre: la media, la moda e la mediana.

1. La **media aritmetica semplice** è la misura di tendenza centrale più comunemente utilizzata. Quando si parla solo di media, infatti, si intende la media aritmetica semplice. Essa è definita come la somma del valore di tutte le osservazioni, diviso il numero di unità.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

La media può anche essere considerata come il baricentro (punto di equilibrio) della distribuzione campionaria.

2. La **mediana** è il valore che occupa la posizione centrale in un insieme ordinato di dati. È una misura robusta in quanto poco influenzata dalla presenza di dati anomali. Le sue caratteristiche fondamentali sono due:

- è calcolata sul numero di osservazioni per cui si utilizza quando si vuole attenuare l'effetto di valori estremi
- in una distribuzione o serie di dati, ogni valore estratto a caso ha la stessa possibilità di essere superiore o inferiore alla mediana.

Essa è calcolata:

per numeri dispari:  $(n+1)/2$

per numeri pari: la media tra i valori definiti da  $n/2$  e  $(n/2) + 1$

3. La **moda** è il valore più frequente che compare in una distribuzione. Essa non è influenzata dalla presenza di valori estremi, tuttavia viene utilizzata solamente per scopi descrittivi in quanto è meno stabile e meno oggettiva delle altre misure di tendenza centrale.

Oltre alle distribuzioni di frequenza unimodali esistono delle distribuzioni che presentano due o più mode dette: bimodali o plurimodali.

Queste possono essere il risultato della scarsità di osservazioni o dell'arrotondamento dei dati; di norma, sono dovute alla sovrapposizione di più distribuzioni con tendenza centrale differente. Quando la distribuzione dei dati evidenzia due o più mode, quindi, è possibile che i dati non siano omogenei, ma formati da altrettanti gruppi con differenti tendenze centrali.

#### **6.4.2: MISURE DI DISPERSIONE**

Le misure di dispersione definiscono la forma, più o meno raccolta, della distribuzione intorno al valore centrale e forniscono indicazioni sul tipo di test da applicare.

1. **L'intervallo di variazione** (Range) è definito come la differenza tra il valore massimo e quello minimo

$$\text{Range} = \text{Valore Massimo} - \text{Valore Minimo}$$

I limiti di questa misura sono:

- l'impossibilità di conoscere la distribuzione dei dati entro l'intervallo, e di individuare la presenza di valori anomali
- la dipendenza dal numero di dati

2. **La differenza interquartile** è la differenza tra il 3° (Q3) e il 1° (Q1) quartile. Possiede il vantaggio di eliminare i valori estremi, collocati nella coda della distribuzione.
3. **La varianza** di una distribuzione si definisce come la media del quadrato degli scarti

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - M)^2 + (x_2 - M)^2 + \dots + (x_n - M)^2}{n}$$

4. **La deviazione standard** è, invece, la radice quadrata della varianza

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - M)^2 + (x_2 - M)^2 + \dots + (x_n - M)^2}{n}}$$

### 6.4.3: INDICI DI FORMA

Gli indici di forma riguardano due caratteristiche: la simmetria e la curtosi. Nella distribuzione unimodale si ha simmetria quando media, moda e mediana coincidono.

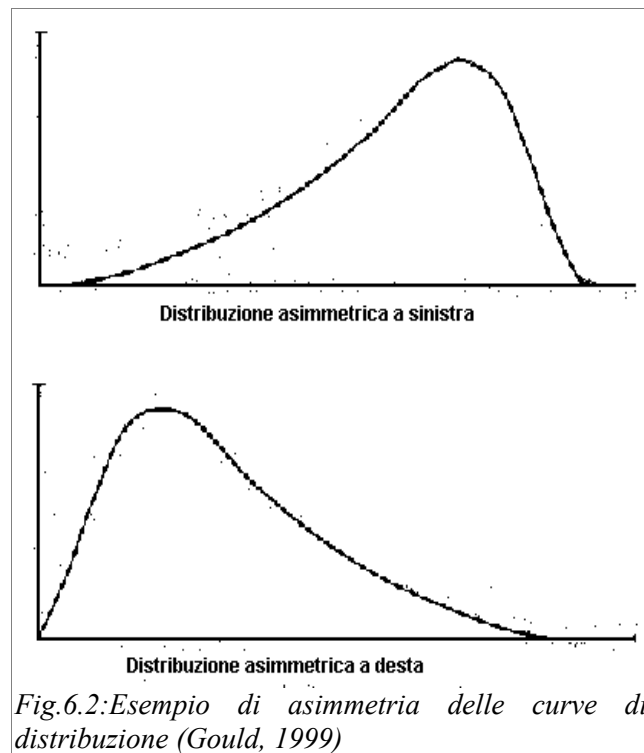
1. **L'asimmetria** in una distribuzione (Fig.6.2):
  - l'asimmetria è detta destra quando i valori che si allontanano dalla media sono quelli più elevati, cioè a destra dei valori centrali
  - l'asimmetria è detta sinistra quando i valori estremi che si allontanano dalle medie sono quelle minori

Per l'analisi dei dati di questo lavoro di tesi è stato misurato l'indice di asimmetria assoluta

$$d = \text{media} - \text{moda}$$

Se tale differenza è:

- $d = 0$  la curva della distribuzione è simmetrica
- $d > 0$  asimmetria positiva (destra)
- $d < 0$  asimmetria negativa (sinistra)



2. Per *curtosi* si intende il grado di appiattimento della distribuzione rispetto alla curva normale o gaussiana (Fig.6.3). In una distribuzione unimodale simmetrica la curva è detta:

- *mesocurtica*: forma uguale alla distribuzione normale
- *leptocurtica*: quando ha un eccesso frequenza delle classi centrali, una frequenza minore delle classi intermedie ed una presenza maggiore delle classi estreme: la distribuzione è più alta al centro e agli estremi e più bassa ai fianchi; la caratteristica più evidente è l'eccesso di frequenza dei valori centrali
- *platicurtica*: presenta una minore frequenza delle classi centrali e di quelle estreme, con una maggiore frequenza di quelle intermedie. È una distribuzione più bassa al centro e agli estremi e più alta ai fianchi.

L'indice di curtosi utilizzato in questo lavoro è quello di Fischer per cui:

- = 0 : mesocurtica
- > 0 : leptocurtica
- < 0 : platicurtica

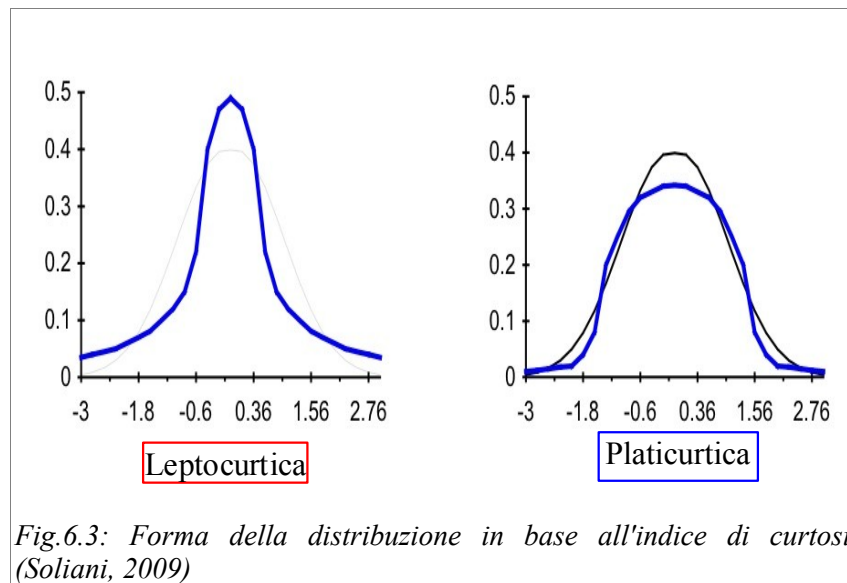


Fig.6.3: Forma della distribuzione in base all'indice di curtosi (Soliani, 2009)

### 6.5: I Box-Plot

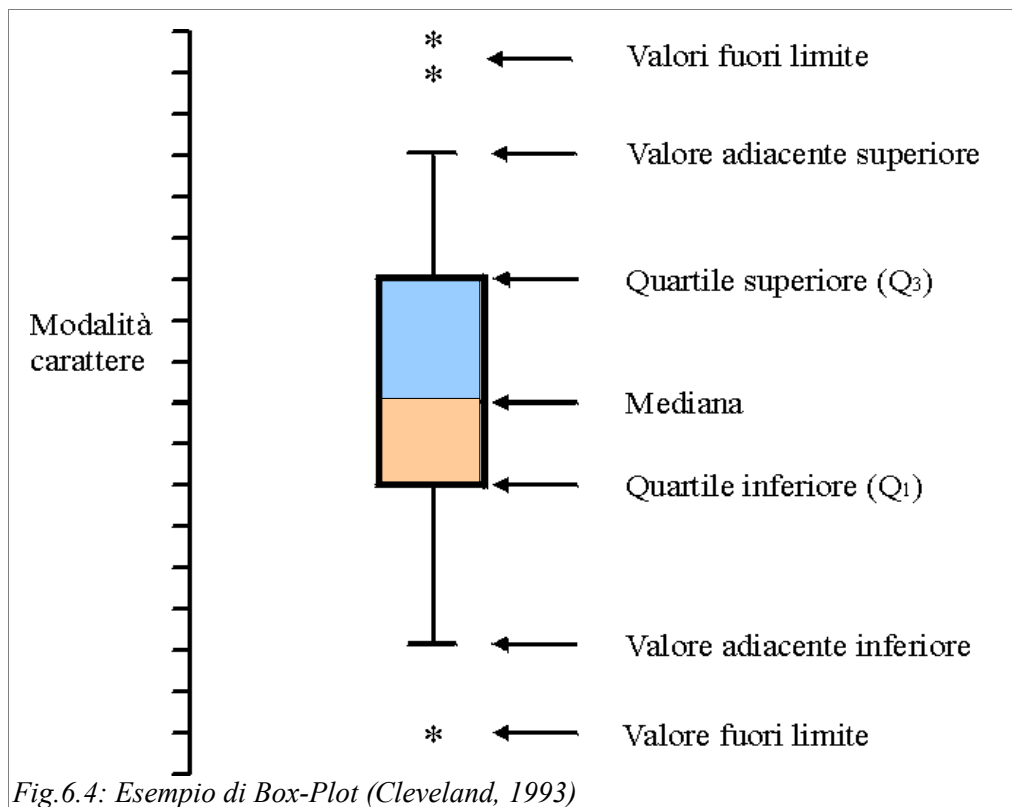
Tra le rappresentazioni grafiche della distribuzione dei dati risultano molto utili i diagrammi Box-and-Whisker (scatola e baffi) detti comunemente Box-Plot (Soliani, 2009).

Essi forniscono una quantità elevata di informazioni: ad esempio, riassumono in cinque numeri le informazioni contenute nella distribuzione:

- la mediana
- 1° e 3° quartile
- valore massimo e valore minimo

Inoltre, forniscono visivamente quattro caratteristiche fondamentali di una distribuzione statistica dei dati:

- la misura della tendenza centrale (mediana)
- il grado di dispersione o variabilità dei dati rispetto alla mediana
- la forma della dispersione dei dati, in particolare la simmetria
- la presenza e l'identificazione di un valore anomalo o outlier



Un **Box-Plot** presenta (Fig.6.4):

- ✓ una linea orizzontale, interna alla scatola, che rappresenta la mediana;
- ✓ la scatola è delimitata da due linee orizzontali:
  - la linea inferiore rappresenta il primo quartile
  - la linea superiore rappresenta il terzo quartile

La distanza tra il terzo ed il primo quartile è detta distanza interquartilica ed è una misura della distribuzione.

$$r = Q_3 - Q_1$$

È utile soprattutto quando sono presenti valori anomali in quanto tra il Q1 ed il Q3, per costruzione, sono compresi il 50% delle osservazioni collocate attorno al valore centrale

- ✓ le linee che si allungano dai bordi della scatola e che si concludono con altre due linee orizzontali (baffi) delimitano gli intervalli nei quali sono collocati:

- i valori minori di Q1 (nella parte inferiore)
- i valori maggiori di Q3 (nella parte superiore)

Se tutti i valori ricadono all'interno dei baffi allora nei dati raccolti non esistono valori anomali. Ne consegue che i valori esterni a questi limiti sono definiti valori anomali (outlier). Questi sono segnalati individualmente perchè costituiscono un'anomalia importante rispetto agli altri dati della distribuzione.

## **6.6: LA CLUSTER ANALYSIS**

La cluster analysis consiste in un insieme di tecniche statistiche atte ad individuare gruppi di unità tra loro simili rispetto ad un carattere o ad un insieme di caratteri presi in considerazione, e secondo uno specifico criterio. L'obiettivo che si pone è sostanzialmente quello di riunire unità tra loro eterogenee in più sottoinsiemi tendenzialmente omogenei. Le unità statistiche vengono, in altri termini, suddivise in un certo numero di gruppi a seconda del loro livello di somiglianza valutata a partire dai valori che un insieme di variabili prescelte assume in ciascuna unità.

La cluster analysis, a differenza di altre tecniche di statistica multivariata, non compie alcuna assunzione "a priori" sulle tipologie fondamentali esistenti che possono caratterizzare l'insieme di dati studiato.

L'applicazione della cluster analysis si articola in alcune fasi:

- ✓ scelta della variabile di classificazione delle unità osservate espresse nella stessa unità di misura ;
- ✓ scelta di una misura della dissomiglianza esistente fra le unità statistiche.  
In questo caso è stata scelta la distanza euclidea che corrisponde al concetto geometrico di distanza nello spazio cartesiano. Tale distanza è stata determinata sul vettore dei valori mediani dei gruppi;
- ✓ una volta scelta la misura di dissomiglianza occorre scegliere un idoneo algoritmo di raggruppamento delle unità osservate. In questo lavoro è stato scelto un metodo di tipo gerarchico che conduce ad un insieme di gruppi ordinabili secondo livelli crescenti.

### 6.6.1: I METODI GERARCHICI

I metodi gerarchici (Johnson, 1967; Everitt, 1979) rappresentano una situazione per cui da  $n$  grappoli di una sola unità si giunge, attraverso continue fusioni dei grappoli meno distanti fra loro, ad un unico grappolo che contiene tutte le  $n$  unità. Il prodotto finale dei metodi gerarchici può essere rappresentato graficamente attraverso un “dendogramma” o “diagramma ad albero” (Fig.6.5) nel quale sull'asse delle ascisse viene riportato il livello delle distanze, mentre sull'asse delle ordinate vengono riportate le singole unità. Ogni ramo del diagramma (linea verticale) corrisponde ad un grappolo. La linea di congiunzione orizzontale di due o più rami individua il livello di distanza al quale i grappoli si fondono.

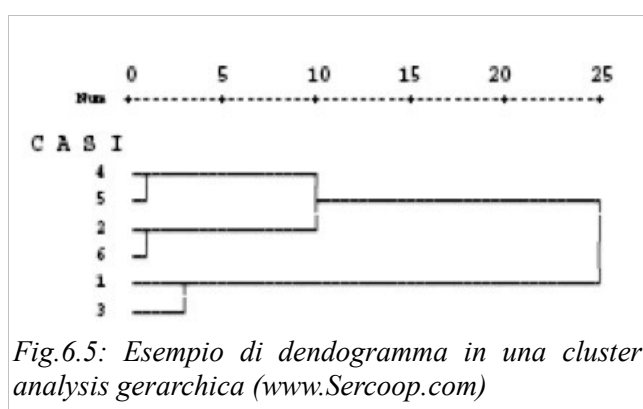


Fig.6.5: Esempio di dendogramma in una cluster analysis gerarchica ([www.Sercoop.com](http://www.Sercoop.com))

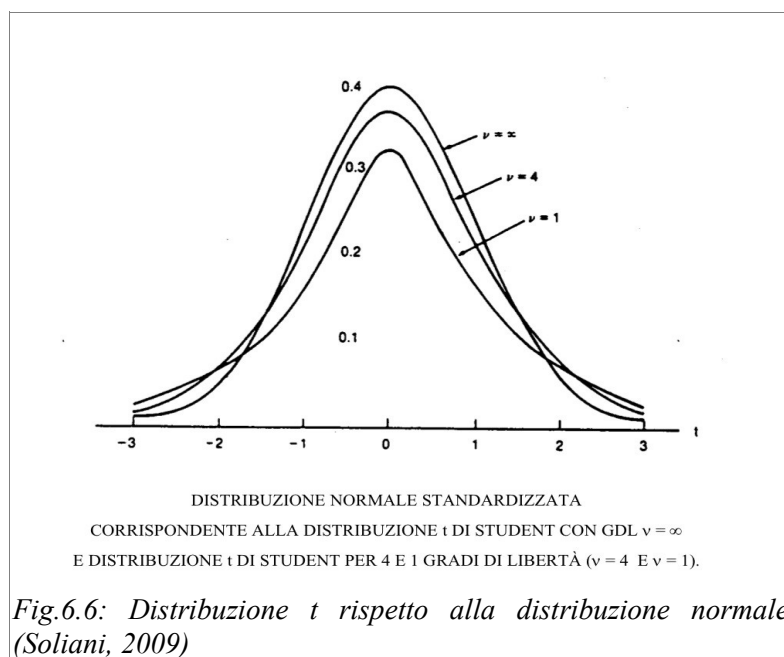
### 6.7: I TEST DI INFERENZA STATISTICA

Un test statistico ci consente di trarre delle conclusioni circa un'ipotesi. A questo scopo si utilizzano, in genere, i test statistici di inferenza “parametrici” ovvero quei test di significatività che si basano sui parametri fondamentali della statistica (media e deviazione standard) e che sono applicabili a variabili quantitative con curva di distribuzione approssimabile alla distribuzione normale o gaussiana (Soliani, 2009).

La variabile aleatoria  $t$  di Student per piccoli numeri di campioni rientra in questa categoria. Essa, infatti, presenta una curva di distribuzione delle probabilità caratterizzata da una forma simmetrica a campana che richiama quella gaussiana, ma con una dispersione maggiore quanto minore è il numero di gradi di libertà.

La variabile  $t$  di Student, rispetto alla distribuzione normale, è caratterizzato da un indice aggiuntivo detto “gradi di libertà” che è funzione sia del numero di osservazioni ( $n$ ), sia del numero di parametri da stimare.

In pratica, non esiste una sola curva  $t$  ma un'intera famiglia di distribuzioni  $t$ , una per ogni grado di libertà (Fig.6.6). Dovrebbero allora essere pubblicati interi volumi di tabelle dei suoi valori critici ma in realtà, si utilizza abitualmente una sola tavola sinottica che riporta i valori critici più importanti.



Il test di Student può essere utilizzato per due scopi fondamentali:

1. *per dati indipendenti*: per confrontare tra loro due gruppi diversi rispetto ad una singola variabile, per cui il test  $t$  si basa sulla differenza tra le medie calcolate nei due gruppi;
2. *per dati appaiati*: per confrontare tra loro due rilevazioni diverse fatte sullo stesso soggetto e, in questo caso, il test  $t$  si basa sulla differenza media tra le due rilevazioni.

### 6.7.1: IL TEST $T$ DI STUDENT PER DATI INDIPENDENTI

Nella ricerca ambientale le situazioni più ricorrenti sono quelle del confronto tra due medie campionarie. In questi casi la distribuzione  $t$  di Student può essere ricavata dal rapporto tra la differenza delle due medie campionarie e la sua deviazione standard:

$$t(v) = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Dove:

- $v = n_1 + n_2 - 2 =$  gradi di libertà
- $\bar{x}_1$  e  $\bar{x}_2 =$  medie campionarie
- $s_1$  e  $s_2 =$  deviazioni standard
- $n_1$  e  $n_2 =$  numero di campioni

Innanzitutto viene formulata un'ipotesi statistica di uguaglianza ( $H_0$ ):

$$H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$$

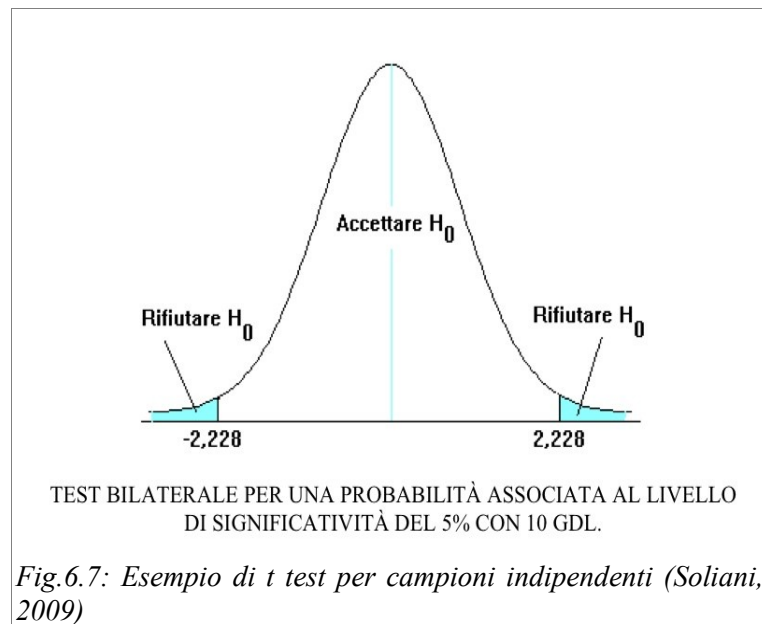
quindi si sceglie l'indice statistico adeguato (t di Student per n gradi di libertà), lo si calcola, e il valore ottenuto viene confrontato con il valore critico della sua distribuzione di frequenza.

Il valore critico  $t(\alpha)$  è il valore dell'indice statistico relativo ad  $\alpha$ , dove  $\alpha$  è la probabilità massima di errore che si intende accettare considerando l'ipotesi iniziale falsa invece che vera. Tale probabilità viene solitamente fissata pari a 0,05 (5%) o a 0,01 (1%). il valore  $(1-\alpha)$  rappresenta il livello di significatività.

La valutazione del test avviene confrontando l'indice statistico calcolato con il valore critico (Fig.6.7), per cui:

- se  $t(n) < t(\alpha)$  allora accetto l'ipotesi  $H_0$
- se  $t(n) > t(\alpha)$  allora rifiuto l'ipotesi  $H_0$

Il valore di  $t(n)$  è sempre considerato in modulo quando si effettua un test bilaterale a due code.



## 6.8: ANOVA

Nella ricerca sperimentale è frequente il confronto simultaneo tra le medie di due o più gruppi. Al fine di evidenziare tutte le possibili differenze significative tra le medie, non è corretto ricorrere al test t di Student per ripetere l'analisi tante volte quanti sono i possibili confronti a coppie tra i singoli gruppi.

Lo vietano due ordini di motivi:

- con il metodo del t di Student si utilizza solo una parte dei dati
- la probabilità di commettere un errore di primo tipo (rifiutare l'ipotesi nulla quando in realtà è vera) è valida solo per ogni singolo confronto

La metodologia sviluppata per verificare la significatività delle differenze tra le medie aritmetiche di vari gruppi, chiamata analisi della varianza e indicato con ANOVA dall'acronimo dei termini inglesi Analysis Of Variance, utilizza la distribuzione F.

### 6.8.1: ANALISI DELLA VARIANZA AD UN CRITERIO DI CLASSIFICAZIONE

Il modello più semplice di analisi della varianza, che può essere visto come un'estensione del test t di Student a più campioni indipendenti è detta ANOVA ad un criterio di classificazione (one-way) perchè ogni dato è classificato solo sulla base del trattamento o del gruppo al quale appartiene.

L'ipotesi nulla è :

$$H_0 = \text{tutte le medie sono uguali}$$

mentre l'ipotesi alternativa è:

$$H_0 = \text{le medie non sono tutte uguali o almeno una media è differente}$$

Per l'analisi statistica in questo modello non è richiesto che i vari gruppi abbiano lo stesso numero di osservazioni o di repliche.

Prima dell'applicazione di questo test parametrico, occorre verificare se sussistono le assunzioni di validità del test F che riguardano gli errori.

1. Gli errori devono essere tra loro indipendenti: la variazione casuale di ogni osservazione non deve essere influenzata da quella di un'altra.
2. Gli errori devono essere distribuiti normalmente: prima dell'applicazione del test deve essere controllata l'asimmetria e la curtosi della distribuzione, per verificare che non si discosti troppo dalla normale.
3. Gli errori devono avere le varianze dei vari gruppi tra loro omogenee.

Dopo la verifica delle condizioni di validità, la metodologia dell'analisi della varianza prevede il calcolo delle seguenti quantità:

- la devianza totale con i suoi gradi di libertà
- la devianza tra trattamenti
- la devianza entro trattamenti

Dividendo la devianza tra trattamenti e quella entro i trattamenti per i rispettivi gradi di libertà si ottengono:

- la varianza fra gruppi, che misura le differenze esistenti tra un gruppo e l'altro
- la varianza entro gruppi che misura la variabilità esistente attorno alla media aritmetica di ogni gruppo.

Come indice dell'uguaglianza tra le due varianze viene usato il test F di Fisher fondato sul rapporto varianza tra/varianza entro:

$$F_{(p-1, n-p)} = \frac{S_{tra}^2}{S_e^2}$$

Se è vera l'ipotesi nulla  $H_0$ :

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$$

il rapporto dovrebbe risultare uguale ad 1

Se è vera l'ipotesi alternativa

$$H_1 = \text{le } \mu_i \text{ non sono tutte uguali}$$

il rapporto dovrebbe risultare superiore ad 1.

I valori critici per i rispettivi gradi di libertà sono forniti dalla distribuzione F:

- Se il valore F calcolato è superiore a quello tabulato, alla probabilità  $\alpha$  prefissata, si rifiuta l'ipotesi nulla e si accetta l'ipotesi alternativa: almeno una media è diversa dalle altre.
- Se il valore di F calcolato è inferiore a quello riportato nella tabella allora si accetta l'ipotesi nulla.

Per individuare quali gruppi hanno influito sulla significatività di un'ANOVA è possibile applicare alcuni test detti "a posteriori".

In questo lavoro di Dottorato è stato applicato il test LSD (Least significance difference) che esegue tutti i possibili confronti tra le medie alla ricerca di qualche differenza significativa. È un test molto potente. Esso confronta i gruppi a coppie ma il valore critico di F e del test t di Student non dipendono dal numero di gruppi, per cui restano sempre costanti come se si effettuasse un solo confronto.

Una delle ipotesi alla base del modello ANOVA è che le varianze all'interno degli strati siano uguali tra loro. E' quindi necessario verificare l'ipotesi nulla di omogeneità delle varianze: se tale ipotesi viene rifiutata, la procedura standard è inadeguata. Uno dei più famosi test per verificare questa ipotesi è il test di Levene.

Nel caso in cui cada l'ipotesi di omogeneità delle varianze, è opportuno verificare l'ipotesi nulla dell'ANOVA (le medie negli strati sono tutte uguali) ricorrendo a test robusti all'assunzione di omogeneità delle varianze. Tra questi, quelli più comunemente implementati nei pacchetti statistici sono il test di Welch e il test di Brown-Forsythe.

Una volta accertata la presenza di differenze statisticamente significative è necessario individuare quali sono le medie diverse tra loro, procedendo quindi a verificare l'uguaglianza tra tutte le possibili coppie di medie attraverso i cosiddetti test post-hoc.

Quando le varianze non sono omogenee i test post hoc standard non possono essere utilizzati. Procedure adeguate in questo caso sono ad esempio i test di Tamhane (T2), di Games-Howell e il test di Dennet (T3).

## **6.9: LA REGRESSIONE E LA CORRELAZIONE**

In statistica è molto importante la connessione tra due variabili: una variabile dipendente dall'altra, oppure si influenzano reciprocamente.

La **regressione** è la funzione che esprime il legame di dipendenza di una variabile dall'altra. È molto utile perchè permette di valutare entro il limite dell'intervallo di dati rilevati, il valore della variabile dipendente al variare della variabile indipendente.

Date due variabili statistiche X ed Y, si considerano le coppie  $(x_i, y_i)$  dei valori associati. Lo studio della regressione consiste nella determinazione di una funzione matematica che esprima la relazione tra le variabili.

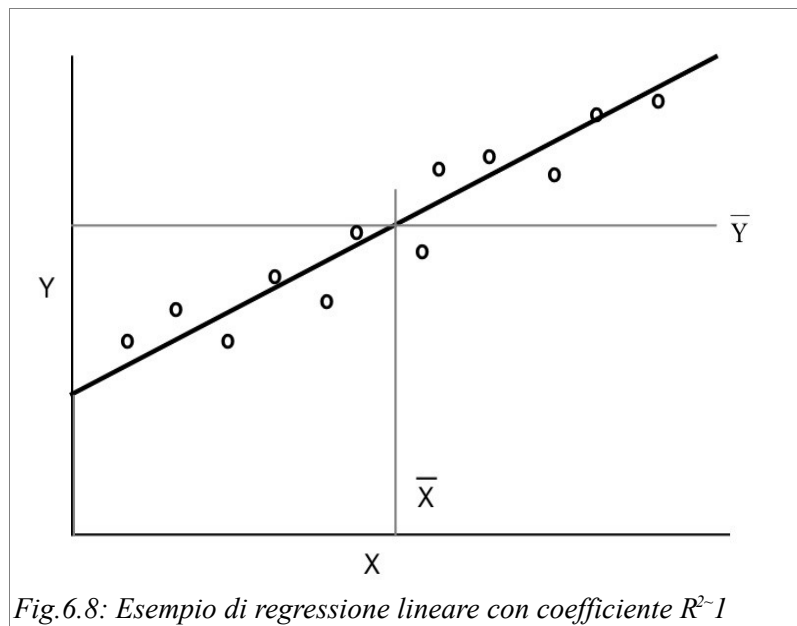
Se esiste una relazione lineare, i punti si distribuiscono vicino ad una retta; se invece, i punti sono molto dispersi non esiste alcuna relazione (Fig.6.8).

In genere viene applicato il Metodo dei minimi quadrati per ottenere la retta di regressione di Y rispetto ad X

$$y = a_1 + b_1x$$

dove:  $a_1$  = intercetta

$b_1$  = coefficiente angolare



La **correlazione** si misura mediante indici ed esprime l'intensità del legame tra due variabili. Fra i vari indici introdotti il più importante ed il più utile è il coefficiente di correlazione lineare o di Bravais-Pearson ( $r$ ).

Esso gode di importanti proprietà:

- è un valore adimensionale che non dipende dall'unità di misurazioni
- il suo valore è compreso tra -1 ed 1

In particolare:

- $r > 0$  correlazione diretta o positivamente
- $r < 0$  correlazione inversa o negativa
- $r = 1$  correlazione lineare perfetta diretta
- $r = -1$  correlazione lineare perfetta inversa
- $r = 0$  non esiste correlazione lineare

Il coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) indica quanto il modello della regressione lineare è aderente al fenomeno in studio. Per questo motivo  $R^2$  può essere utilizzato per stabilire la bontà di un modello lineare: quanto più  $R^2$  è prossimo ad 1, tanto maggiore è la bontà del modello lineare.

## **PARTE III**

### **PRESENTAZIONE E DISCUSSIONE DEI DATI**

## ***Capitolo 7***

### ***I SITI ITALIANI***

*In questo capitolo vengono presentati e discussi i risultati relativi ai reperti rinvenuti in varie località della Pianura Padana, nel sito della Caverna delle Arene Candide (SV) e in quello di località Masseria Candelarò (FG). La descrizione dettagliata dei campioni è riportata nelle Tabelle in Appendice (Pagg.1-11), nelle quali per ogni singolo sito archeologico sono descritti tutti gli individui analizzati e in particolare: il tipo di reperto (osso/dente), il sesso, l'età, la cronologia (fase culturale), i valori dei parametri isotopici ( $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  dell'apatite,  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  del collagene) nonché le percentuali elementari di C e N ed il rapporto C/N.*

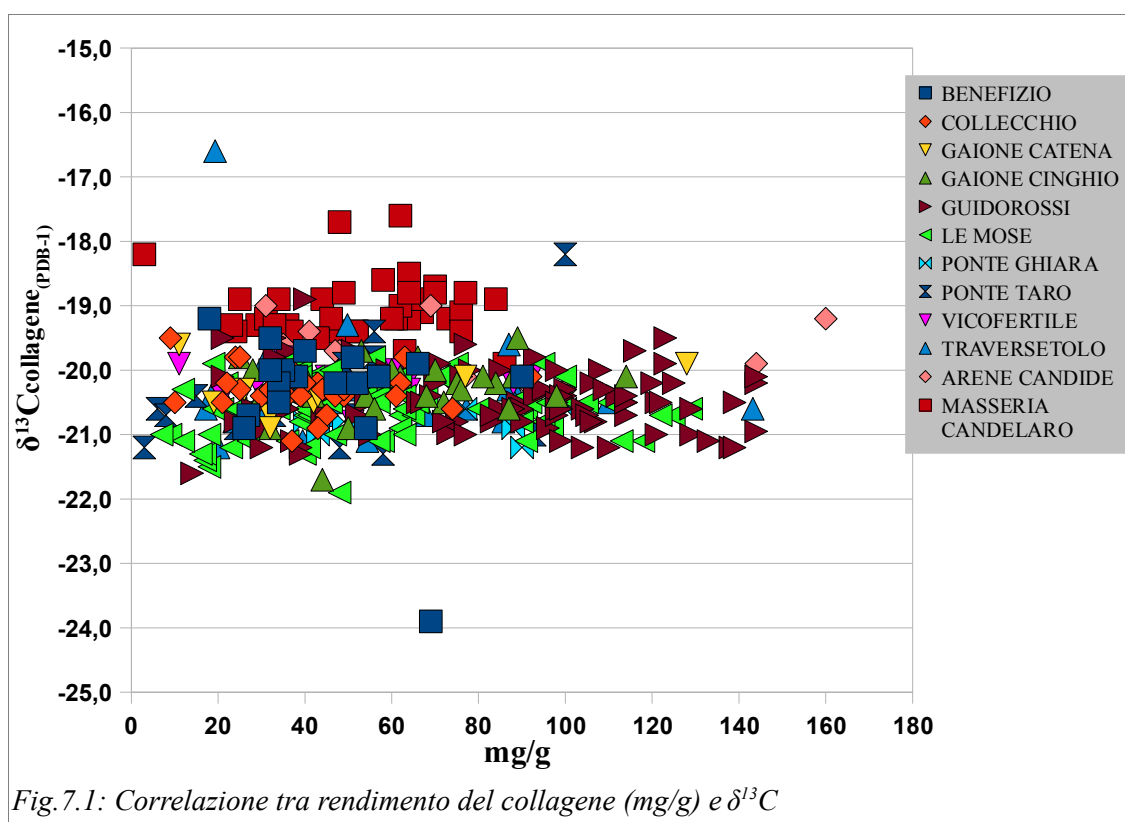
*Per quanto riguarda l'elaborazione e la discussione dei dati si procederà sempre suddividendo i campioni in funzione della tipologia, in quanto le informazioni fornite dai diversi tessuti scheletrici sono sostanzialmente diverse; inoltre, in molti casi saranno valutati in maniera separata i dati relativi ai siti di Le Mose (PC) e di Via Guidorossi (PR) poiché presentano delle variabilità interne non riscontrate negli altri gruppi.*

### 7.1: VALUTAZIONE DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DEI REPERTI

Dalla quasi totalità dei campioni sottoposti a trattamento chimico di estrazione del collagene è stato possibile estrarre quantità sufficienti di materiale per eseguire la misura della composizione isotopica.

I rendimenti ottenuti sono, nella maggior parte dei casi, vicini al valore ideale per le ossa antiche di 50 mg/g e, inoltre, il rapporto tra le percentuali elementari di C e N (per cui si rimanda all'Appendice) rientra all'interno del range previsti per un collagene preservato  $2,9 < C/N < 3,6$  (De Niro et Epstein, 1981). Ovviamente i reperti che non rispondevano a tale requisito sono stati eliminati dall'analisi dei dati.

Per essere maggiormente sicuri che i valori isotopici misurati siano effettivamente quelli originari, sono stati messi in relazione il rendimento (mg/g) con il  $\delta^{13}C$  (Fig.7.1) e con il  $\delta^{15}N$  (Appendice Pag. 35). Queste due variabili non devono mostrare alcun tipo di correlazione per dimostrare l'indipendenza dei valori isotopici dalla quantità di collagene estratto. Effettivamente, in questo caso, il fattore di correlazione ( $R^2$ ) calcolato per i siti è molto prossimo a zero confermando quindi la bontà dei dati.



La stessa osservazione può essere effettuata anche prendendo in considerazione il rapporto C/N in funzione dei segnali isotopici:  $\delta^{15}\text{N}$  (Fig.7.2) e  $\delta^{13}\text{C}$  (Appendice Pag.35). In entrambi i casi, ancora una volta, non si rileva alcuna correlazione tra le due variabili ( $R^2=0$ ).

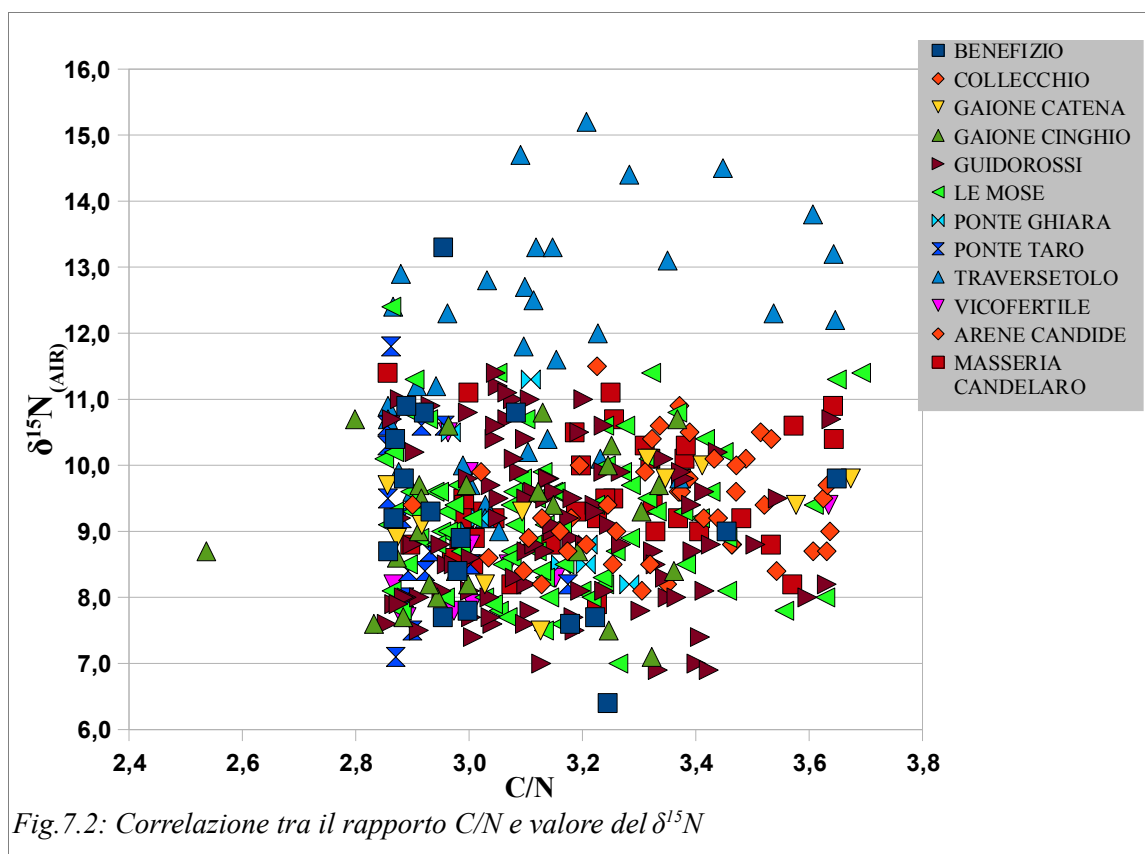


Fig.7.2: Correlazione tra il rapporto C/N e valore del  $\delta^{15}\text{N}$

Queste valutazioni ci forniscono già una buona stima sul grado di preservazione del campione e sull'attendibilità dei dati isotopici, ma per ottenere un'ulteriore conferma è stato misurato, su un piccolo gruppo di campioni, anche il valore del  $\delta^{18}\text{O}$  nel fosfato della bioapatite per poter essere confrontato con lo stesso valore determinato sul gruppo carbonato.

Diversi autori, infatti, hanno dimostrato l'esistenza di una relazione lineare tra i valori di composizione isotopica dell'ossigeno dei gruppi  $\text{PO}_4$  e  $\text{CO}_3$  dell'idrossiapatite biogenica.

Tra questi nel 1996 Iacumin et al., proposero per primi una retta di equilibrio tra le due fasi relativa ai denti e alle ossa dei mammiferi:

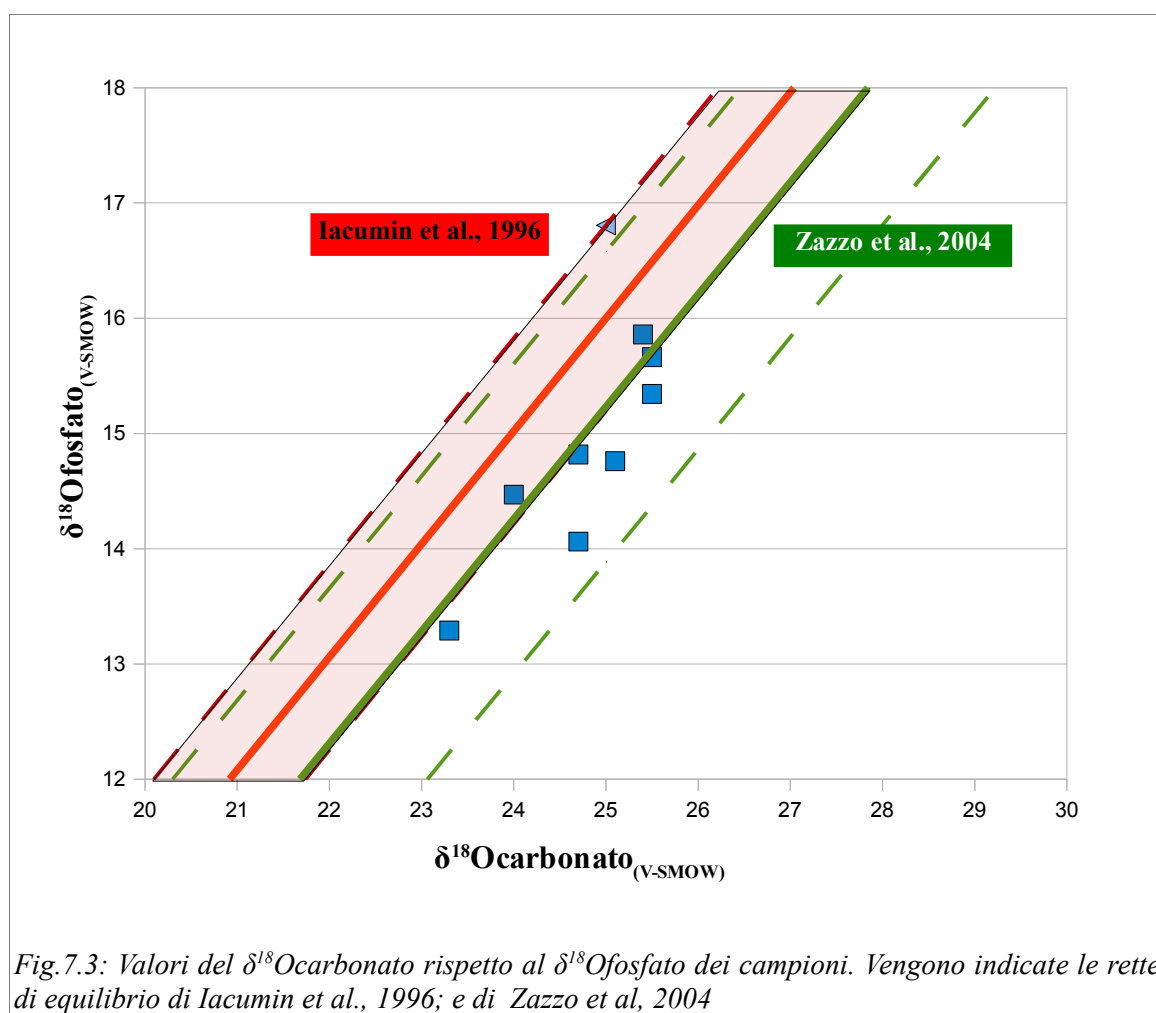
$$\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}} = 0,98(\pm 0,031) * \delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}} - 8,5(\pm 0,806)$$

Più recentemente Zazzo et al., (2004) hanno messo a punto la seguente relazione calcolata per gli ippopotami attuali:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}} = 0,97(\pm 0,044) * \delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}} - 9,117(\pm 1,346)$$

Nuove rette stanno emergendo da studi recentissimi, non ancora pubblicati, le quali dimostrano che questo tipo di relazioni sono probabilmente influenzate da effetti di tipo metabolico legati alla specie.

Nel grafico di Fig.7.3 vengono correlati i valori del  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}}$  e del  $\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}}$  misurati per i nostri campioni. Non essendo ancora disponibile una retta specifica per l'*homo sapiens* sono state riportate quelle disponibili in letteratura evidenziando anche il range di errore.



Possiamo osservare come i nostri campioni ricadano vicino ad entrambe le rette e ne seguono l'andamento indicando un buon grado di correlazione. Questo elemento, insieme alle valutazioni sul collagene, ci fanno ritenere con un buon margine di sicurezza che i valori isotopici presentati e discussi in questo elaborato siano quelli originari.

## 7.2: LA COMPOSIZIONE ISOTOPICA DEL CARBONIO DELL'APATITE

I valori di composizione isotopica del C dell'apatite e del collagene dei reperti scheletrici consentono di ricostruire la dieta degli individui e, in maniera indiretta, le caratteristiche dell'ambiente nel quale essi vivevano. Prenderemo prima in considerazione i risultati ottenuti dalla misura della composizione isotopica del C dell'idrossiapatite.

Statistiche descrittive $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$										
Sito	Tipologia	N	Minimo	Massimo	Range	Media	Errore std della media	Deviazione std.	Asimmetria	Curtosi
Le Mose	Osso	35	-15,0	-11,7	3,3	-13,2	0,1	0,9	-0,4	-0,6
	M1	31	-15,1	-12,2	2,9	-13,9	0,1	0,6	0,5	0,7
	M3	21	-14,3	-12,6	1,7	-13,7	0,1	0,5	0,9	0,3
	Incisivo	1	-14,5	-14,5	0,0	-14,5		.	.	.
Benefizio	Osso	9	-14,3	-12,0	2,3	-13,0	0,2	0,7	-0,9	1,1
	M1	9	-14,8	-12,8	2,0	-13,6	0,2	0,6	-0,7	0,6
	M3	2	-14,0	-13,2	0,8	-13,6	0,4	0,6	.	.
Collecchio	Osso	13	-13,0	-11,5	1,5	-12,1	0,1	0,4	-0,8	2,0
	M1	11	-15,3	-13,1	2,2	-13,9	0,2	0,6	-1,7	4,2
	M3	6	-13,6	-12,9	0,7	-13,4	0,1	0,3	1,3	0,8
Gaione Catena	M1	6	-14,4	-13,1	1,3	-13,7	0,2	0,4	-0,4	0,6
	M3	4	-14,1	-13,2	0,9	-13,6	0,2	0,4	-0,8	1,5
	Incisivo	1	-13,4	-13,4	0,0	-13,4		.	.	.
Gaione Cinghio	Osso	12	-12,9	-11,3	1,6	-12,0	0,1	0,5	-0,5	0,1
	M1	12	-14,4	-13,1	1,3	-13,6	0,1	0,4	-0,8	0,9
	M3	2	-13,4	-12,3	1,1	-12,9	0,6	0,8	.	.
Guidorossi	Osso	35	-14,6	-11,7	2,9	-13,1	0,1	0,8	-0,2	-1,0
	M1	30	-15,4	-13,5	1,9	-14,5	0,1	0,5	0,2	-1,1
	M3	20	-14,9	-13,3	1,6	-14,2	0,1	0,5	0,3	-1,0
	Canino	10	-14,7	-13,5	1,2	-14,0	0,1	0,4	-0,2	-0,7
Ponte Ghiara	Osso	3	-13,7	-12,7	1,0	-13,2	0,3	0,5	0,0	.
	M1	3	-15,1	-14,4	0,7	-14,7	0,2	0,4	-1,6	.
	M3	2	-14,3	-14,3	0,0	-14,3	0,0	0,0	.	.
Ponte Taro	Osso	6	-13,3	-12,4	0,9	-12,9	0,1	0,4	-0,2	-1,6
	M1	6	-14,3	-13,4	0,9	-13,9	0,1	0,3	0,6	0,5
	M3	3	-14,1	-13,8	0,3	-14,0	0,1	0,2	0,9	.
Vicofertile	Osso	5	-13,1	-12,6	0,5	-12,8	0,1	0,2	-0,2	-2,0
	M1	5	-14,8	-13,9	0,9	-14,4	0,2	0,4	0,1	-1,6
	M3	3	-14,1	-13,6	0,5	-13,8	0,2	0,3	-1,5	.
Traversetolo	Osso	23	-14,4	-11,3	3,1	-12,5	0,2	0,7	-0,8	1,2
	M1	17	-15,0	-12,6	2,4	-13,8	0,1	0,5	0,3	2,9
	Canino	12	-15,0	-12,3	2,7	-13,7	0,2	0,7	0,0	0,7
Arene Candide	Osso	7	-14,8	-13,4	1,4	-14,0	0,2	0,5	-0,5	-1,2
	M1	6	-14,0	-13,4	0,6	-13,8	0,1	0,3	1,1	-0,4
	M3	3	-14,1	-13,5	0,6	-13,8	0,2	0,3	0,9	.
Masseria Candelaro	Osso	17	-12,9	-10,2	2,7	-11,9	0,1	0,6	1,3	2,9
	M1	14	-13,4	-11,6	1,8	-12,4	0,2	0,6	-0,5	-1,1
	M3	10	-13,4	-11,6	1,8	-12,5	0,2	0,6	-0,4	-0,6

Fig.7.4: Tabella riassuntiva dei parametri di statistica descrittiva per i valori di  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carbonato}}$

A causa dell'elevato numero di misure effettuate abbiamo provveduto a determinare alcuni parametri di statistica descrittiva (Max., Min., Range, Media, Errore standard della media, Deviazione Standard, Curtosi ed Asimmetria) i quali forniscono una sintesi completa dei dati a disposizione. In particolare il Range o Intervallo di variazione, pur non mettendo in evidenza l'eventuale presenza di valori anomali, costituisce il metodo più semplice per definire la dispersione dei dati, mentre le misure degli indici di asimmetria e curtosi descrivono in maniera immediata la forma della distribuzione dei dati.

I risultati di questa prima elaborazione sono riportati nella Tabella di Fig.7.4 per ognuno dei siti archeologici e in funzione della tipologia del reperto.

Uno dei modi più efficaci per evidenziare le caratteristiche riportate in Tabella è la costruzione di diagrammi di tipo Box-and-Whisker (Box-Plot) i quali forniscono un elevato numero di informazioni. Essi, infatti, rappresentano visivamente le caratteristiche fondamentali di una distribuzione statistica di dati, vale a dire: la misura della tendenza centrale (mediana), il grado di variabilità dei dati rispetto ad essa, la forma della dispersione (in particolare l'asimmetria) e la presenza di valori anomali, detti anche outliers.

Nel grafico di Fig.7.5 sono rappresentati i Box-Plot che illustrano l'andamento del  $\delta^{13}\text{C}$  dell'apatite delle ossa in funzione della posizione geografica dei siti.

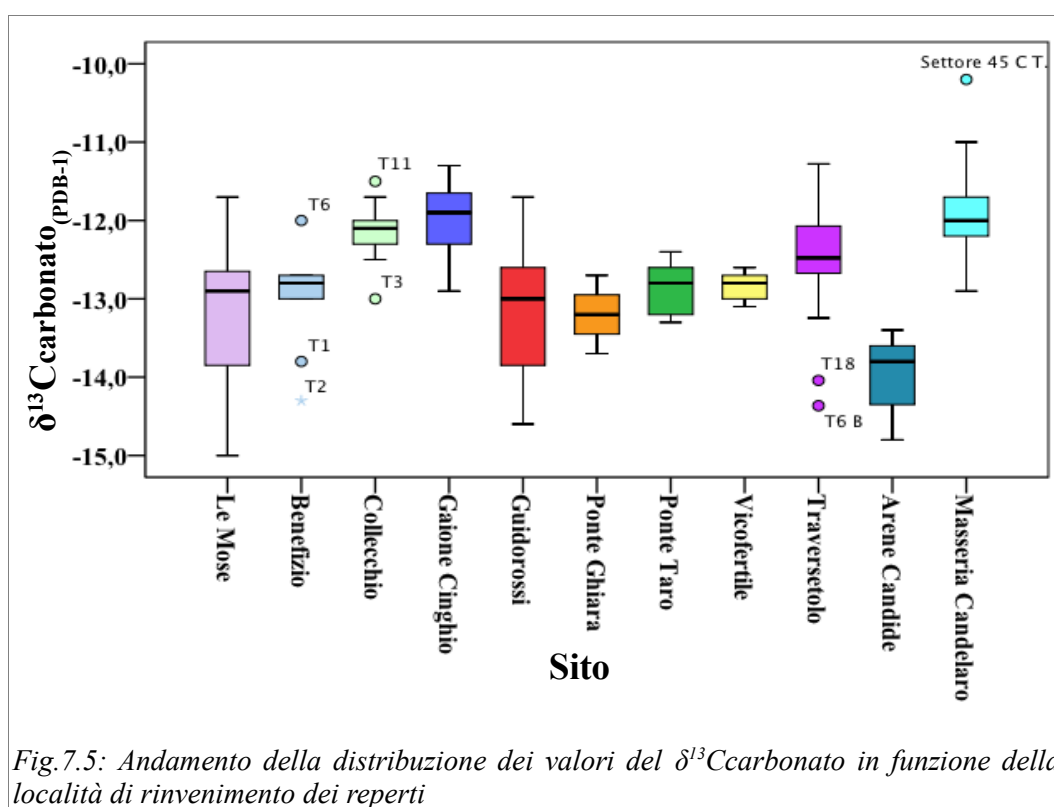
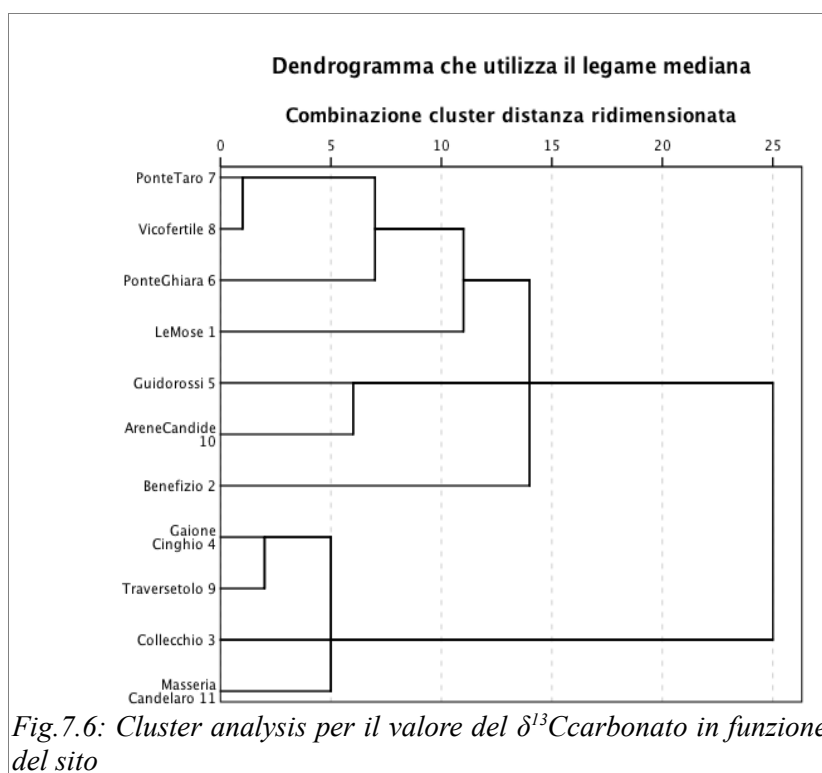


Fig.7.5: Andamento della distribuzione dei valori del  $\delta^{13}\text{C}$  carbonato in funzione della località di rinvenimento dei reperti

In generale si osserva una dispersione abbastanza contenuta dei valori isotopici, se si escludono gli outliers, con l'eccezione dei siti di Le Mose e di Via Guidorossi i quali presentano una variabilità più elevata, rispettivamente di 3,3 e 2,9 per mille, probabilmente dovuta al fatto che essi comprendono individui che appartengono a intervalli cronologici diversi. La forma della distribuzione è generalmente asimmetrica sinistra, a parte Ponte Ghiara che mostra una distribuzione simmetrica e Masseria Candelaro con una coda a destra, ma con grado di curtosi piuttosto variabile.

Per riuscire a confrontare la distribuzione dei valori tra i gruppi è stata effettuata la cluster analysis di tipo gerarchico della mediana la quale, sulla base delle distanze euclidee, ha consentito di associare i siti con maggiori affinità (Fig.7.6). Sono quindi stati individuati due grandi raggruppamenti il primo costituito dai siti di Collecchio, Gaione Cinghio, Traversetolo e Masseria Candelaro caratterizzati da valori della mediana leggermente meno negativi rispetto al secondo gruppo che comprende tutti i restanti siti con valori più negativi.



In secondo luogo sono stati analizzati i valori delle medie dei gruppi e, considerato l'elevato numero di siti e di conseguenza di possibili confronti, per verificare in maniera corretta la significatività delle eventuali differenze tra le medie aritmetiche, è stata utilizzata la metodologia dell'one-way ANOVA ( $p=0,05$ ). Il vantaggio di usare tale modello statistico

risiede nel fatto che non è richiesto che i vari gruppi abbiano lo stesso numero di osservazioni.

In questo caso, poiché il test di Levene ha provato la non omogeneità delle varianze, è stato necessario verificare l'ipotesi nulla dell'ANOVA ricorrendo a test robusti quali quelli di Welch e di Brown-Forsythe (Fig.7.7). Entrambi i test hanno dimostrato che è altamente probabile che le medie dei gruppi non siano tutte uguali, rifiutando quindi l'ipotesi  $H_0$  di uguaglianza tra le medie.

Test robusti per l'uguaglianza delle medie						
Tipologia		Statisticaa	df1	df2	Sig.	
Osso	$\delta^{13}\text{C}$ carbonato	Welch	13,522	10	29,770	0,000
		Brown-Forsythe	15,474	10	101,737	0,000

Fig.7.7: Esempio di test robusti per l'uguaglianza delle medie

Il passo successivo è stato quello di individuare tra quali medie esiste tale differenza e per farlo è stata utilizzata la procedura dei confronti multipli. In questo caso è stato scelto il test a posteriori di Tamhane (T2) il quale risulta appropriato quando i gruppi non sono bilanciati. Nel grafico di Fig.7.8 è riportato l'andamento delle medie il quale evidenzia visivamente le differenze statisticamente significative rilevate dal test.

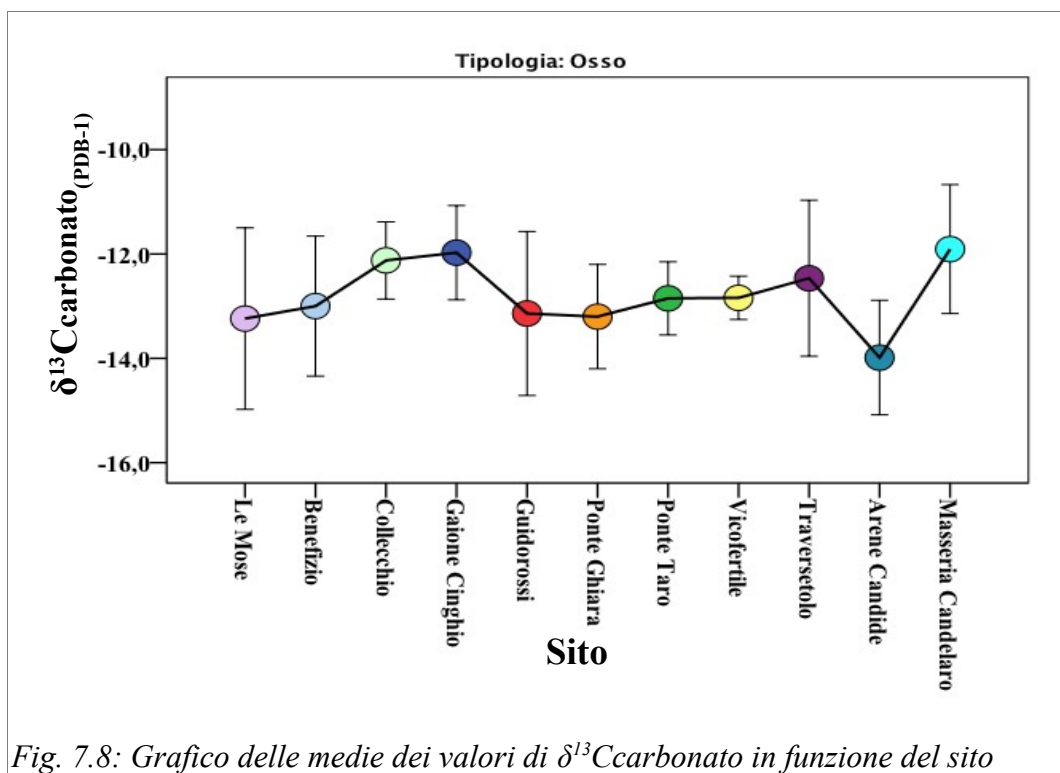
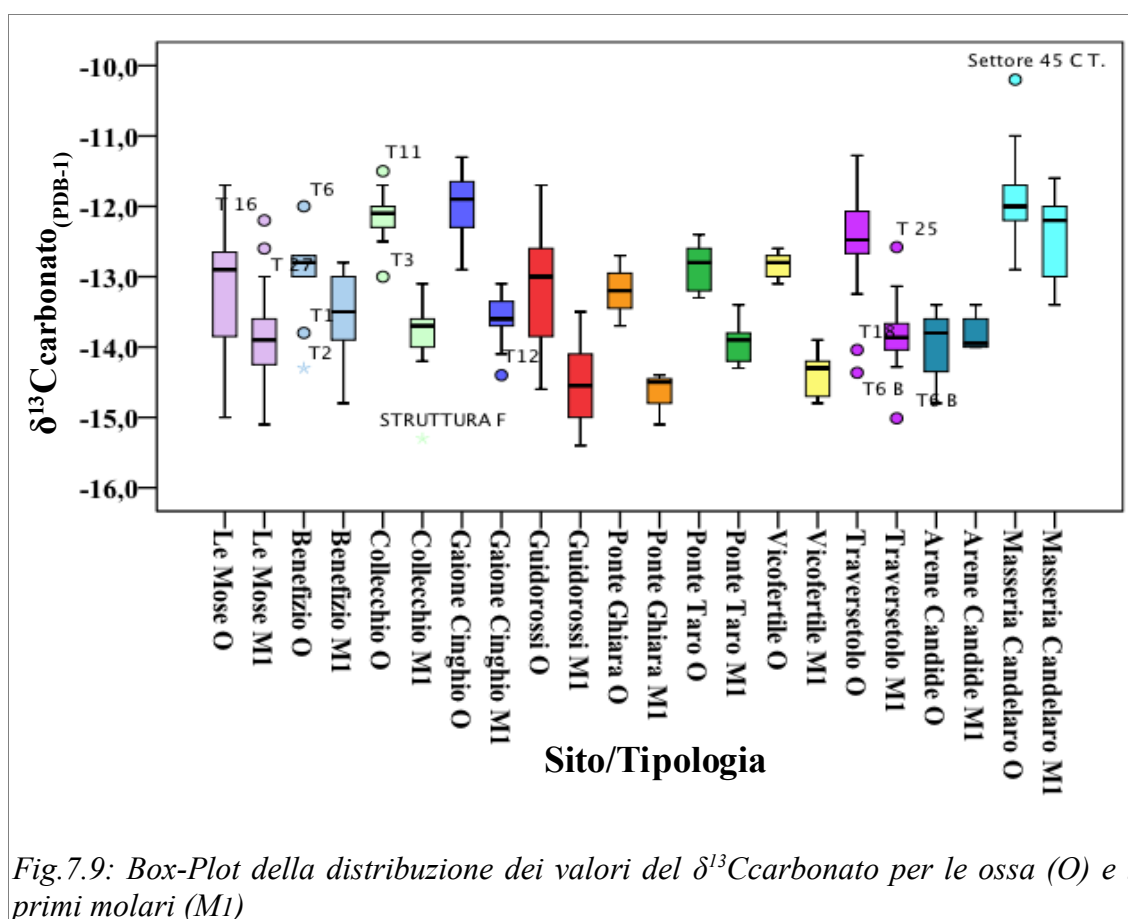


Fig. 7.8: Grafico delle medie dei valori di  $\delta^{13}\text{C}$ carbonato in funzione del sito

Quasi tutti i siti della Pianura Padana mostrano differenze statisticamente non significative per questo parametro isotopico ad eccezione dei siti di Collecchio e Gaione Cinghio i quali rispetto alle località di Le Mose, Guidorossi e Vicofertile presentano valori mediamente meno negativi, così come il sito di Via Traversetolo (PR) che differisce da quello di Le Mose (PC). Il sito delle Arene Candide presenta delle differenze statisticamente significative sia con i siti emiliani sopracitati, sia con quello di Masseria Candelaro. Quest'ultimo, infine, si distingue da tutti gli altri siti, tranne i soliti Collecchio, Gaione Cinghio e Traversetolo, presentando i valori medi in assoluto meno negativi (-11,9‰). Queste piccole differenze possono essere riconducibili per l'area della Pianura Padana al fatto che i gruppi sono cronologicamente eterogenei, mentre negli altri casi sono legate alla diversa posizione geografica delle località prese in esame.

Nel grafico successivo (Fig.7.9) i Box-Plot illustrano sempre l'andamento del  $\delta^{13}\text{C}$  per i diversi siti ma vengono confrontati i valori relativi alle ossa (O) e ai primi molari (M1).

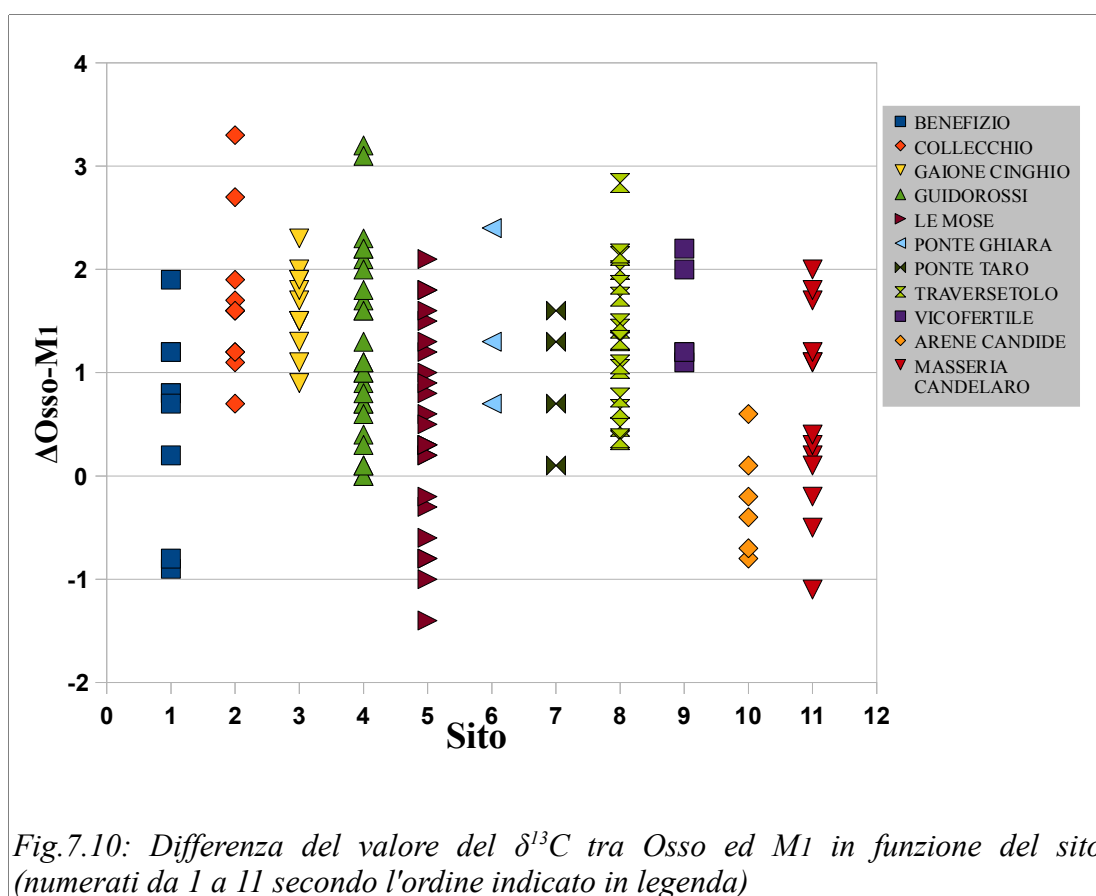


L'andamento dei valori già descritto per le ossa rimane confermato per i primi molari.

Il dato più interessante proviene dal confronto tra le ossa e i denti, in quanto sistematicamente per ciascuno dei siti (ad eccezione delle Arene Candide), indipendentemente dalla collocazione geografica, i valori isotopici del  $\delta^{13}\text{C}$  relativi alle ossa risultano sempre meno negativi rispetto a quelli misurati nel primo molare (andamento confermato anche dai test statistici).

Dalla letteratura è noto che per svariati parametri isotopici, compreso il  $\delta^{13}\text{C}$  del collagene, si verifica un arricchimento in isotopi pesanti nel primo molare rispetto all'osso in ragione del fatto che questo particolare dente, mineralizzando già prima della nascita, registra informazioni relative ai primi anni di vita di un individuo i quali risultano influenzati dall'allattamento; in questo caso, invece, si verifica la condizione opposta.

In effetti, se analizziamo in dettaglio (Fig.7.10) la differenza Osso-M1 per i singoli individui di ogni sito (numerati da 1 a 11 secondo l'ordine riportato in legenda) vediamo che essa risulta caratterizzata, nella maggior parte dei casi, da valori positivi (con l'eccezione del sito delle Arene Candide, per il quale però abbiamo pochi dati), confermando dunque l'arricchimento isotopico delle ossa rispetto al primo molare.



Se valutiamo l'entità media di tale differenza in funzione del sito (Tabella di Fig.7.11), escludendo le Arene Candide, noteremo che essa varia da un minimo di  $0,5\pm 1,0\text{‰}$  per il sito di Le Mose ad un massimo di  $1,7\pm 0,7\text{‰}$  per quello di Collecchio. Complessivamente il valore medio dell'arricchimento dell'osso rispetto al primo molare è dell'ordine di  $1,1\pm 0,9\text{‰}$ .

Sito	$\Delta$ Osso-M1 (media ‰)
Le Mose	$0,5\pm 1,0$
Benefizio	$0,6\pm 0,8$
Collecchio	$1,7\pm 0,7$
Gaione Cinghio	$1,6\pm 0,4$
Via Guidorossi	$1,2\pm 0,9$
Ponte Ghiara	$1,5\pm 0,9$
Ponte Taro	$1,0\pm 0,6$
Vicofertile	$1,5\pm 0,5$
Via Traversetolo	$1,3\pm 0,3$
Arene Candide	$-0,2\pm 0,5$
Masseria Candelaro	$0,6\pm 0,9$

Fig.7.11: Valore della differenza tra Osso ed M1 in funzione del sito di appartenenza dei campioni

Inoltre, lo stesso tipo di andamento (vedi grafici in Appendice Pagg. 12-13) è stato descritto, sempre mediante opportuni test statistici, anche nel caso del terzo molare il quale, mineralizzando a partire dai 7/8 anni d'età, non dovrebbe mostrare effetti metabolici legati all'allattamento ed essere quindi confrontabile con i valori delle ossa.

Per questo parametro isotopico, invece, la differenza Osso-M3 (Fig.7.12) per i singoli individui di ogni sito è sempre mediamente positiva (tranne che per le Arene Candide), per cui ancora una volta l'osso risulta arricchito in isotopi pesanti rispetto al dente.

In particolare i valori oscillano tra  $0,3\pm 1,1\text{‰}$  di Le Mose e  $1,4\pm 0,5\text{‰}$  di Collecchio con un valore medio complessivo pari a  $0,8\pm 0,8\text{‰}$ .

Sito	$\Delta$ Osso-M3 (media ‰)
Le Mose	0,3±1,1
Benefizio	0,8±0,4
Collecchio	1,4±0,5
Gaione Cinghio	1,0±0,4
Via Guidorossi	1,0±0,9
Ponte Ghiara	0,9±0,4
Ponte Taro	1,1±0,4
Vicoferile	0,9±0,5
Arene Candide	-0,4±0,3
Masseria Candelaro	0,8±1,0

Fig.7.12: Valore della differenza tra Osso ed M3 in funzione del sito di appartenenza dei reperti

L'analisi statistica, infine, non ha evidenziato delle differenze significative tra M1 ed M3 (a parte poche eccezioni), probabilmente anche a causa del ridotto numero di terzi molari a disposizione, che in alcuni casi rende poco attendibile il confronto.

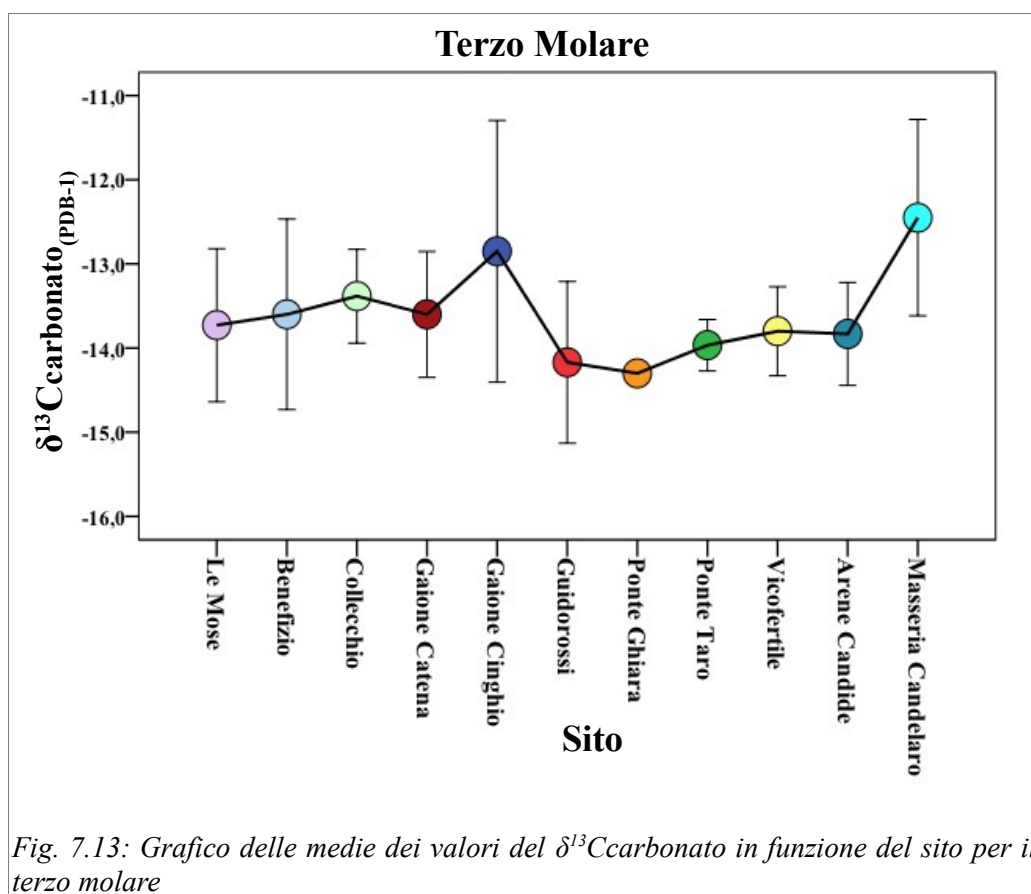
Questo tipo di andamento potrebbe essere spiegato o da processi biochimici che determinano un diverso frazionamento degli atomi di carbonio nell'apatite rispetto al collagene oppure potremmo ipotizzare che, siccome questo indice riflette la composizione isotopica di tutti i macronutrienti della dieta e non solo delle proteine, qualcuna di queste componenti potrebbe influenzare diversamente il  $\delta^{13}\text{C}$  dell'osso rispetto al dente.

Quello che è importante sottolineare è che, per la prima volta, un simile comportamento viene descritto e statisticamente definito. Ciò è stato possibile grazie al fatto di avere avuto la possibilità di misurare in maniera sistematica l'osso e i denti dello stesso individuo per un numero elevato di campioni.

Poiché il terzo molare mineralizza a partire dai 7/8 anni di età fino a circa 16/18 anni (Hillson, 1986) esso illustra bene le fasi giovanili di un individuo. Nel grafico di Fig.7.13 si osserva come per i siti emiliani non si osservano delle differenze statisticamente significative tra i gruppi ad eccezione dei siti di Gaione Cinghio e Ponte Ghiara i quali presentano rispettivamente i valori più elevati (-12,9‰) e più negativi (-14,3‰) rispetto al resto dei gruppi. Il sito di Masseria Candelaro conferma l'andamento già illustrato nel caso dell'osso con il valore medio più elevato (-12,5‰), mentre quello delle Arene Candide pur presentando

presenza in questo grafico del sito di Gaione Catena, assente in quello delle ossa, in quanto è un gruppo costituito solo da denti.

Poiché gli andamenti descritti per i denti (M1, M3, canino) ricalcano sostanzialmente quelli ottenuti per le ossa, a volte attenuandoli, nell'analisi dei dati degli altri segnali isotopici verranno illustrati (a parte alcuni casi significativi) solo i risultati relativi ai reperti ossei.



Per determinare la presenza di differenze nei valori isotopici del carbonio dell'apatite tra individui di sesso opposto o appartenenti a fasce d'età diverse (bambini: 0-12 anni, adolescenti: 12-18 anni e adulti >18 anni), sono stati confrontati i valori misurati nei vari reperti in maniera specifica per ognuno dei siti. Nei grafici che seguono (Fig.7.14 e Fig.7.15) viene rappresentata una sintesi di tali considerazioni che illustra quanto rilevato con le indagini individuali (Appendice Pagg. 14-16). Si può facilmente intuire come non sussistano differenze significative tra i gruppi e questo dato può essere interpretato come la possibilità di accedere alle risorse alimentari senza discriminazioni in base al sesso o all'età.

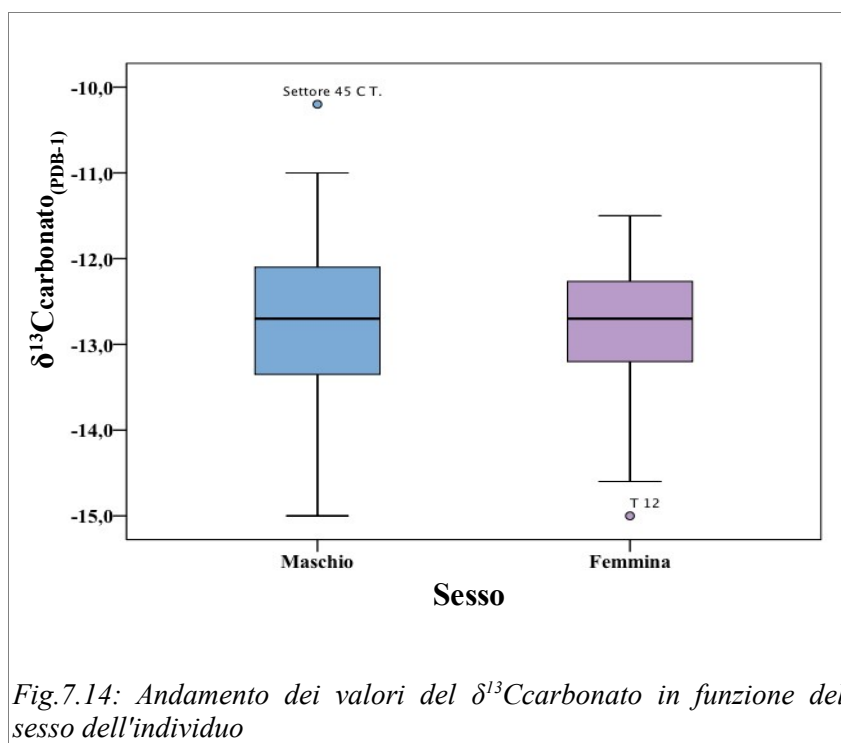


Fig.7.14: Andamento dei valori del  $\delta^{13}\text{Ccarbonato}$  in funzione del sesso dell'individuo

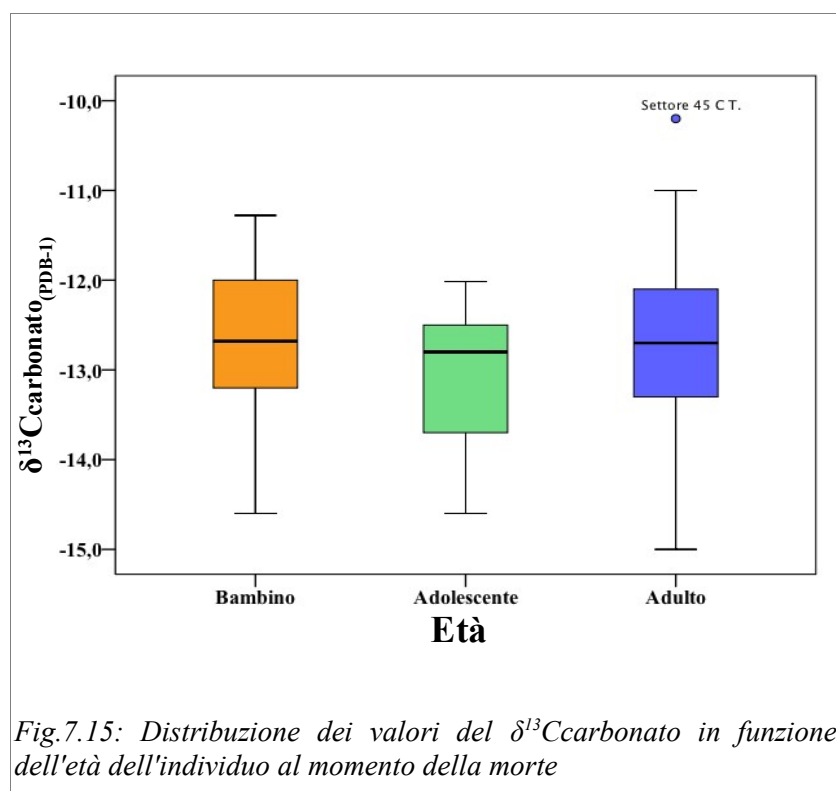


Fig.7.15: Distribuzione dei valori del  $\delta^{13}\text{Ccarbonato}$  in funzione dell'età dell'individuo al momento della morte

I valori di composizione isotopica del C nell'apatite possono essere ricalcolati in termini di dieta considerando il frazionamento di +9/10‰ tra il valore del  $\delta^{13}\text{C}$  delle piante e quello del carbonato dell'osso o dello smalto (Krueger et Sullivan, 1984; Passey et al., 2005).

In questo caso abbiamo scelto di utilizzare la formula seguente per il calcolo della dieta base (Ambrose et Norr, 1993) e i valori ottenuti sono riportati, in funzione della cronologia, nella Tabella di Fig.7.16

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{dieta}} = 1,04 * \delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} - 9,2$$

L'indicazione del tipo di dieta può essere molto utile per ricostruire il tipo di copertura vegetale presente nell'area la quale a sua volta fornisce indicazioni su alcune caratteristiche ambientali quali: condizioni di umidità, insolazione, temperatura, tasso di precipitazione.

<b>Cronologia/Sito</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math> dieta (media ‰)</b>
Masseria Candelaro	-21,6±0,6
Arene Candide (VBQ)	-23,8±0,6
Siti Pianura Padana (VBQ I)	-22,4±0,7
Siti Pianura Padana (VBQ II)	-22,7±0,9
Siti Pianura Padana (Eneolitico)	-22,8±0,9
Siti Pianura Padana (Bronzo antico)	-22,2±0,8

Fig.7.16: Valori del  $\delta^{13}\text{C}$  della dieta in funzione della cronologia e dell'area geografica di appartenenza dei reperti

Nel grafico di Fig.7.17 sono rappresentati i Box-Plot che illustrano l'andamento dei valori del  $\delta^{13}\text{C}$  della dieta in funzione della cronologia dei reperti. Questa classificazione risulta molto utile perchè ci consente di fare due tipi di considerazioni: la prima è strettamente legata al tempo. Ricordiamo, infatti, che il sito di Masseria Candelaro (Neolitico inferiore: ~7500 cal. BP) è precedente rispetto a quelli emiliani mentre i campioni della caverna delle Arene Candide sono classificati genericamente VBQ perchè non si hanno a disposizione datazioni al radiocarbonio. La seconda considerazione è di tipo geografico in quanto i gruppi risultano ben distinti anche da questo punto di vista.

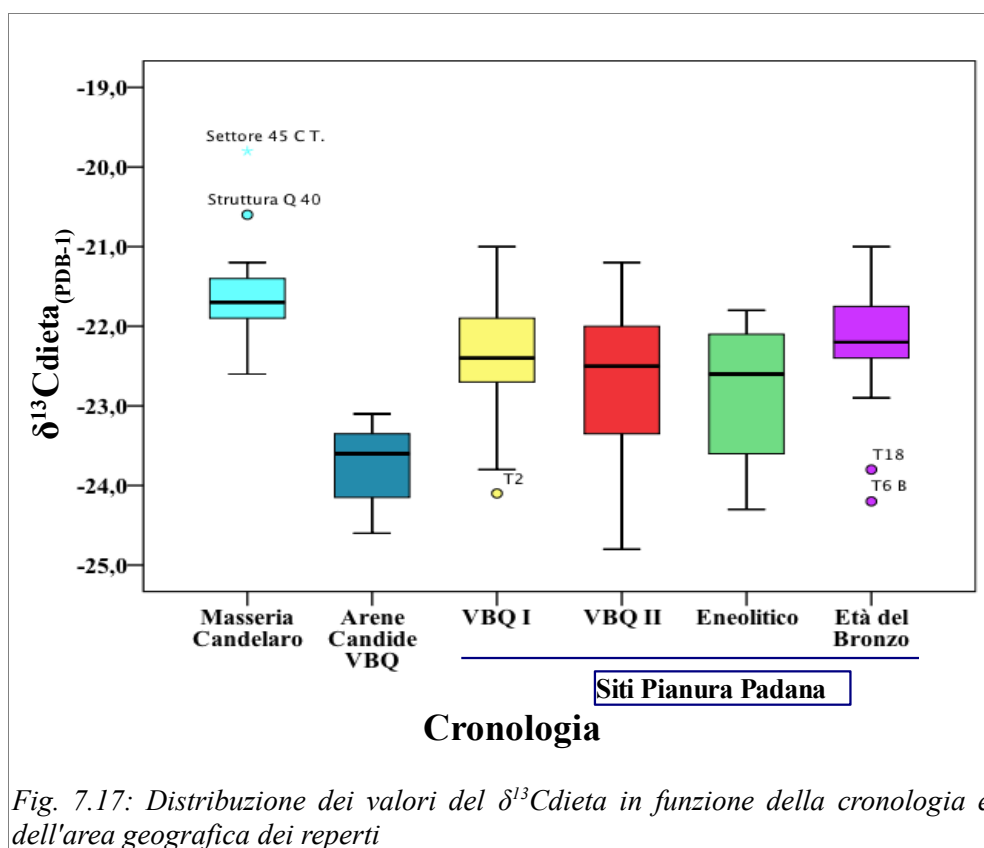
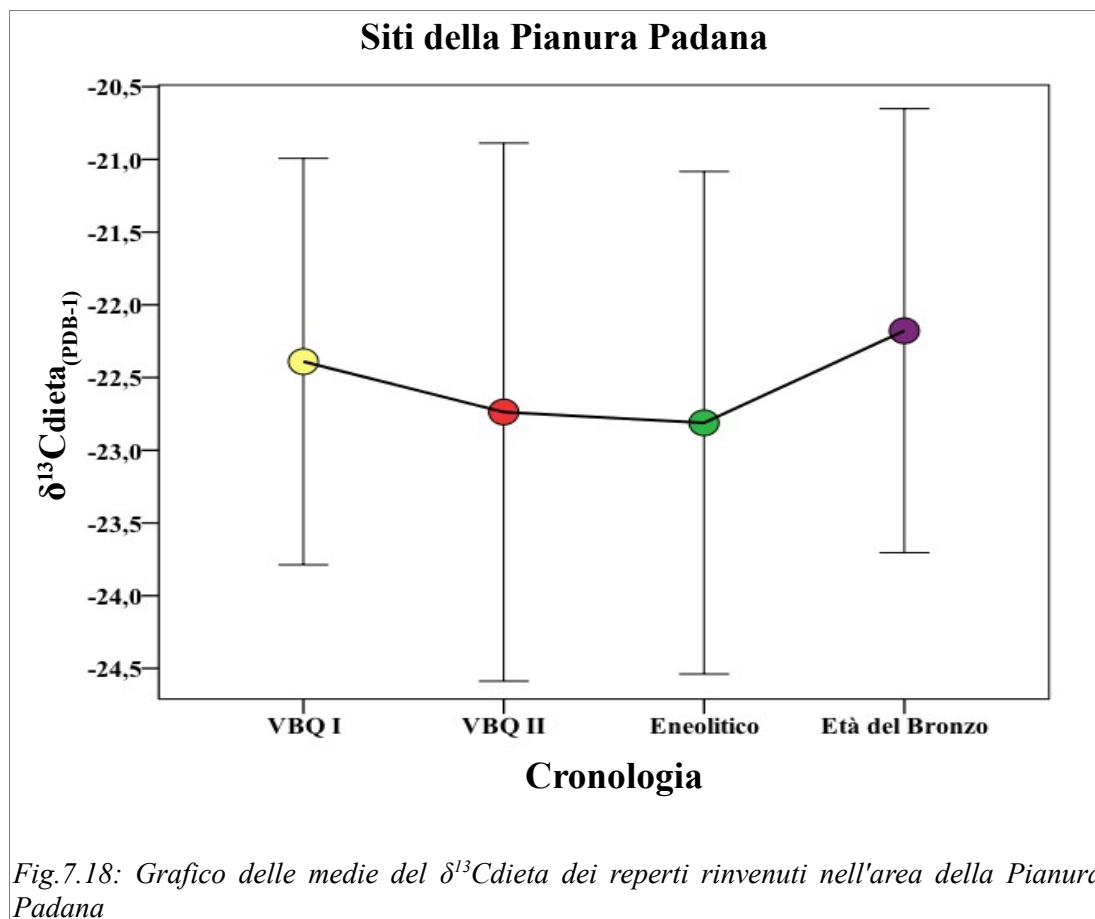


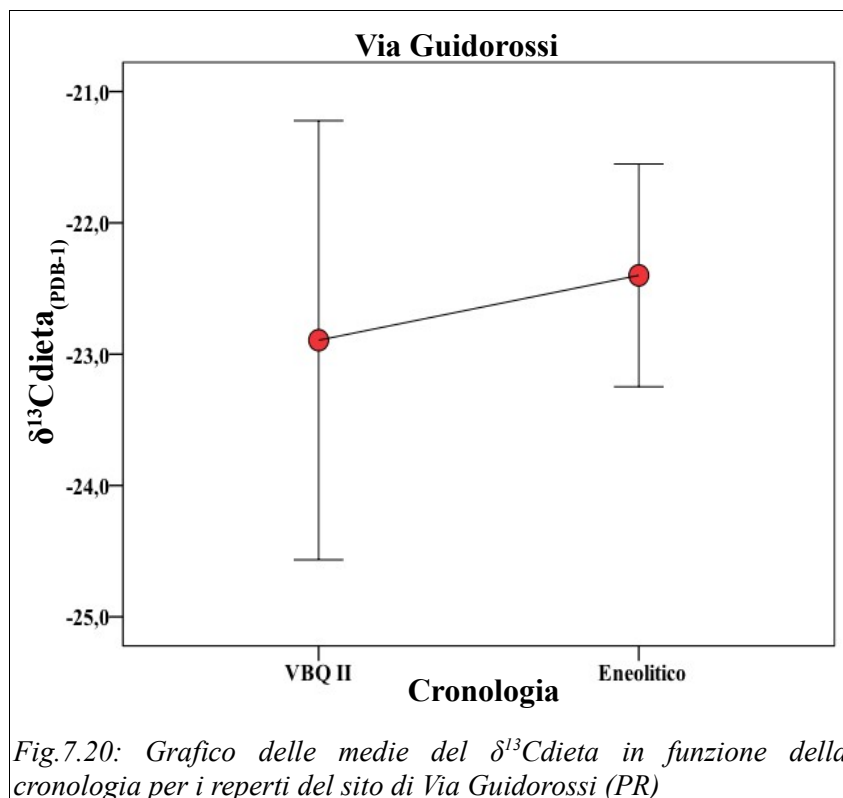
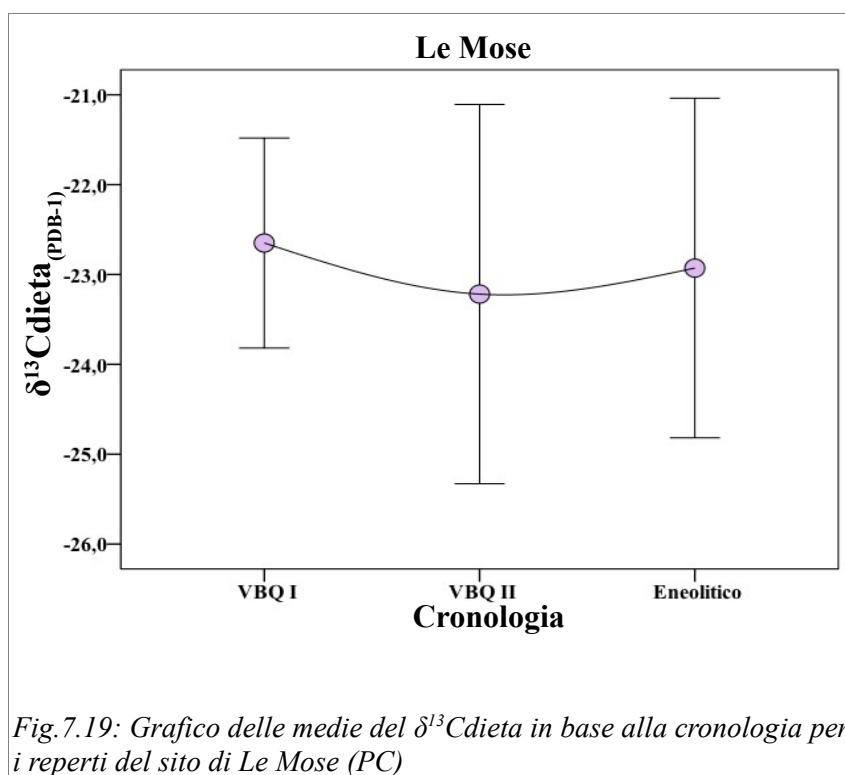
Fig. 7.17: Distribuzione dei valori del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{dieta}}$  in funzione della cronologia e dell'area geografica dei reperti

I siti di Masseria Candelaro e delle Arene Candide si differenziano significativamente dai siti della Pianura Padana indipendentemente dal periodo cronologico con valori rispettivamente più elevati e più negativi (Test LSD per confronti multipli e test t di Student per confronti individuali tra coppie di medie). Probabilmente la loro diversa collocazione geografica giustifica questo tipo di andamento.

Se invece consideriamo solo i reperti ossei rinvenuti nelle varie località dell'Emilia Romagna (Fig.7.18) possiamo osservare una progressiva negativizzazione dei valori durante il Neolitico medio, al passaggio dalla prima alla seconda fase VBQ. Successivamente i valori del  $\delta^{13}\text{C}$  non mostrano differenze significative nell'Eneolitico per poi diventare mediamente meno negative durante la fase del Bronzo antico.



Poiché sia il sito di Le Mose che quello di Via Guidorossi comprendono individui di epoche differenti abbiamo valutato la variazione del  $\delta^{13}C$  della dieta per questi due gruppi (Fig.7.19 e Fig.7.20) e, in effetti, l'andamento descritto in linea generale viene confermato ma bisogna sempre considerare (anche per i parametri successivi) il minore numero di esemplari che compone il campione statistico e quindi il limite di tali valutazioni.



### 7.3: LA COMPOSIZIONE ISOTOPICA DEL CARBONIO DEL COLLAGENE

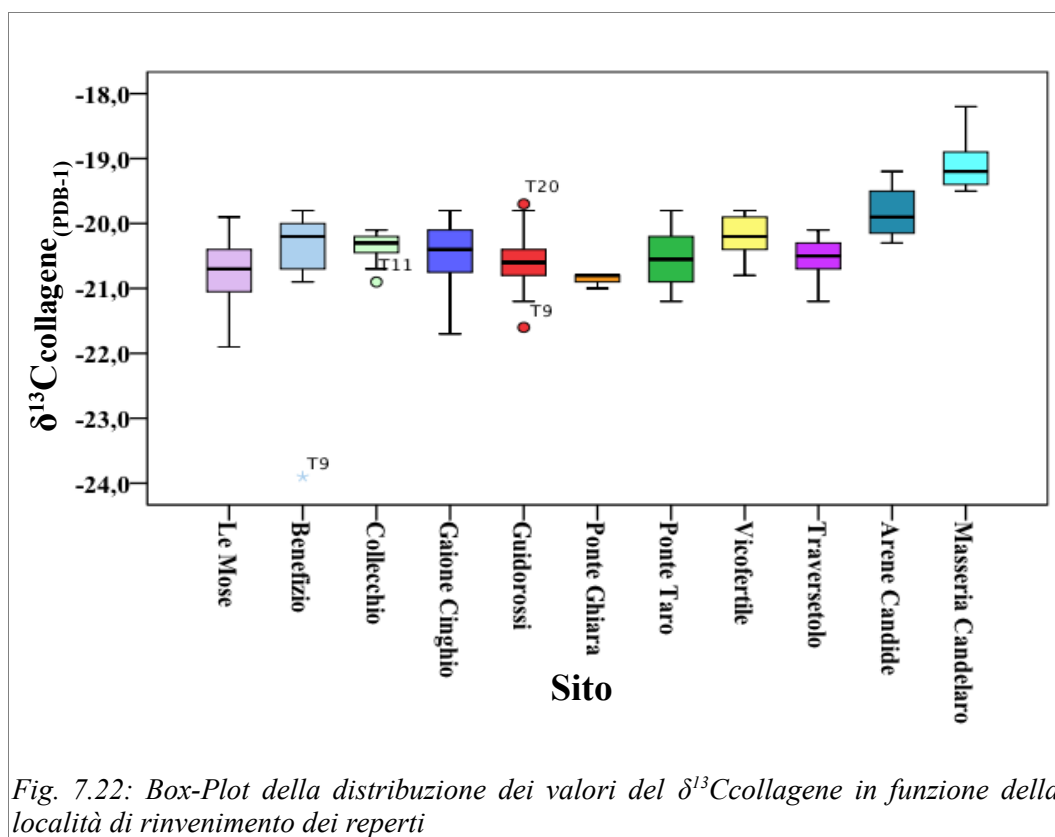
Il  $\delta^{13}\text{C}$  del collagene rappresenta molto bene i rapporti di abbondanza isotopica delle proteine (vegetali e animali) inserite nella dieta, a differenza dell'apatite la quale, come già affermato, fornisce informazioni su tutte le componenti.

Nella Tabella di Fig.7.21 è riportato il riepilogo dei parametri statistici descrittivi per il  $\delta^{13}\text{C}$  che sintetizzano le numerose analisi effettuate.

Statistiche descrittive $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagene}}$										
Sito	Tipologia	N	Minimo	Massimo	Range	Media	Errore std della media	Deviazione std.	Asimmetria	Curtosi
Le Mose	Osso	35	-21,9	-19,9	2,0	-20,8	0,1	0,4	-0,5	0,4
	M1	30	-21,3	-19,8	1,5	-20,4	0,1	0,4	-0,5	-0,5
	M3	21	-21,4	-19,9	1,5	-20,7	0,1	0,4	0,0	-0,3
	Incisivo	1	-20,6	-20,6	0,0	-20,6		.	.	.
Benefizio	Osso	9	-23,9	-19,8	4,1	-20,7	0,4	1,3	-2,5	6,8
	M1	9	-20,2	-19,1	1,1	-19,8	0,1	0,4	0,7	-1,2
	M3	2	-20,9	-20,2	0,7	-20,6	0,3	0,5	.	.
Collecchio	Osso	12	-20,9	-20,1	0,8	-20,4	0,1	0,2	-1,2	1,0
	M1	11	-21,1	-19,5	1,6	-20,2	0,1	0,4	-0,2	0,9
	M3	6	-20,6	-19,8	0,8	-20,2	0,1	0,3	0,5	-0,4
Gaione Catena	M1	6	-20,9	-19,6	1,3	-20,4	0,2	0,5	0,7	-0,9
	M3	4	-20,4	-20,1	0,3	-20,3	0,1	0,1	1,1	2,2
	Incisivo	1	-20,1	-20,1	0,0	-20,1		.	.	.
Gaione Cinghio	Osso	12	-21,7	-19,8	1,9	-20,5	0,1	0,5	-1,1	1,8
	M1	12	-20,5	-19,5	1,0	-20,1	0,1	0,3	0,5	-0,1
	M3	2	-20,4	-20,1	0,3	-20,3	0,1	0,2	.	.
Guidorossi	Osso	35	-21,6	-19,7	1,9	-20,6	0,1	0,4	0,0	0,4
	M1	32	-21,1	-19,5	1,6	-20,2	0,1	0,4	-0,4	-0,5
	M3	20	-21,3	-18,9	2,4	-20,5	0,1	0,6	1,3	2,1
	Canino	10	-21,2	-20,1	1,1	-20,7	0,1	0,4	-0,1	-0,5
Ponte Ghiara	Osso	3	-21,0	-20,8	0,2	-20,9	0,1	0,1	-1,7	.
	M1	3	-21,2	-20,7	0,5	-20,9	0,1	0,3	-0,6	.
	M3	2	-20,6	-20,6	0,0	-20,6	0,0	0,0	.	.
Ponte Taro	Osso	6	-21,2	-19,8	1,4	-20,5	0,2	0,5	0,2	-0,7
	M1	6	-21,3	-18,2	3,1	-20,3	0,5	1,1	1,6	2,6
	M3	3	-21,2	-19,4	1,8	-20,4	0,5	0,9	1,2	.
Vicofertile	Osso	5	-20,8	-19,8	1,0	-20,2	0,2	0,4	-0,6	-0,6
	M1	5	-20,1	-19,9	0,2	-20,0	0,0	0,1	0,5	-0,6
	M3	3	-20,3	-20,2	0,1	-20,2	0,0	0,1	-1,7	.
Traversetolo	Osso	12	-21,2	-20,1	1,1	-20,5	0,1	0,3	-0,8	0,0
	M1	14	-20,7	-19,3	1,4	-20,1	0,1	0,4	0,4	0,7
	Canino	12	-21,1	-20,1	1,0	-20,5	0,1	0,3	-0,4	-0,3
Arene Candide	Osso	7	-20,3	-19,2	1,1	-19,8	0,2	0,4	0,5	-1,5
	M1	6	-20,4	-19,0	1,4	-19,7	0,3	0,6	0,1	-2,6
	M3	3	-20,8	-19,6	1,2	-20,0	0,4	0,7	-1,7	.
Masseria Candelaro	Osso	14	-19,5	-18,2	1,3	-19,1	0,1	0,3	1,7	3,4
	M1	14	-19,7	-17,6	2,1	-18,8	0,2	0,6	0,9	0,7
	M3	10	-19,9	-18,7	1,2	-19,2	0,1	0,3	-0,5	1,3

Fig.7.21: Tabella dei parametri di statistica descrittiva per il valore del  $\delta^{13}\text{C}$  del collagene

Nel grafico sottostante sono riportati i Box-Plot che illustrano le caratteristiche della distribuzione dei dati ottenuti in funzione della posizione geografica dei siti (Fig.7.22). Ad eccezione del sito di Le Mose (2,0‰), il range di variazione dei valori isotopici è piuttosto limitato (escludendo gli outliers) il che indica una certa omogeneità infra-gruppo. La distribuzione è in genere asimmetrica e con curtosi variabile anche se nel caso del sito di Via Guidorossi si riscontra una perfetta simmetria.



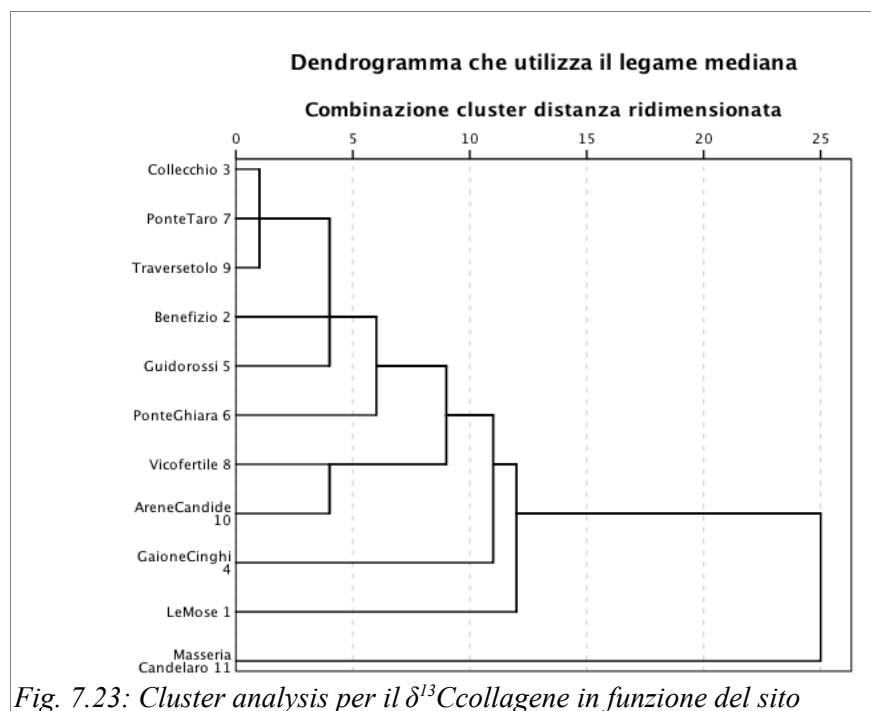


Fig. 7.23: Cluster analysis per il  $\delta^{13}\text{C}$ collagene in funzione del sito

La cluster analysis in funzione della mediana (Fig.7.23) ha evidenziato essenzialmente la presenza di due raggruppamenti il primo dei quali comprende la totalità dei siti emiliani e quello delle Arene Candide, mentre il secondo è costituito dal sito di Masseria Candelaro caratterizzato da valori tendenzialmente meno negativi.

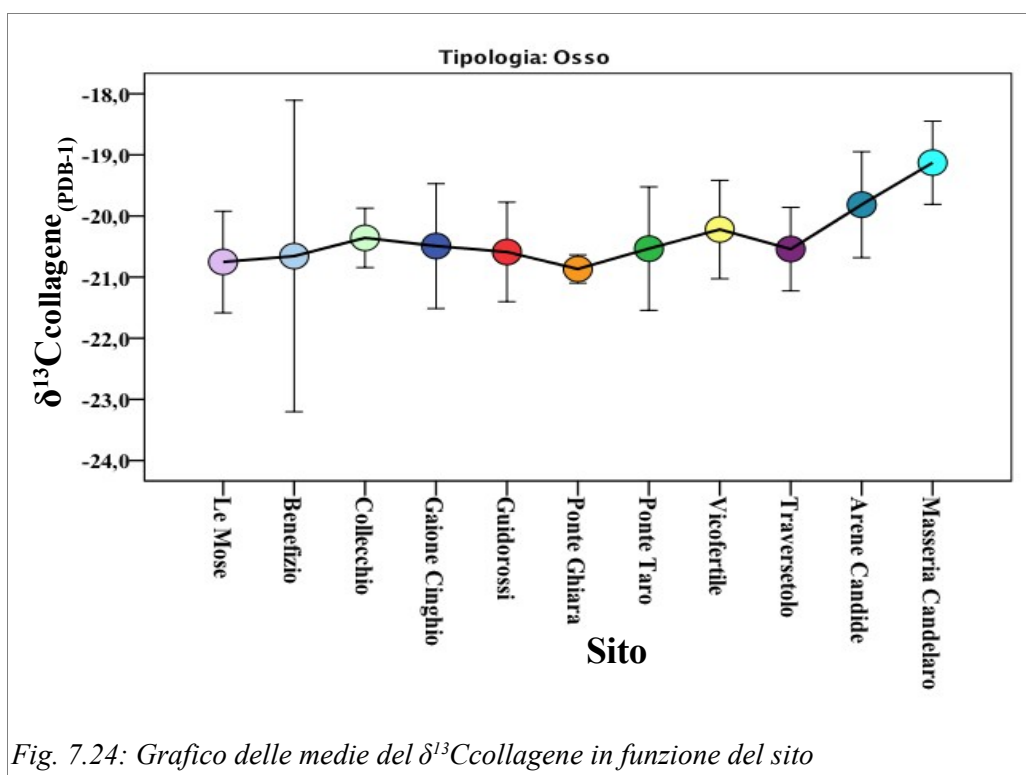
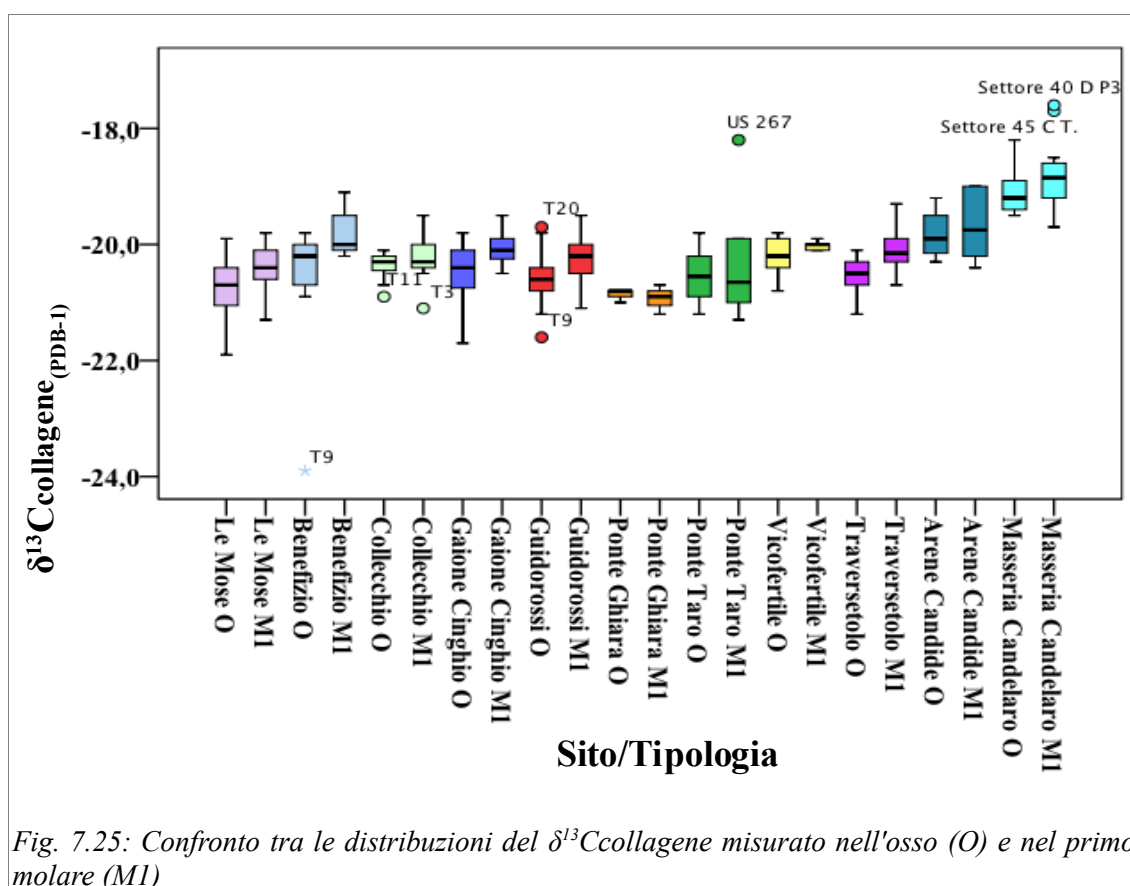


Fig. 7.24: Grafico delle medie del  $\delta^{13}\text{C}$ collagene in funzione del sito

Successivamente abbiamo confrontato i vari siti in funzione del valore medio, mediante l'ANOVA la quale ha evidenziato l'elevata possibilità della presenza di differenze statisticamente significative che sono state individuate con l'applicazione del test per confronti multipli di Tamhane in quanto le varianze sono risultate non omogenee. Nel grafico di Fig.7.24 è riportato il grafico delle medie.

Il quadro generale già illustrato dalla cluster analysis viene sostanzialmente confermato e, infatti, si osserva per le località emiliane l'assenza di differenze statisticamente significative, a parte quella riscontrata tra Le Mose e Collecchio. Il sito delle Arene Candide risulta confrontabile con quelli padani (a parte Le Mose e Ponte Ghiara), mentre Masseria Candelaro se ne differenzia con un valore mediamente meno negativo riconducibili alla diversa collocazione geografica rispetto all'area della Pianura Padana.

Anche per questo parametro isotopico sono stati confrontati i valori relativi alle ossa e ai primi molari (Fig.7.25) e, come previsto dalla letteratura già citata, si rileva nella maggioranza dei casi un arricchimento significativo nell'M1 rispetto all'osso riferibile al periodo dell'allattamento.



Nella Tabella di Fig.7.26 è riportato il valore medio della differenza tra osso ed M1 calcolata per gli individui di ogni sito. Complessivamente il  $\Delta O-M1$  medio per questo parametro isotopico è uguale a  $-0,3 \pm 0,6\%$ .

Sito	$\Delta$ Osso-M1 (media ‰)
Le Mose	$-0,3 \pm 0,4$
Benefizio	$-1,0 \pm 1,7$
Collecchio	$-0,1 \pm 0,5$
Gaione Cinghio	$-0,4 \pm 0,5$
Via Guidorossi	$-0,3 \pm 0,4$
Ponte Ghiara	$0,1 \pm 0,3$
Ponte Taro	$0,0 \pm 0,4$
Vicoferile	$-0,2 \pm 0,4$
Via Traversetolo	$-0,5 \pm 0,6$
Arene Candide	$-0,1 \pm 0,2$
Masseria Candelaro	$-0,3 \pm 0,5$

Fig.7.26: Valori della differenza tra osso ed M1 in funzione del sito

Dal confronto tra individui di sesso opposto e/o appartenenti a fasce d'età differenti al momento della morte, non sono emerse differenze statisticamente significative tra le medie (a parte alcuni casi) confermando, anche in questo caso, l'assenza di discriminazioni nell'accesso alle risorse (Appendice Pagg. 25-28).

A partire dal valore di  $\delta^{13}C$  misurato nel collagene è possibile determinare il valore della base della dieta tenendo conto degli opportuni frazionamenti teorici (Ambrose and Norr, 1993):

$$\delta^{13}C_{dieta} = \delta^{13}C_{collagene} - 5$$

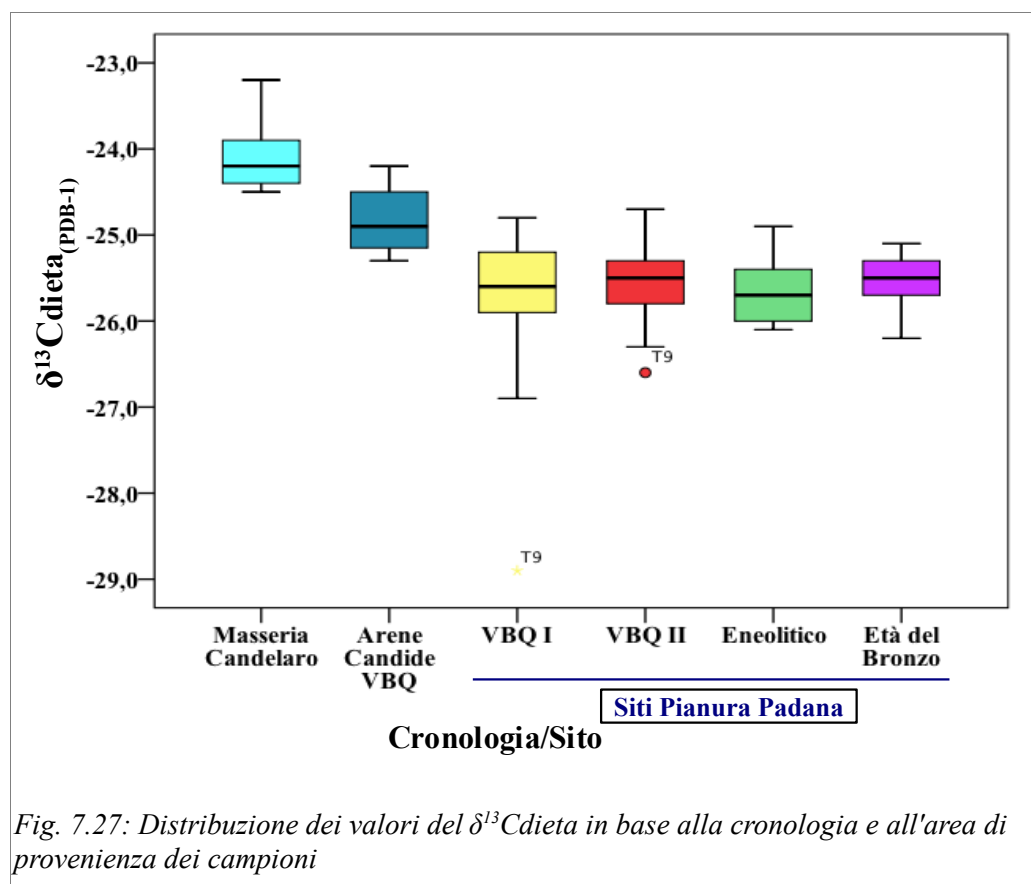


Fig. 7.27: Distribuzione dei valori del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{dieta}}$  in base alla cronologia e all'area di provenienza dei campioni

Nel grafico di Fig.7.27 è illustrata la distribuzione dei valori del  $\delta^{13}\text{C}$  della dieta in funzione della cronologia dei campioni e si può immediatamente notare come non sembrano sussistere per i siti emiliani quelle piccole variazioni riscontrate nel caso dell'apatite. I siti di Masseria Candelaro e delle Arene Candide invece risultano caratterizzati da valori isotopici meno negativi indipendentemente dalla cronologia.

Questo dato viene ribadito sia dall'analisi delle medie (Fig.7.28) sia dall'andamento descritto per i siti di Le Mose e di Via Guidorossi (Fig.7.29 e Fig.7.30).

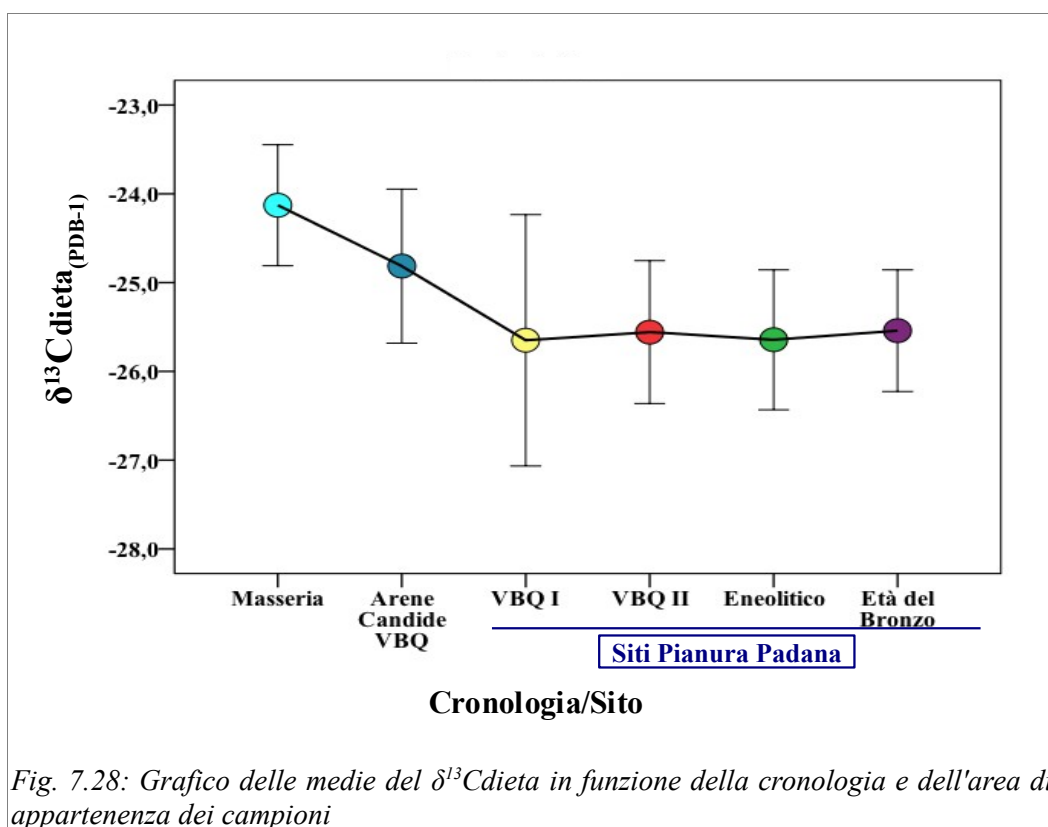


Fig. 7.28: Grafico delle medie del  $\delta^{13}C_{dieta}$  in funzione della cronologia e dell'area di appartenenza dei campioni

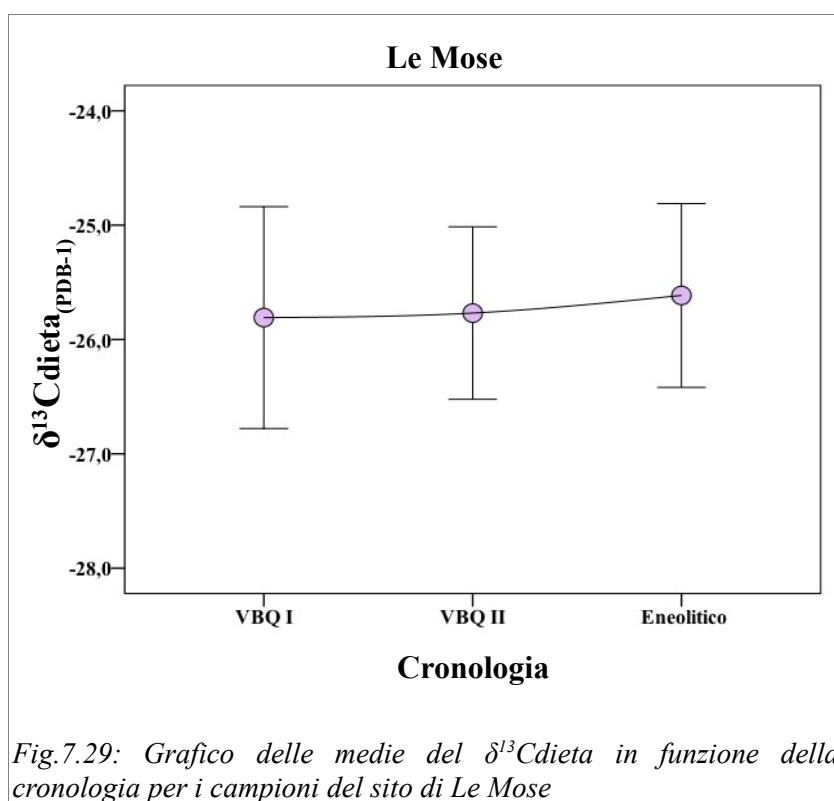
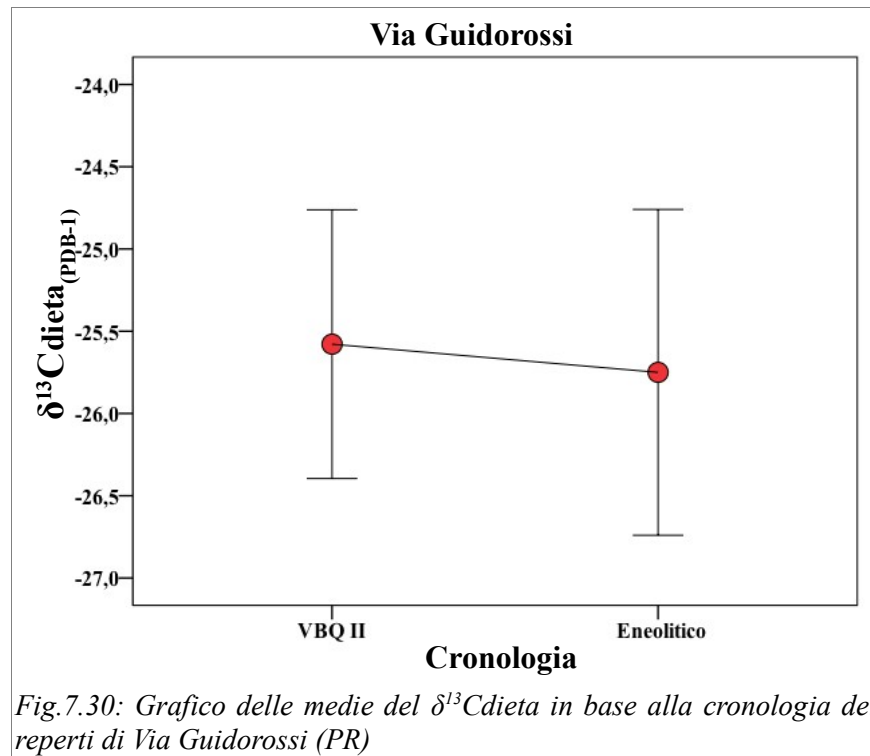


Fig. 7.29: Grafico delle medie del  $\delta^{13}C_{dieta}$  in funzione della cronologia per i campioni del sito di Le Mose



### 7.4: LA COMPOSIZIONE ISOTOPICA DELL'AZOTO DEL COLLAGENE

Questo parametro isotopico rappresenta un valido strumento per determinare la natura e l'origine della frazione proteica della dieta, inoltre, risulta un buon indicatore ambientale per quando riguarda il tasso di umidità e la disponibilità idrica.

Statistiche descrittive $\delta^{15}\text{N}_{\text{collagene}}$										
Sito	Tipologia	N	Minimo	Massimo	Range	Media	Errore std della media	Deviazione std.	Asimmetria	Curtosi
Le Mose	Osso	35	7,0	10,8	3,8	8,7	0,2	0,9	0,5	-0,2
	M1	30	7,5	12,4	4,9	9,8	0,2	1,2	0,1	-0,4
	M3	21	7,8	10,2	2,4	9,2	0,1	0,6	-0,4	0,0
	Incisivo	1	10,7	10,7	0,0	10,7	.	.	.	.
Benefizio	Osso	9	6,4	9,8	3,4	8,2	0,3	1,0	-0,1	0,3
	M1	9	5,6	13,3	7,7	9,8	0,7	2,1	-0,6	1,6
	M3	2	9,2	9,8	0,6	9,5	0,3	0,4	.	.
Collecchio	Osso	12	8,1	9,4	1,3	8,7	0,1	0,4	0,0	-0,7
	M1	11	8,5	11,5	3,0	9,7	0,3	0,8	0,7	1,0
	M3	6	9,0	10,4	1,4	9,7	0,2	0,5	-0,2	-1,3
Gaione Catena	M1	6	7,5	10,1	2,6	9,2	0,4	1,1	-1,1	-0,9
	M3	4	8,9	9,4	0,5	9,2	0,1	0,2	-0,5	-1,7
	Incisivo	1	9,7	9,7	0,0	9,7	.	.	.	.
Gaione Cinghio	Osso	12	7,6	9,7	2,1	8,5	0,2	0,6	0,6	-0,2
	M1	12	7,1	10,8	3,7	9,8	0,3	1,1	-1,5	2,9
	M3	2	7,5	9,4	1,9	8,5	1,0	1,3	.	.
Guidorossi	Osso	35	6,9	10,7	3,8	8,2	0,2	0,9	0,9	0,3
	M1	32	7,6	11,4	3,8	9,7	0,2	1,0	-0,3	-0,7
	M3	20	7,0	11,1	4,1	9,1	0,3	1,1	0,3	-0,6
	Canino	10	8,5	10,9	2,4	9,4	0,3	0,8	0,7	-0,7
Ponte Ghiara	Osso	3	8,2	8,8	0,6	8,5	0,2	0,3	0,0	.
	M1	3	8,5	11,3	2,8	10,1	0,8	1,4	-1,2	.
	M3	2	9,2	9,5	0,3	9,4	0,2	0,2	.	.
Ponte Taro	Osso	6	7,1	9,2	2,1	8,1	0,3	0,7	-0,1	-0,2
	M1	6	8,0	11,8	3,8	9,8	0,6	1,4	0,1	-0,9
	M3	3	8,7	10,6	1,9	10,0	0,6	1,1	-1,7	.
Vicofertile	Osso	5	7,7	8,8	1,1	8,1	0,2	0,5	1,1	0,2
	M1	5	7,8	10,6	2,8	9,4	0,6	1,3	-0,5	-2,9
	M3	3	8,5	9,4	0,9	9,0	0,3	0,5	-1,4	.
Traversetolo	Osso	12	9,0	13,3	4,3	10,7	0,4	1,5	0,4	-1,2
	M1	14	9,7	15,2	5,5	12,4	0,5	1,8	-0,2	-1,0
	Canino	12	9,6	14,4	4,8	11,7	0,4	1,5	0,5	-0,7
Arene Candide	Osso	7	8,2	10,9	2,7	9,2	0,4	0,9	1,1	0,9
	M1	6	8,7	10,5	1,8	10,0	0,3	0,7	-1,4	1,5
	M3	3	9,2	9,8	0,6	9,5	0,2	0,3	0,9	.
Masseria Candelaro	Osso	14	7,9	11,4	3,5	9,0	0,2	0,8	1,7	4,7
	M1	14	8,2	11,1	2,9	10,1	0,2	0,9	-0,7	-0,2
	M3	10	8,9	10,3	1,4	9,5	0,2	0,5	0,7	-1,1

Fig.7.31: Tabella riassuntiva dei parametri di statistica descrittiva per il valore del  $\delta^{15}\text{N}$

Come per gli altri segnali isotopici nella Tabella di Fig.7.31 è riportata la sintesi dei dati statistici descrittivi per il  $\delta^{15}\text{N}$  misurato nel collagene.

L'andamento della distribuzione dei valori del  $\delta^{15}\text{N}$  in funzione della posizione geografica dei siti è rappresentata dai Box-Plot di Fig.7.32. Si può osservare come la dispersione di questo parametro isotopico all'interno dei gruppi è piuttosto variabile e asimmetrica (a parte Ponte Ghiara) e come il sito di Traversetolo si distingue immediatamente per una distribuzione dei valori più ampia e spostata verso valori più positivi rispetto al resto dei gruppi.

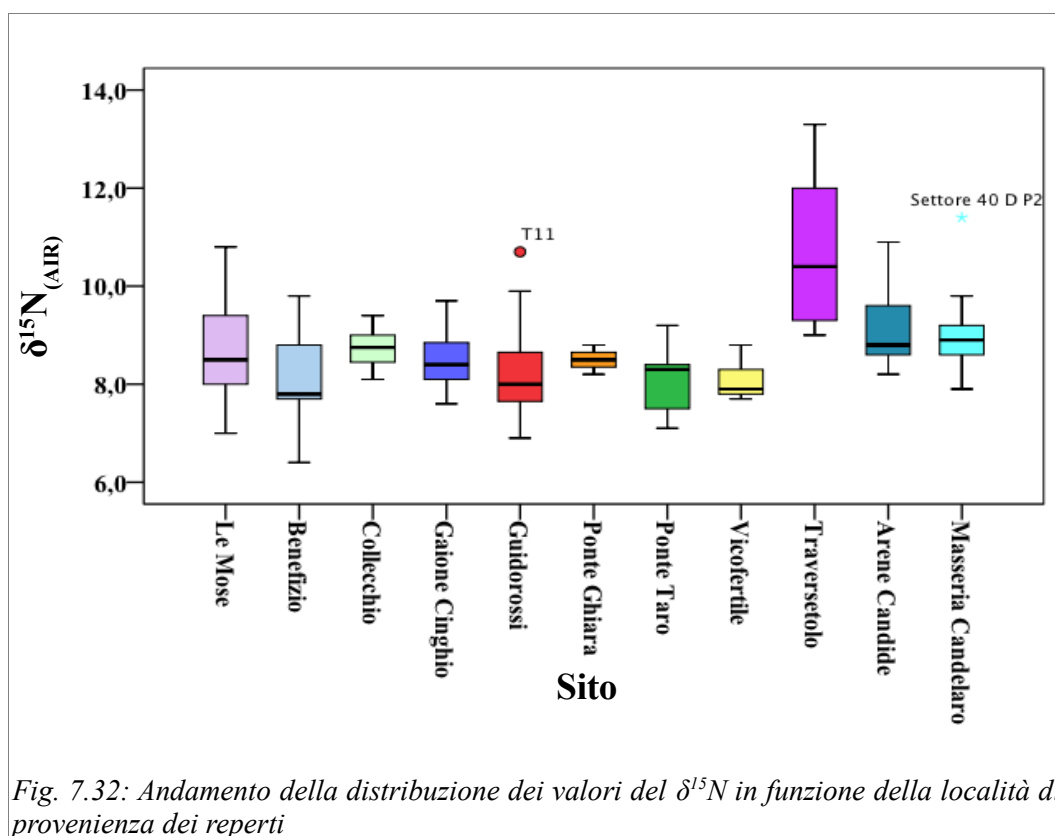
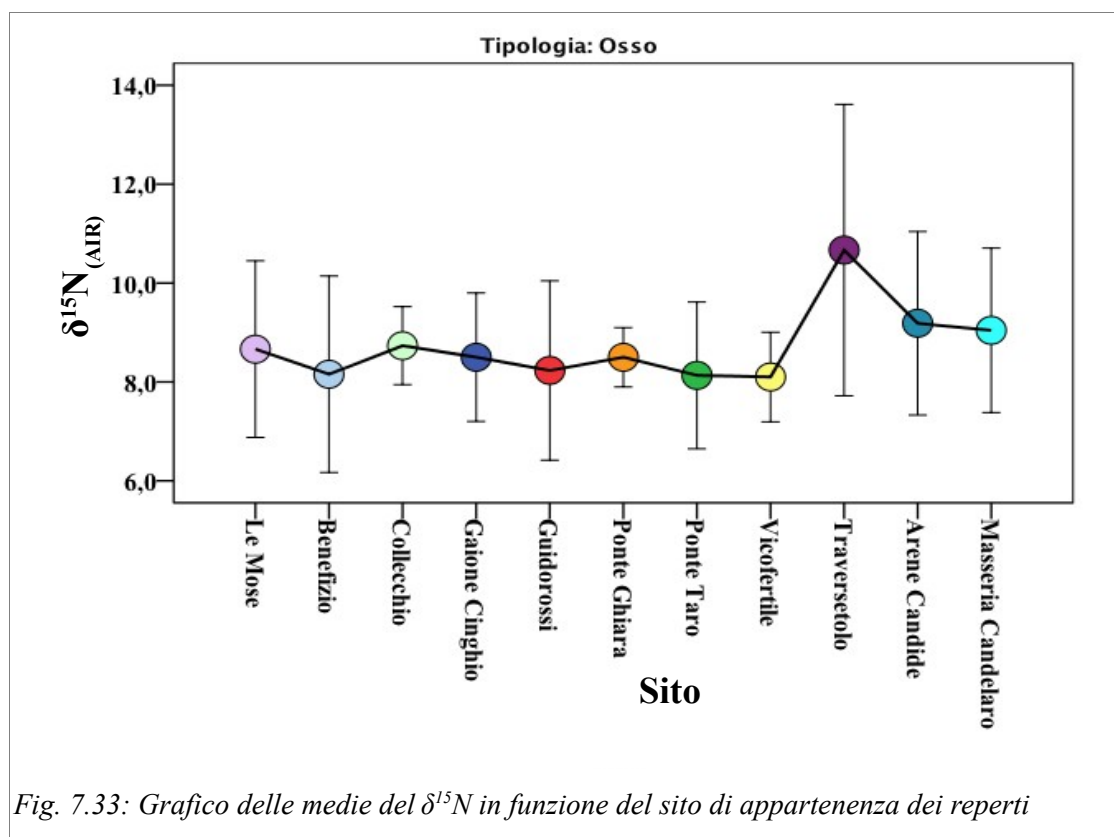


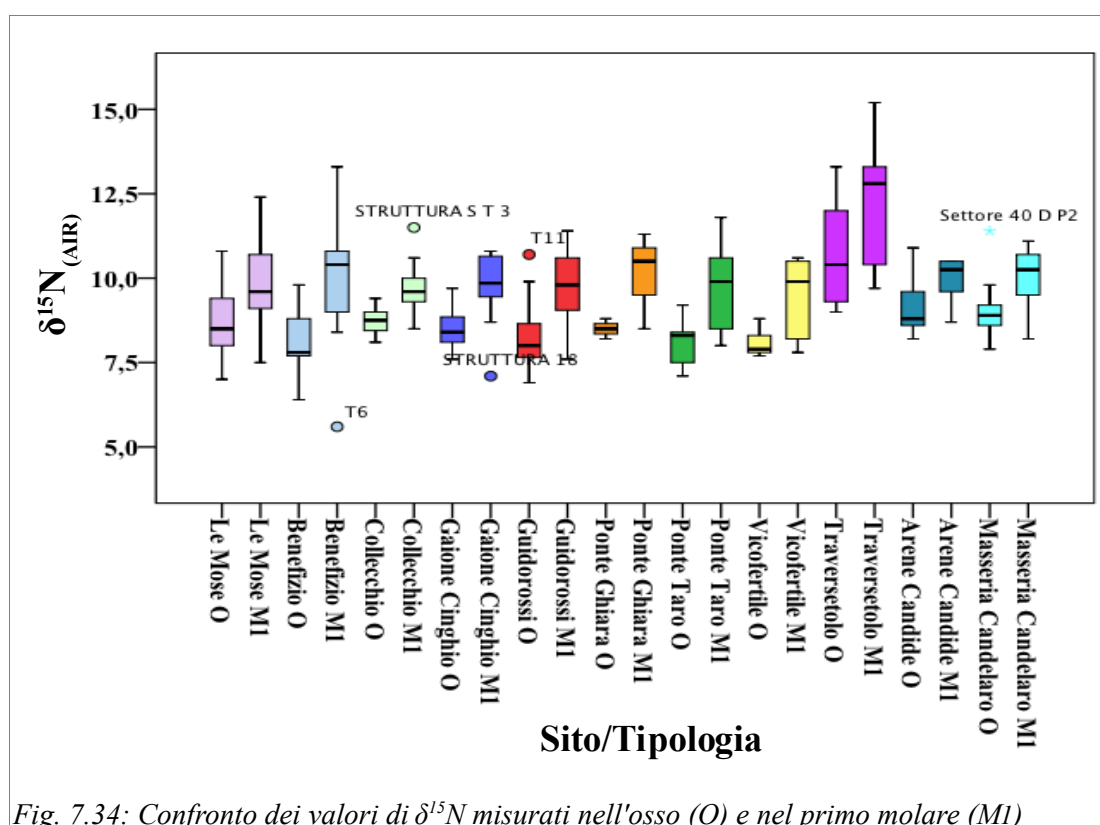
Fig. 7.32: Andamento della distribuzione dei valori del  $\delta^{15}\text{N}$  in funzione della località di provenienza dei reperti

Il confronto tra i vari siti è stato quindi effettuato sulla base dell'andamento del valore medio della distribuzione mediante one way ANOVA la quale ha evidenziato la presenza di differenze statisticamente significative rilevate mediante test a posteriori per varianze non omogenee Tamhane. Nel grafico di Fig.7.33 è riportato il grafico delle medie dal quale si rileva immediatamente che il sito di Via Traversetolo si differenzia significativamente da tutti gli altri gruppi della Pianura Padana con valori del  $\delta^{15}\text{N}$  mediamente più positivi (10,7%).



Masseria Candelaro e Arene Candide pur presentando valori mediamente più arricchiti risultano statisticamente paragonabili fra di loro e a quelli dell'area della Pianura Padana compreso il sito di Via Traversetolo.

Il confronto tra osso e primo molare (Fig.7.34) ha messo in evidenza la presenza di un arricchimento medio dell' $1,1 \pm 2,3\%$  dell'"M1 rispetto all'osso (vedi Tabella di Fig.7.35 per il dettaglio dei siti). È noto, infatti, che nei bambini si riscontri una positivizzazione dei valori del  $\delta^{15}\text{N}$  rispetto agli adulti (dell'ordine dell'1-2% appunto) dovuta all'assunzione del latte materno il quale, essendo un alimento altamente proteico, colloca l'individuo ad un livello trofico maggiore. Analogamente la dentina che cessa di rigenerarsi durante le prime fasi di vita risulta arricchito in  $^{15}\text{N}$  rispetto al collagene delle ossa che invece continua a rinnovarsi.



Sito	$\Delta$ Osso-M1 (media ‰)
Le Mose	-1,0±1,3
Benefizio	-2,6±1,9
Collecchio	-0,8±0,8
Gaione Cinghio	-1,3±0,9
Via Guidorossi	-1,4±1,1
Ponte Ghiara	-1,6±1,4
Ponte Taro	-1,3±0,8
Vicofertile	-1,3±1,3
Via Traversetolo	-1,3±1,5
Arene Candide	-0,6±1,0
Masseria Candelaro	-1,4±0,9

 Fig. 7.35: Tabella delle differenze dei valori del  $\delta^{15}\text{N}$  tra osso ed M1

L'andamento del  $\delta^{15}\text{N}$  in funzione della cronologia è illustrato nel grafico di Fig.7.36 nel quale ancora una volta si osserva una maggiore dispersione e positivizzazione dei valori per i campioni dell'età del Bronzo i quali però coincidono con reperti di Via Traversetolo.

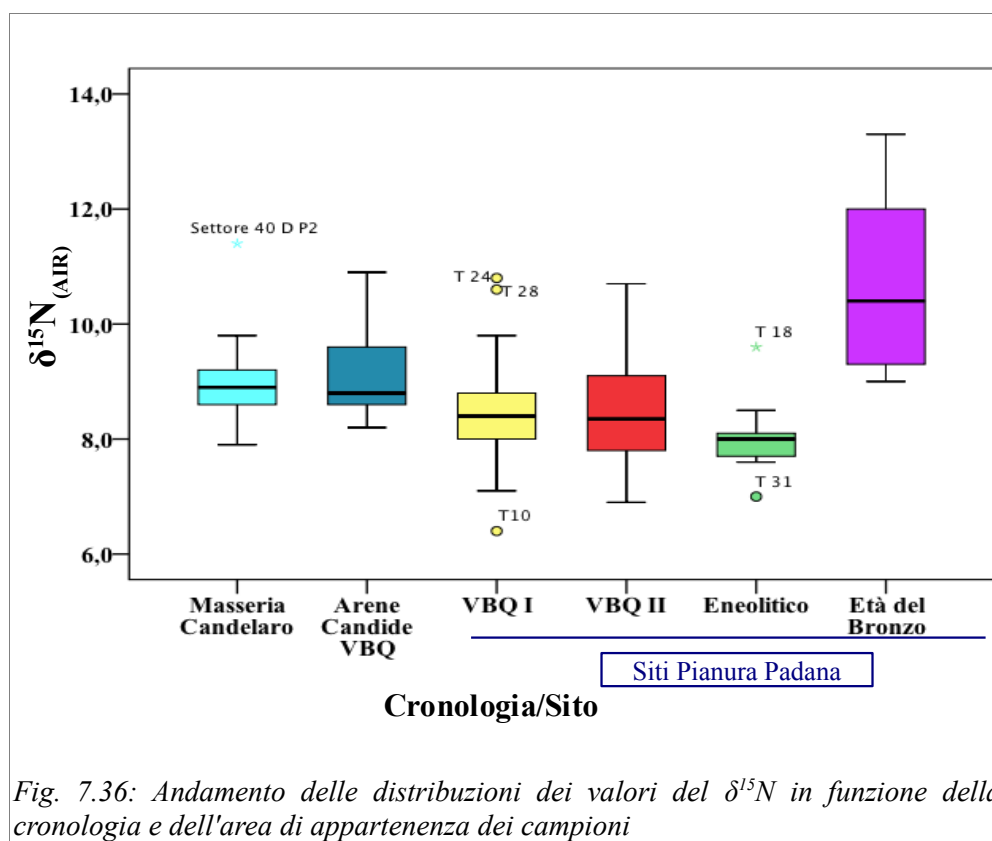
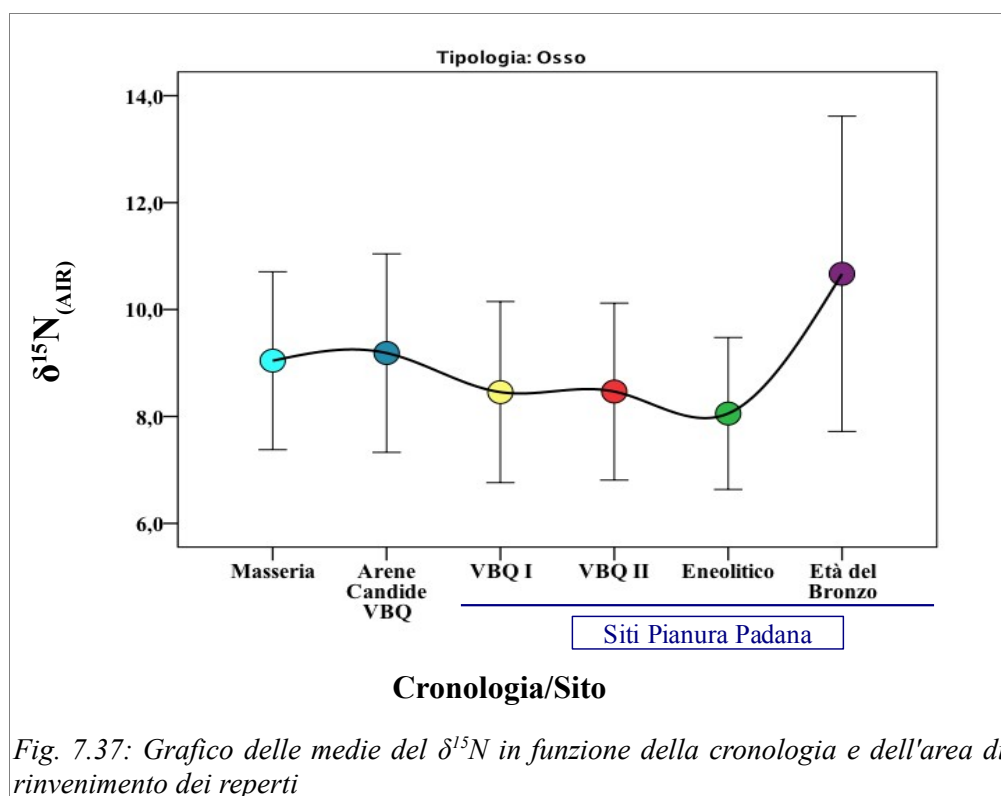
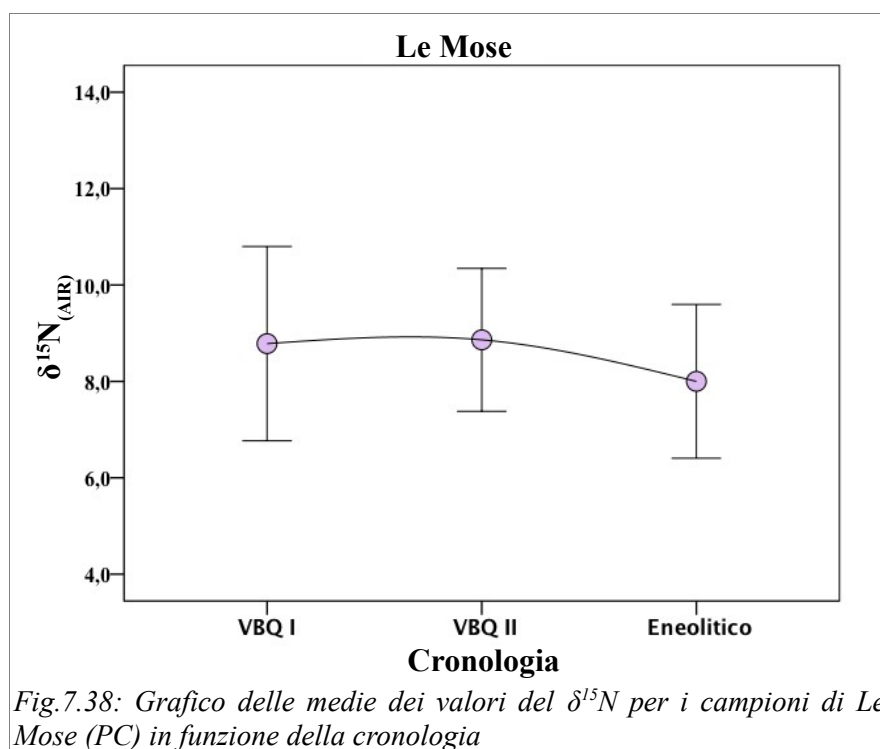


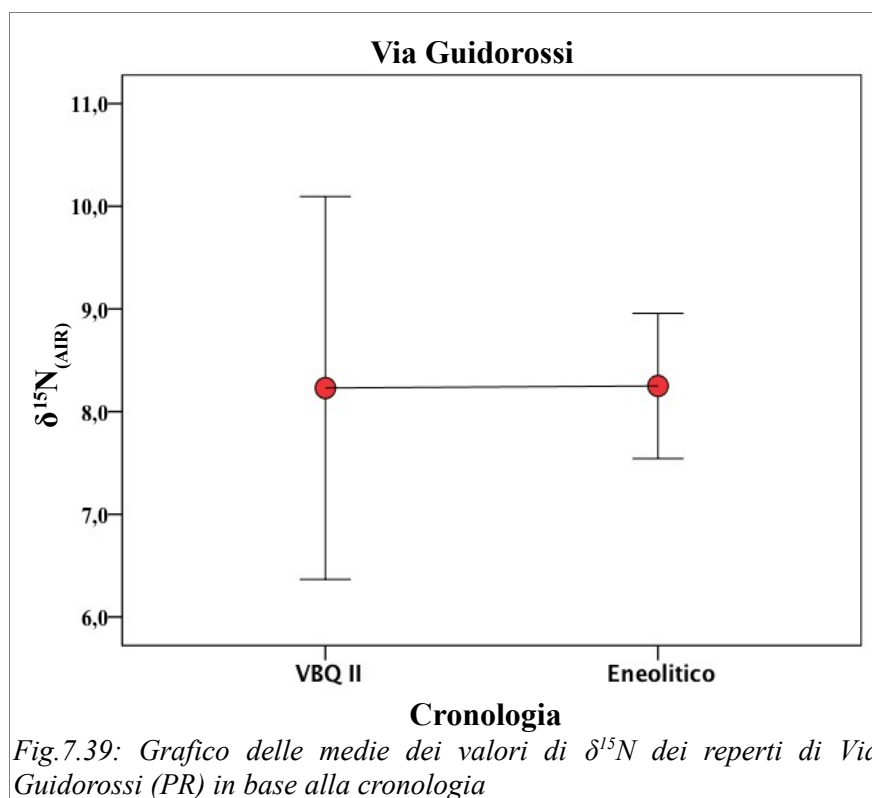
Fig. 7.36: Andamento delle distribuzioni dei valori del  $\delta^{15}\text{N}$  in funzione della cronologia e dell'area di appartenenza dei campioni

I siti di Masseria Candelaro e delle Arene Candide mostrano valori mediamente più positivi rispetto a quelli della Pianura Padana i quali, invece, non presentano differenze statisticamente significative nel corso del tempo fino all'età del Bronzo nel quale i valori diventano più elevati (Fig.7.37) confermando per questo periodo quanto descritto per il  $\delta^{13}\text{C}$ apatite.



Le analisi specifiche per i siti di Le Mose e Guidorossi (Fig.7.38 e Fig.7.39), i quali comprendono individui di epoca diversa, mostrano una certa concordanza con l'andamento generale appena descritto.





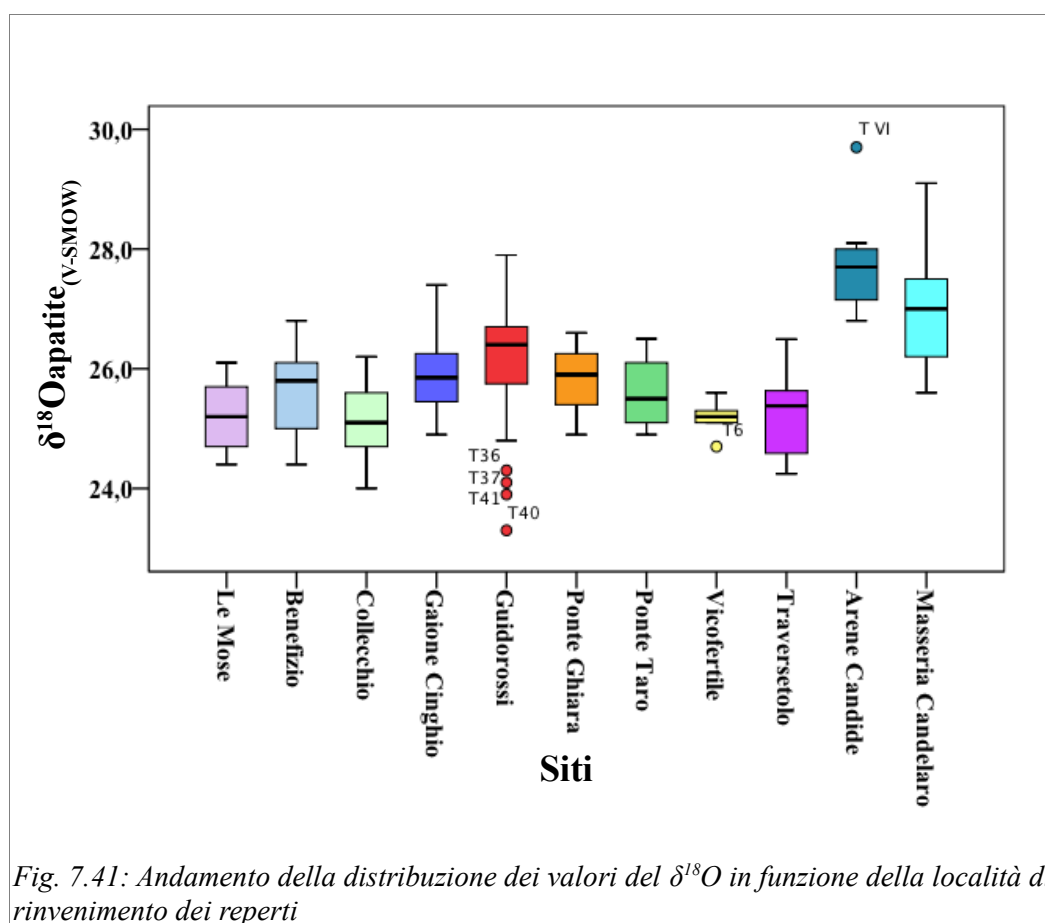
### 7.5: LA COMPOSIZIONE ISOTOPICA DELL'OSSIGENO DELL'APATITE

Nella Tabella di Fig.7.40, analogamente a quanto effettuato per gli altri parametri isotopici, vengono riportati i valori degli indici di statistica descrittiva calcolati a partire dall'elevato numero di misure ottenute.

Statistiche descrittive $\delta^{18}\text{O}_{\text{apatite}}$										
Sito	Tipologia	N	Minimo	Massimo	Range	Media	Errore std della media	Deviazione std.	Asimmetria	Curtosi
Le Mose	Osso	35	24,4	26,1	1,7	25,2	0,1	0,5	0,2	-1,3
	M1	31	24,6	28,8	4,2	26,0	0,2	0,8	1,3	2,7
	M3	21	24,5	27,6	3,1	25,4	0,2	0,8	1,4	2,3
	Incisivo	1	25,8	25,8	0,0	25,8		.	.	.
Benefizio	Osso	9	24,4	26,8	2,4	25,7	0,3	0,8	-0,3	-0,8
	M1	9	25,5	26,4	0,9	26,0	0,1	0,3	-0,7	0,8
	M3	2	25,5	25,6	0,1	25,6	0,1	0,1	.	.
Collecchio	Osso	13	24,0	26,2	2,2	25,1	0,2	0,6	0,2	-0,4
	M1	11	25,1	26,5	1,4	25,9	0,1	0,4	-0,8	1,2
	M3	6	24,8	25,8	1,0	25,3	0,2	0,4	0,7	-1,7
Gaione Catena	M1	6	25,1	27,0	1,9	26,0	0,3	0,7	0,5	-1,1
	M3	4	24,9	25,8	0,9	25,3	0,2	0,4	0,6	-0,8
	Incisivo	1	26,9	26,9	0,0	26,9	.	.	.	.
Gaione Cinghio	Osso	12	24,9	27,4	2,5	25,9	0,2	0,7	0,8	1,2
	M1	12	25,4	27,1	1,7	26,3	0,2	0,6	-0,2	-1,5
	M3	2	25,6	26,4	0,8	26,0	0,4	0,6	.	.
Guidorossi	Osso	35	23,3	27,9	4,6	26,2	0,2	1,1	-0,8	0,5
	M1	30	25,1	29,3	4,2	26,4	0,2	1,0	1,4	1,8
	M3	20	25,2	28,7	3,5	26,1	0,2	0,9	1,2	1,4
	Canino	10	25,3	27,8	2,5	26,3	0,3	0,8	1,0	0,3
Ponte Ghiara	Osso	3	24,9	26,6	1,7	25,8	0,5	0,9	-0,5	.
	M1	3	26,4	26,8	0,4	26,6	0,1	0,2	1,3	.
	M3	2	25,6	25,7	0,1	25,7	0,0	0,1	.	.
Ponte Taro	Osso	6	24,9	26,5	1,6	25,6	0,3	0,6	0,4	-1,7
	M1	6	25,3	29,1	3,8	26,8	0,5	1,3	1,4	3,2
	M3	3	24,4	27,9	3,5	26,3	1,0	1,8	-0,6	.
Vicofertile	Osso	5	24,7	25,6	0,9	25,2	0,1	0,3	-0,4	1,2
	M1	5	25,6	27,6	2,0	26,6	0,4	0,8	0,0	-1,1
	M3	3	25,7	26,1	0,4	25,9	0,1	0,2	1,3	.
Traversetolo	Osso	23	24,2	26,5	2,3	25,2	0,1	0,7	0,0	-0,9
	M1	17	22,2	27,5	5,3	26,0	0,3	1,1	-2,9	11,3
	Canino	12	25,0	27,7	2,7	26,0	0,2	0,6	1,6	4,3
Arene Candide	Osso	7	26,8	29,7	2,9	27,8	0,4	1,0	1,5	2,6
	M1	6	27,2	28,2	1,0	27,8	0,2	0,4	-0,9	-0,7
	M3	3	27,6	28,0	0,4	27,7	0,1	0,2	1,7	.
Masseria Candelaro	Osso	17	25,6	29,1	3,5	27,0	0,2	1,0	0,6	-0,3
	M1	14	25,8	28,4	2,6	27,2	0,2	0,7	-0,5	0,1
	M3	10	26,3	28,7	2,4	27,0	0,2	0,7	1,6	3,3

Fig.7.40: Tabella dei parametri di statistica descrittiva per i valori del  $\delta^{18}\text{O}$

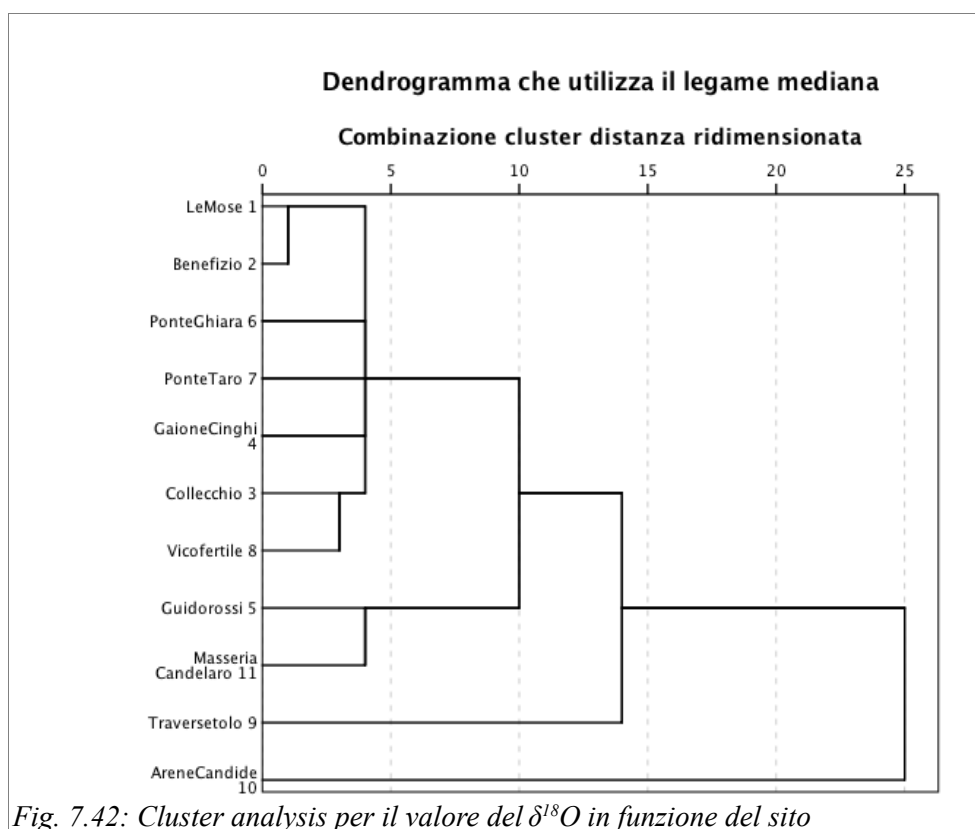
La distribuzione del  $\delta^{18}\text{O}$  misurato nell'apatite delle ossa in funzione della posizione geografica dei siti archeologici è rappresentata in Fig.7.41.



In generale si osserva una dispersione variabile nei siti, maggiormente evidente per Masseria Candelaro e Guidorossi, quest'ultimo caratterizzato dalla presenza di numerosi outliers. La forma delle distribuzioni è molto prossima alla simmetria con grado di curtosi variabile.

I siti di Masseria Candelaro e delle Arene Candide rispetto a quelli emiliani mostrano un andamento del  $\delta^{18}\text{O}$  verso valori più positivi.

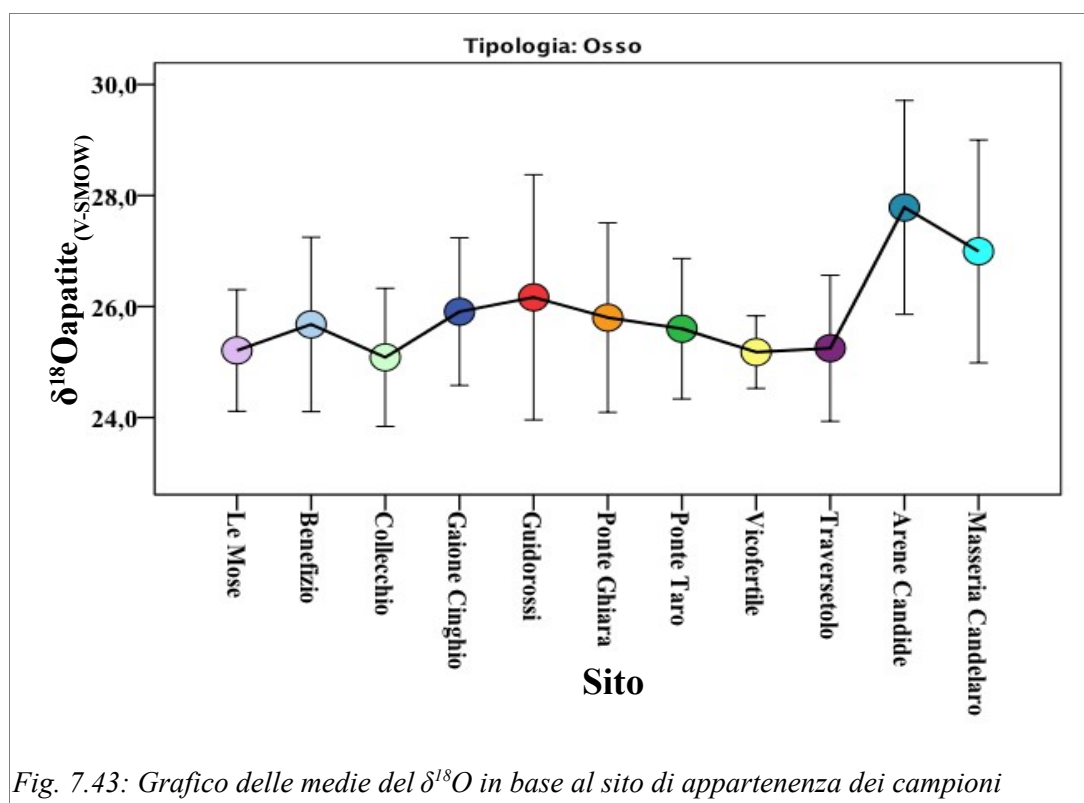
La cluster analysis (Fig.7.42) conferma questo tipo di andamento, ponendo soprattutto l'accento sul fatto che il sito ligure mostra valori dissimili per la mediana a tutti i restanti siti, mentre Masseria Candelaro, Traversetolo e Via Guidorossi costituiscono un gruppo che si differenzia dal resto dei siti della Pianura Padana i quali presentano invece un grado di similarità elevato.



L'ANOVA ha messo in evidenza la presenza di differenze statisticamente significative tra le medie dei gruppi le quali, come per gli altri segnali isotopici, sono state individuate mediante il test T2 per confronti multipli (Fig.7.43).

Prendendo in considerazione le località dell'area Padana possiamo individuare un gruppo di siti caratterizzato da valori mediamente meno positivi (Le Mose, Collecchio, Vicofertile e Traversetolo) rispetto al sito di Via Guidorossi che invece presenta il valore più positivo (26,2‰). Il resto dei gruppi si colloca in posizione intermedia tra questi due estremi non mostrando differenze significative.

I siti di Arene Candide e Masseria Candelaro si differenziano sia fra di loro, sia in molti casi nei confronti della Pianura Padana con valori mediamente più positivi, rispettivamente 27,8‰ e 27,0‰.



Il confronto tra l'osso e il primo molare (Fig.7.44) non ha evidenziato delle differenze statisticamente significative a parte alcuni casi (Le Mose, Collecchio, Ponte Taro e Vicofertile) in cui si osserva una positivizzazione dei valori dell'M1 rispetto all'osso. Ancora una volta la causa risiede nell'assunzione del latte materno (isotopicamente arricchito) durante i primi anni di vita registrata dal primo molare.

Si deve inoltre osservare come il sito di Via Guidorossi presenti anche nel caso dell'M1 numerosi outliers.

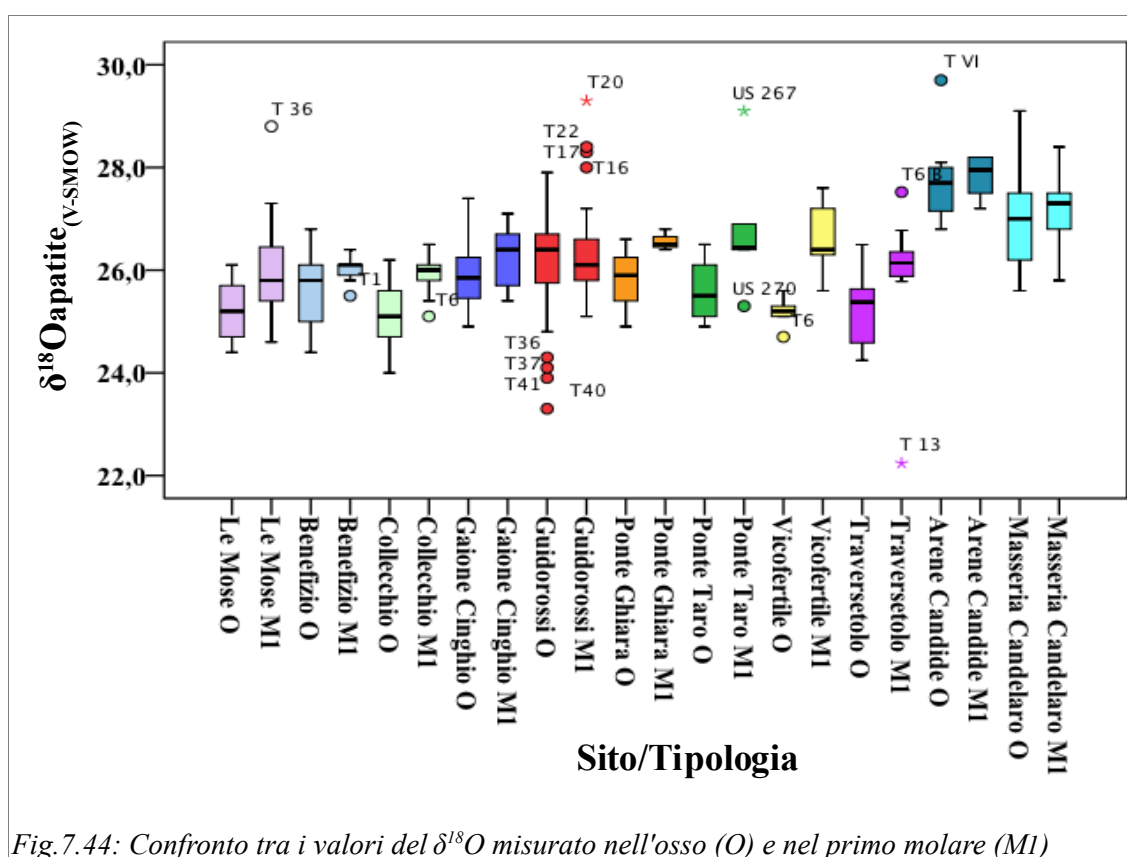


Fig. 7.44: Confronto tra i valori del  $\delta^{18}\text{O}$  misurato nell'osso (O) e nel primo molare (M1)

Come già espresso nel Capitolo 3 al pari del valore isotopico dell'O del fosfato il  $\delta^{18}\text{O}$  del gruppo carbonatico dell'apatite può essere utilizzato per calcolare la composizione isotopica dell'ossigeno dell'acqua ambientale.

Nello specifico, il valore del  $\delta^{18}\text{O}$  del carbonato è stato trasformato in  $\delta^{18}\text{O}$  del fosfato sia con la retta Iacumin et al., 1996:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}} = 0,98(\pm 0,031) * \delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}} - 8,5(\pm 0,806)$$

sia con quella di Zazzo et al, 2004:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}} = 0,97(\pm 0,044) * \delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}} - 9,117(\pm 1,346)$$

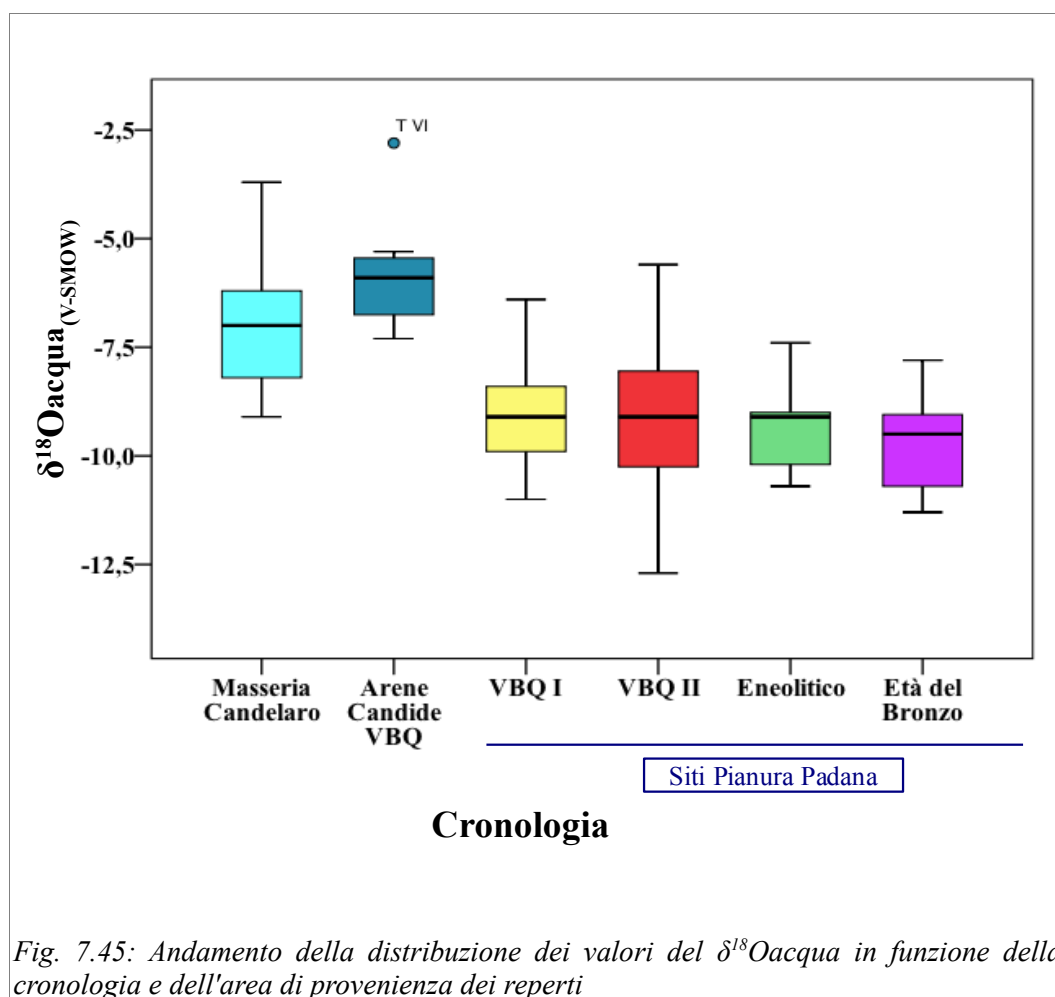
La differenza osservata tra i valori di  $\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}}$  calcolati con le due relazioni è di  $0,86 \pm 0,02\%$ . Per determinare il valore dell'acqua sono stati utilizzati i valori ottenuti con la retta Iacumin et al. in quanto essa è valida per tutti i mammiferi, mentre quella riportata da Zazzo et al. è specifica per una singola specie e mostra una variabilità molto elevata.

Occorre ricordare che studi recentissimi, non ancora pubblicati, sembrano dimostrare che questo tipo di relazioni è influenzato da effetti metabolici dipendenti dalla specie, per cui la retta per l'uomo potrebbe essere diversa; anche per questo motivo abbiamo optato per una relazione più generica come quella di Iacumin et al.

Successivamente, mediante l'equazione calibrata per l'uomo, è stato calcolato il valore dell'acqua meteorica locale riferibile al periodo nel quale l'individuo è vissuto (Longinelli, 1984):

$$\delta^{18}\text{O fosfato} = 0,64 \delta^{18}\text{Oacqua} + 22,37$$

Nel grafico di Fig.7.45 viene quindi rappresentata la distribuzione dei valori del  $\delta^{18}\text{O}$  acqua in funzione della cronologia.



I siti estranei all'area padana mostrano nuovamente il valori meno negativi, mentre per quelli emiliani le distribuzioni sembrano essere paragonabili. Si noti l'ampia dispersione dei dati nel caso del periodo culturale VBQ II, essa potrebbe essere imputabile alla maggiore variabilità che caratterizza il sito di Via Guidorossi.

<b>Cronologia/Sito</b>	<b><math>\delta^{18}\text{O}</math>acqua (media ‰)</b>
Masseria Candelaro	-7,0±1,5
Arene Candide (VBQ)	-5,8±1,5
Siti Pianura Padana (VBQ I)	-9,1±1,1
Siti Pianura Padana (VBQ II)	-9,1±1,6
Siti Pianura Padana (Eneolitico)	-9,4±1,1
Siti Pianura Padana (Bronzo antico)	-9,7±1,0

Fig.7.46: Valori medi del  $\delta^{18}\text{O}$ acqua in funzione della cronologia e della provenienza dei campioni

Per evidenziare eventuali differenze tra i periodi cronologici dei siti della Pianura Padana sono stata confrontate le medie dei gruppi (Fig.7.47) mediante test t di Student per campioni indipendenti ( $p=0,05$ ) il quale ha identificato una differenza statisticamente significativa solo per il gruppo dell'età del Bronzo.

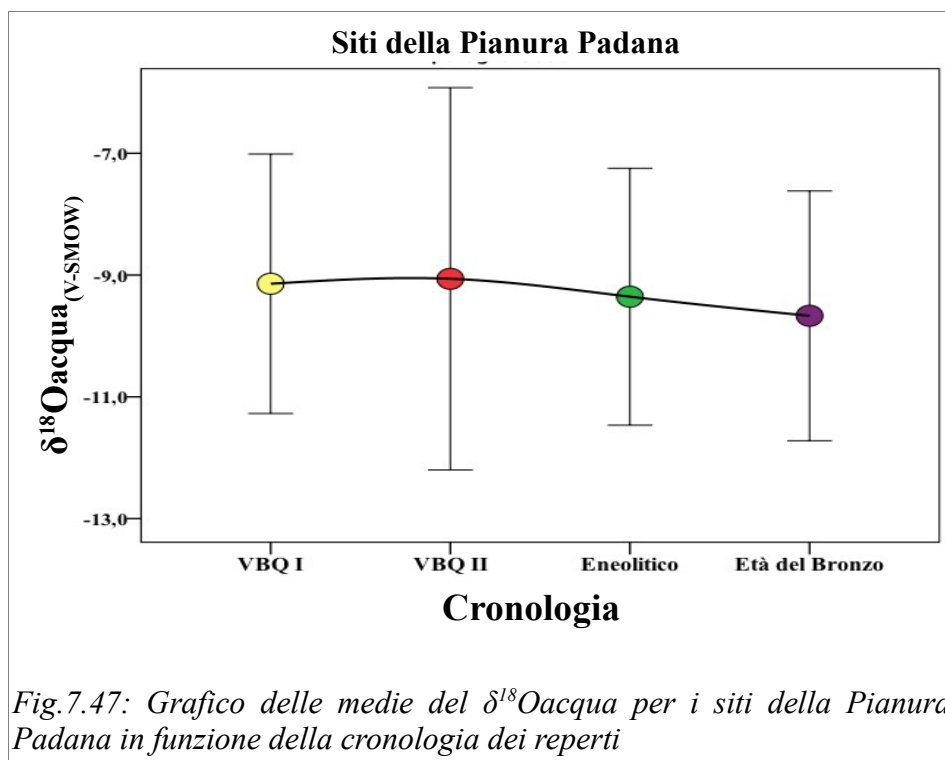


Fig.7.47: Grafico delle medie del  $\delta^{18}\text{O}$ acqua per i siti della Pianura Padana in funzione della cronologia dei reperti

Tale andamento si riscontra anche per Le Mose e Via Guidorossi i quali non mostrano differenze significative nell'intervallo cronologico da essi ricoperto (Fig.7.48 e Fig.7.49)

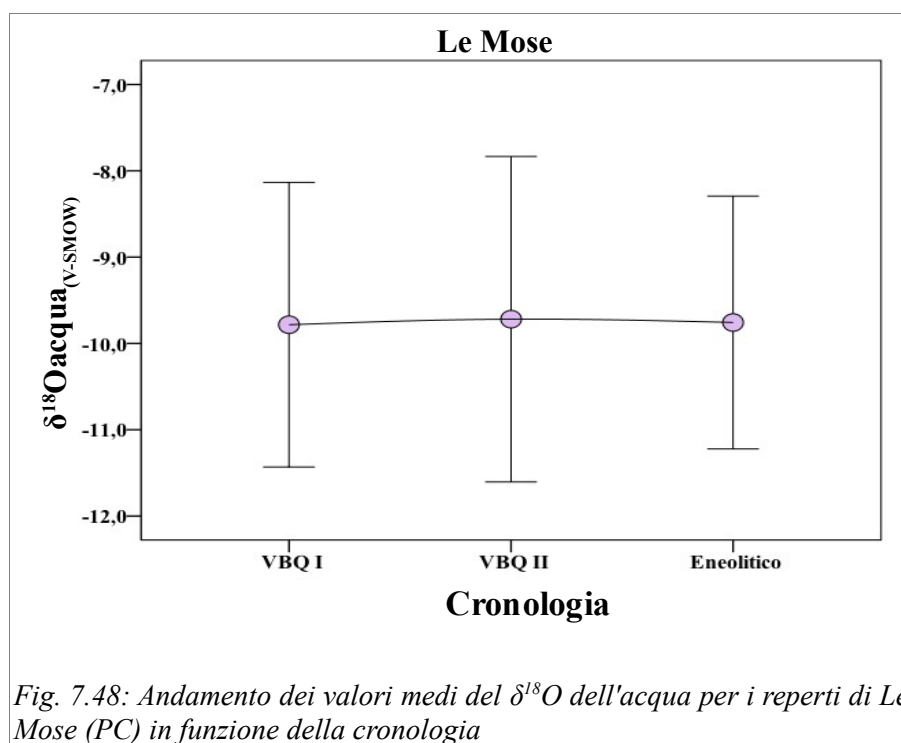


Fig. 7.48: Andamento dei valori medi del  $\delta^{18}O$  dell'acqua per i reperti di Le Mose (PC) in funzione della cronologia

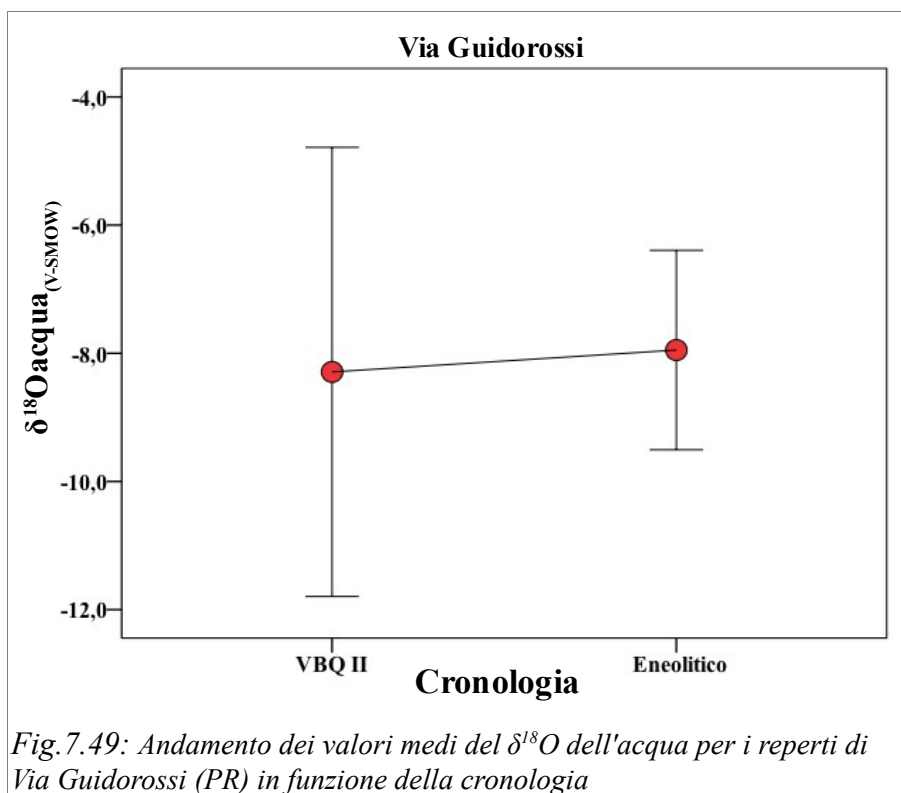
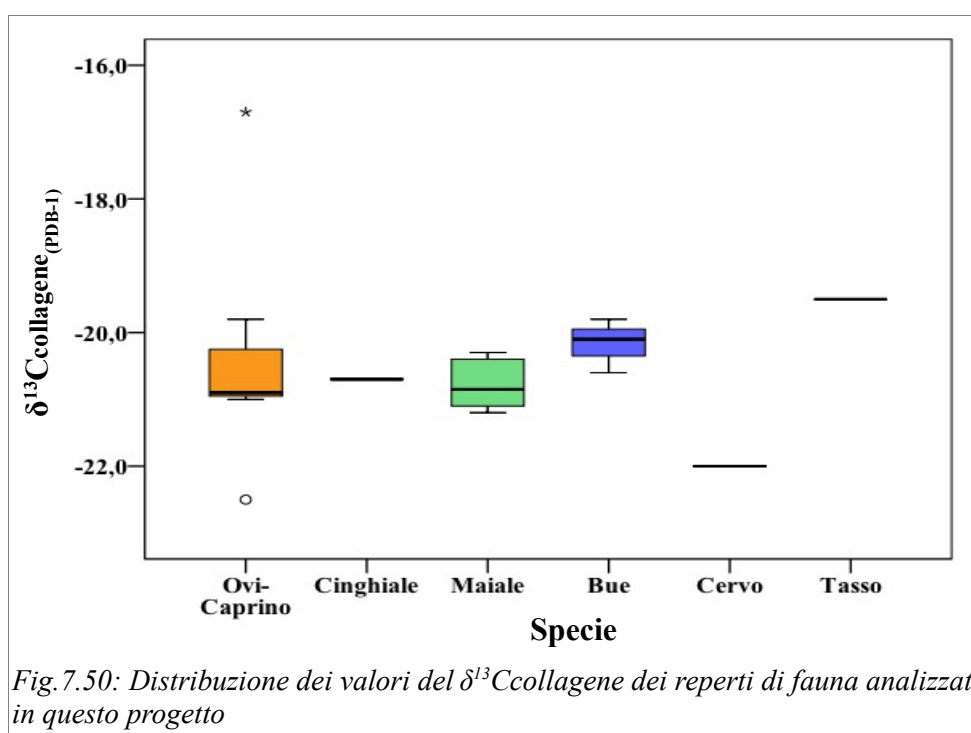


Fig. 7.49: Andamento dei valori medi del  $\delta^{18}O$  dell'acqua per i reperti di Via Guidorossi (PR) in funzione della cronologia

## 7.6: LE FAUNE

In alcuni dei siti archeologici sono stati rinvenuti resti osteologici di faune, principalmente ovini-caprini, maiali e buoi, i cui valori risultano molto utili sia per completare il quadro climatico e ambientale che per considerazioni specifiche sulle diete.

Nel grafico di Fig.7.50 sono illustrati i Box-Plot relativi all'andamento del  $\delta^{13}\text{C}$  del collagene misurato in tali reperti. Si può osservare come i valori di composizione isotopica del carbonio siano compatibili con una dieta tipicamente terrestre basata su piante  $\text{C}_3$ , confermando quanto era già emerso dai campioni umani.



Si può anche rilevare come l'esemplare di cervo presenti il valore più negativo il quale risulta compatibile con una dieta esclusivamente erbivora correlata con un habitat di foresta matura (Drucker et al., 2009).

Il valore del  $\delta^{15}\text{N}$  si rivela molto utile per ricostruire le catene trofiche sia in ambiente terrestre che marino, in particolare si osserva un arricchimento del 3-4‰ tra un livello trofico e l'altro. Il confronto tra uomini e animale (Fig.7.51) segnala proprio un arricchimento a

favore dei primi il quale indica il posizionamento dell'uomo ad un livello trofico maggiore rispetto alle faune. Queste, presumibilmente, costituivano parte integrante della dieta come confermato anche dagli studi archeologici.

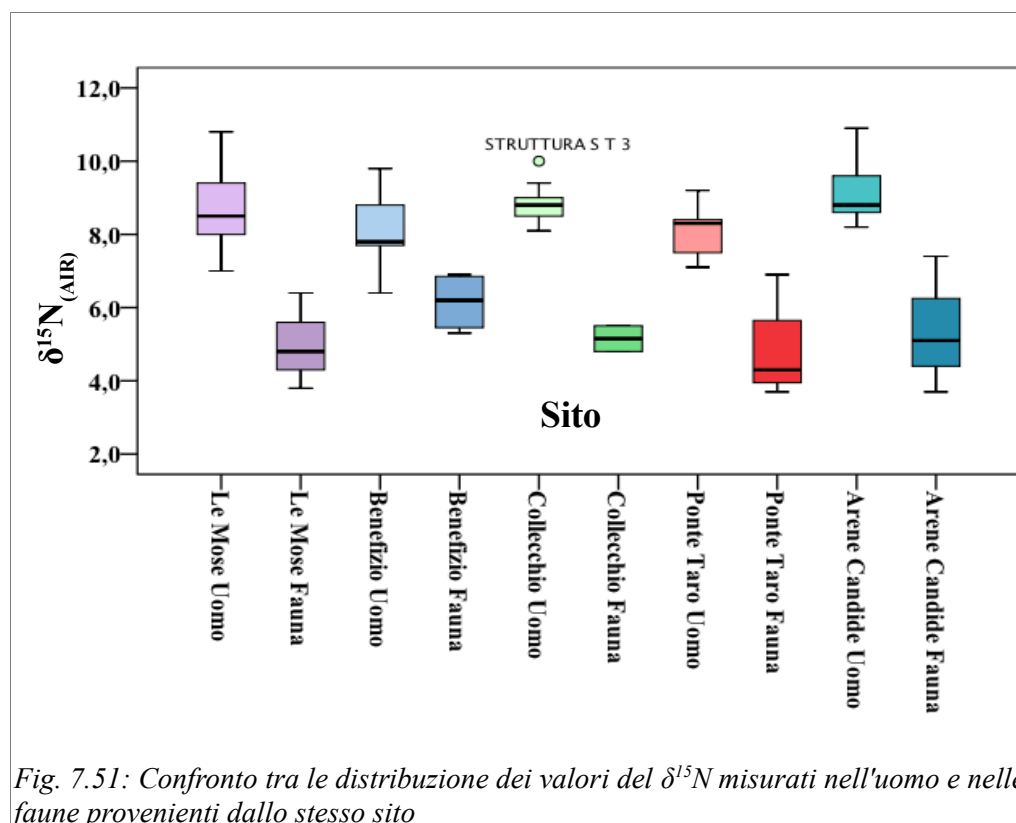


Fig. 7.51: Confronto tra le distribuzioni dei valori del  $\delta^{15}\text{N}$  misurati nell'uomo e nelle faune provenienti dallo stesso sito

I valori del  $\delta^{18}\text{O}$  seguono lo stesso andamento individuato per gli esemplari umani (Fig.7.52) con un piccolo ma sistematico arricchimento nelle faune rispetto agli uomini. Tale positività, più evidente per i campioni appartenenti ai siti nei quali è stata indicata una maggiore aridità ambientale, è legata al fatto che gli animali si abbeverano anche dalle pozze d'acqua evaporanti, isotopicamente più pesanti.

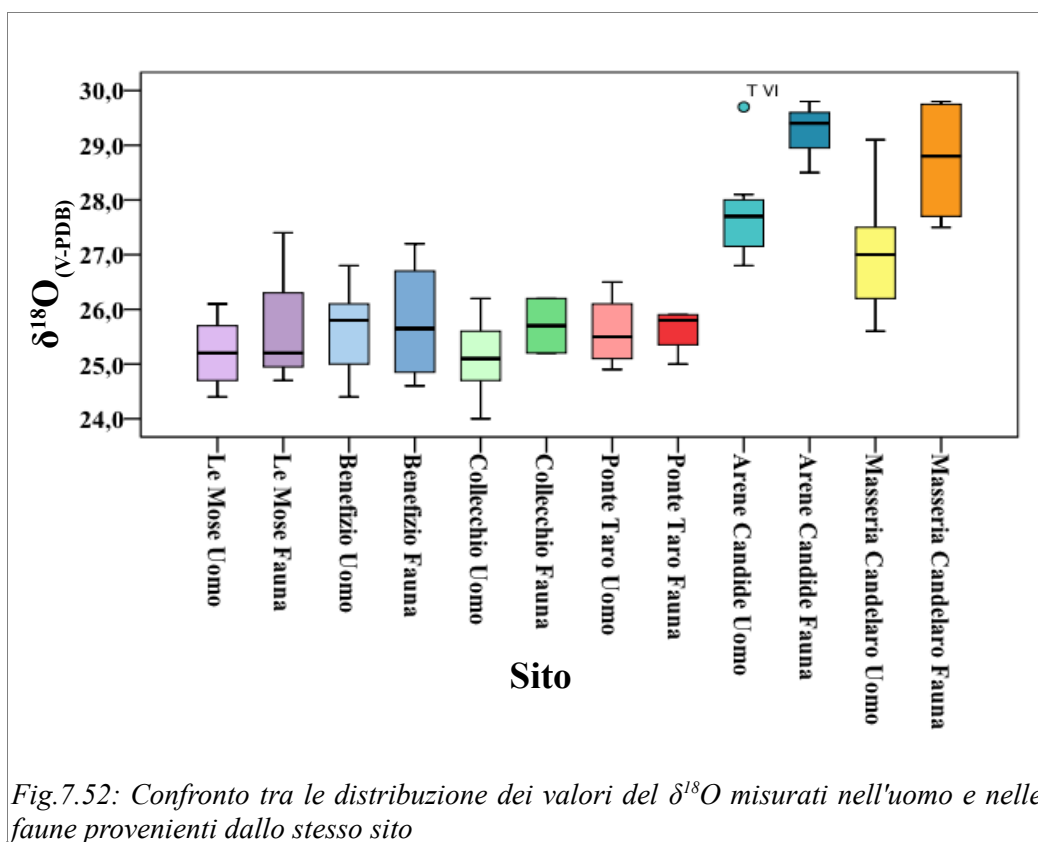


Fig.7.52: Confronto tra le distribuzione dei valori del  $\delta^{18}O$  misurati nell'uomo e nelle faune provenienti dallo stesso sito

## 7.7: RICOSTRUZIONE DELLA PALEODIETA

Entrambi i segnali isotopici ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$  e  $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagene}}$ ) forniscono informazioni sulla paleodieta ma abbiamo visto come essi riflettano diversamente la composizione isotopica dei macronutrienti. Nel grafico di Fig.7.53. il valore del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$  è stato correlato con il  $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagene}}$  e sono state riportate le rette che rappresentano isotopicamente le proteine derivanti da piante  $\text{C}_3$  (rossa), quelle provenienti da risorse marine (giallo) e, infine, quelle relative alle piante  $\text{C}_4$  secondo il modello proposto da Kellner e Schoeninger, 2007.

Come si può osservare dal posizionamento dei campioni la base della dieta è senz'altro costituita da proteine provenienti da piante  $\text{C}_3$ , mentre risultano del tutto assenti le piante a ciclo fotosintetico  $\text{C}_4$  e le proteine di origine marina. In realtà per evidenziare in maniera più efficace l'eventuale presenza di pesce nella dieta è necessario confrontare questi dati con il valore del  $\delta^{15}\text{N}$ . La variabilità riscontrata per il  $\delta^{13}\text{C}$  dell'apatite potrebbe essere messa in relazione con la composizione biochimica dei diversi macronutrienti della dieta. È noto, infatti, che i lipidi sono maggiormente selettivi per l'isotopo più leggero e quindi risultano impoveriti rispetto alla dieta, a differenza delle proteine che invece sono arricchite in  $^{13}\text{C}$  e dei glucidi che mantengono valori simili a quelli dei cibi assunti. Probabilmente la dieta di questi individui, oltre che dal consumo di piante  $\text{C}_3$ , era caratterizzata anche dall'assunzione di proteine animali. In effetti questa possibilità viene confermata dalle analisi condotte in tale senso sui resti ossei delle faune.

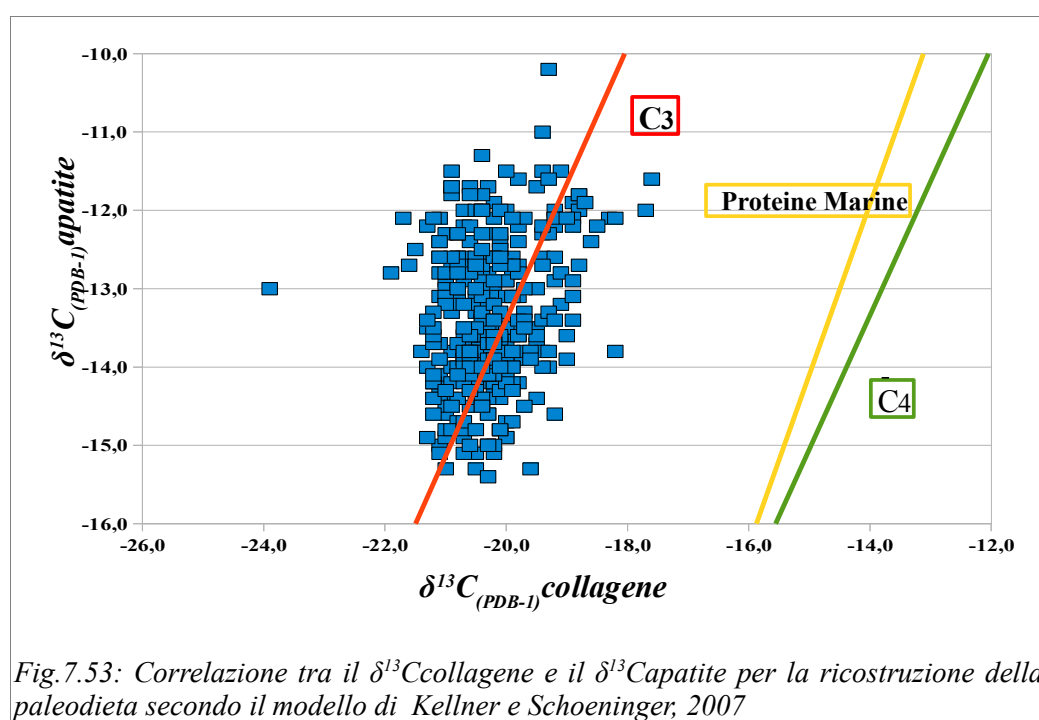
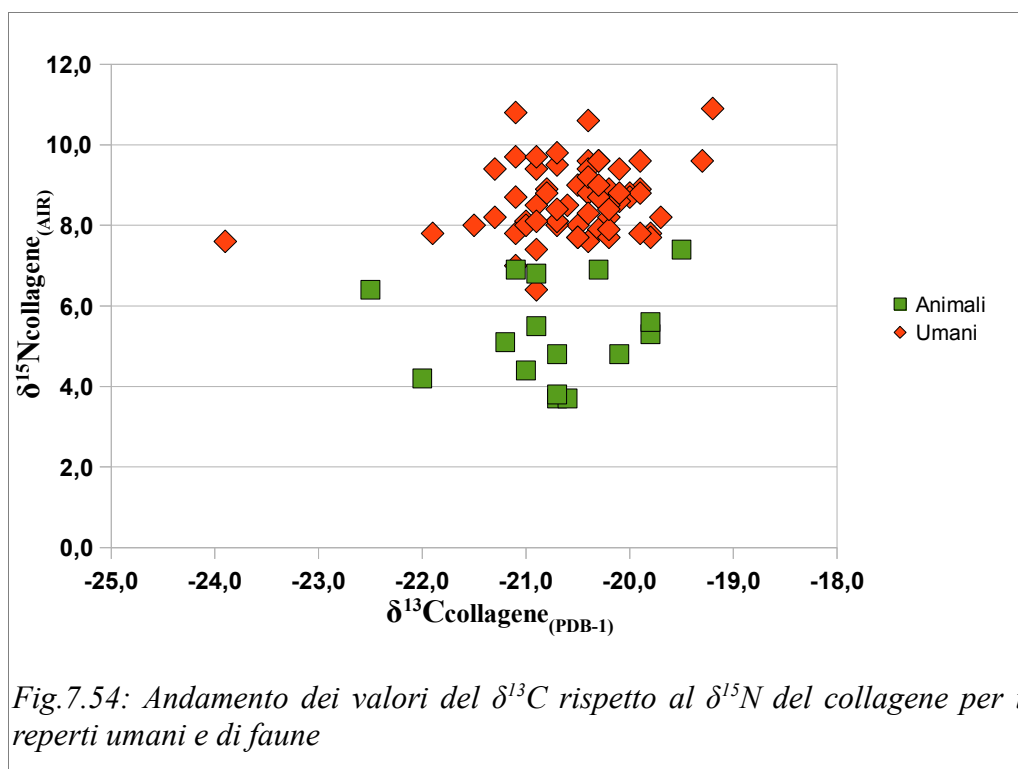


Fig.7.53: Correlazione tra il  $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagene}}$  e il  $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$  per la ricostruzione della paleodieta secondo il modello di Kellner e Schoeninger, 2007

A questo proposito nel grafico di Fig. 7.54 vengono confrontati i valori del  $\delta^{13}\text{C}$  e del  $\delta^{15}\text{N}$  dei campioni ossei, umani e animali, relativi ai siti nei quali sono stati rinvenuti entrambe le tipologie di reperto: Le Mose, Benefizio, Collecchio, Ponte Taro e Arene Candide.



Possiamo osservare come gli umani possiedano valori dell'azoto più arricchiti rispetto agli animali, mediamente del 3,3‰. Questo dato indica che molto probabilmente le faune in questione rientravano nel regime alimentare di questi individui, anche se non è possibile quantificare l'entità delle proteine animali assunte. I valori isotopici del carbonio confermano, come già descritto nel paragrafo precedente, che anche gli animali si cibavano di piante C3.

Un metodo piuttosto immediato per individuare l'eventuale presenza di altre fonti proteiche, è quello di determinare la differenza tra il valore misurato nel collagene e quello dell'apatite. Gli erbivori, infatti, la cui dieta è basata essenzialmente su carboidrati, mostrano in genere una maggiore differenza tra  $\delta^{13}\text{C}$  del collagene e  $\delta^{13}\text{C}$  dell'apatite rispetto ai carnivori e agli onnivori per i quali il  $\Delta$  è minore a causa dell'arricchimento in  $^{13}\text{C}$  per la maggiore quantità di proteine ingerite. In realtà, nel caso dell'uomo queste differenze sono piuttosto variabili (le più piccole sembrerebbero essere quelle di popolazioni di pescatori) ma ci consentono comunque di ottenere un'indicazione in tal senso soprattutto se le confrontiamo

con quelle relative ai campioni di faune.

In questo caso possiamo rilevare, dal grafico di Fig.7.55, che gli erbivori presentano valori del  $\Delta_{ap-co}$  generalmente maggiori rispetto ai carnivori e agli onnivori, per i quali questa differenza si riduce.

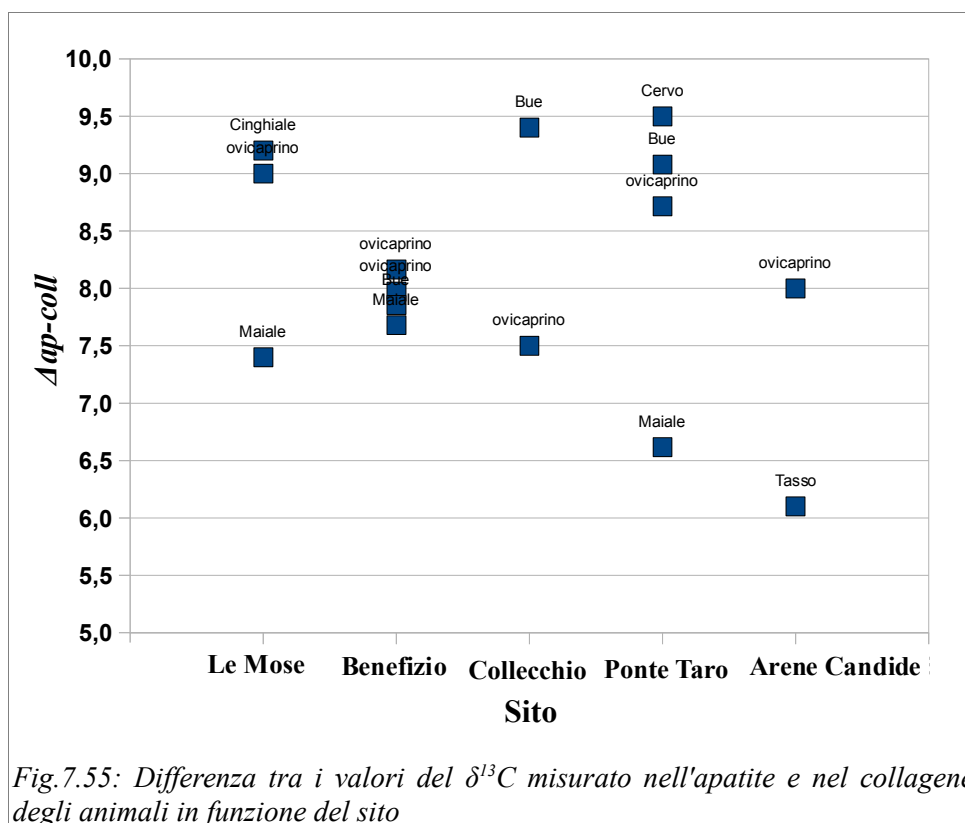
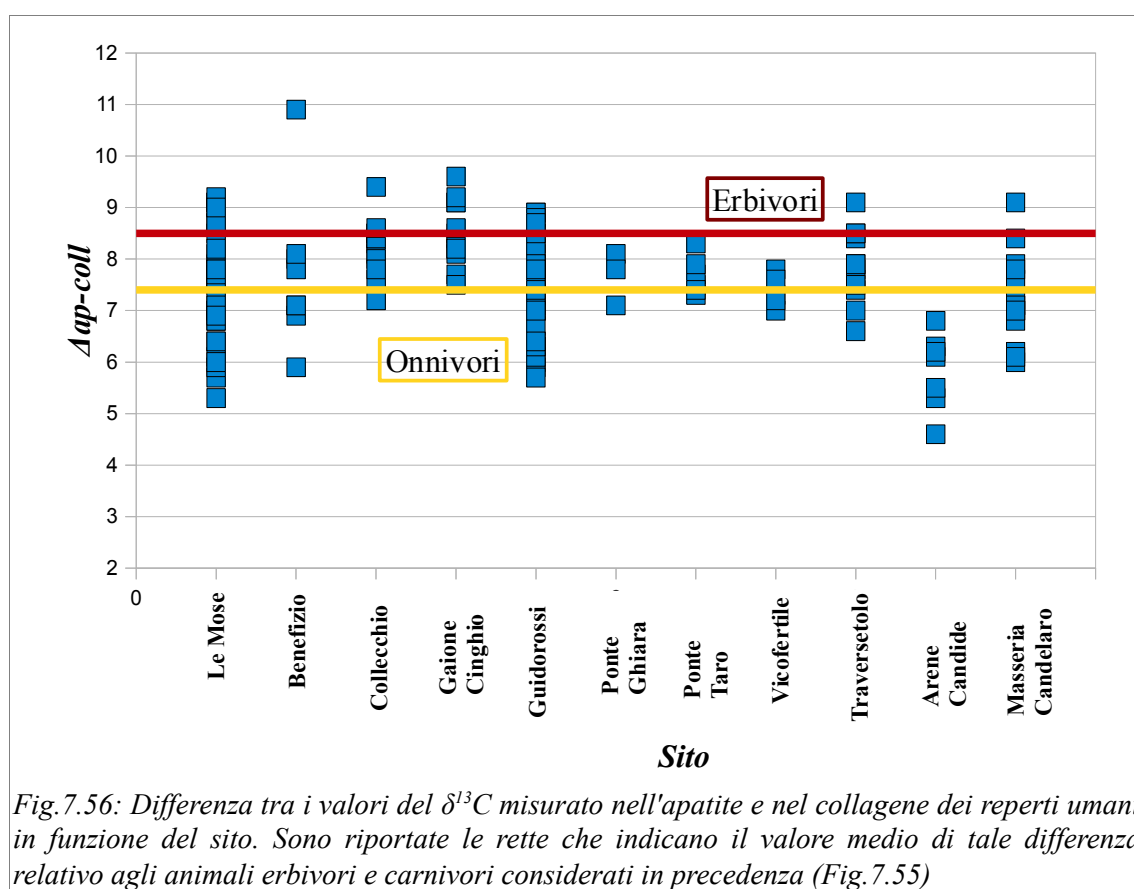


Fig.7.55: Differenza tra i valori del  $\delta^{13}C$  misurato nell'apatite e nel collagene degli animali in funzione del sito

Nel grafico di Fig.7.56 abbiamo calcolato il valore della differenza  $\Delta_{ap-coll}$  per ognuno degli individui umani riportando le rette che illustrano i valori medi individuati per le faune onnivore ( $\sim 7,4\%$ ) ed erbivore ( $\sim 8,5\%$ ). Possiamo osservare come, in linea di massima, venga confermato quanto già rilevato con le valutazioni precedenti, per cui questi individui presentano una dieta vegetariana nella quale sono inserite delle proteine di origine animale.



Per quanto riguarda le considerazioni che si possono ricavare dall'analisi del  $\delta^{15}\text{N}$  possiamo dire che i valori positivi riscontrati per gli individui del sito di Via Traversetolo (Fig. 7.32) potrebbero far pensare ad un eventuale consumo di pesce e, in effetti, questa possibilità non è da escludersi a priori. Tuttavia se tale alimento rappresentava davvero una quota consistente del sostentamento di questi individui ci saremmo aspettati valori dell'azoto ancora più arricchiti. Forse il pesce, presumibilmente d'acqua dolce, veniva effettivamente consumato dalle popolazioni oggetto di studio ma in quantità molto subordinate rispetto alle altre componenti alimentari.

Tale discriminazione non può essere effettuata neppure considerando i valori del  $\delta^{13}\text{C}$  i quali, nel caso dei pesci d'acqua dolce, sono confrontabili con quelli relativi alle faune terrestri.

## **7.8: RICOSTRUZIONE PALEOCLIMATICA E PALEOAMBIENTALE**

I parametri isotopici considerati in questo studio risultano, per svariati motivi, indicatori diretti o indiretti delle caratteristiche ambientali delle aree indagate, relativamente all'intervallo cronologico ricoperto dai campioni.

I valori di  $\delta^{13}\text{C}$  della dieta, ricalcolati a partire del valore misurato nell'idrossiapatite, indicano per la totalità degli individui un'alimentazione e, in maniera indiretta, una copertura vegetale, costituita essenzialmente da piante a ciclo fotosintetico C3. Questo tipo di piante è molto diffuso alle medie latitudini e risulta indicativo di un clima temperato.

Nell'analisi di questo parametro isotopico è necessario considerare le variazioni indotte da alcuni fattori ambientali, tra i quali ad esempio la disponibilità d'acqua, il tasso di umidità e l'insolazione, sui valori isotopici della vegetazione di tipo C3. In particolare è stato sperimentalmente provato che esiste una correlazione negativa tra il  $\delta^{13}\text{C}$  e la disponibilità idrica, per cui la vegetazione cresciuta in condizioni di stress idrico riporta valori di composizione isotopica del carbonio più elevati rispetto alle piante cresciute in condizioni di abbondanza d'acqua.

Sulla base di queste considerazioni potremmo ipotizzare per i campioni prelevati in Pianura Padana una tendenza verso condizioni ambientali caratterizzate da una maggiore umidità durante il Neolitico medio e fino all'Eneolitico, mentre a partire dall'età del Bronzo si assisterebbe al passaggio verso una fase di maggiore aridità.

Per il sito della Caverna delle Arene Candide verrebbero indicate condizioni maggiormente umide probabilmente legate alla posizione geografica e alla vicinanza con il mare. Valori più negativi potrebbero anche essere il risultato di un "effetto copertura" per cui in un'ambiente di foresta le piante del sottobosco sono costrette ad usufruire della  $\text{CO}_2$  (più negativa) rilasciata dalle piante più alte le quali impediscono il mescolamento con quella atmosferica (più positiva).

Infine, il sito di Masseria Candelaro sembrerebbe caratterizzato da una minore disponibilità idrica, magari anche solo stagionale.

I valori del  $\delta^{13}\text{C}$  relativi alla frazione organica dei reperti scheletrici confermano per le aree prese in esame un tipo di copertura vegetale di tipo C3. Contrariamente a quanto descritto per la fase minerale in questo caso non si osservano quelle piccole variazioni descritte per i siti emiliani che avevamo correlato con il tasso di umidità e la disponibilità idrica, indicando invece condizioni dell'habitat più omogenee. Si può ipotizzare che questo indice isotopico non

sia così sensibile alle variazioni di tali parametri ambientali come invece sembrerebbe esserlo il  $\delta^{13}\text{C}$  dell'apatite.

Per quanto riguarda il sito dell'Italia meridionale di Masseria Candelaro i valori meno negativi potrebbero essere ricondotti, tra l'altro, alla disponibilità in quell'area di piante  $\text{C}_3$  di specie differenti rispetto a quelle della Pianura Padana, capaci magari di crescere in condizioni di maggiore aridità. Inoltre, poiché alcuni autori (Stuiver et Braziunas, 1987; Hemming et al., 1998; van Klinken et al., 1994) hanno correlato positivamente la temperatura e l'irraggiamento con il valore del  $\delta^{13}\text{C}$  della vegetazione, potremmo ipotizzare per quest'area un ambiente più aperto e con temperature maggiori rispetto a quello dell'Emilia Romagna.

Il sito della Caverna delle Arene Candide, invece, non risulta concordante con l'andamento riscontrato per l'apatite in quanto i valori del  $\delta^{13}\text{C}$ collagene indicano condizioni di umidità intermedie tra quelle descritte per la Pianura Padana e quelle relative al sito di Masseria Candelaro. In questo caso è possibile che tale discrepanza sia legata ad un fattore dietetico piuttosto che climatico. Inoltre, occorre sempre tenere presente il numero inferiore di campioni che rappresenta questa sito rispetto agli altri gruppi.

La composizione isotopica dell'azoto nei reperti scheletrici, oltre a ricostruire le paleodiete, costituisce un buon indicatore ambientale. Esiste, infatti, una correlazione inversa tra valori del  $\delta^{15}\text{N}$  e la quantità di pioggia. In caso di stress idrico, infatti, il corpo rilascia maggiori quantità di urea (isotopicamente impoverita) attraverso le urine, di conseguenza l'acqua metabolica disponibile per la sintesi dei tessuti risulterà arricchita in  $^{15}\text{N}$ .

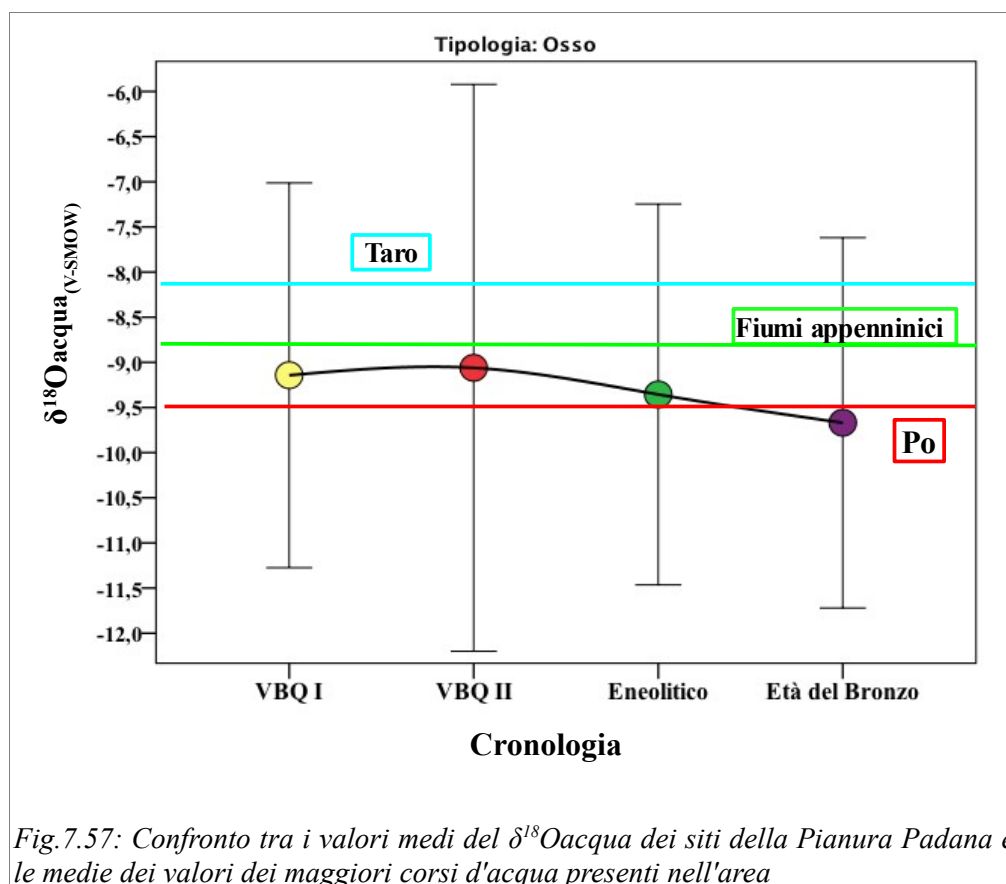
In base a queste considerazioni potremmo ipotizzare per i siti della Pianura Padana una fase meno umida durante il Bronzo Antico, come tra l'altro anche indicato dal  $\delta^{13}\text{C}$  dell'apatite.

I siti di Masseria Candelaro e delle Arene Candide denoterebbero, invece, condizioni leggermente più aride rispetto a quelle presenti in Pianura Padana. Questo dato sarebbe concordante con le considerazioni effettuate per il  $\delta^{13}\text{C}$  del collagene.

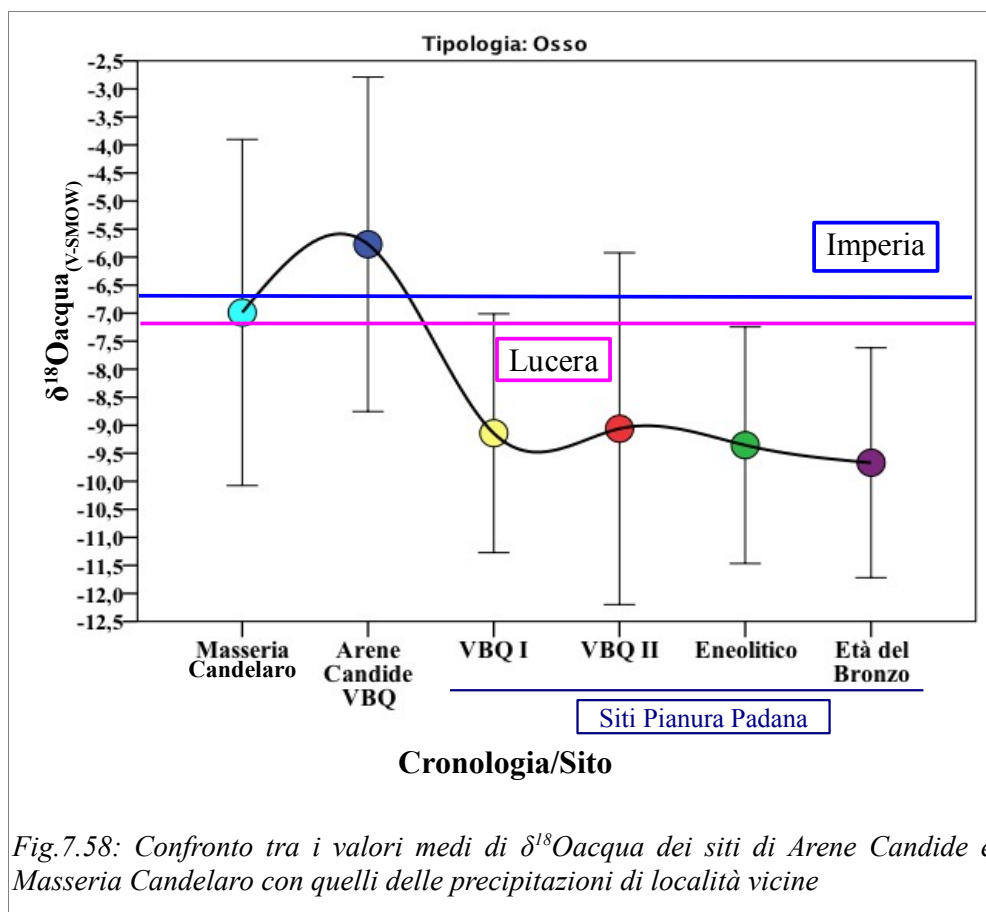
La composizione isotopica dell'ossigeno del fosfato e del carbonato dell'idrossiapatite dei reperti scheletrici è legata a quella dell'acqua ambientale da una relazione lineare positiva. Poiché sussiste una notevole variabilità dei rapporti isotopici dell'ossigeno nei diversi ambienti naturali, in funzione di temperatura, umidità, distanza dal mare, altitudine, quantità di pioggia, ecc., tale parametro si rivela molto utili per ricostruire gli ambienti del passato. In particolare, il  $\delta^{18}\text{O}$  delle precipitazioni è direttamente correlato con la temperatura media annua al suolo.

Sulla base di tali considerazioni possiamo affermare che i campioni della Pianura Padana mostrano una certa stabilità climatica durante il Neolitico medio, con un iniziale peggioramento durante il Bronzo antico, segnalato dalla negativizzazione dei valori isotopici. I reperti di Masseria Candelaro e Arene Candide presentano valori mediamente meno negativi i quali indicano condizioni climatiche più calde rispetto a quelle dell'area Padana.

Attualmente i valori di composizione isotopica dell'ossigeno (Fig.7.57) dei fiumi presenti nell'area sono i seguenti: Taro = -8,1‰; Parma, Baganza ed Enza = -8,8‰ i quali hanno origine dagli appennini, mentre il Po, di origine alpina, presenta valori più negativi (-9,5‰). I siti emiliani durante il Neolitico mostrano un valore medio di -9,1‰ il quale segnalerebbe condizioni climatiche non molto differenti rispetto a quelle attuali in termini di temperatura. I campioni dell'Età del Bronzo mostrano maggiore affinità con il valore attuale del Po. Considerando che esso è un fiume di origine alpina, per cui le temperature di condensazione delle piogge nell'area di ricarica sono inferiori rispetto a quelle dei torrenti appenninici, potremmo affermare che durante il Bronzo antico si è verificata una diminuzione delle temperature rispetto ai periodi precedenti.



Per i siti di Masseria Candelaro e delle Arene Candide non si hanno a disposizione i dati dei corsi d'acqua ma possiamo effettuare dei confronti con i valori isotopici delle precipitazioni attuali (Longinelli et Selmo, 2003).



Per l'area pugliese abbiamo considerato il dato relativo alla vicina località di Lucera (FG), situata circa 40 km più ad est e ad un'altitudine di 200 m maggiore, il quale ha un valore medio di -7,2‰ (Fig.7.58). I reperti del Neolitico inferiore di Masseria Candelaro presentano un valore medio di -7,0‰ il quale ancora una volta segnalerebbe condizioni climatiche molto simili a quelle attualmente presenti nell'area, più calde rispetto all'area padana.

Infine, il sito ligure delle Arene Candide (media -5,8‰) viene confrontato con i valori di composizione isotopica delle precipitazioni relative alla località di Imperia (-6,6‰). Questa volta il dato Neolitico indicherebbe condizioni climatiche caratterizzate da temperature maggiori sia rispetto a quelle attuali, sia nei confronti della Pianura Padana neolitica. Inoltre, se si tiene conto della posizione costiera del sito, che determina valori più arricchiti in <sup>18</sup>O rispetto a quelli della zona emiliana più interna (effetto continentalità), potremmo ipotizzare

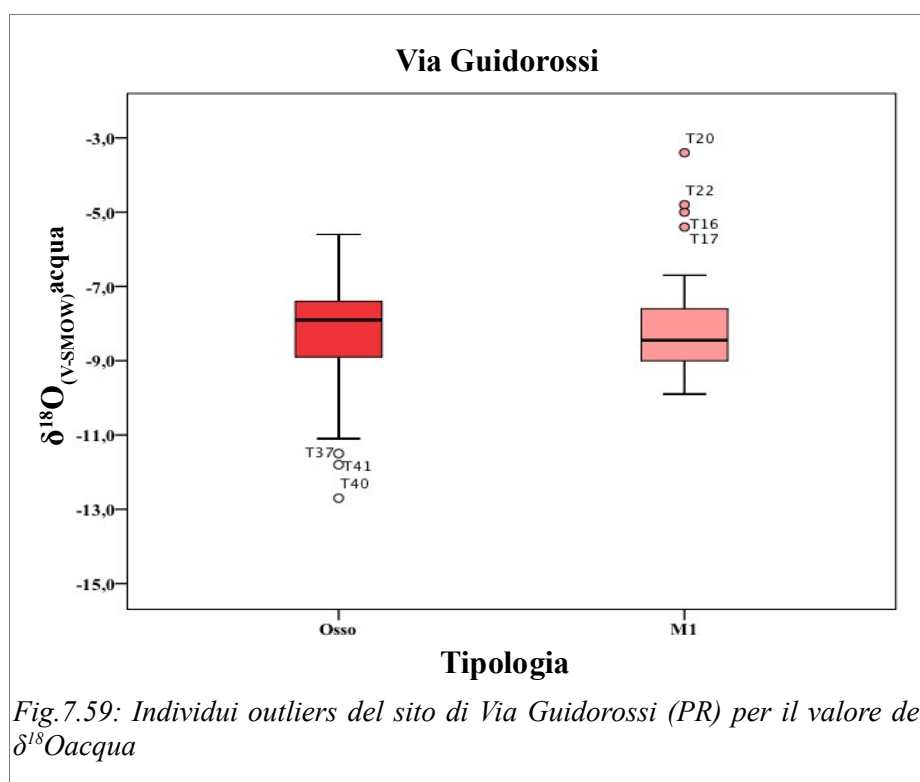
che l'andamento preferenziale delle perturbazioni, da ovest verso est, che caratterizza attualmente l'area era attivo anche durante il Neolitico medio.

Occorre tenere sempre presente, quando si fanno questi raffronti, che i valori dell'acqua calcolati sui reperti ossei forniscono un ordine di grandezza mediato su molti anni, mentre i valori dei fiumi sono stati determinati solo su un campionamento di un anno e mezzo, e le piogge sulla raccolta di dati per un periodo variabile tra uno e sette anni.

In aggiunta agli studi sulla variabilità climatica gli isotopi dell'ossigeno possono essere utilizzati per individuare la presenza di fenomeni migratori che coinvolgono interi gruppi e/o singoli individui. Come già affermato, infatti, i tessuti metabolicamente inattivi (come lo smalto dei denti) riflettono le condizioni ambientali dell'area geografica e del periodo della vita nel quale si sono formati, mentre per quei tessuti che rigenerano continuamente il proprio patrimonio cellulare, i valori di composizione isotopica sono da riferirsi al periodo di rinnovamento che nel caso delle ossa si riferisce almeno agli ultimi 10 anni di vita di un individuo.

I nostri esemplari, nel caso delle ossa, sono caratterizzati da una certa variabilità interna ai gruppi la quale potrebbe segnalare la presenza di fenomeni migratori in aree ristrette.

Se invece prendiamo in considerazione il sito di Via Guidorossi notiamo la presenza di numerosi outliers, sia per i primi molari che per le ossa (Fig.7.59).



In particolare nel caso dell'M1 gli individui T.16, T.17, T.20, T.22 presentano valori di composizione isotopica dell'ossigeno più positivi rispetto al resto del gruppo, mentre essi rientrano all'interno della distribuzione quando si considerano le ossa. Questo andamento potrebbe indicare che questi soggetti abbiano trascorso le prime fasi della loro vita in un'area diversa da quella della Pianura Padana, forse più meridionale o costiera se li confrontiamo con i siti di Masseria Candelaro e delle Arene Candide. Per quanto riguarda gli outliers relativi alle ossa (T.37, T.40 e T.41) essi presentano valori più negativi rispetto al gruppo e potrebbero segnalare lo spostamento da aree mediamente più fredde (magari per motivi di sostentamento) nel periodo precedente alla morte. Queste ipotesi sembrerebbero in parte supportate dai dati archeologici che individuano una sepoltura ravvicinata per gli individui T.16, T.17 e T.20 forse per appartenenza allo stesso gruppo familiare o sociale. Anche il sito di Le Mose (Fig.7.60) presenta un individuo anomalo (T.36) il quale però non risulta compatibile con il gruppo né per il primo molare né per il terzo e che quindi sarebbe completamente “estraneo”.

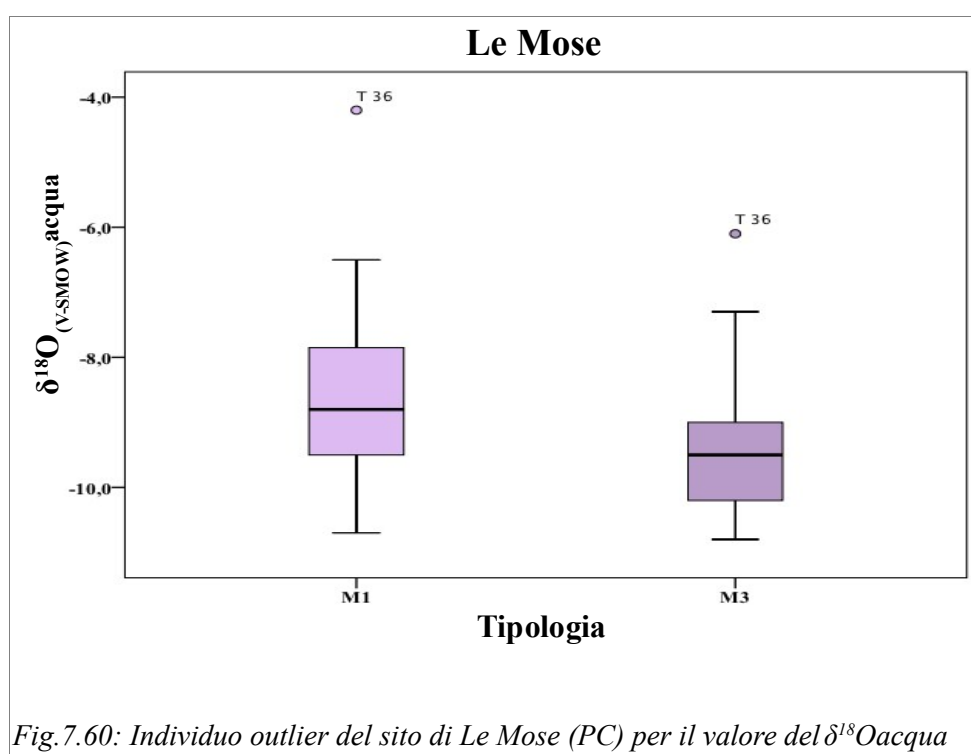


Fig.7.60: Individuo outlier del sito di Le Mose (PC) per il valore del  $\delta^{18}\text{O}$  acqua

Dall'integrazione delle informazioni ricavate dai singoli segnali isotopici possiamo desumere per i siti dell'area della Pianura Padana un clima temperato caldo caratterizzato da condizioni termiche non troppo dissimili rispetto a quelle attuali e da un tasso di umidità crescente tra la prima e la seconda fase VBQ, come evidenziato dall'andamento del  $\delta^{13}\text{C}$

dell'apatite. A partire dall'età del Bronzo si assiste ad un peggioramento climatico con temperature inferiori e un incremento dell'aridità. Questa ricostruzione sembrerebbe concordare con i dati palinologici preliminari disponibili per i siti di Le Mose e Via Guidorossi (Marcheselli, 2009). In entrambi i casi sono stati individuate due fasi polliniche, corrispondenti ad altrettante fasi cronologiche, differenziate in base alle caratteristiche della vegetazione e dell'ambiente. In particolare la prima fase VBQ sarebbe caratterizzata dalla presenza del querceto misto e da un incremento delle erbe rispetto alle piante arboree, probabilmente in seguito all'aumento delle specie coltivate (cereali, canapa, leguminose), mentre risulta limitata la presenza di piante di ambienti umidi (pteridofite). In generale però vengono indicate per questa prima fase condizioni di miglioramento delle temperature e del clima in accordo con l'optimum climatico che caratterizza l'Atlantico.

Per la seconda fase VBQ si osserva un aumento delle latifoglie decidue e una regressione delle conifere. Gli Indicatori Antropici Totali diminuiscono (fase di abbandono) mentre si assiste ad un incremento delle piante legate ad ambiente umido (pteridofite). Il clima sempre nell'ambito dell'*optimum climatico olocenico* risulta essere più umido (Fig.7.61) rispetto alla fase precedente.

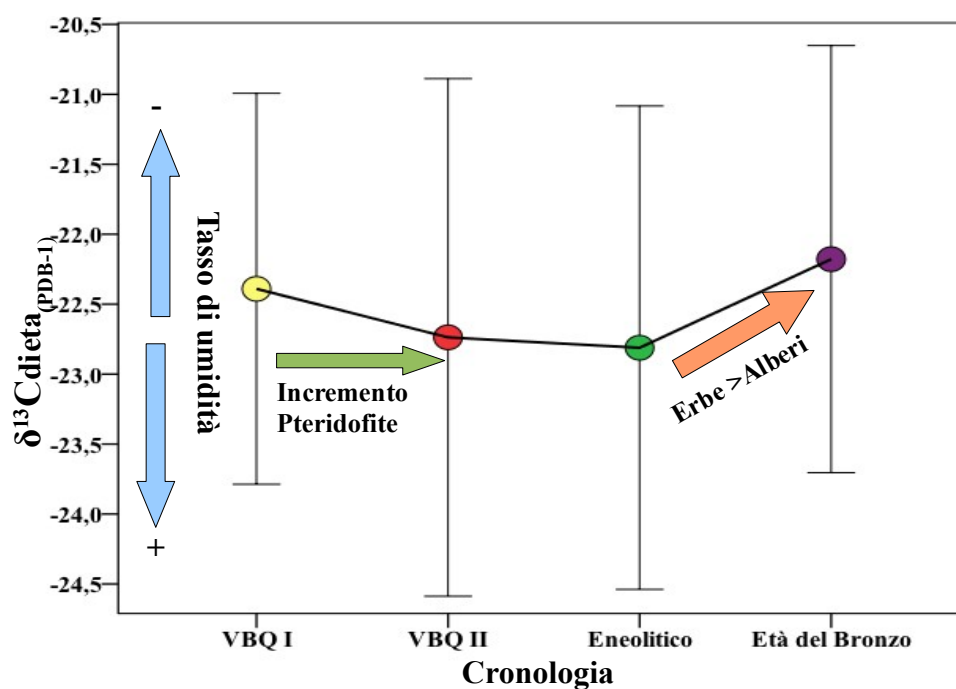


Fig.7.61: Confronto tra le informazioni polliniche disponibili per i siti della Pianura Padana e quelle ottenute dai valori isotopici del  $\delta^{13}C_{dieta}$

Purtroppo nel caso del sito dell'Età del Bronzo non è ancora disponibile uno studio palinologico, attualmente in corso, ma è possibile far riferimento ad indagini condotte in aree limitrofe. Ad esempio uno studio condotto per il Lago di Lucone (BR) segnala per il Bronzo Antico (4200-3600 BP) un aumento dei cereali e delle erbe rispetto agli alberi, nonché una crescita degli Indicatori Antropici Totali i quali indicano un ambiente aperto e deforestato a causa delle attività antropiche. Per quanto riguarda il dato ambientale l'associazione pollinica suggerisce una fase ancora relativamente calda e ma arida (Valsecchi et al., 2006). Lo stesso tipo di habitat si rileva anche per il vicino sito di Montale (MO) per il quale una fase di relativa aridità precede il peggioramento climatico che caratterizza i periodi successivi dell'Età del Bronzo (Mercuri et al., 2006).

Il sito Neolitico di Masseria Candelaro, datato a metà del VI millennio a.C. (~7500 BP) è, come già affermato, antecedente rispetto a quelli del Neolitico medio padano. Dalla nostra ricostruzione gli individui appartenenti a questo gruppo vivevano in condizioni climatiche più calde e meno umide rispetto alle condizioni presenti in Pianura Padana durante il millennio successivo ma simili a quelle che si riscontrano oggi nell'area.

Gli esemplari provenienti dal sito della Caverna delle Arene Candide sono datati solo su basi archeologiche e risultano appartenere alla cultura VBQ. Pur essendo contemporanei ai reperti della Pianura Padana non è possibile stabilire a quale delle due fasi VBQ essi appartengano.

Questi individui presentano valori di composizione isotopica abbastanza controversi probabilmente a causa del minore numero di esemplari analizzati. I valori dell'ossigeno indicano condizioni climatiche migliori rispetto a quelle attuali e più calde rispetto all'area padana. Per quanto riguarda il tasso di umidità e la disponibilità idrica i valori del  $^{13}\text{C}$  misurati nell'apatite sembrerebbero indicare un clima caldo e umido. I valori isotopici di C e N del collagene non confermano però questa ricostruzione. Essi, infatti, indicherebbero condizioni di umidità inferiori (ma non particolarmente marcate) rispetto alla Pianura Padana. È possibile che la negativizzazione dei valori isotopici del  $\delta^{13}\text{C}$ apatite sia da imputare alle caratteristiche della dieta (in particolare alla frazione proteica) e che il dato ambientale più attendibile sia quello determinato dai valori del collagene.

Se inquadrriamo i dati in nostro possesso in un ambito più ampio e globale possiamo confrontarli con quanto emerso da recenti studi sulle variazioni climatiche oloceniche in area europea. Ad esempio, la ricostruzione mediante analisi polliniche (Davis et al., 2003) delle

temperature in Europa durante l'Olocene evidenzia, per l'intervallo cronologico che ci riguarda, una fase di relativa stabilità termica (Optimum termico Atlantico) con oscillazioni contenute, mentre subito dopo i 4000 BP (Sub-Boreale) comincia una breve fase di declino termico (Fig.7.62). Questo dato concorderebbe con quanto evidenziato dai valori isotopici dell'ossigeno.

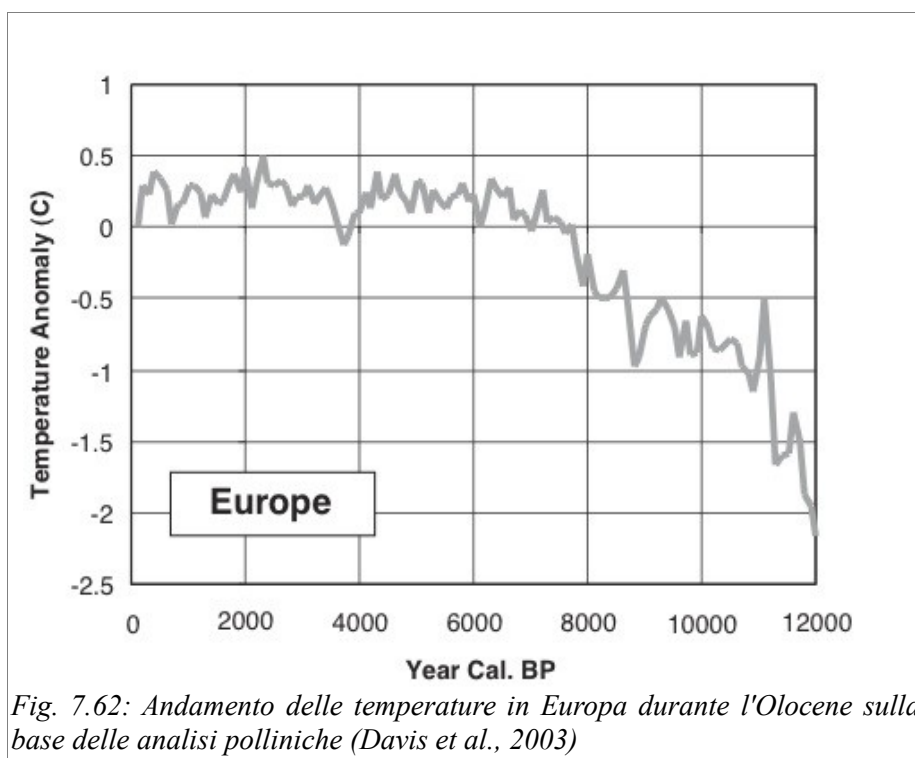


Fig. 7.62: Andamento delle temperature in Europa durante l'Olocene sulla base delle analisi polliniche (Davis et al., 2003)

Per un'analisi di maggiore dettaglio i dati isotopici sono stati confrontati con le fluttuazioni delle dimensioni e delle caratteristiche dinamiche dei ghiacciai alpini indotte dalle variazioni climatiche. Avanzate e ritiri sono, infatti, la conseguenza di cambiamenti nel bilancio di massa dei ghiacciai montani, il quale risulta a sua volta strettamente correlato con le principali variazioni climatiche: temperatura e precipitazioni.

In particolare, ridotte precipitazioni nevose invernali ed elevate temperature medie estive determinano valori negativi nel bilancio di massa, con un conseguente innalzamento dell'ELA (Equilibrium Line Altitude), definita come la quota teorica che separa la zona di accumulo da quella di ablazione e in corrispondenza della quale il bilancio di massa annuale è pari a zero.

I cambiamenti di forma e dimensione dei ghiacciai, e quindi gli arretramenti e gli avanzamenti del fronte, derivano dai cambiamenti nel bilancio di massa i quali vengono registrati con un certo ritardo temporale, che per i ghiacciai alpini è compreso tra pochi e qualche decina di

anni.

In questo caso è stato considerato uno studio condotto sui ghiacciai alpini svizzeri durante l'Olocene (Maisch, 2000) riportato in Fig.7.63.

Nell'intervallo cronologico ricoperto dai campioni (dai 7500 ai 3600 anni fa circa) si osserva una lunga fase di ritiro del fronte dei ghiacciai, *corrispondente all'optimum climatico olocenico*, seguita da una nuova fase di avanzata intorno ai 4000 anni fa. Tale andamento risulta concordante con quello descritto dai dati isotopici.

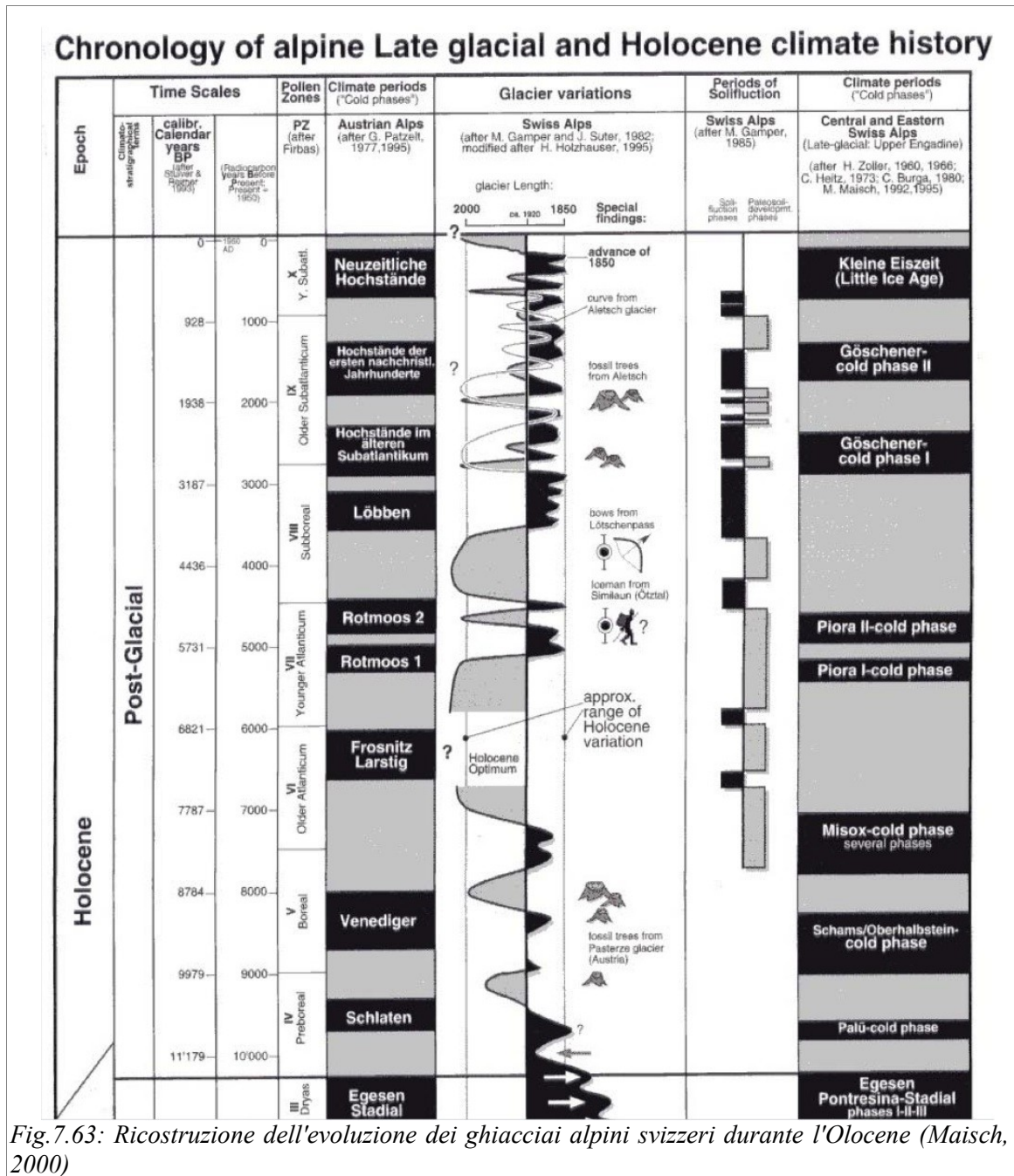


Fig.7.63: Ricostruzione dell'evoluzione dei ghiacciai alpini svizzeri durante l'Olocene (Maisch, 2000)

## **Capitolo 8**

### **I SITI DI EL SALHA**

*In questa seconda parte vengono presentati e discussi i dati relativi ai reperti rinvenuti nel sito archeologico di Al Khiday 1 e nell'annessa necropoli (Al Khiday 2), situati nei pressi della località di El Salha (Sudan Centrale). La tipologia dei campioni analizzati è costituita esclusivamente da frammenti di ossa in quanto i denti si trovano tutt'ora in fase di studio antropologico.*

*L'insufficiente stato di conservazione del collagene non ha consentito l'analisi isotopica pertanto saranno illustrati solo i valori della composizione isotopica di carbonio e ossigeno determinati sulla frazione minerale dell'osso.*

*L'elaborazione e l'interpretazione dei dati procederà sempre considerando i campioni in funzione dell'attribuzione cronologica effettuata su valutazioni di tipo archeologico.*

*Nelle Tabelle in Appendice (Pagg. 36-37) sono riportati per ogni singolo esemplare: la cronologia, il sesso, l'età dell'individuo al momento della morte e i valori isotopici ( $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ).*

### 8.1: VALUTAZIONE DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DEI REPERTI

La quantità di collagene estratta mediante il trattamento chimico standard (descritto nel Capitolo 5) non ha consentito di effettuare le misure del  $\delta^{15}\text{N}$  e del  $\delta^{13}\text{C}$ . Per tali reperti si è dunque resa necessaria la ricerca di un protocollo di estrazione “*ad hoc*” che ha previsto la variazione dei tempi di reazione e/o delle concentrazioni delle soluzioni chimiche utilizzate. Le maggiori quantità di collagene si sono ottenute applicando una procedura molto rapida (vedi Cap. 5) ma ciononostante lo stato di conservazione del materiale estratto non è risultato sufficiente per condurre un'analisi corretta: nessuno dei campioni, infatti, rientrava nel range  $2,9 < \text{C/N} > 3,6$  (De Niro et Epstein, 1981) previsto per un collagene ben preservato.

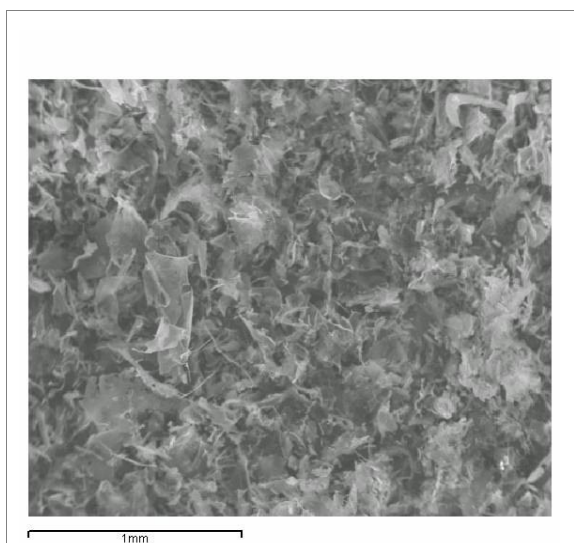


Fig.8.1: Immagine al SEM di un campione di collagene estratto da un reperto di Al Khiday

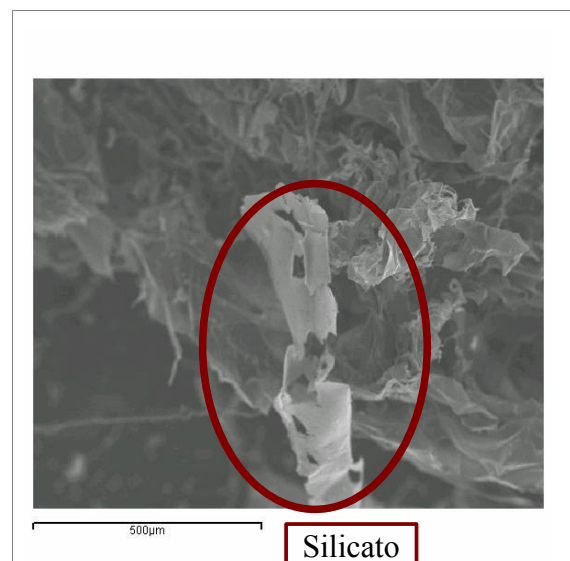


Fig.8.2: Immagine al SEM di un frammento silicatico rinvenuto all'interno del collagene

Ulteriori indagini in tal senso sono state condotte, grazie alla collaborazione della Dott.ssa Emma Salvioli Mariani, mediante l'osservazione del materiale estratto al microscopio elettronico.

La struttura delle fibre di collagene è risultata estremamente frammentata (Fig.8.1) e l'analisi puntuale ha evidenziato scarsi livelli di C e N, inoltre è stata rilevata la presenza di silicati (Fig.8.2), che dovrebbero essere assenti, i quali indicano uno scarso livello di purezza del materiale estratto.

La perdita di collagene, come in precedenza affermato, è controllata dalle condizioni di sepoltura quali: temperatura, umidità e acidità dei suoli (Hedges, 2002) che determinano l'entità dell'attacco microbico il quale rappresenta la causa principale di degradazione della

frazione organica.

Per quanto riguarda la fase minerale, anche in questo caso è stato necessario testare un trattamento preliminare specifico per eliminare i carbonati esogeni, presenti in quantità elevate, i quali influivano sul valore isotopico. I test effettuati hanno dimostrato che dopo 24 ore di trattamento con acido acetico il valore isotopico si stabilizzava, di conseguenza era presumibile pensare che i carbonati non strutturali erano stati eliminati.

In effetti, si può osservare dal grafico di Fig.8.3 che dopo 12 ore di trattamento sussisteva una correlazione ( $R^2=0,69$ ) tra la quantità di gas estratta da ogni mg di campione (mbar/mg) e il valore isotopico dell'ossigeno (per il  $\delta^{13}\text{C}$  si rimanda all'Appendice Pag.40).

Tale andamento riguardava soprattutto i reperti con un rapporto mbar/mg superiore a 0,6 i quali, quindi, possedevano una maggiore quantità di carbonati esogeni.

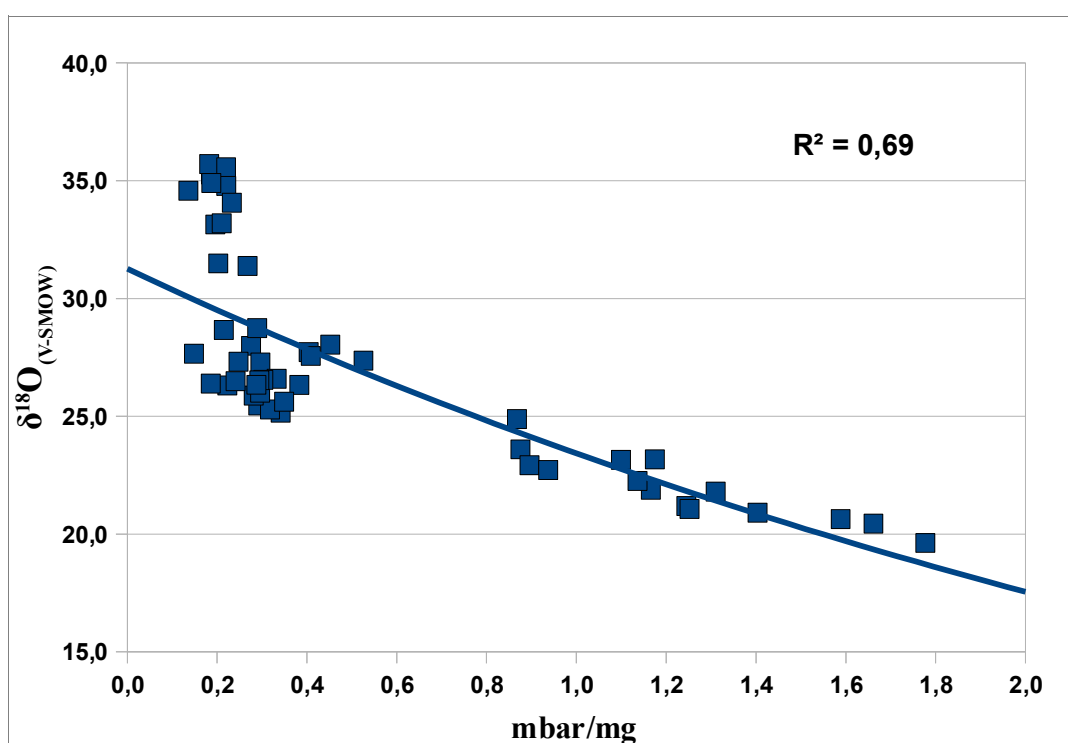


Fig.8.3: Correlazione tra quantità di  $\text{CO}_2$  estratta per mg di campione e valore del  $\delta^{18}\text{O}$  dopo 12 h di pre-trattamento in acido acetico.

Dopo 24 ore di pre-trattamento in acido acetico (Fig.8.4), invece, tale correlazione non veniva più rilevata ( $R^2=0,04$ ) e il rapporto mbar/mg si attestava su valori compresi tra 0,1 e 0,4.

Abbiamo quindi stabilito, nelle preparazioni successive, di accettare solo i valori isotopici dei campioni che rientravano in questo range di valori di mbar/mg.

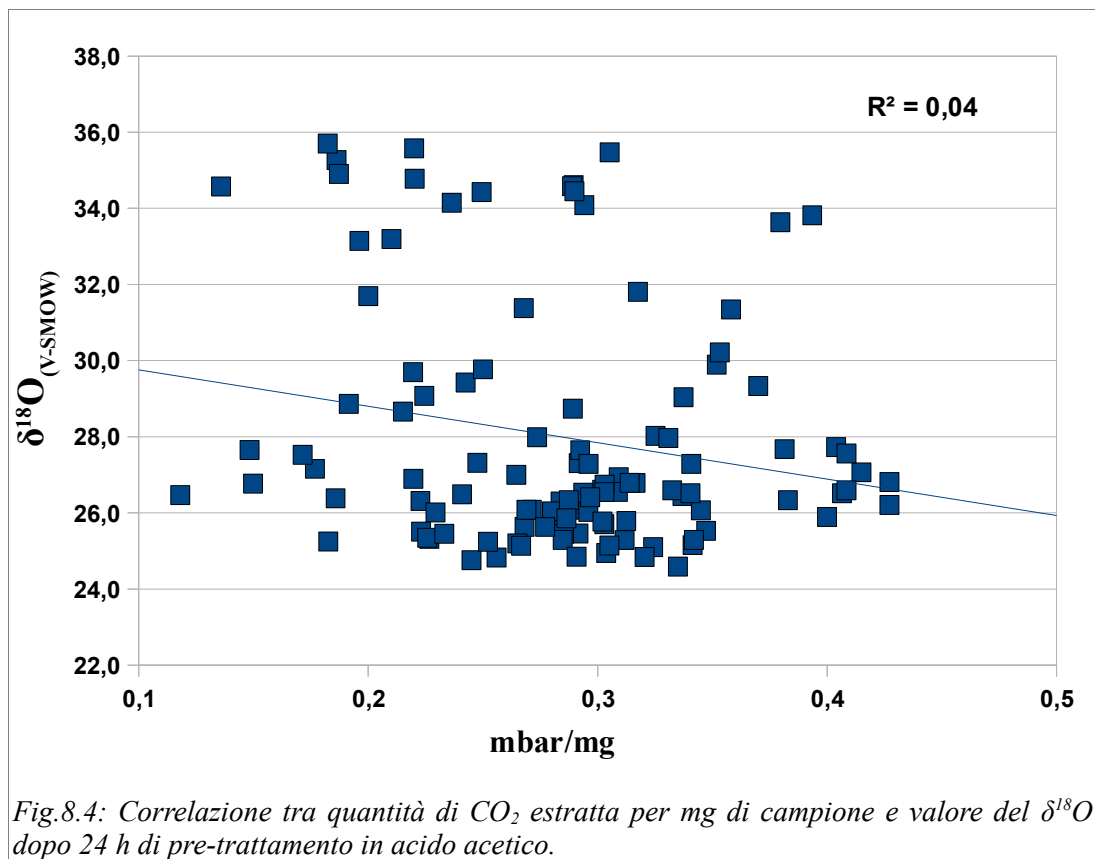


Fig.8.4: Correlazione tra quantità di CO<sub>2</sub> estratta per mg di campione e valore del δ<sup>18</sup>O dopo 24 h di pre-trattamento in acido acetico.

Per un'ulteriore valutazione dello stato di conservazione dell'idrossiapatite, su un piccolo gruppo di campioni di età variabile è stata determinata la composizione isotopica dell'ossigeno del fosfato (meno alterabile rispetto al carbonato) mediante due metodologie diverse. La prima ha previsto la combustione ad alta temperature del fosfato d'argento, precipitato con apposita procedura chimica dall'osso, mediante analizzatore TC/EA che si è svolta grazie alla collaborazione del Dott. Tiziano Boschetti. La seconda tecnica si basa invece, sulla reazione con BrF<sub>5</sub> del fosfato d'argento e la successiva conversione dell'ossigeno in CO<sub>2</sub>, analizzabile allo spettrometro di massa (vedi Capitolo 5), per la quale ci si è avvalsi della collaborazione del Prof. Antonio Longinelli per la parte di fluorurazione.

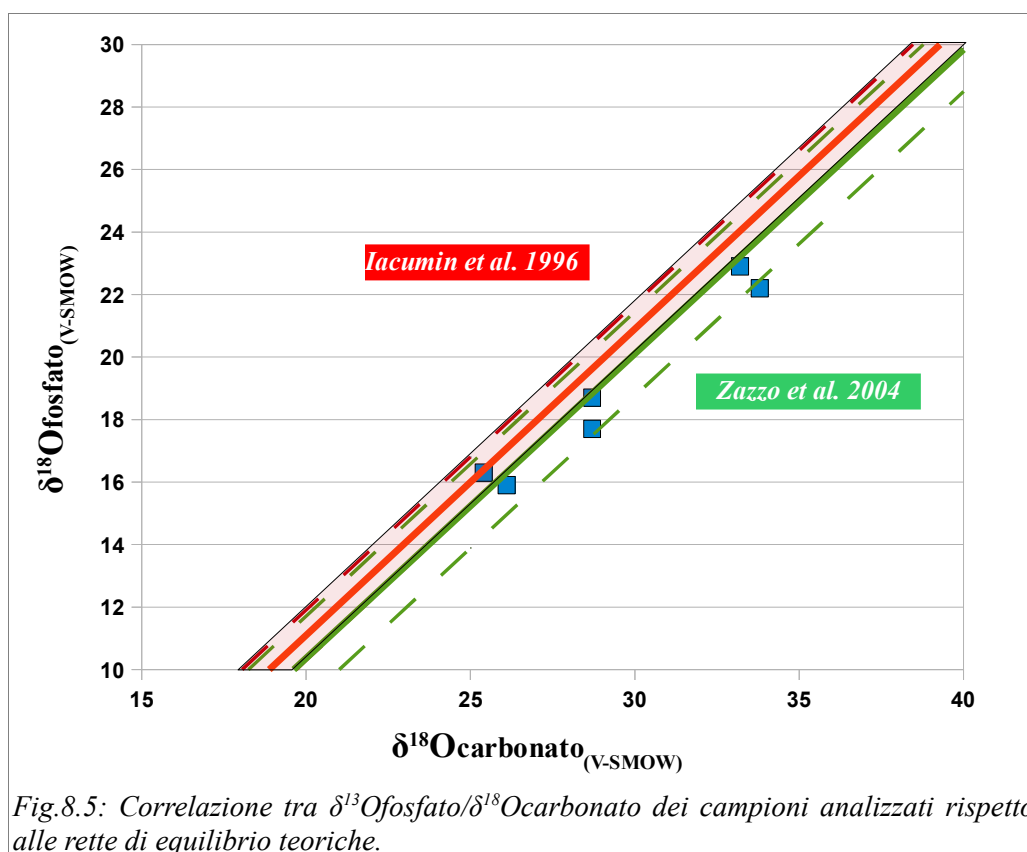


Fig.8.5: Correlazione tra  $\delta^{18}\text{Ofosfato}/\delta^{18}\text{Ocarbonato}$  dei campioni analizzati rispetto alle rette di equilibrio teoriche.

Nel grafico di Fig.8.5 è riportato il  $\delta^{18}\text{Ocarbonato}$  rispetto al  $\delta^{18}\text{Ofosfato}$  ottenuto dalla media dei valori misurati con le due diverse metodologie analitiche, inoltre, sono state indicate le equazione di equilibrio carbonato-fosfato (Iacumin et al., 1996, Zazzo et al.; 2004). Si può osservare come i campioni si posizionino molto vicini alle rette (compresi quelli più antichi) indicando quindi un buon livello di conservazione almeno per la frazione inorganica. È necessario sempre considerare, come già visto nel caso dei reperti italiani, che studi più recenti indicano per questo tipo di correlazioni variazioni indotte da effetti metabolici dipendenti dalle specie, quindi la retta per l'uomo potrebbe posizionarsi in modo leggermente diverso.

## 8.2: LA COMPOSIZIONE ISOTOPICA DEL CARBONIO DELL'APATITE

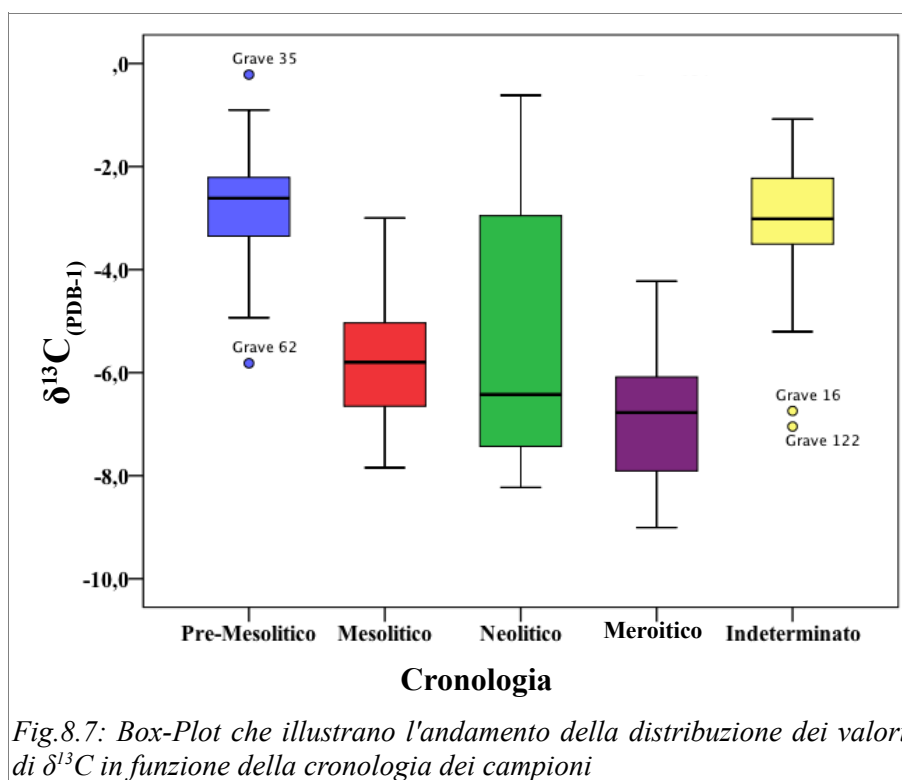
Per i motivi già anticipati, le analisi isotopiche relative al collagene sono risultate inattendibili e quindi non verranno prese in considerazione in questa discussione, ma si focalizzerà l'attenzione esclusivamente sui valori isotopici determinati sulla fase inorganica dei reperti ossei.

Nella Tabella di Fig.8.6 viene riportata una sintesi dei valori isotopici del carbonio dell'apatite riportando alcuni parametri di statistica descrittiva (Max., Min., Range, Media, Dev. St., Curtosi, Asimmetria) e suddividendo i campioni in funzione dell'attribuzione cronologica effettuata su basi archeologiche (giacitura degli scheletri all'interno dei tumuli, corredo, ecc... Capitolo 4).

Statistiche descrittive $\delta^{13}\text{C}$ carbonato									
Cronologia	N	Minimo	Massimo	Range	Media	Errore std della Media	Deviazione std.	Asimmetria	Curtosi
Pre-Mesolitico	55,0	-5,8	-0,2	5,6	-2,7	0,1	1,0	-0,2	1,3
Mesolitico	9,0	-7,8	-3,0	4,8	-5,7	0,5	1,4	0,5	1,0
Neolitico	18,0	-8,2	-0,6	7,6	-5,4	0,6	2,4	0,6	-1,0
Meroitico	23,0	-9,0	-4,2	4,8	-6,9	0,3	1,3	0,4	-0,1
Indeterminato	23,0	-7,0	-1,1	6,0	-3,2	0,3	1,5	-1,2	1,7

Fig.8.6: Tabella riepilogativa dei parametri di statistica descrittiva per il  $\delta^{13}\text{C}$  determinati in funzione dell'attribuzione cronologica dei campioni.

Nel grafico di Fig.8.7 viene rappresentata mediante grafici Box-and-Whisker la distribuzione dei valori del  $\delta^{13}\text{C}$  in funzione della cronologia. Il vantaggio di questo tipo di rappresentazione grafica risiede, tra l'altro, nell'evidenziare l'eventuale presenza di outliers che non sarebbe possibile determinare considerando solo il range di dispersione dei dati. Si può subito notare l'ampia dispersione dei dati che caratterizza il gruppo dei campioni Neolitici (7,6‰), tale andamento potrebbe essere riconducibile all'incertezza dell'attribuzione cronologica di alcuni reperti oppure ad una maggiore mobilità di questi individui.

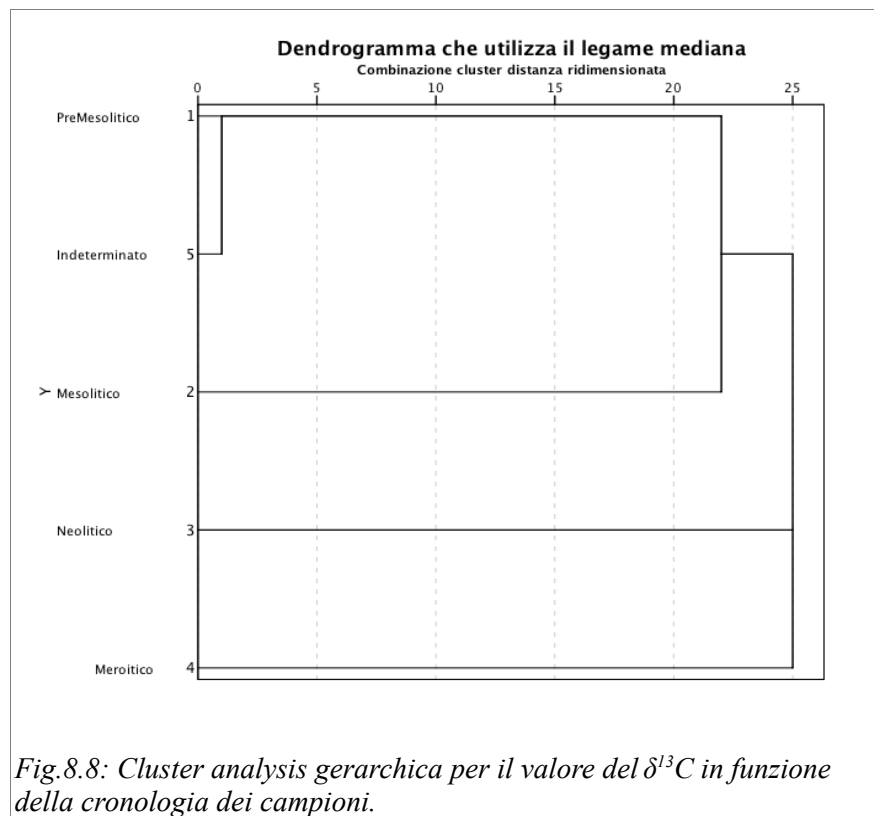


La distribuzione è molto vicina alla simmetria e generalmente leptocurtica, soprattutto se si escludono gli outliers, ad eccezione nuovamente degli esemplari Neolitici che mostrano una coda sinistra molto accentuata (indice di una maggiore eterogeneità dei valori).

I campioni di età pre-Mesolitica presentano valori meno negativi rispetto agli altri gruppi e lo stesso andamento si può rilevare per i reperti di attribuzione cronologica indeterminata.

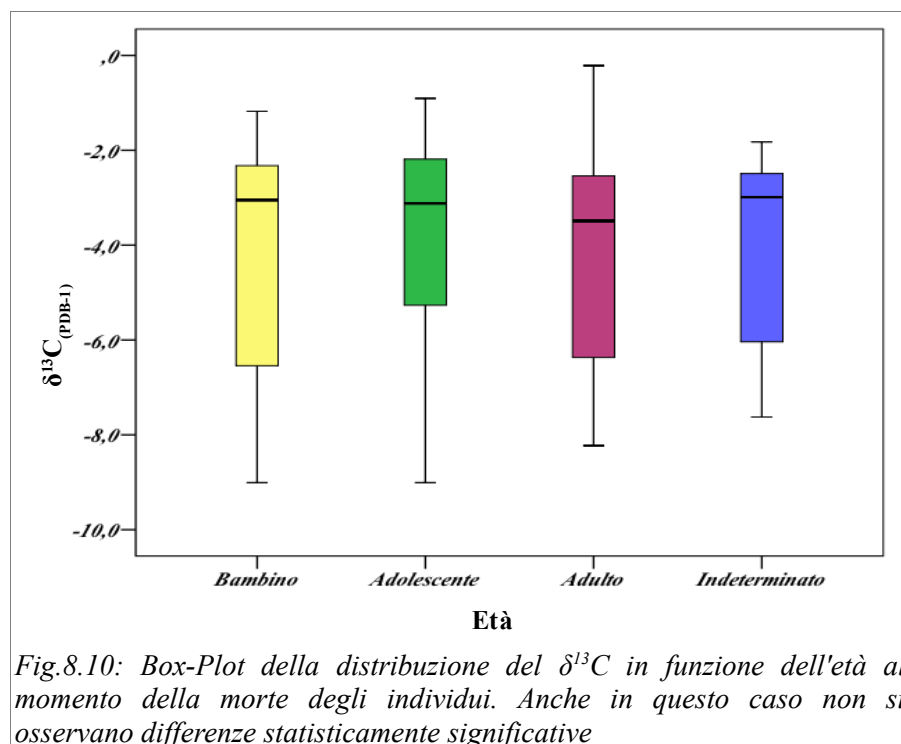
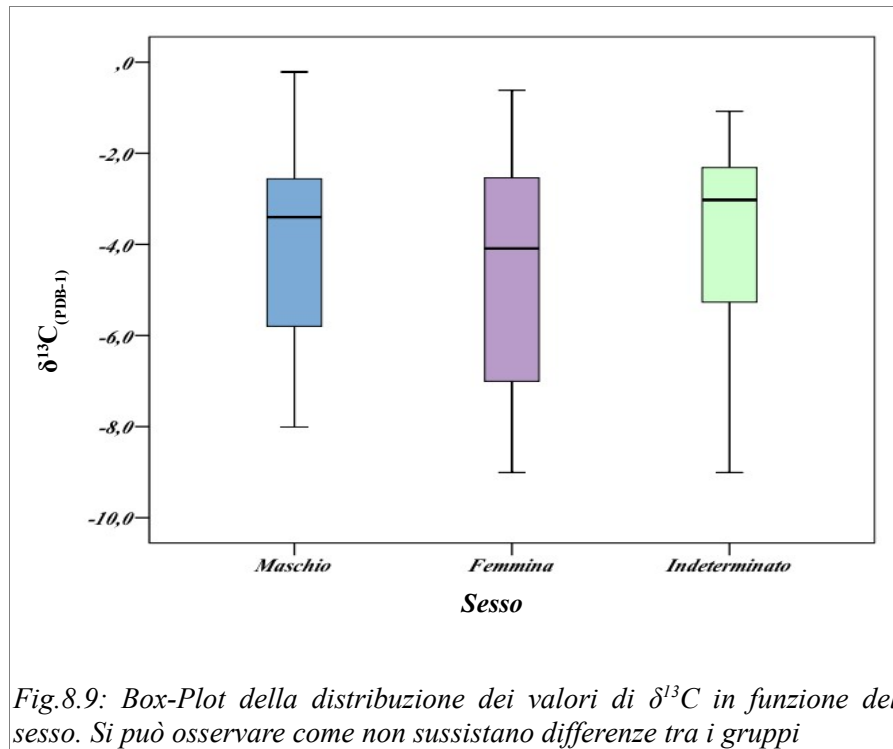
Per quanto riguarda gli outliers possiamo affermare che, in generale, si tratta di pochi esemplari rispetto alla totalità dei campioni (4 su 127) e che, per gli individui pre-Mesolitici (Grave 35 e Grave 62) si osserva uno scostamento limitato. I campioni dalla datazione incerta sono caratterizzati nella maggior parte dei casi da valori confrontabili con quelli dei pre-Mesolitici mentre i due esemplari che si discostano dall'andamento generale (Grave 16 e Grave 122) presentano valori che potrebbero appartenere ad uno dei gruppi cronologici successivi.

La cluster analysis (Fig.8.8) conferma una minore distanza euclidea, e quindi un maggior grado di similarità, tra i reperti pre-Mesolitici e quelli dalla datazione incerta, mentre i restanti raggruppamenti costituiscono degli insiemi indipendenti.



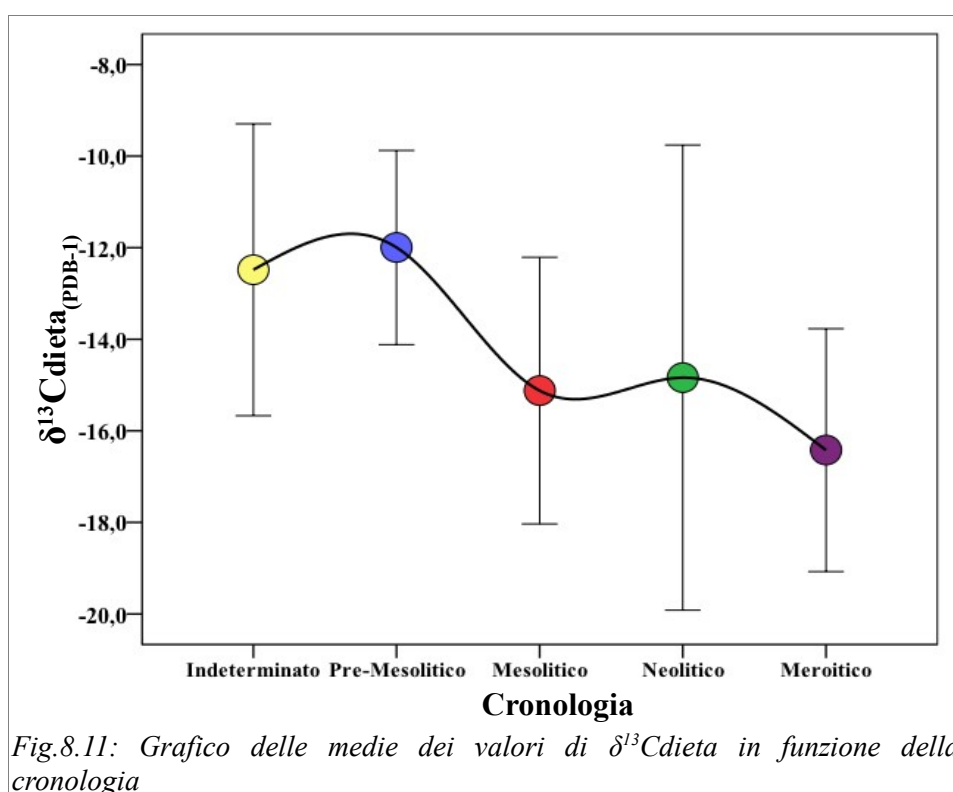
Per ognuno dei periodi considerati abbiamo effettuato una suddivisione dei campioni in funzione del sesso e dell'età al momento della morte (Bambino: 0-12 anni; Adolescente: 12-18 anni; Adulto: >18 anni), almeno per i casi in cui l'indagine antropologica ha consentito l'attribuzione, ma non sono state osservate differenze significative tra i gruppi per nessuna delle variabili prese in esame, indice ancora una volta di un indiscriminato accesso alle risorse alimentari (Appendice Pagg.38-39).

I grafici di Fig.8.9 e Fig.8.10 riassumono tali considerazioni.



I valori del  $\delta^{13}\text{C}$  sono stati reinterpretati in termini di dieta, tenendo conto sempre della relazione di Ambrose e Norr (1993), in maniera da ottenere informazioni sul tipo di copertura vegetale e, indirettamente, sulle condizioni dell'habitat (temperatura, umidità, irraggiamento, ecc...).

Il grafico di Fig.8.11 illustra l'andamento dei valori medi dei gruppi suddivisi in funzione del periodo cronologico



L'ANOVA univariata ( $p=0,05$ ) ha evidenziato, mediante i test restrittivi previsti per varianze disomogenee (Welch e Brown-Forsythe), la presenza di differenze statisticamente significative tra le medie che sono state individuate mediante test statistico a posteriori di Tamhane (T2) per confronti multipli (Fig.8.12).

Test robusti per l'uguaglianza delle medie					
		Statisticaa	df1	df2	Sig.
$\delta^{13}\text{C}$ dieta	Welch	55,401	4	33,603	,000
	Brown-Forsythe	34,304	4	52,658	,000

Fig.8.12: Esempio di Anova con test restrittivi per varianze disomogenee

Gli individui pre-Mesolitici possiedono il valore medio del  $\delta^{13}\text{C}$  della dieta meno negativo in assoluto (-12,0‰) il quale presenta differenze statisticamente significative con tutti gli altri insiemi ad eccezione di quello cronologicamente indeterminato (-12,8‰).

Gli esemplari Mesolitici e Neolitici, caratterizzati da una media rispettivamente del -15,1‰ e del -14,8‰, non mostrano differenze statisticamente significative, mentre i Meroitici si distinguono per i valori medi della dieta più negativi (-16,4‰). Occorre però ricordare che la datazione dei campioni Mesolitici non è definitiva in quanto non è stato ancora possibile distinguerli in maniera inequivocabile da quelli Neolitici rinvenuti senza corredo.

In definitiva si rileva un andamento del  $\delta^{13}\text{C}$  verso una progressiva negativizzazione nel corso del tempo, mentre i campioni non datati sono confrontabili con quelli più antichi.

### 8.3: LA COMPOSIZIONE ISOTOPICA DELL'OSSIGENO DELL'APATITE

I valori di composizione isotopica dell'ossigeno misurati nei reperti scheletrici del Sudan sono riportati nella Tabella di Fig.8.13 espressi secondo alcuni parametri di statistica descrittiva.

Statistiche descrittive $\delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}}$								
Cronologia	N	Minimo	Massimo	Range	Media	Errore std della Media	Deviazione std.	Asimmetria
Pre-Mesolitico	55	21,8	28,7	7,0	26,1	0,1	1,1	-0,9
Mesolitico	9	26,4	35,5	9,0	30,0	1,0	2,9	1,1
Neolitico	18	24,8	35,6	10,7	29,8	0,9	3,8	0,1
Meroitico	23	29,7	35,7	6,0	33,7	0,3	1,4	-1,1
Indeterminato	22	25,1	34,1	9,0	27,6	0,6	2,7	1,8

Fig.8.13: Tabella riepilogativa dei parametri di statistica descrittiva per il  $\delta^{18}\text{O}$  determinati in funzione dell'attribuzione cronologica dei campioni.

Il grafico di Fig.8.14 illustra mediante box-plot la distribuzione del  $\delta^{18}\text{O}$  in funzione della cronologia dei campioni.

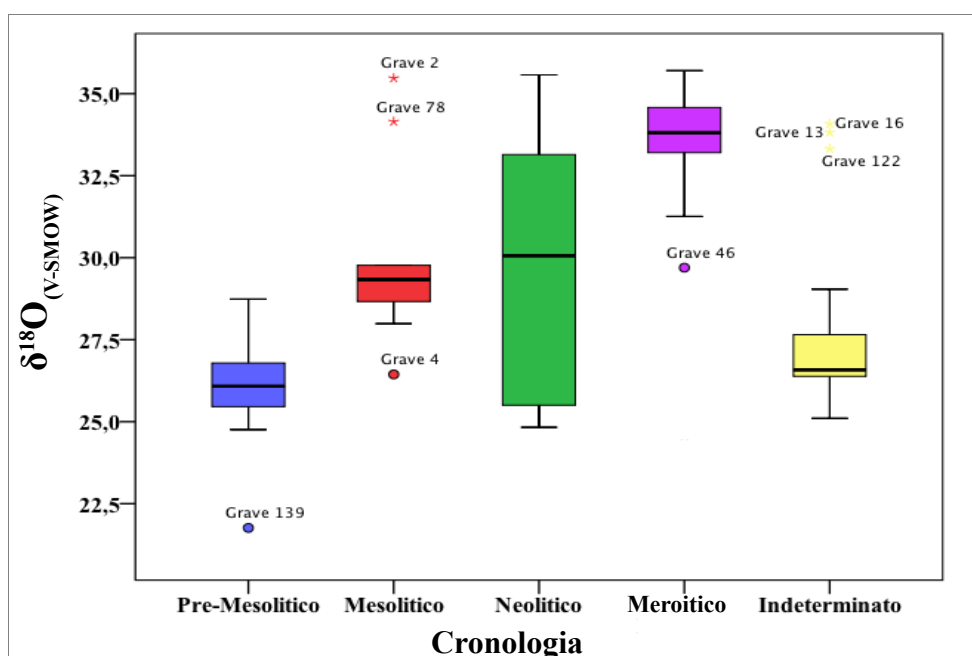


Fig.8.14: Box-Plot che illustrano l'andamento della distribuzione dei valori di  $\delta^{18}\text{O}$  in funzione della cronologia dei campioni

La dispersione dei dati è molto contenuta ma tale condizione non viene rilevata se si considera solo il valore del Range il quale non tiene conto della presenza degli outlier. La distribuzione è generalmente asimmetrica e con gradi molto variabili di curtosi.

Il gruppo dei campioni Neolitici si discosta nuovamente dall'andamento generale in quanto presenta un'ampia dispersione (10,7%), imputabile sempre all'incertezza della datazione.

Si osserva in generale un graduale aumento dei valori del  $\delta^{18}\text{O}$  nel corso del tempo mentre gli esemplari cronologicamente indeterminati mostrano ancora una volta una maggiore affinità con quelli più antichi di epoca pre-Mesolitica.

Per questo parametro isotopico però aumenta il numero degli outliers, soprattutto nel caso dei reperti Mesolitici (Grave 2, Grave 4 e Grave 78).

La cluster analysis gerarchica della mediana (Fig.8.15) conferma l'andamento appena descritto, con gli individui pre-Mesolitici molto simili a quelli indeterminati, mentre i restanti gruppi presentano distanze euclidee maggiori che ne determinano un elevato livello di differenziazione.

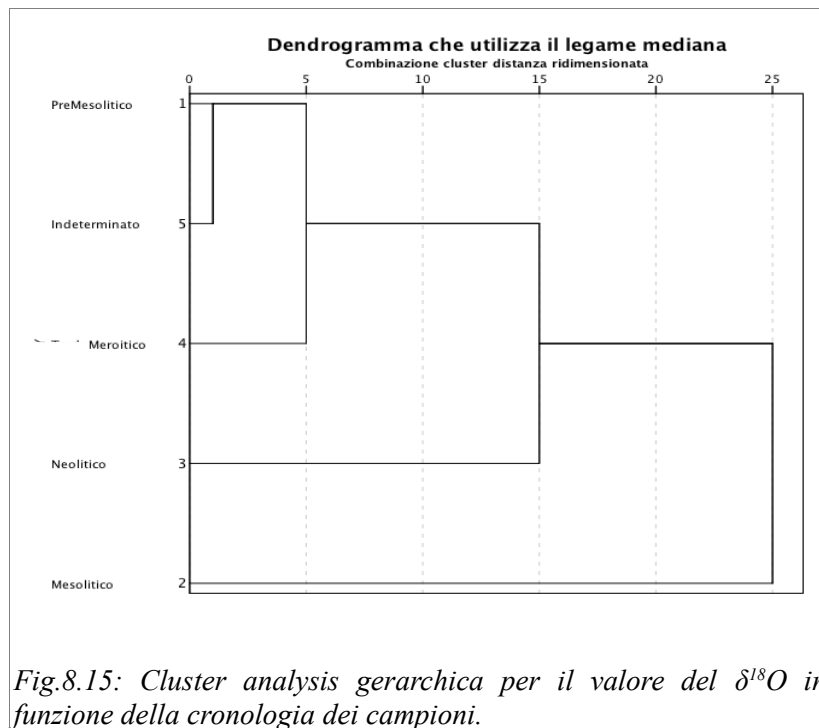
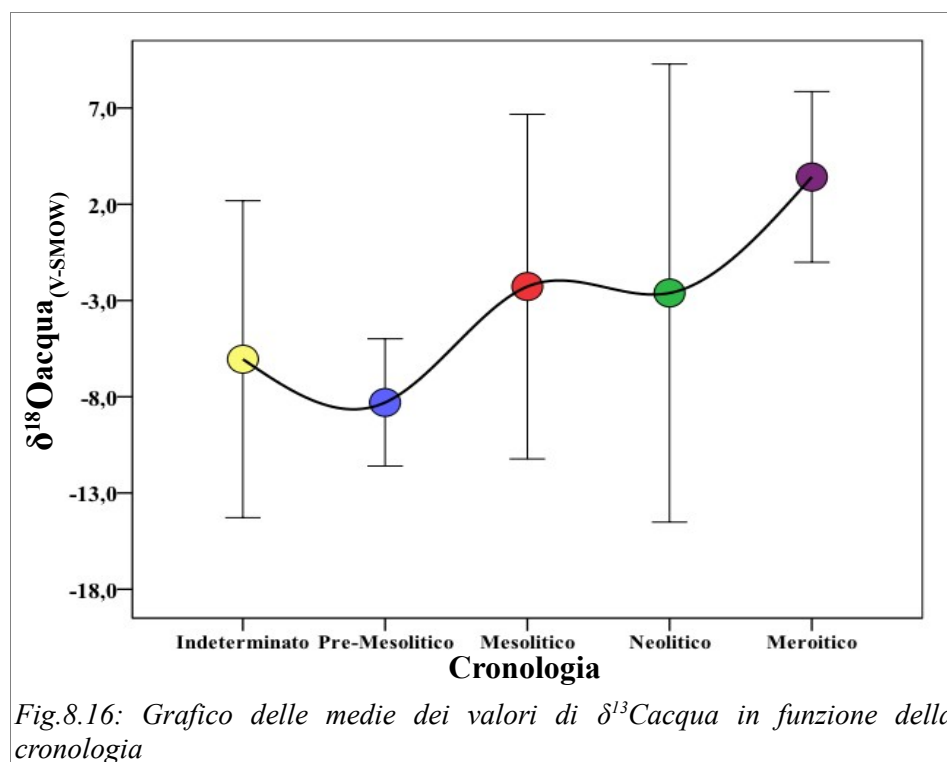


Fig.8.15: Cluster analysis gerarchica per il valore del  $\delta^{18}\text{O}$  in funzione della cronologia dei campioni.

Anche per questo parametro isotopico non si rilevano, per nessuno dei periodi in oggetto, delle differenze statisticamente significative tra individui di sesso opposto o appartenenti a fasce d'età differenti (bambini, adolescenti, adulti).

I valori di composizione isotopica dell'ossigeno misurati nel gruppo carbonato dell'idrossiapatite sono stati ricalcolati in termini di acqua ambientale (Iacumin et al., 1996; Longinelli, 1984) e i risultati ottenuti sono illustrati nel grafico di Fig.8.16 in funzione della cronologia.

L'ANOVA one way ha nuovamente evidenziato la presenza di differenze significative tra i gruppi che sono state identificate mediante test di Tamhane per varianze disomogenee.



Il gruppo degli individui di età pre-Mesolitica possiede i valori medi di composizione isotopica dell'ossigeno dell'acqua più negativi (-8,3‰) e, secondo questo test statistico, presenta differenze statisticamente significative con tutti altri raggruppamenti, compreso quello dei campioni non datati malgrado una dispersione molto simile.

Gli esemplari Mesolitici e Neolitici presentano valori intermedi, rispettivamente -2,3‰ e -2,6‰ senza alcuna differenza significativa, mentre si differenziano dai reperti Meroitici i quali sono caratterizzati da valori del  $\delta^{18}\text{O}$  dell'acqua positivi (+3,4‰).

In generale, quindi, si rileva un progressivo arricchimento in  $^{18}\text{O}$  nel corso del tempo, mentre per quanto riguarda i campioni dalla cronologia indeterminata, non è possibile individuare alcuna uguaglianza statistica se non una certa affinità con il gruppo dei reperti più

antichi.

Attualmente i valori isotopici delle precipitazioni nel Sudan Meridionale si attestano mediamente sul -2,0‰ (Williamson et al., 2000) mentre la composizione isotopica del Nilo a Khartoum è di circa +2,4‰ che indica condizioni di acque evaporanti.

Quest'ultimo valore è stato ottenuto dalla media di quattro anni di campionamento del quale riportiamo in Fig.8.17 il dettaglio delle misure effettuate nell'ambito di questo progetto di ricerca presso il laboratorio di geochimica isotopica dell'Università di Parma.

<i>Anno di campionamento</i>	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}_{(V-SMOW)}$
2005	2,76
2007	1,71
2008	2,31
2009	2,74

*Fig.8.17: Valori isotopi del  $\delta^{18}\text{O}$  dell'acqua del Nilo a Khartoum.*

Inoltre, è stata campionata anche l'acqua di un pozzo profondo oltre 25 m, situato nel Deserto del Bayuda, il cui valore del  $\delta^{18}\text{O}$  è uguale a -9,7‰. Tale valore potrebbe riferirsi ad un periodo antico nel quale il Nilo presentava una portata superiore a quella attuale dovuta ad una maggiore piovosità nell'area di ricarica.

### 8.4: LE FAUNE

Associati ai resti umani rinvenuti nella necropoli (16-D-4) sono stati ritrovati nell'abitato Mesolitico (16-D-5) numerosi reperti osteologici appartenenti ad animali di specie diverse, sia terrestri che acquatiche. Sulla base delle datazioni assolute effettuate su carboni rinvenuti in alcune unità stratigrafiche che contenevano gli esemplari faunistici (7030-6690 e 6770-6640 BP) è possibile far risalire tali reperti al periodo Mesolitico (Usai et al., 2010).

Nella Tabella di Fig.8.18 abbiamo riportato il dettaglio di tali campioni suddivisi per famiglie e una sintesi statistica dei valori isotopici di C e O misurati nell'apatite delle ossa.

Statistiche descrittive							
Famiglia		N	Minimo	Massimo	Range	Media	Deviazione Std.
Bovide	$\delta^{13}\text{C}$	25	-8,1	1,2	9,3	-0,6	2,0
	$\delta^{18}\text{O}$	25	21,0	30,3	9,3	27,2	2,4
Rinoceronte	$\delta^{13}\text{C}$	1	-8,6	-8,6	0,0	-8,6	.
	$\delta^{18}\text{O}$	1	28,5	28,5	0,0	28,5	.
Facocero	$\delta^{13}\text{C}$	1	-4,0	-4,0	0,0	-4,0	.
	$\delta^{18}\text{O}$	1	25,5	25,5	0,0	25,5	.
Carnivoro	$\delta^{13}\text{C}$	6	-4,9	0,0	4,9	-2,8	1,9
	$\delta^{18}\text{O}$	6	24,8	30,3	5,5	27,0	2,0
Pesce	$\delta^{13}\text{C}$	18	-4,5	-0,9	3,6	-2,5	1,0
	$\delta^{18}\text{O}$	18	20,6	29,0	8,4	25,5	2,2

Fig.8.18: Tabella riepilogativa dei parametri di statistica descrittiva per i valori di  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  dei campioni di faune suddivisi per famiglie

Notiamo come i Bovidi e i Pesci sono le famiglie maggiormente rappresentate, rispettivamente con 25 e 18 esemplari inoltre, occorre precisare che all'interno di esse sono state fatte delle suddivisioni per specie delle quali riportiamo una descrizione nella Tabella di Fig.8.19.

La famiglia dei Bovidi comprende le specie bovine, ovine e caprine e in quest'ambito sono state riconosciute le specie: *kob*, *alcelaphus* e *redunca*.

Sia il *kob* che l'*alcelaphus* sono specie molto simili alle antilopi ma di taglia superiore,

entrambe sono attualmente diffuse in Africa lungo la fascia sub-sahariana e vivono preferibilmente in zone umide come le praterie erbose. La *redunca*, detta anche cervicapra, predilige anch'essa i terreni erbosi e umidi ma riesce ad adattarsi a condizioni di maggiore aridità cibandosi ad esempio di cereali.

Statistiche descrittive							
Specie		N	Minimo	Massimo	Range	Media	Deviazione std.
Kob	$\delta^{13}\text{C}$	9	-8,1	1,2	9,3	-,9	2,9
	$\delta^{18}\text{O}$	9	24,4	29,4	5,0	26,9	2,0
Red/Alc/Kob	$\delta^{13}\text{C}$	3	-3,1	0,2	3,3	-1,0	1,8
	$\delta^{18}\text{O}$	3	25,9	30,3	4,3	28,7	2,4
Alcelaphus	$\delta^{13}\text{C}$	8	-4,1	0,4	4,6	-0,9	1,4
	$\delta^{18}\text{O}$	8	21,0	29,3	8,3	26,0	3,0
Bovino	$\delta^{13}\text{C}$	4	-0,3	1,2	1,4	0,5	0,6
	$\delta^{18}\text{O}$	4	28,0	29,9	1,9	28,9	1,0
Redunca	$\delta^{13}\text{C}$	1	0,7	0,7	,0	0,7	.
	$\delta^{18}\text{O}$	1	29,3	29,3	,0	29,3	.
Rinoceronte	$\delta^{13}\text{C}$	1	-8,6	-8,6	,0	-8,6	.
	$\delta^{18}\text{O}$	1	28,5	28,5	,0	28,5	.
Facocero	$\delta^{13}\text{C}$	1	-4,0	-4,0	,0	-4,0	.
	$\delta^{18}\text{O}$	1	25,5	25,5	,0	25,5	.
Volpe	$\delta^{13}\text{C}$	1	-4,9	-4,9	,0	-4,9	.
	$\delta^{18}\text{O}$	1	24,8	24,8	,0	24,8	.
Cane	$\delta^{13}\text{C}$	4	-4,9	-2,0	2,9	-2,9	1,3
	$\delta^{18}\text{O}$	4	25,1	30,3	5,2	27,3	2,2
Leone	$\delta^{13}\text{C}$	1	0,0	0,0	,0	0,0	.
	$\delta^{18}\text{O}$	1	28,2	28,2	,0	28,2	.
Claridae	$\delta^{13}\text{C}$	13	-4,5	-1,6	2,9	-2,6	0,9
	$\delta^{18}\text{O}$	13	20,6	29,0	8,4	25,9	2,3
Latidae	$\delta^{13}\text{C}$	5	-3,8	-0,9	3,0	-2,5	1,4
	$\delta^{18}\text{O}$	5	22,5	26,0	3,5	24,5	1,3

Fig.8.19: Tabella riepilogativa dei parametri di statistica descrittiva per i valori di  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  dei campioni di faune suddivisi per specie

Tra le specie acquatiche sono stati riconosciuti esemplari di pesce gatto africano, appartenenti alla famiglia dei *Claridae*, e campioni di pesce persico africano (*Lates Niloticus sp.*) che invece fanno parte della famiglia dei *Latidae*. Nel primo caso si tratta di una specie di fondo che vive in acque non troppo profonde (< 20 m) e relativamente calde (19-27°C) ma riesce facilmente ad adattarsi a condizioni ambientali anche molto diverse.

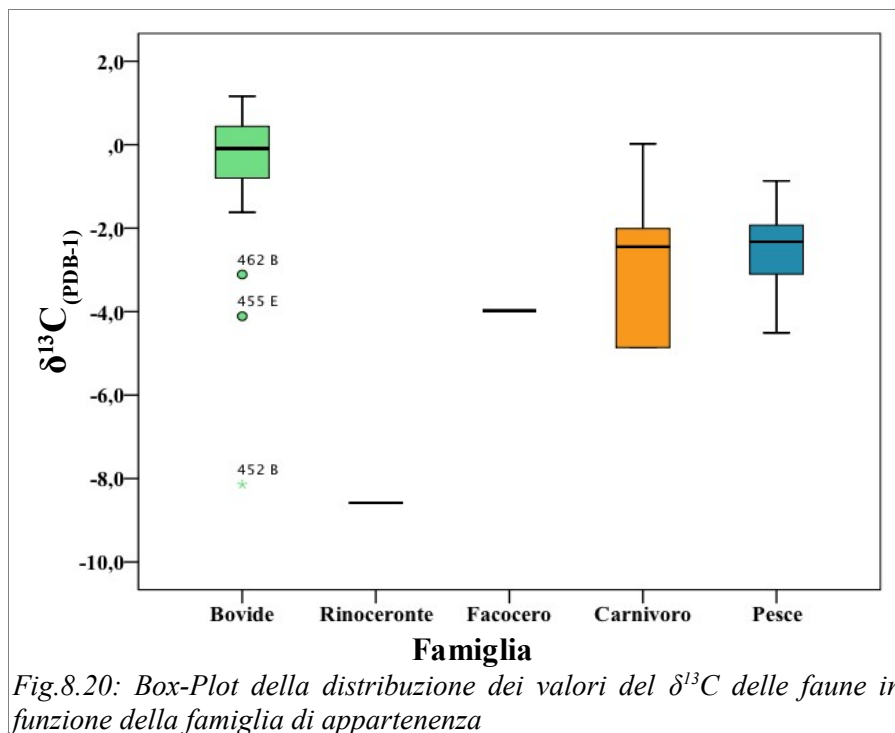
Nel secondo caso ci si riferisce ad una specie di fondo che predilige acque più profonde (20-

60 m).

Nel grafico di Fig.8.20 abbiamo rappresentato la distribuzione dei valori isotopici del carbonio in funzione della famiglia di appartenenza delle varie specie animali.

In generale possiamo osservare che i Bovidi presentano una dispersione dei dati molto contenuta (a parte la presenza di tre outliers) indice di una certa uniformità interna al gruppo.

I valori del  $\delta^{13}\text{C}$  sono prossimi allo zero (media = -0,6‰) e risultano complessivamente meno negativi rispetto alle altre famiglie.



I pesci presentano una dispersione piuttosto contenuta con valori del  $\delta^{13}\text{C}$  confrontabili con quelli relativi alla famiglia dei carnivori che, invece, presenta una maggiore variabilità legata probabilmente al fatto che essa comprende specie diverse.

Al pari degli umani, il  $\delta^{13}\text{C}$  misurato nei reperti animali può essere espresso in termini di dieta tenendo conto, però, del diverso frazionamento tra dieta e apatite che sussiste tra gli erbivori (12-14‰) e i carnivori (9-10‰). Questo valore è ottenuto dalla somma tra il frazionamento  $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{collagene}}$  (di entità variabile per carnivori ed erbivori terrestri. Vedi Capitolo 2) e quello tra  $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagene}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$  (5‰ per i mammiferi terrestri).

Il  $\delta^{13}\text{C}$  del muscolo corrisponde, in definitiva, al valore della dieta per l'uomo.

Nello specifico, per risalire al valore della dieta di questi individui sono state utilizzate le seguenti relazioni e i risultati sono riportati nella Tabella di Fig.8.21:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{dieta}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{carbonato}} - 12 \quad (\text{erbivori})$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{dieta}} = 1,04 * \delta^{13}\text{C}_{\text{carbonato}} - 9,2 \quad (\text{carnivori ed onnivori})$$

Statistiche descrittive							
Specie		N	Minimo	Massimo	Range	Media	Deviazione std.
Kob	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	9	-20,1	-10,8	9,3	-12,9	2,8
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	9	-9,8	-4,3	5,5	-7,1	2,2
Redunca/Alcelaphus	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	1	-15,1	-15,1	0,0	-15,1	.
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	1	-8,2	-8,2	0,0	-8,2	.
Alcelaphus	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	8	-16,1	-11,6	4,5	-13,0	1,4
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	8	-13,7	-4,4	9,3	-8,1	3,3
Bovide	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	4	-12,3	-10,9	1,4	-11,5	0,6
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	4	-5,8	-3,8	2,0	-4,9	1,0
Kob/Redunca	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	2	-12,1	-11,8	0,3	-12,0	0,2
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	2	-3,9	-3,4	0,5	-3,7	0,4
Redunca	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	1	-11,3	-11,3	0,0	-11,3	.
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	1	-4,4	-4,4	0,0	-4,4	.
Rinoceronte	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	1	-20,6	-20,6	0,0	-20,6	.
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	1	-5,3	-5,3	0,0	-5,3	.
Facocero	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	1	-13,3	-13,3	0,0	-13,3	.
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	1	-6,7	-6,7	0,0	-6,7	.
Volpe	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	1	-14,3	-14,3	0,0	-14,3	.
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	1	-7,2	-7,2	0,0	-7,2	.
Cane	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	4	-14,3	-11,3	3,0	-12,3	1,4
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	4	-7,0	-3,2	3,8	-5,4	1,6
Leone	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	1	-9,2	-9,2	0,0	-9,2	.
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	1	-4,8	-4,8	0,0	-4,8	.
Claridae	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	13	-17,2	-14,3	2,9	-15,2	0,9
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	13	-9,6	-1,4	8,2	-4,4	2,3
Latidae	$\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$	5	-16,5	-14,3	2,2	-15,3	1,5
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$	5	-7,7	-4,2	3,5	-5,7	1,3

Fig.8.21: Tabella riepilogativa dei parametri di statistica descrittiva per i valori di  $\delta^{13}\text{C}_{\text{dieta/muscolo}}$  e  $\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$  dei campioni di faune suddivisi per specie

Se analizziamo l'andamento di questo parametro isotopico in funzione della singola specie (Fig.8.22) possiamo osservare come, per la maggior parte dei gruppi, i valori siano riconducibili ad una dieta basata essenzialmente su piante a ciclo fotosintetico C4.

Inoltre, si può osservare come il valore relativo al leone (-9,2‰), tenendo conto anche del piccolo arricchimento trofico (1-2‰) che sussiste tra carnivori ed erbivori, sia confrontabile con quello delle varie specie di bovidi. Questo dato conferma la presenza di un ambiente selvatico caratterizzato da piante C4.

Un altro valore che merita attenzione è quello del rinoceronte (-20,6‰) il quale indurrebbe ad ipotizzare per questa specie ad una dieta diversa, forse legata ad una maggiore selezione a favore delle piante C3, oppure ad un'età più recente del campione.

Per risalire al valore del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$  per i pesci, come nel caso delle altre faune, sono stati valutati i frazionamenti esistenti tra  $\delta^{13}\text{C}_{\text{capitate}}$  e il  $\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$ .

Studi condotti su esemplari di pesci d'acqua dolce attuali provenienti dall'Africa (non allevati) hanno indicato che il  $\Delta^{13}\text{C}_{\text{cap-coll}}$  è dell'ordine del  $10 \pm 0,3\%$ , mentre il  $\Delta^{13}\text{C}_{\text{coll-musc}}$  è di  $2,7 \pm 0,5\%$  (Dufour, 1999). In base a tali valutazioni è stato considerato un frazionamento complessivo per il  $\Delta^{13}\text{C}_{\text{cap-musc}}$  di  $12,7\%$  che è stato utilizzato per calcolare il valore di composizione isotopica del muscolo nel caso dei pesci il quale, quindi, equivale al valore della dieta per l'uomo.

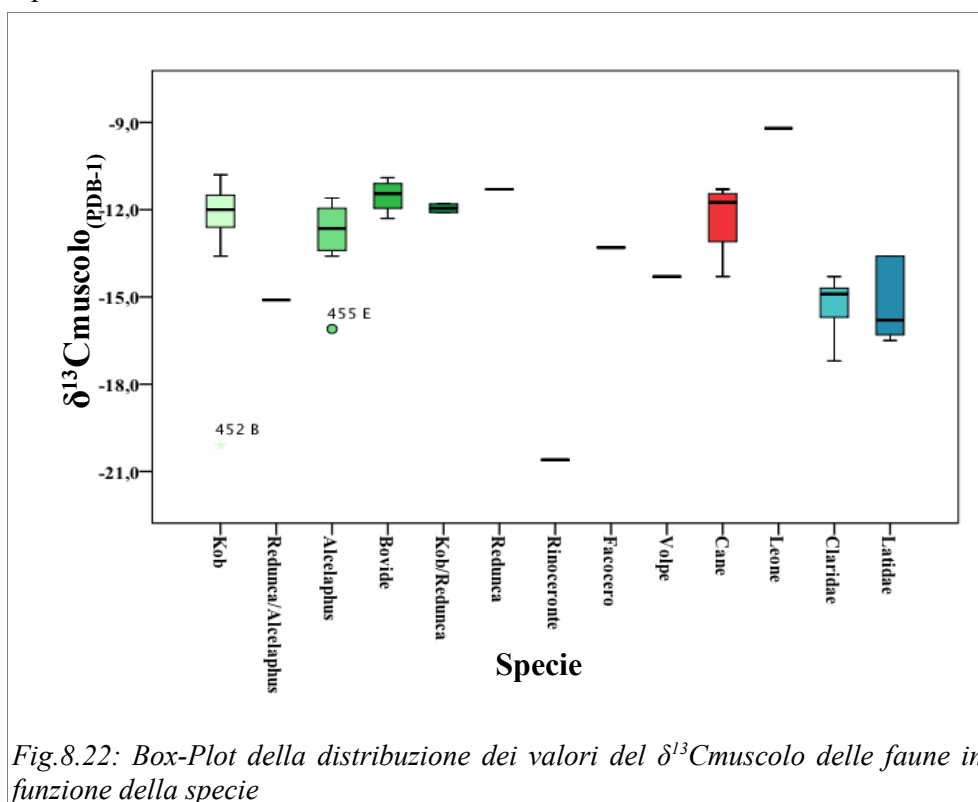


Fig.8.22: Box-Plot della distribuzione dei valori del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{muscolo}}$  delle faune in funzione della specie

I valori medi ottenuti per i due gruppi di specie di pesce, (*Claridae*: $-15,2\pm 0,9$ ; *Latidae*: $-15,3\pm 1,5$ ), risultano mediamente meno negativi rispetto alle altre faune.

L'andamento dei valori isotopici dell'ossigeno in funzione delle singole specie (Fig.8.23) segnala una maggiore variabilità per questo parametro rispetto al  $\delta^{13}\text{C}$ . Ciò non ha consentito di individuare in maniera inequivocabile la presenza di differenze significative tra i gruppi, anche a causa del numero ridotto di campioni per alcune specie.

Se si prendono in considerazione i pesci, però, è possibile evidenziare come gli esemplari appartenenti alla famiglia dei *Latidae* presentino valori tendenzialmente meno positivi rispetto ai *Claridae*, indicando condizioni ambientali leggermente diverse per i due gruppi dovute ad una differente profondità dell'habitat: acque più superficiali per i *Claridae*, più profonde per i *Latidae*.

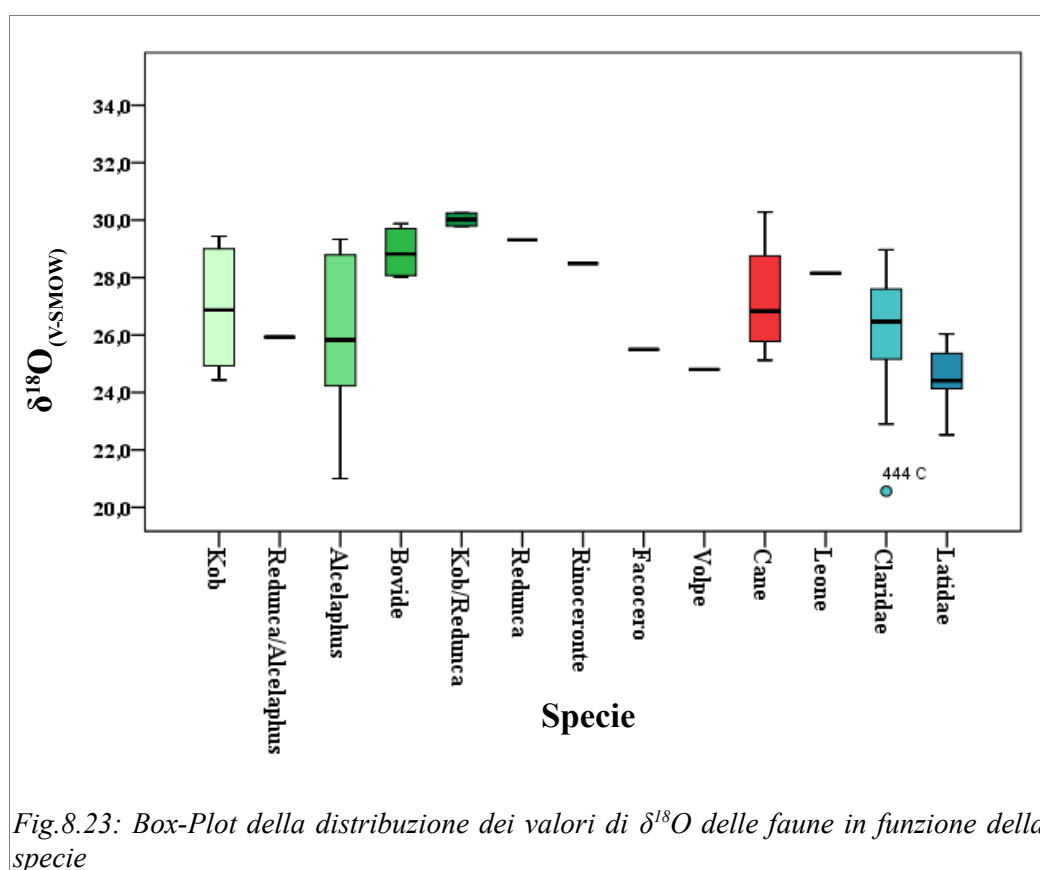


Fig.8.23: Box-Plot della distribuzione dei valori di  $\delta^{18}\text{O}$  delle faune in funzione della specie

Dal confronto tra i reperti faunistici Mesolitici con quelli umani suddivisi in base alla cronologia sono emerse delle osservazioni interessanti.

Nel grafico di Fig. 8.24 sono stati messi in relazione il valore del  $\delta^{13}\text{C}$  del muscolo e quello del  $\delta^{18}\text{O}$  dell'acqua ambientale. Quest'ultimo parametro è stato determinato, analogamente a quanto fatto per l'uomo, ricavando il valore del  $\delta^{18}\text{O}$  del fosfato a partire da quello del carbonato (Iacumin et al., 1996) e applicando poi le relazioni, dipendenti dalla specie, per il calcolo del valore di composizione isotopica dell'acqua (Longinelli, 1999).

Non avendo a disposizione una retta specifica per l'antilope, nel caso dei bovidi sono state utilizzate le relazioni messe a punto per le capre e i buoi:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}} = 0,88 * \delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}} + 24,10 \quad (\text{capra})$$

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}} = 1,01 * \delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}} + 24,90 \quad (\text{bue})$$

La differenza che sussiste tra i valori ottenuti applicando queste due rette è molto piccola (0,1%) per cui possono essere usate entrambe in maniera equivalente. In questo caso, è stata utilizzata la relazione specifica per le capre sulla base delle maggiori affinità con le specie dei bovidi considerate.

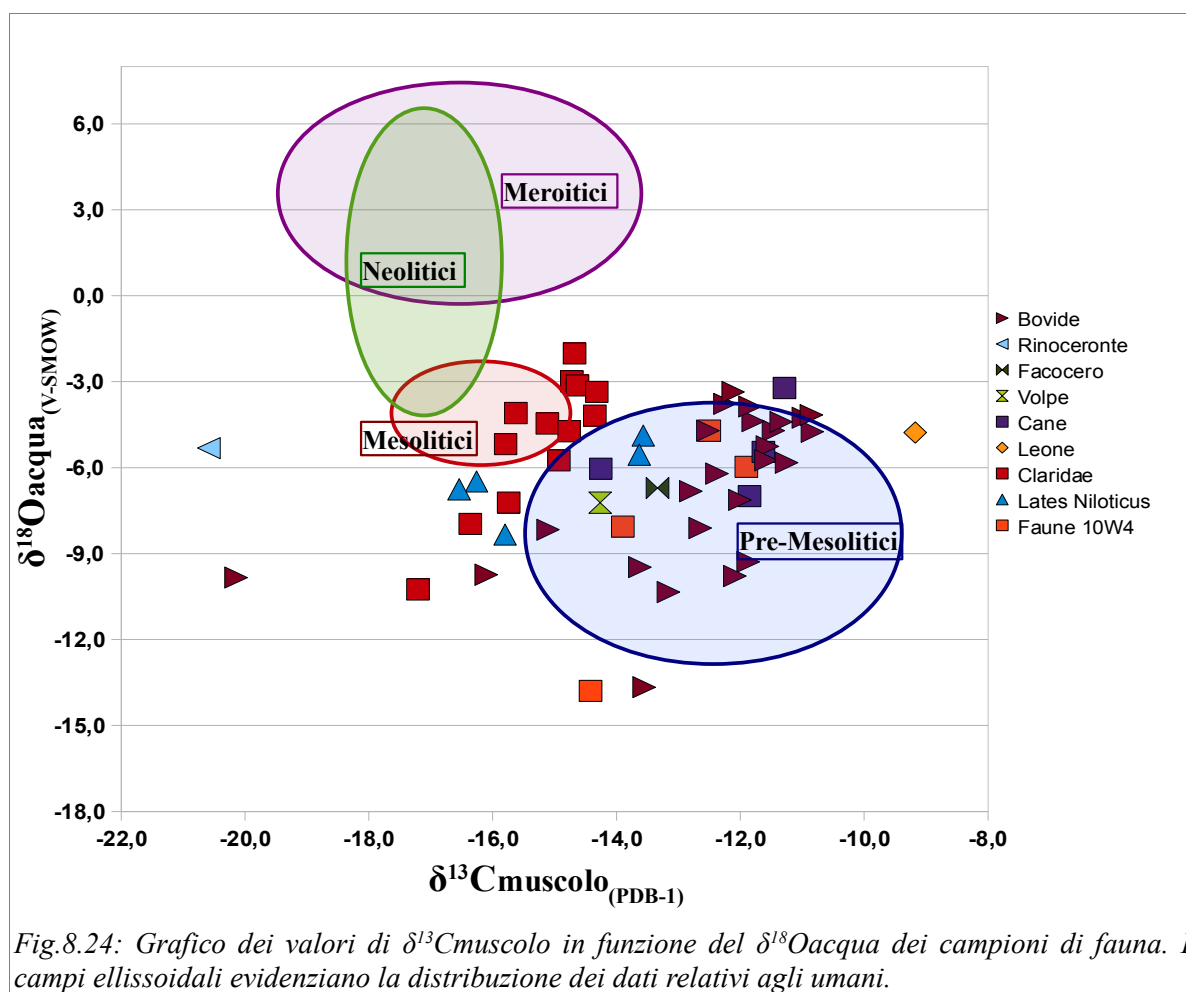
Per quanto riguarda i carnivori è stata utilizzata la relazione determinata per la volpe, essendo l'unica messa a punto per una specie carnivora:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}} = 1,34 * \delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}} + 25,49$$

Infine, nel caso dei pesci è stata applicata la relazione di equilibrio per i fosfati (Longinelli et Nuti, 1973) considerando una temperatura dell'acqua di 20°C:

$$t = 111,4 - 4,3(\delta^{18}\text{O}_{\text{fosfato}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}})$$

Ovviamente è necessario ricordare che, non esistendo una retta specifica per ogni singola specie animale, i valori dell'acqua così calcolati forniscono solo un'indicazione sull'ordine di grandezza.



Dal grafico possiamo osservare come la maggioranza dei campioni si collochi all'interno del campo dei valori isotopici che caratterizzano gli individui umani del periodo pre-Mesolitico.

Per quanto riguarda il  $\delta^{13}\text{C}$  del muscolo, e quindi della dieta, a parte le eccezioni già valutate, le faune confermano la presenza sul territorio di piante C4 durante il periodo più antico di frequentazione del sito.

I valori dei pesci, più spostati verso il campo degli umani Mesolitici, farebbero pensare che questo tipo di risorsa venisse maggiormente consumata in questo periodo piuttosto che in quello precedente. L'introduzione del pesce potrebbe contribuire ai valori più negativi che si riscontrano per questo gruppo rispetto ai pre-Mesolitici.

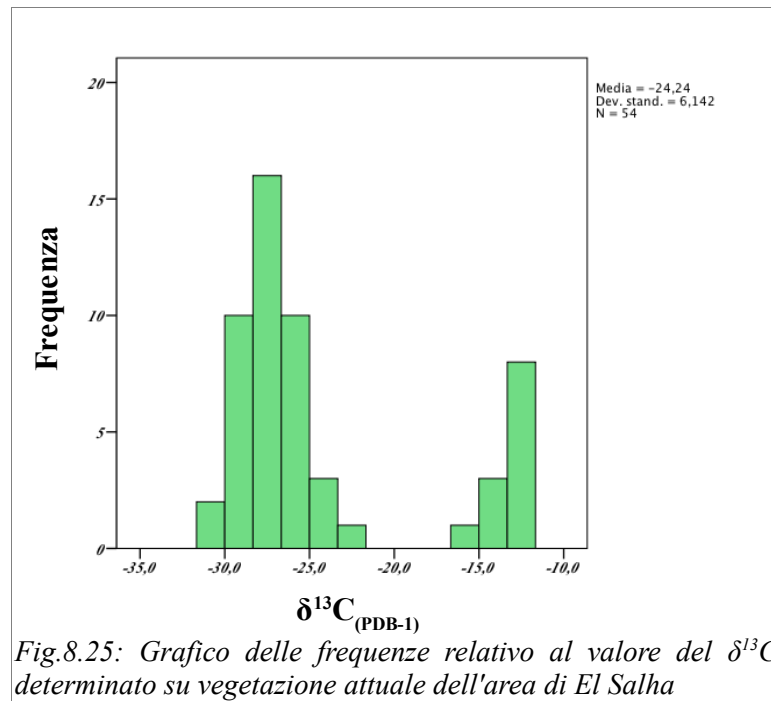
I valori dell'ossigeno, generalmente più positivi rispetto a quelli degli umani coevi, indicano anch'essi una condizione climatica e ambientale molto simile a quella che caratterizza gli individui più antichi (pre-Mesolitici e Mesolitici).

Nel grafico, inoltre, sono stati riportati alcuni valori relativi ad esemplari di faune appartenenti al sito di età tardo-Mesolitica 10-W-4 datato 5500 BC.

Anche in questo caso i valori si collocano nel campo degli umani pre-Mesolitici, esattamente come gli animali di Al Khiday, indicando quindi una copertura vegetale di tipo C4.

### 8.5: LE PIANTE ATTUALI

Durante questo progetto di ricerca è stato possibile misurare la composizione isotopica del carbonio di 54 esemplari di piante provenienti dalla zona di El Salha e nel grafico di Fig.8.25 è rappresentata la distribuzione delle frequenze.



Si distinguono nettamente i due gruppi vegetali in quanto, come previsto dalla letteratura, la distribuzione è bimodale.

Le piante C3 rappresentano la maggior parte delle specie raccolte (42 su 54) e mostrano valori del  $\delta^{13}\text{C}$  che oscillano tra -30,2‰ e -23,2‰ con un valore medio di -27,4‰ (Dev.st. 1,7).

Le piante C4 invece possiedono valori tipicamente più arricchiti e variabili tra -15,3‰ e -12,1‰ con una media di -13,2‰ (Dev. st. 0,9).

Questi dati indicano che in quest'area del Sudan Centrale oltre alle piante C4, notoriamente diffuse a tali latitudini, sono presenti in maniera consistente anche delle piante a ciclo fotosintetico C3, tipiche delle medie latitudini e di condizioni climatiche temperate, le quali evidentemente hanno saputo adattarsi a situazioni climatiche calde e aride come quelle attuali.

## 8.6: RICOSTRUZIONE DELLA PALEODIETA

Nel grafico di Fig.8.26 è rappresentato l'andamento del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{dieta}}$  degli esemplari umani in funzione delle cronologia e, inoltre, sono stati evidenziati i campi di variazione dei valori isotopici del carbonio riportati in letteratura relativi alle piante C3 e C4, i quali comprendono il range di valori riscontrati nelle piante attuali e illustrati nel paragrafo precedente.

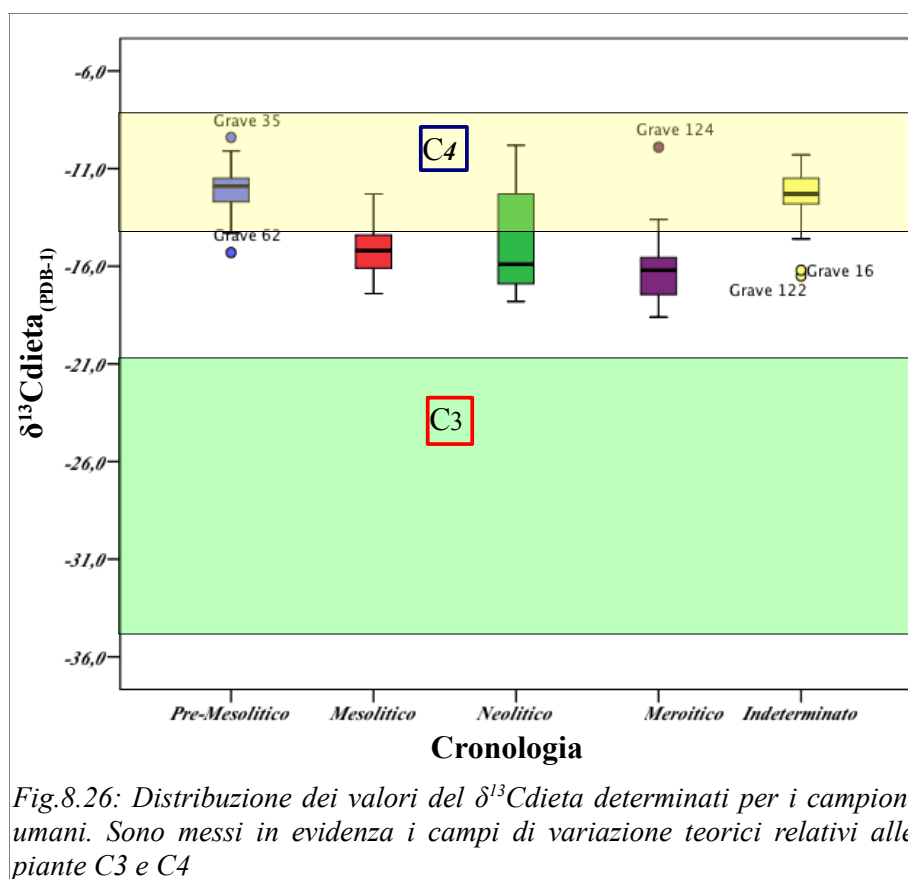


Fig.8.26: Distribuzione dei valori del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{dieta}}$  determinati per i campioni umani. Sono messi in evidenza i campi di variazione teorici relativi alle piante C3 e C4

Possiamo ipotizzare per gli individui pre-Mesolitici una dieta costituita quasi esclusivamente da piante C4 e da animali che si nutrivano a loro volta di piante C4, le quali dovevano crescere sul territorio in maniera spontanea ed essere quindi disponibili per queste popolazioni di raccoglitori-cacciatori-pescatori e per le faune.

In effetti, se prendiamo in considerazione i valori relativi alle faune (Fig.8.27) possiamo osservare come, nella maggior parte dei casi, e soprattutto per i Bovidi, i valori isotopici del carbonio siano indicativi di una dieta a base di piante C4. Inoltre, se si considerano i confronti effettuati nel paragrafo precedente, questo gruppo di animali risulta compatibile con gli individui pre-Mesolitici e Mesolitici confermando quindi anche il dato ambientale.

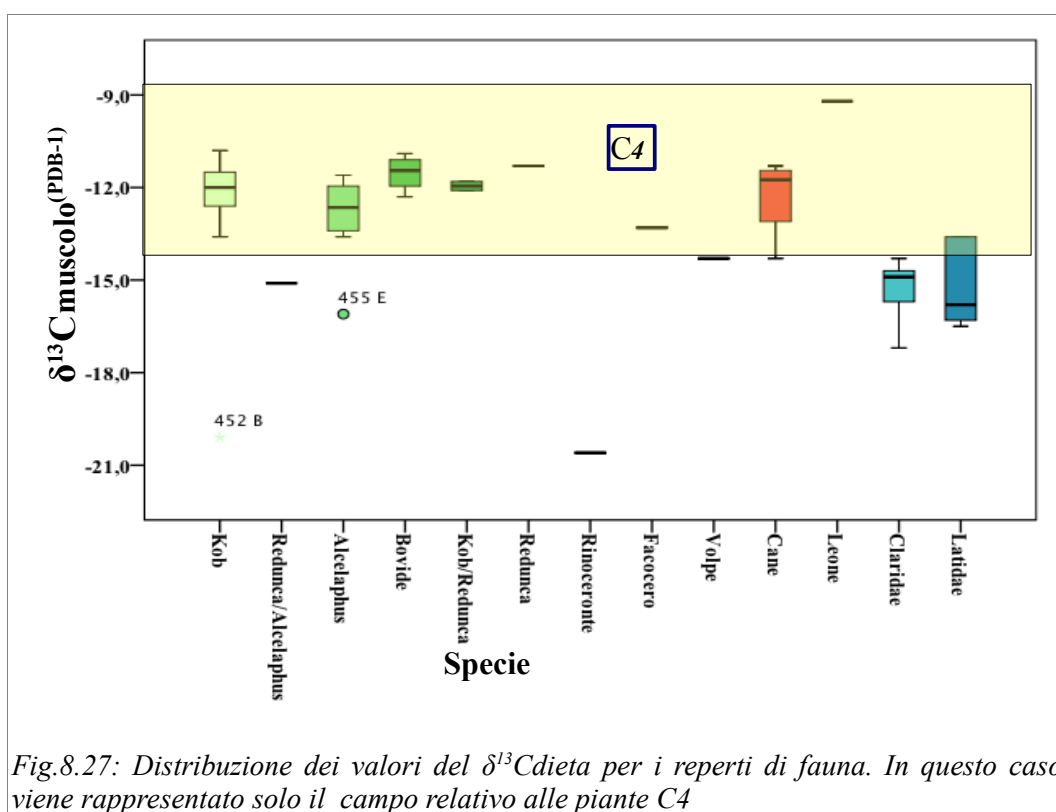
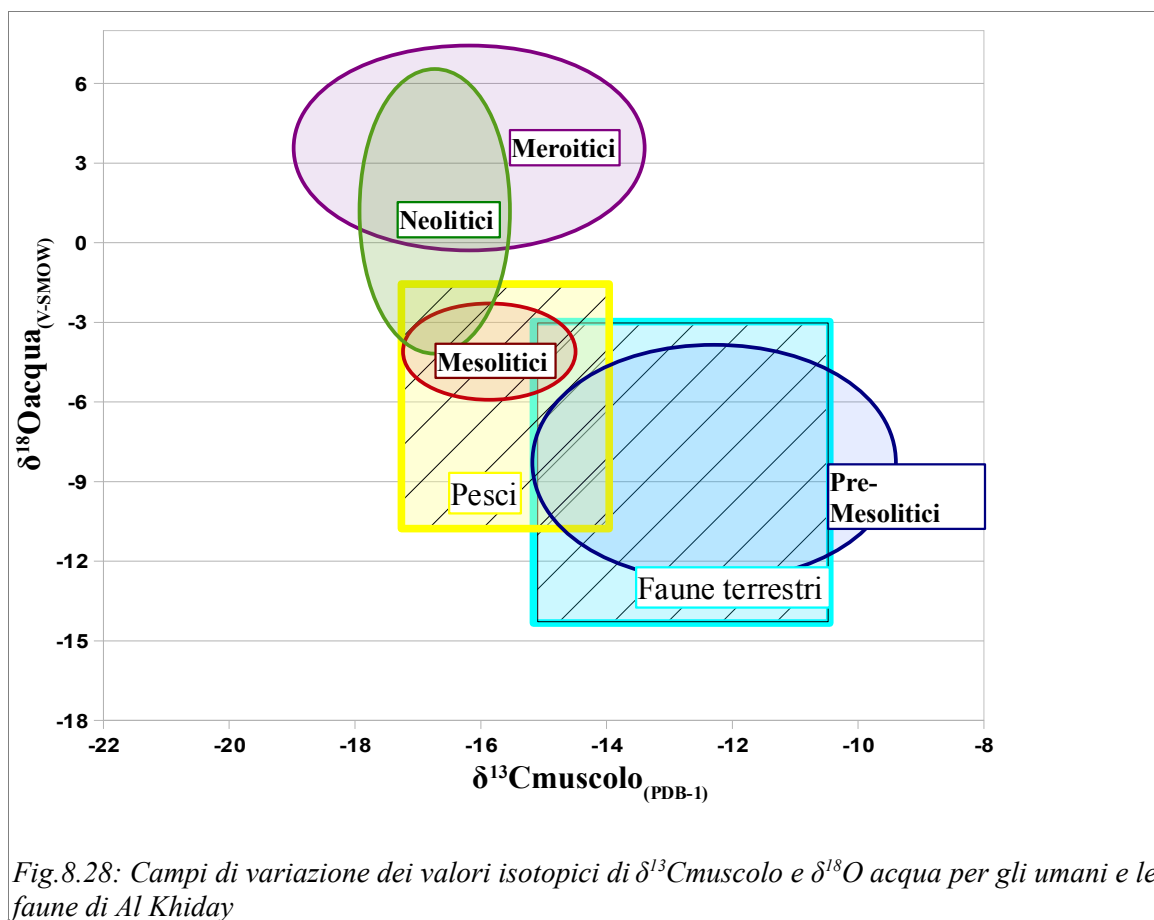


Fig.8.27: Distribuzione dei valori del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{dieta}}$  per i reperti di fauna. In questo caso viene rappresentato solo il campo relativo alle piante C4

A partire dal Mesolitico e in maniera progressiva durante le epoche successive la dieta degli umani diventa mista C3/C4, probabilmente in seguito ad una variazione delle caratteristiche della copertura vegetale indotta ad esempio dall'introduzione della pratica dell'agricoltura (Fig.8.28).

Se, ad esempio, prendiamo in considerazione la presenza sul territorio del sorgo (C4), la quale rappresenta ancora oggi una delle piante alimentari più diffuse in Africa, possiamo ipotizzare che essa crescesse in maniera spontanea e abbondante durante il periodo pre-Mesolitico e Mesolitico e che quindi venisse introdotto nella dieta in maniera diretta o indiretta (animali selvatici).

Durante le epoche successive, con il passaggio da una condizione di totale mobilità a quella di semi-sedentarietà (neolitizzazione), queste popolazioni cominciarono a coltivare anche delle piante C3 le quali, presumibilmente, venivano impiegate pure per nutrire gli animali che iniziavano ad essere allevati. In questa fase queste popolazioni, con il perfezionarsi delle tecniche agricole e con l'introduzione della pratica dell'allevamento, introdussero nella dieta, insieme alle piante C4, quantità sempre maggiori di piante C3.



La negativizzazione dei valori isotopici del carbonio che si osserva negli umani a partire dal Mesolitico potrebbe anche essere dovuta al contributo fornito dal pesce d'acqua dolce, il quale evidentemente cominciava ad essere maggiormente introdotto nella dieta rispetto al periodo precedente. In effetti, tale ipotesi, oltre che dai dati isotopici, risulta rafforzata anche da alcune evidenze: la vicinanza dell'insediamento al fiume Nilo, la presenza nell'area di un paleolago tardo-Olocenico.

Una stima approssimativa della quantità di piante  $C_4$  introdotte nella dieta può essere effettuata utilizzando l'equazione di Schwarcz et al, 1985:

$$\% C_4 = \frac{[\delta_{carb} - \delta_3 - (\delta_{carb} - \delta_{dieta})]}{(\delta_4 - \delta_3)} * 100$$

utilizzando i valori isotopici medi delle piante locali che in questo caso sono: -27,4‰ per le C3 e -13,2‰ per le C4. A questi però, occorre apportare una correzione di +1,5‰ che tenga conto della negativizzazione della CO<sub>2</sub> atmosferica (da -6,5‰ a -8‰) che ha comportato l'utilizzo dei combustibili fossili (Friendly et al., 1986; Keeling et al., 1979). In base a tali calcoli è stato stimato che per gli individui pre-Mesolitici le piante C4 rappresentavano almeno l'80% della dieta; questa percentuale si riduce fino al 60% durante il Mesolitico e il Neolitico mentre nel Meroitico le piante C4 raggiungono la parità con le piante C3.

Le proteine animali (terrestri ed acquatiche) facevano sicuramente parte della dieta ma non è possibile discriminarle a causa della mancanza dei valori isotopici del collagene.

### **8.7: RICOSTRUZIONE PALEOCLIMATICA E PALEOAMBIENTALE**

I valori del  $\delta^{13}\text{C}$ , oltre ad essere usati per effettuare delle considerazioni sulle economie di sussistenza, ci permettono di ottenere alcune informazioni sulle caratteristiche dell'habitat.

Per quanto riguarda i campioni presi in esame in questo studio abbiamo osservato come gli individui pre-Mesolitici presentino valori di composizione isotopica della dieta riconducibili ad una copertura vegetale caratterizzata essenzialmente da piante a ciclo fotosintetico C4, le quali, infatti, oscillano tra -9‰ e -14‰.

Le piante C4, attualmente molto diffuse in Africa, si associano a condizioni climatiche calde e umide, ad ambienti aperti e con un elevato tasso di irraggiamento durante la stagione di crescita (Sage et Monson, 1999); inoltre, si adattano molto bene in condizioni di stress idrico e di crescente aridità (Ehleringer et al., 1997). Sulla base di tali indicazioni potremmo ipotizzare per questa fase cronologica molto antica condizioni climatiche calde e soleggiate. Durante le epoche successive si assiste ad un progressivo impoverimento in isotopi pesanti che potrebbe essere ricondotto all'introduzione nella dieta, e quindi alla comparsa nella copertura vegetale, di piante a ciclo fotosintetico C3 isotopicamente più negative, ad esempio per i motivi descritti nel paragrafo precedente (passaggio al semi-nomadismo e introduzione dell'agricoltura).

Mentre le piante C3 risultano particolarmente sensibili alle variazioni delle caratteristiche ambientali, quelle a ciclo fotosintetico C4 mantengono pressoché inalterata la propria composizione isotopica al variare delle condizioni dell'habitat (Farquhart et al., 1982; Henderson et al., 1992; Schultze et al., 1996; Wang et al., 2006).

In particolare, le piante C4 adattandosi molto bene in caso di stress idrico, non possono essere utilizzate per evidenziare un cambiamento delle condizioni di umidità in una determinata zona.

Se però si analizzano le caratteristiche della copertura vegetale attualmente presente nell'area del sito archeologico (Paragrafo 8.5) si scopre che sono rappresentate entrambe le categorie di piante.

Sulla base di tale considerazione possiamo ipotizzare che l'introduzione delle piante C3 a partire dal Mesolitico e in maniera sempre più consistente durante le epoche successive potrebbe anche essere dovuta ad un fattore climatico: l'aumento delle condizioni di aridità ambientale avrebbe causato la riduzione delle aree nelle quali crescevano spontanee le piante C4 spingendo le popolazioni a coltivare lungo le sponde del Nilo, anche con l'introduzione di

opere di canalizzazione, nuove colture di piante C3.

Per quanto riguarda l'ossigeno, nel Capitolo 2 è stato ampiamente descritto come il  $\delta^{18}\text{O}$  delle acque meteoriche decresca al diminuire della temperatura, all'aumentare della piovosità, della distanza dal mare e dell'altitudine.

Altri fattori importanti che influenzano il valore isotopico dell'ossigeno sono: l' "effetto quantità" delle precipitazioni (Higgins et MacFaddan, 2004) e il tasso di umidità relativa (Burk et Stuiver, 1981), entrambe inversamente proporzionali al  $\delta^{18}\text{O}$ .

Se consideriamo (vista la posizione del sito) che l'acqua ingerita da questi individui era quella del Nilo, allora una maggiore quantità di pioggia anche nelle aree di ricarica del fiume si traduceva in una maggiore portata, in un minore effetto di evaporazione e in valori di composizione isotopica dell'ossigeno dell'acqua meno arricchiti. Di conseguenza il  $\delta^{18}\text{O}$  dell'apatite risultava più negativo durante le fasi umide e piovose rispetto al valore registrato nei periodi di magra.

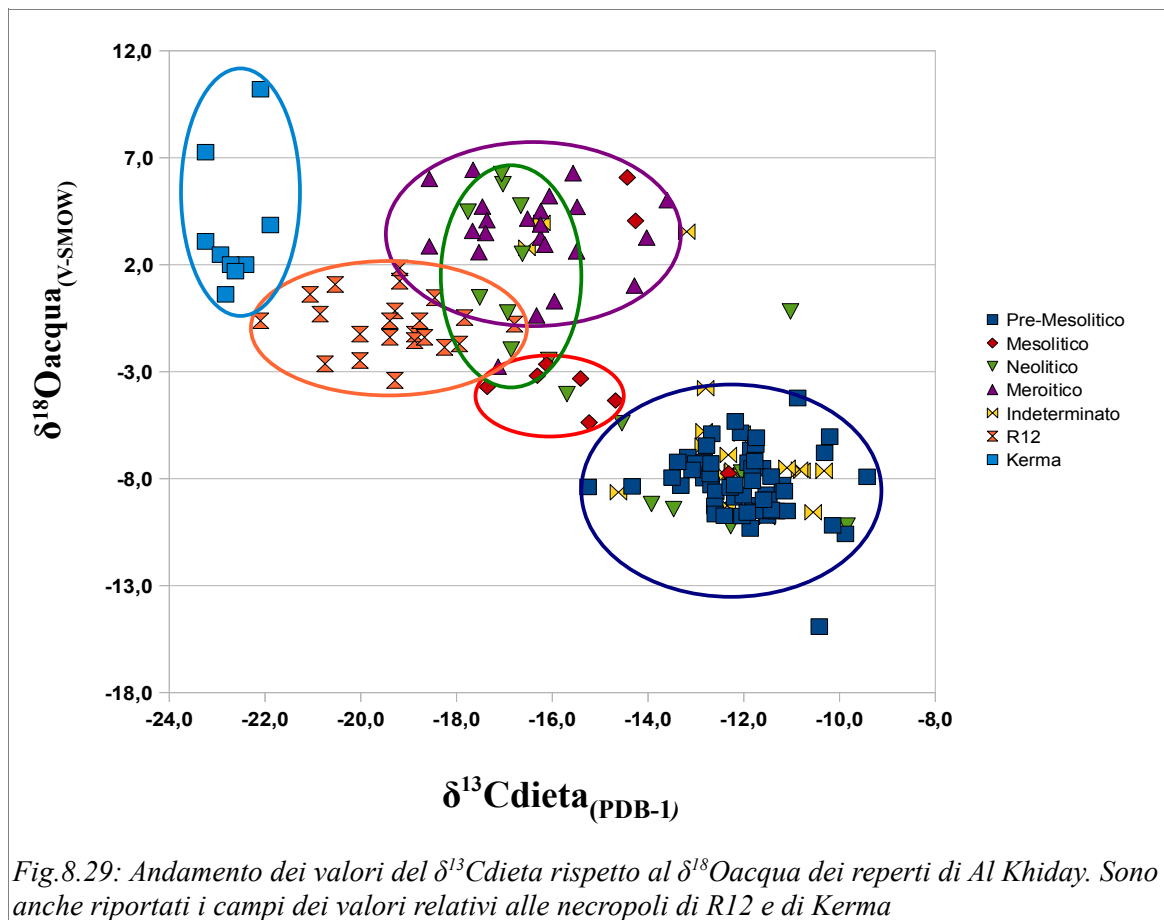
Sulla base di tali relazioni potremmo supporre che gli individui pre-Mesolitici (isotopicamente impoveriti) vivessero in condizioni ambientali contraddistinte da un maggiore tasso di precipitazioni annue e da una maggiore umidità rispetto agli individui delle epoche successive, per i quali si ipotizzano condizioni di aridità crescente e di minore piovosità.

Tale ricostruzione sembra essere confermata anche dal confronto con i valori isotopici relativi ad altre necropoli rinvenute in aree vicine, situate a circa 750 Km più a Nord rispetto al villaggio di Al Khiday.

Nel grafico di Fig.8.29 sono stati riportati il  $\delta^{13}\text{C}$  in funzione del  $\delta^{18}\text{O}$  dei campioni di El Salha, suddivisi in base alla cronologia, e dei reperti provenienti dalla necropoli Neolitica di R12, che copre l'intervallo temporale che va dagli inizi del V millennio fino alla fine del IV (Iacumin, 2008), e della vicina Kerma, datata tra i 4450 e i 3700 BP (Iacumin et al., 1998).

I valori della dieta relativi al sito di R12 oscillano tra -22,1‰ e -16,8‰ (con un valore medio di  $-18,8 \pm 1,2$ ), mentre quelli della necropoli di Kerma variano tra -23,2‰ e -21,9‰ (media  $-22,7 \pm 0,5$ ).

Possiamo osservare come in entrambi i casi i valori indicano una copertura vegetale mista C3/C4, nella quale le piante C4 sono decisamente in quantità subordinate rispetto alle C3. Tale andamento si accorda con quanto osservato nel caso dei campioni di El Salha per lo stesso periodo cronologico, per i quali viene indicato un aumento delle C3 rispetto alle fasi precedenti nelle quali erano maggiormente rappresentate le C4.

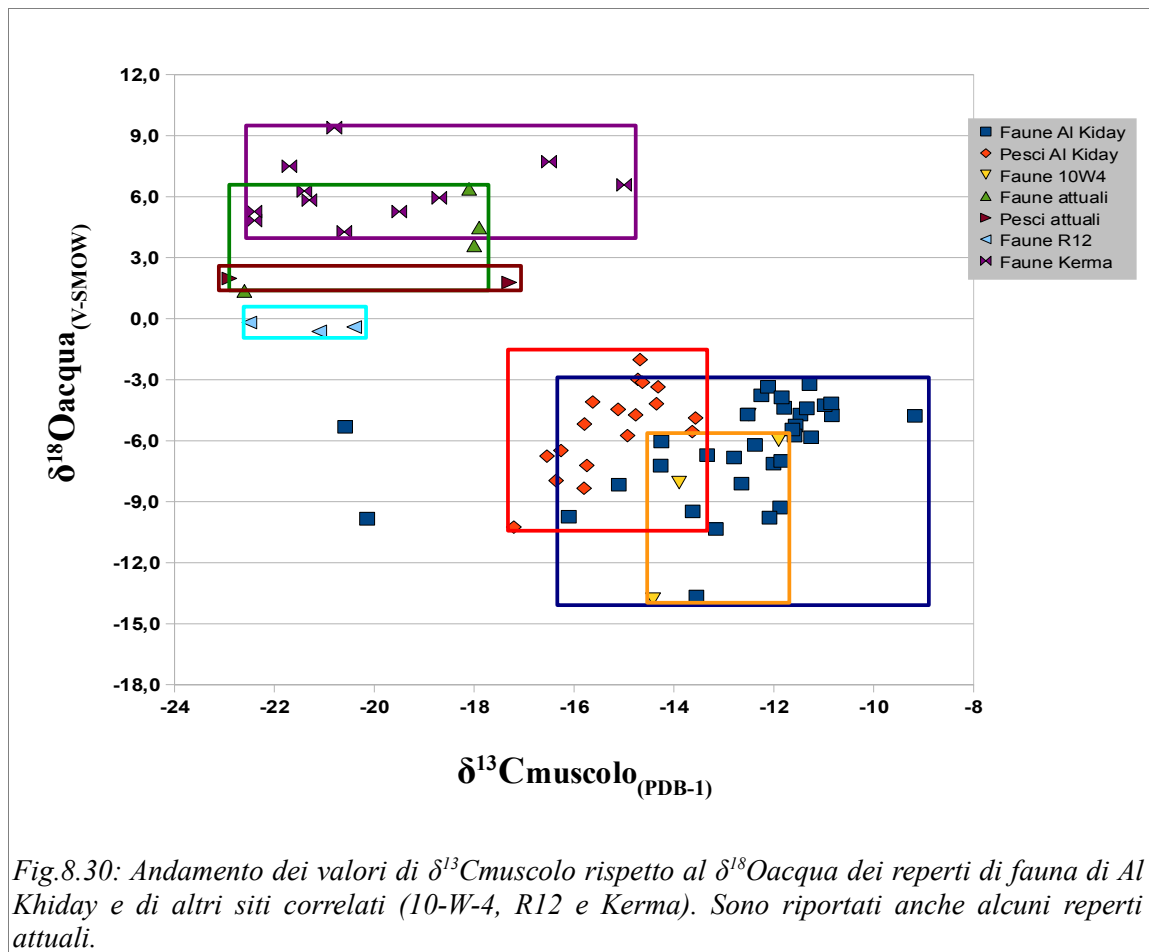


Per quanto riguarda la composizione isotopica dell'ossigeno nel caso di R12 i valori riportati per l'acqua oscillano tra +1,9‰ e -3,4‰. Questo intervallo comprende, in parte, i valori dei campioni neolitici di Al Khiday e segnala, ancora, condizioni più aride se si raffrontano con i valori degli individui più antichi. Se si considerano anche i campioni della necropoli di Kerma possiamo osservare come i valori isotopici dell'acqua siano molto variabili, compresi tra +10,2‰ e +0,6‰ (valore medio:  $+3,7 \pm 3,1\%$ ), e confrontabili con quelli degli individui Neolitici e Meroitici.

Anche in questo caso quindi, vengono segnalate condizioni di maggiore aridità rispetto ai periodi precedenti, confermando in definitiva il trend descritto per i campioni provenienti dall'area di El Salha.

Un analogo confronto può essere condotto prendendo in esame i reperti faunistici fossili di Al Khiday e quelli rinvenuti nelle altre necropoli: Kerma, R12 e 10-W-4. Oltre a questi, sono

stati considerati anche alcuni esemplari attuali (Fig.8.30) raccolti sempre nell'area di Khartoum.



In generale si osserva che i campioni di Al Khiday, sia terrestri che acquatici, presentano valori del  $\delta^{13}\text{C}$  e del  $\delta^{18}\text{O}$  meno arricchiti rispetto agli altri gruppi, ad eccezione di quello tardo-Mesolitico 10-W-4.

I valori isotopici del carbonio per Al Khiday variano, infatti tra  $-20,6\text{‰}$  e  $-9,2\text{‰}$  indicando un tipo di vegetazione caratterizzata essenzialmente da piante C4, esattamente come i campioni di 10-W-4.

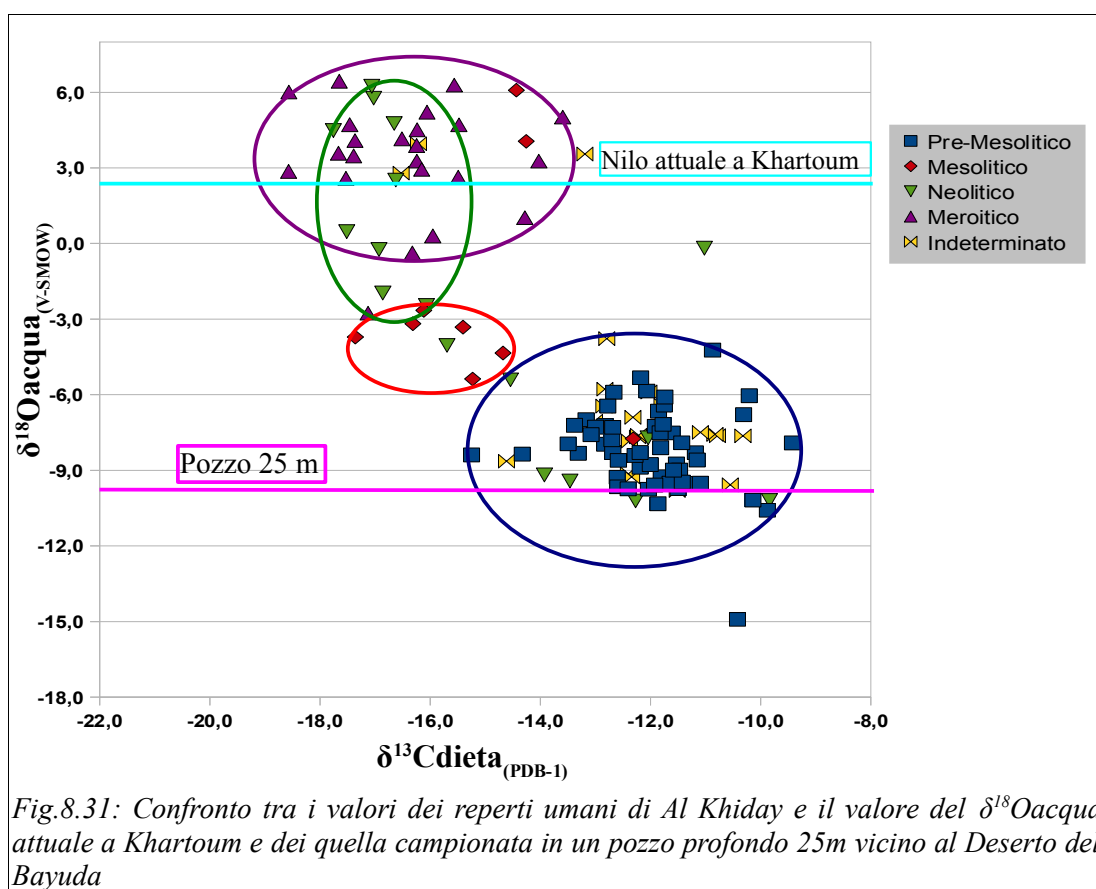
Sia i reperti attuali (media:  $-19,2 \pm 2,3\text{‰}$ ), sia quelli appartenenti alle altre necropoli (R12:  $-21,3 \pm 1,5\text{‰}$ ; Kerma:  $-20,0 \pm 2,4\text{‰}$ ) mostrano, invece, valori più negativi del  $\delta^{13}\text{C}$  indicativi di una dieta mista C3/C4.

Nel caso dell'ossigeno, i valori più positivi riferiti ai siti di R12 ( $-0,4 \pm 0,2\text{‰}$ ) e di Kerma ( $6,3 \pm 1,5\text{‰}$ ) nonché ai reperti attuali ( $3,9 \pm 2,1\text{‰}$ ), sarebbero indicativi di un ambiente più

arido e meno piovoso rispetto a quello riscontrato nell'area di Al Khiday ( $-6,5 \pm 2,5\text{‰}$  per Al Khiday e  $-8,1 \pm 4,0$  per 10-W-4). Condizioni ambientali e climatiche molto simili a quelle attuali, quindi, si erano già instaurate circa 4000 anni fa.

Questo dato è ulteriormente confermato dai valori dei pesci fossili che presentano valori medi di composizione isotopica dell'ossigeno dell'acqua ( $-6,4 \pm 2,2\text{‰}$ ) molto più negativi rispetto a quelli pescati attualmente nel Nilo ( $1,9 \pm 0,1\text{‰}$ ) i quali segnalano condizioni di acque più evaporate. Questi valori devono essere comunque considerati delle stime perchè sono stati ottenuti da un numero esiguo di campioni.

In definitiva, considerando (come già rilevato in precedenza) che i valori isotopici dei reperti faunistici di El Salha sembrano essere maggiormente confrontabili con quelli relativi alle popolazioni pre-Mesolitiche e Mesolitiche di frequentazione del sito, possiamo ipotizzare per questa fase un' area caratterizzata essenzialmente da vegetazione di tipo C4, indicativa di ambienti caldi e aperti (tipo savana), e da condizioni ambientali maggiormente umide e piovose rispetto a quelle che caratterizzerebbero questo sito e quelli più a Nord nei periodi successivi. Tale ricostruzione confermerebbe dunque l'andamento descritto nel caso dei reperti umani.



Dal confronto con tali valori è chiaro che il tasso di precipitazione e di umidità relativa durante il periodo definito pre-Mesolitico (>9000 BP) doveva essere marcatamente maggiore rispetto alle attuali condizioni iper-aride. Questo dato troverebbe un'ulteriore conferma se si considera il valore isotopico di  $-9,7\%$  relativo all'acqua prelevata dal pozzo profondo circa 25 metri situato nel vicino Deserto del Bayuda . Quest'acqua è riconducibile ad un periodo molto antico, nel quale il Nilo era caratterizzato da una notevole portata e velocità di flusso o quanto meno da una maggiore piovosità nell'area di ricarica (Fig.8.31).

Gli individui dei periodi successivi presentano valori molto prossimi a quelli che si riscontrano attualmente nell'area e che quindi indicano l'instaurarsi di condizioni ambientali di crescente aridità. Durante il periodo Neolitico (in parte) e il Meroitico le condizioni di aridità sembrano essere ancora più marcate di quelle attuali.

In definitiva, dall'integrazione delle informazioni fornite dai valori isotopici di carbonio e ossigeno si possono ipotizzare per il periodo pre-Mesolitico condizioni climatiche calde e umide con un tasso di precipitazioni annuo maggiore sia rispetto a quello attuale, sia nei confronti di quello dei periodi successivi. Soprattutto a partire dal Neolitico, infatti, si attestano condizioni di crescente aridità.

La ricostruzione paleoclimatica e paleoambientale ottenuta dai dati isotopici trova riscontro in altri record paleoclimatici i quali, per l'inizio dell'Olocene, indicano l'instaurarsi in Africa di condizioni maggiormente umide rispetto alla precedente fase arida tardo-Pleistocenica (Williams et Talbot, 2009; Williams et al., 2010) .

È il caso, ad esempio, delle indagini geomorfologiche condotte nell'area dello scavo archeologico di Al Khiday che hanno portato all'individuazione delle tracce della presenza di un paleo-lago di formazione Olocenica (Fig.4.6).

Molti insediamenti Mesolitici si rinvengono proprio in corrispondenza dei terrazzi pleistocenici che si trovano ai margini di tale formazione lacustre la quale, già nell'Olocene Medio, riduce le proprie dimensioni fino a scomparire (Cremaschi et al., 2007; Zerboni, 2010).

Dal punto di vista isotopico per il Sahara Centrale sono disponibili in letteratura poche informazioni sugli acquiferi relative alle prime fasi dell'Olocene: Fontes et al. (1993) e Gasse (2002) riportano valori di  $\delta^{18}\text{O}$  delle paleo-precipitazioni locali del Mali e della Nigeria variabili tra  $-10\%$  e  $-11\%$  le quali sono nettamente più negative rispetto alle precipitazioni attuali. Questi valori avvalorano la tesi secondo la quale gli individui di età pre-Mesolitica

(più antichi di 9000 anni) sarebbero vissuti durante un periodo particolarmente umido e piovoso, probabilmente corrispondente con le prime fasi dell'Olocene, anche perchè per ritrovare una fase precedente ugualmente umida bisogna risalire al periodo del cosiddetto “Nilo selvaggio” (tra i 14000 e i 13000 anni fa). La mancanza di riscontri oggettivi sulle reale età di questi reperti rende una simile ipotesi plausibile ma non comprovata da dati concreti; ulteriori accertamenti in tal senso sono tutt'ora in corso e potrebbero cambiare la cronologia degli eventi senza però influire sugli andamenti climatici individuati.

La presenza di laghi di età Olocenica è stata attestata anche nel Sudan Settentrionale da altri autori. Ad esempio, Hoelzmann (2001) ha indagato sull'evoluzione del West Nubian Palaeolake il quale costituisce una significativa evidenza della fase umida Olocenica del Nord Africa. Questa formazione lacustre si trova collocata più a Nord rispetto al sito di Al Khiday, in un'area che era caratterizzata dalla presenza di altri bacini come quello di Selima o di Oyo (Fig.8.32).

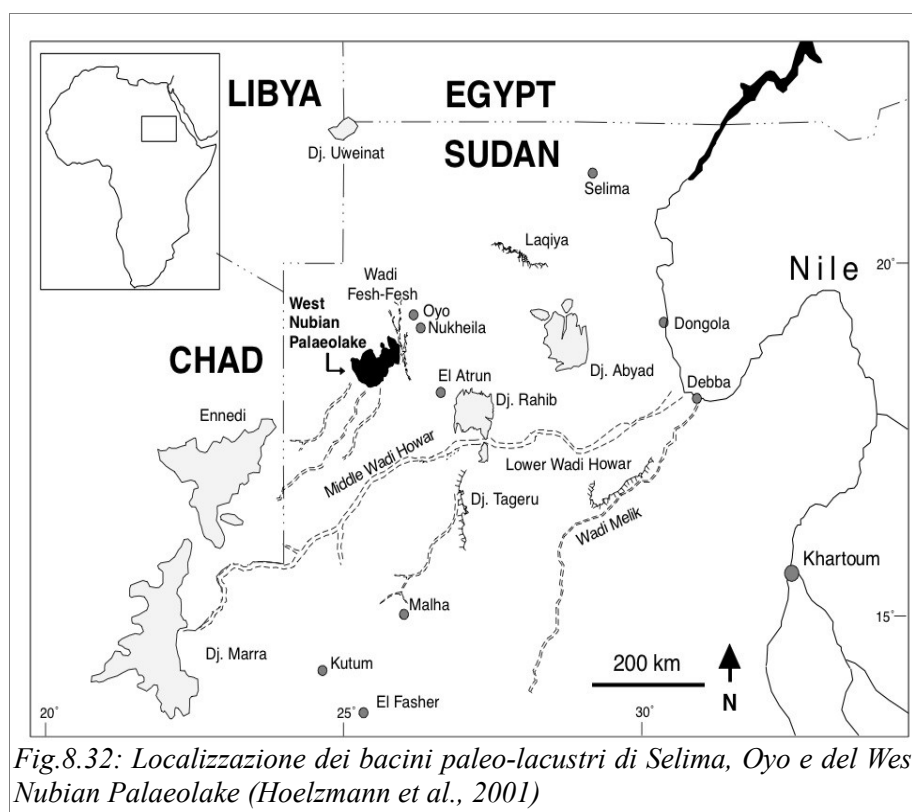


Fig.8.32: Localizzazione dei bacini paleo-lacustri di Selima, Oyo e del West Nubian Palaeolake (Hoelzmann et al., 2001)

Secondo tale studio il lago raggiunse le dimensioni massime approssimativamente tra i 9400 e i 7500 BP, periodo nel quale le stime sulla piovosità indicano un tasso di paleo-

precipitazioni dell'ordine dei 460/600 mm annui, fino ai 4000 BP quando comincia la transizione verso una fase di maggiore aridità che condurrà all'essiccazione completa del bacino.

Anche il record stratigrafico del lago di Selima indica che il bacino subì una fase di intensa evaporazione nel periodo compreso tra i 7000 e 6000 BP che condusse alla formazione di un lago salino intorno ai 6400 anni fa (Haynes et al., 1989). Il progressivo accentuarsi delle condizioni di aridità determinarono la definitiva scomparsa del lago di Selima all'incirca 4000 anni fa.

In Fig.8.33 riportiamo un grafico riassuntivo che illustra l'evoluzione del livello di una serie di laghi dell'area Sahara-Sahel nel corso dell'Olocene e che conferma, in linea generale, i trend appena descritti (Liu et al., 2007).

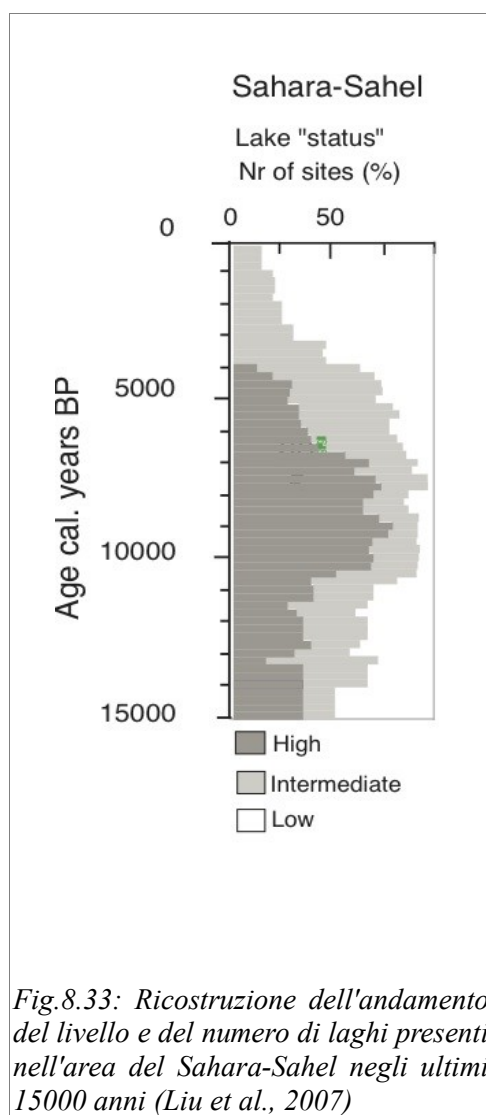


Fig.8.33: Ricostruzione dell'andamento del livello e del numero di laghi presenti nell'area del Sahara-Sahel negli ultimi 15000 anni (Liu et al., 2007)

La causa principale di un simile cambiamento nel regime delle precipitazioni è riconducibile ad una migrazione verso Sud della Zona di Convergenza Intertropicale e alla variazione dell'attività del monzone estivo.

In definitiva, nell'area di nostro interesse l'alternarsi di periodi di siccità, frequenti e spesso molto intensi, con fasi di maggiore aridità e piovosità ha condotto nel tempo, soprattutto a partire dall'Olocene medio, alla condizione iper-arida attuale.

## *Capitolo 9*

### *CONCLUSIONI*

I valori di composizione isotopica determinati sui reperti scheletrici fossili presi in esame, sia umani che animali, hanno permesso di ottenere importanti informazioni di tipo paleoclimatico e paleoambientale in merito alle aree e agli intervalli cronologici considerati.

Nel caso dei siti italiani, grazie al buono stato di conservazione dei campioni (ossa e denti) verificato mediante opportuni test, è stato possibile effettuare le analisi isotopiche sia sulla frazione organica (collagene) che su quella inorganica (apatite).

I valori del  $\delta^{13}\text{C}$  del collagene misurati sugli esemplari umani hanno indicato un tipo di copertura vegetale costituita essenzialmente da piante a ciclo fotosintetico C3, le quali sono indicative di climi temperati.

In tale contesto, il  $\delta^{13}\text{C}$ collagene, correlato inversamente con il tasso di umidità ambientale e la disponibilità idrica, ha evidenziato per il sito costiero delle Arene Candide (SV) e per quello dell'Italia Meridionale di Masseria Candelaro (FG) condizioni ambientali caratterizzate da una minore umidità rispetto a quella presente nell'area della Pianura Padana.

Per questa zona, invece, vengono indicate dal  $\delta^{13}\text{C}$ apatite condizioni di crescente umidità tra la I e la II fase VBQ, mentre si assiste ad un cambiamento verso una maggiore aridità ambientale nell'età del Bronzo antico (Fig.9.2) indicata anche dai valori di  $\delta^{15}\text{N}$ . Tali informazioni risulterebbero confermate dagli studi preliminari sul record pollinico che si stanno effettuando sugli stessi siti.

Il valore del  $\delta^{18}\text{O}$ , correlato direttamente con la temperatura media annua al suolo, segnala per l'area della Pianura Padana condizioni climatiche temperate calde con temperature prossime a quelle attuali, che si mantengono costanti durante il Neolitico medio (inquadabili nell'*optimum climatico olocenico* che interessa il periodo Atlantico) per poi seguire un andamento verso condizioni termiche inferiori durante il Bronzo antico (nel Sub-Boreale): Fig.9.1. Per le Arene Candide e per Masseria Candelaro, sempre nell'ambito di un clima temperato, sono indicate condizioni di temperatura superiori rispetto alla Pianura Padana.

Le informazioni fornite dallo studio dei reperti di faune hanno sostanzialmente confermato quelle ottenute dagli individui umani.

Un elemento molto importante emerso da questo studio riguarda l'andamento dei valori di composizione isotopica del carbonio misurati nell'apatite delle ossa rispetto a quelli determinati sui denti. Dalla letteratura è noto che il primo molare, risentendo del periodo di allattamento, presenta valori di composizione isotopica dell'ossigeno dell'apatite e del carbonio ed azoto del collagene mediamente arricchiti rispetto all'osso, come in effetti si verifica anche per i nostri individui. Nel caso del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$  non esistono studi sistematici in questo senso, e quello che si osserva è la situazione opposta con l'osso più arricchito in  $^{13}\text{C}$  rispetto al dente. Lo stesso tipo di andamento si osserva anche dal confronto tra osso ed terzo molare. L'M3, mineralizzando a partire dai 7/8 anni d'età, non dovrebbe più mostrare effetti metabolici legati all'allattamento e presentare quindi valori isotopici confrontabili con quelli delle ossa. Nel caso del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ , invece, ancora una volta è l'osso ad essere più arricchito rispetto al dente. È dunque la prima volta che un simile andamento viene descritto in maniera così sistematica, anche grazie alla possibilità di misurare su un elevato numero di campioni i valori isotopici per l'osso e il dente dello stesso individuo; ciò potrebbe apportare dei nuovi elementi nello studio dei frazionamenti isotopici in questo campo.

Il confronto per il  $\delta^{18}\text{O}$  tra osso e primo molare ha consentito, inoltre, di mettere in evidenza la presenza di alcuni individui "estranei" (ouliers) rispetto al resto del gruppo per i siti di Le Mose e Via Guidorossi, i quali indicherebbero una maggiore eterogeneità di queste popolazioni. Questo dato sembrerebbe essere confermato anche dalle evidenze archeologiche (corredo, modalità di sepoltura...)

Per quanto riguarda gli esemplari provenienti dal Sudan a causa del cattivo stato di

conservazione del collagene non è stato possibile determinare i valori isotopici di carbonio e azoto. Sono quindi stati valutati solo il  $\delta^{13}\text{C}$  e il  $\delta^{18}\text{O}$  relativi all'apatite la quale, come verificato da altri test, è risultata sufficientemente preservata.

Il valore del  $\delta^{13}\text{C}$  indica per il periodo indicato come pre-Mesolitico una dieta e, quindi, un tipo di copertura vegetale, costituita essenzialmente da piante a ciclo fotosintetico C4, le quali sono molto diffuse a queste latitudini e indicative di climi caldi. Nel corso delle epoche successive, dal Mesolitico al Meroitico, vengono introdotte anche piante C3, forse in seguito allo sviluppo dell'agricoltura. In effetti, le analisi condotte sulla vegetazione attualmente presente nell'area confermano la presenza di entrambe le tipologie di piante, pur essendo in un contesto di clima iper-arido, segnalando la possibilità che anche le piante a ciclo fotosintetico C3 abbiano saputo adattarsi a sopravvivere in condizioni di aridità.

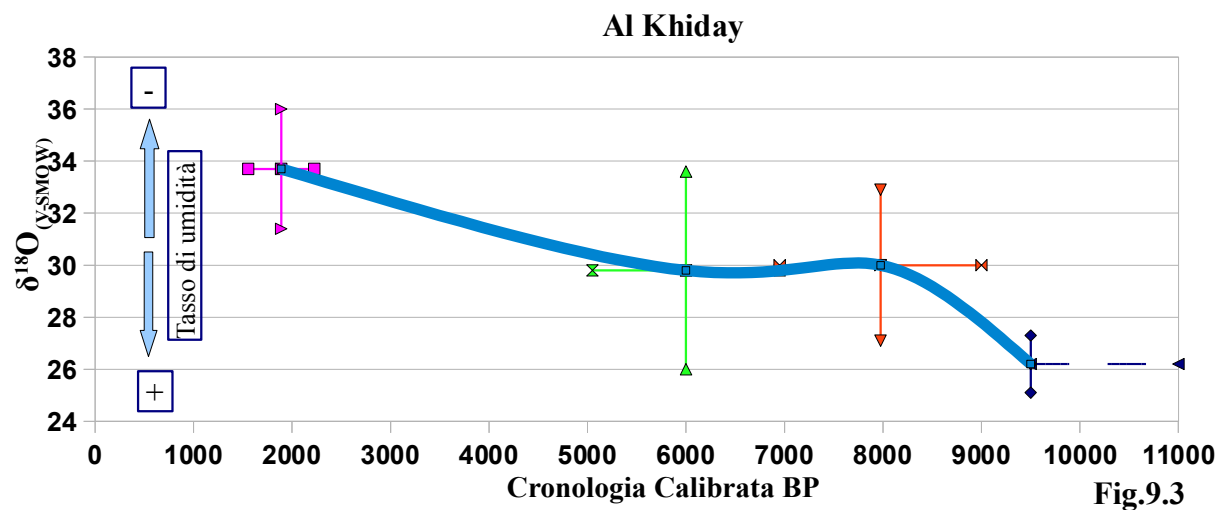
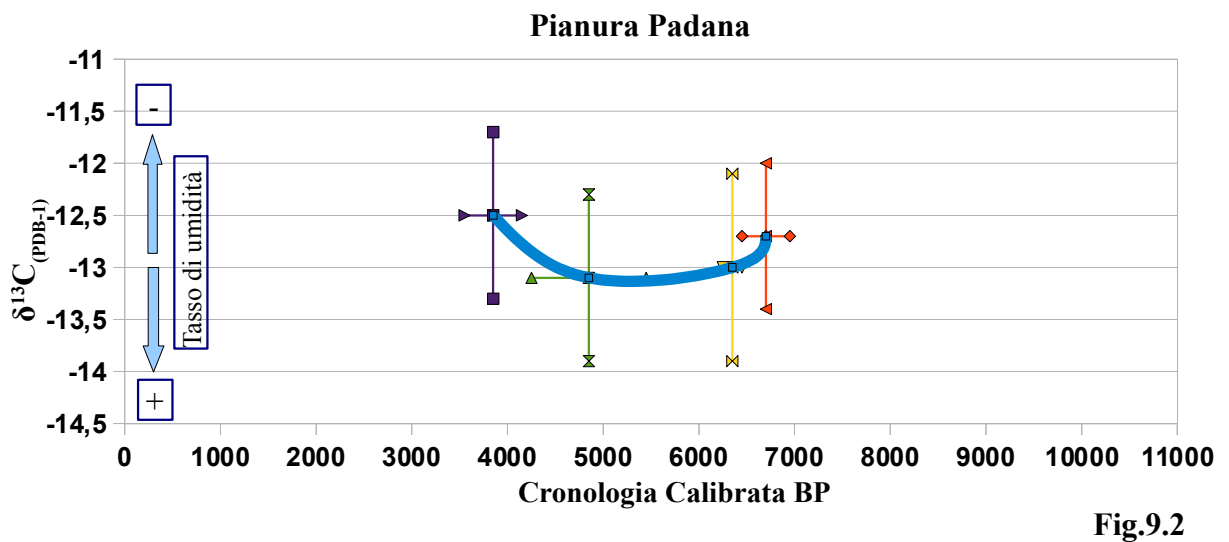
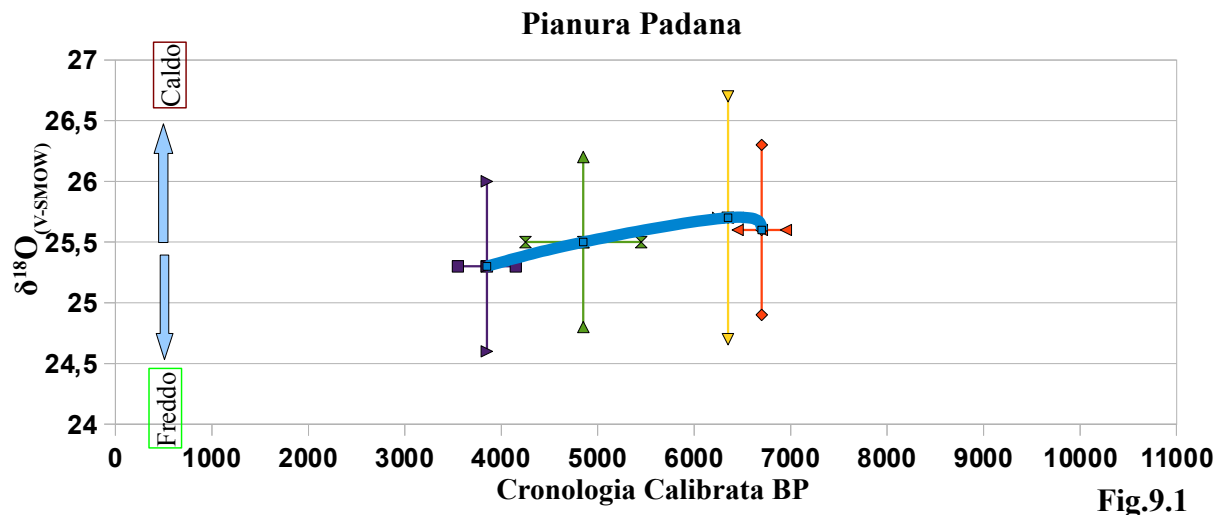
I valori del  $\delta^{18}\text{O}$ , correlati con il tasso di precipitazioni e con il grado di aridità ambientale, indicano condizioni di maggiore piovosità e umidità durante il pre-Mesolitico, probabilmente inquadrabile nel Periodo Umido Africano dell'inizio dell'Olocene, mentre si assiste ad una tendenza verso condizioni di maggiore aridità e minore quantità di pioggia durante i periodi successivi (Fig.9.3).

Tale andamento risulta confermato anche dai valori isotopici misurati sui reperti di fauna Mesolitici i quali indicano, per il periodo più antico di frequentazione del sito, condizioni ambientali più umide rispetto a quelle dei periodi successivi e registrate dai campioni di età Neolitica ed attuali provenienti da altri siti archeologici presenti nell'area. La presenza di questo periodo umido viene confermata dagli studi geomorfologici condotti sui paleo-laghi che erano presenti nell'area del Sahara-Sahel durante l'Olocene iniziale e medio, compreso un paleo-bacino lacustre individuato nei pressi dei siti archeologici di El Salha.

L'intervallo cronologico ricoperto dai campioni della Pianura Padana è sovrapponibile per il periodo del Neolitico medio a quello, molto più ampio, dei campioni di El Salha. Un reale confronto tra i due siti non è stato possibile vista l'impossibilità di datare direttamente i reperti scheletrici sudanesi e quindi il minor dettaglio nella cronologia.

In questo caso, quindi, le due aree sono state paragonate, in maniera puramente indicativa e solo a livello di tendenza, sulla base del tasso di umidità ambientale che, per i reperti della Pianura Padana (ambiente temperato, vegetazione di tipo C3) è ben correlato con il valore del  $\delta^{13}\text{C}$  apatite (Fig.9.2), mentre per quelli di Al Khiday (vegetazione C4 poco sensibile alle variazioni dell'umidità ambientale) è messo in relazione con il  $\delta^{18}\text{O}$  (Fig.9.3). Inoltre, i

campioni padani ci danno un'informazione anche sulla variazione di temperatura (nel senso di più caldo e più freddo) tramite i valori del  $\delta^{18}\text{O}$ apatite (Fig.9.1).



La curva per i campioni italiani è stata costruita considerando i valori medi del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$  e del  $\delta^{18}\text{O}_{\text{apatite}}$  dei gruppi cronologici considerati (cronologia calibrata BP): VBQ I (6950-6450 BP), VBQ II (6450-6250 BP), Eneolitico (5450-4250 BP) e Bronzo antico (4200-3600 BP).

Nel caso dei reperti sudanesi sono state considerati i valori medi del  $\delta^{18}\text{O}_{\text{apatite}}$  dei gruppi: Mesolitico (9000-7000 BP), Neolitico (7000-5000 BP), Meroitico (2225-1550 BP). Per il gruppo dei pre-Mesolitici, sulla base delle considerazioni archeologiche e stratigrafiche, possiamo solo affermare che siano più antichi di 9000 anni BP.

Possiamo osservare che nel Sudan Centrale, le condizioni di aridità presenti nel Neolitico, già instaurate probabilmente dal Mesolitico, incrementano ancora nel Meroitico. In Italia durante il Neolitico si verifica un leggero aumento dell'umidità ambientale seguito, nel Bronzo antico, da un leggero raffreddamento e, nuovamente, da una diminuzione dell'umidità.

Si distinguono quindi due ambienti molto diversi, uno regolato sia da variazioni di umidità che di temperatura, l'altro principalmente dalle variazioni dell'umidità e dal regime delle piogge.

Il primo caratterizzato da piccole fluttuazioni anche se significative, il secondo da variazioni più drastiche legate anche al periodo più lungo preso in considerazione. In entrambi i casi le variazioni ambientali si sono rivelate estremamente importanti per i cambiamenti delle economie di sussistenza delle popolazioni presenti nelle aree esaminate.

Questo lavoro si inserisce all'interno di un quadro ben più ampio di studi sulle ricostruzioni climatiche e ambientali in contesti continentali effettuate mediante la geochimica isotopica. La difficoltà di reperimento e di conservazione dei reperti, infatti, rende spesso difficile indagare in ambiti molto antichi e in successioni cronologiche continue. Solo l'intensificarsi di questo tipo di studi condurrà nel tempo ad ottenere delle ricostruzioni dettagliate delle caratteristiche ambientali degli habitat terrestri e delle variazioni nel tempo delle condizioni climatiche.

**BIBLIOGRAFIA**

ADDISON F., 1949. Wellcome excavations in the Sudan: I, Jebel Moya, 1910-1914. Oxford.

AMBROSE S.H., 1986. Stable carbon and nitrogen isotope analysis of human and animal diet in Africa. *Journal of Human Evolution*, 15: 707-731.

AMBROSE S. H., 1991. Effects of diet, climate and physiology on nitrogen isotope abundances in terrestrial foodwebs. *Journal of Archaeological Science* 18: 293-317.

AMBROSE S.H., NORR L., 1993. Experimental evidence for the relationship of the carbon isotope ratios of whole diet and dietary protein to those of bone collagen and carbonate. In *Prehistoric Human Bone Archeology at the Molecular Level*, G. Grupe, Editor. Springer-Verlag, New York. p. 1-37.

ARMS K., CAMP P., 1998. *Biologia*. Piccin editore.

AYLIFFE L.K., CHIVAS A.R., 1990. Oxygen isotope composition of the bone phosphate of Australian kangaroos: potential as a paleoenvironmental indicator, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 2603-2609.

BANDOLI G., DOLMELLA A., NATILE G., 1999. *Chimica di base*. EdiSES editore, Napoli.

BAXTER G.P., JONES G., 1910. A revision of the atomic weight of phosphorus. First paper the analysis of silver phosphate, *J. Am. Chem. Soc.*, 32, pp. 298-318.

BERNA F., MATTHEWS A., WEINER, S., 2004. Solubilities of bone mineral from archaeological sites: the recrystallization window, *Journal of Archaeological Science*, 31: 867-882.

BERNABÒ BREA L., 1956. Gli scavi nella Caverna delle Arene Candide. Gli strati con ceramiche, vol. 2, *Istituto Internazionale di Studi Liguri*, Bordighera.

BERNABÒ BREA M., CATTANI M., 1992. Collecchio (PR), Tangenziale: abitato e sepolture riferibili al Neolitico medio. *Studi e Documenti di Archeologia*, VII, p. 133.

BERNABÒ BREA M., COLOMBI N., GRASSI G., NEGRINO F., OTTOMANO C., TRAMONTANO A., 1998. Preistoria e Protostoria. Piacenza, località Le Mose, lotto Ikea, *Archeologia dell' Emilia Romagna*, II,2, pp. 11-15.

BERNABÒ BREA M., MAFFI M., FERRARI E., GUARISCO F. 2005, I siti mesolitici e neolitici di Le Mose (Piacenza), *Bollettino Storico Piacentino gennaio-giugno 2005*, pp.11-52.

BERNABÒ BREA M., SALVADEI L., MAFFI M., MAZZIERI P., MUTTI A., SANDIAS M., 2006. Le necropoli VBQ dell'Emilia occidentale: rapporti con gli abitati, rituali, corredi, dati antropologici, in PESSINA A. e VISENTINI P., a cura di, *Preistoria dell' Italia settentrionale. Studi in ricordo di Bernardino Bagolini*, Atti del Convegno, Udine, pp.169-185.

- BERNABÒ BREA M., BRONZONI L., CREMASCHI M., MAZZIERI P., SALVADEI L., TROMBINO L., VALSECCHI V., BRUNI S., COSTA G., GUGLIELMI V., 2008. Lo scavo estensivo nel sito neolitico di Razza di Campegine (RE), in BERNABÒ BREA M., VALLONI R., a cura di, *Archeologia ad alta velocità in Emilia. Indagini geologiche e archeologiche lungo il tracciato ferroviario*, *Quaderni di Archeologia dell'Emilia Romagna*, 22, Firenze, pp. 41-86.
- BERNABÒ BREA M., CASTAGNA D., MAFFI M., MAZZIERI P., PEDROTTI A., SALVADEI L., TIRABASSI I., 2009. Le necropoli VBQ in area padana e alpina, in Atti del convegno "Il pieno sviluppo del Neolitico in Italia" Finale Ligure 8-10 Giugno 2009; *Rivista di Studi Liguri* (in stampa).
- BIAGI P., 1978. Un Momento Della Cultura Dei Vasi A Bocca Quadrata Documentato A Casatico Di Marcarla (MN), *Preistoria Alpina*, 14, Trento: 65-73.
- BOCHERENS H., FOGEL M.L., TUROSS N., ZADER M., 1995. Trophic structure and climatic information from isotopic signatures in a Pleistocene cave fauna of southern England, *Journal of Archaeological Science*, 22: 237-240.
- BOCHERENS H., BILLIOU D., PATOU-MATHIS M., BONJEAN D., OTTE M., MARIOTTI A., 1997. Palaeobiological implications of the isotopic signatures ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) of fossil mammal collagen in Scladina Cave (Sclayn, Belgium), *Quaternary Research*, 48, 370-80.
- BOCHERENS H., TRESSET A., WIEDEMANN F., GALIGNY F., LAFAGE F., LANCHON Y., MARIOTTI A., 1997. Bone diagenetic evolution in two French Neolithic sites, *Bulletin de la société Géologique de France*, 168 (5), 555-64.
- BOCHERENS H., 2001. Reconstitutions paléoenvironnementales et paléalimentaire par le marquage isotopique nature des vertébrés et des plantes fossiles en milieu continental, Dossier non pubblicato "pur obtenir Habilitation à diriger des Recherches en Science Naturelles".
- BUMSTED M.P., 1985. Past human behavior from bone chemical analysis – Respects and prospects, *Journal of Human Evolution*, 14, (5): 539-551.
- BURK R. L., STUIVER M., 1981. Oxygen Isotope Ratios in Trees Reflect Mean Annual Temperature and Humidity, *Science*, 211, 1417-1419.
- CASSANO S.M., MANFREDINI A., 2005. Masseria Candelaro. Vita quotidiana e mondo ideologico in un villaggio neolitico sul Tavoliere, *Gli Ancestrali*, Grenzi.
- CERCHI E., 2005. Comune di Collecchio (PR), Complesso sportivo polifunzionale, via Giardinetto, Scavi archeologici 2004-2005, Relazione tecnica, Relazione inedita, Archivio Museo Archeologico Naz. Parma.
- CHECCHIA RISPOLI G., 1916. I terrazzi delle pendici meridionali del Gargano. *La Geografia*, 4, (4-7), 255-259.
- CHRISTENSEN N., MULLER C.H., 1975. Effects of fire on factors controlling plant growth in *Adenostoma chaparral*. *Ecol. Monogr.* 45: 29-55.

- CLARK I.D., FRITZ P., 1997. Environmental isotopes in hydrogeology: New York, Lewis Publishers, 328 p., Coplen, T.B.
- CLEVELAND W., 1993. *Visualizing Data*. At & T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey.
- COLLINS M.J., NIELSEN-MARSH C.M., HILLER J., SMITH C.I., ROBERTS J.P., PRIGODICH R.V., WESS T.J., CSAPÒ J, MILLARD A.R., TURNER-WALKER G., 2002. The survival of organic matter in bone: a review. *Archaeometry* 44, pp. 383-394.
- COLOMBI N., OTTOMANO C., 1996. Relazione preliminare delle indagini geoarcheologiche effettuate a Ponte Ghiara (PR), SNAM '95 X tronco pp.160-161, relazione inedita, *Archivio Museo Archeologico Naz. Parma*.
- COPLEN T.B., 2000. Laboratory Information Management System (LIMS) for Light Stable Isotopes. U.S. *Geological Survey Open-File Report* 00-345. 121 pp.
- CREMASCHI M., SALVATORI S., USAI D., ZERBONI A., 2007. A further tessera to the huge mosaic: studying the ancient settlement pattern of the El Salha region (south-west of Omdurman, Central Sudan)". In K. Kroeper, M. Chlodnicki and M. Kobusiewicz (eds) "*Archaeology of the Earliest North-eastern Africa*. Poznan Archaeological Museum, 39-48.
- D'AMELIO L., FLORA O., LONGINELLI A., 1994. Environmental isotope data: oxygen isotope concentration in precipitation in N-E Italy (Friuli-Venezia Giulia). *Mineralogica et Petrografica Acta*, 37, pp. 113-124.
- D'ANGELA D., LONGINELLI A., 1990. Oxygen isotopes in living mammals' bone phosphate: further results. *Chemical Geology (Isot. Geosci. Sect.)*, 86, 75-82.
- DANSGAARD W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 436-468d.
- DAVIS B.A.S., BREWER S., STEVENSON A.C., J. GUIOT, 2003.. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews* 22: 1701-1716.
- DE MARINIS R.C., BAIONI M., CASINI S., DEGASPERI N., MANGANI C., SERAGNOLI L., 1999. La sequenza stratigrafica dell'abitato palafitticolo del Lavagnone (Desenzano del Garda, Brescia), in Prehistoric Alpine Environment, Society and Economy, Papers of the International Colloquium in Zurich, ed. by Ph. Della Casa, Bonn (Habelt), pp. 127-131.
- DE NIRO M., EPSTEIN S., 1978. Influence of diet on the distribution of the carbon isotopes in animals, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42, 495-506.
- DE NIRO M.J., EPSTEIN S., 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45: 341-351.
- DRUCKER D.G., BRIDAULT A., IACUMIN P., BOCHERENS H., 2009. Bone stable isotopic signatures ( $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) as tracer of temperature variation in late glacial and early Holocene: case study of red deer from Rochedane site in French Jura. *Geological Journal* 44:493-604.

DUFOUR M. E., 1999. Implications paleoenvironnementales et paleoalimentaires des abondances isotopiques en carbonate et azote des poissons teleosteens. These de Doctorat de l'Université Paris6.

EHLERINGER J. R., CERLING T. E., HELLIKER B. R., 1997. C<sub>4</sub> photosynthesis, atmospheric CO<sub>2</sub>, and climate. *Oecologia*, 112285-299.

EVERITT B.S., 1979. *Unresolved problems in cluster analysis*, Biometrics.

FARQUHAR G.D., SHARKEY T.D., 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology* 33, 317-345.

FONTES J.-C., GASSE F., ANDREWS J. N., 1993. Climatic conditions of Holocene groundwater recharge in the Sahel zone of Africa, in *Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydro- sphere and the Atmosphere*, IAEA-SM-329/59, pp. 231–248, Int. At. Energy Agency, Vienna.

FRIEDLI H., LÖTSCHER H., OESCHGER H., SIEGENTHALER U., STAUFFER B., 1986. Ice core record of <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratio of atmospheric CO<sub>2</sub> in the past Two centuries, *Nature*, 324, pp 237-38.

GASSE F., VAN CAMPO, 1994. Abrupt post-glacial climate events in West Asia and North Africa monsoon domains. *Earth and Planetary Science Reviews*, Volume 126, Issue 4, p. 435-456.

GASSE F., 2002. Diatom-inferred salinity and carbonate oxygen isotopes in Holocene waterbodies of the western Sahara and Sahel (Africa). *Quaternary Science Reviews*, 21, pp. 737-767.

GAT J.R., 1980, The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation, *Handbook of environmental isotope Geochemistry*, edited by Fritz and Fontes Elsevier Vol. 1.

GIARDINA B., 1962. *Manuale di statistica*, F. Angeli, Milano.

GIUSTI F., 1996. La nascita dell'agricoltura (L'evoluzione umana. Vol. II). Aree, tipologie e modelli. Donzelli Editore.

GONFIANTINI R., 1982. La composizione isotopica delle precipitazioni, *Rendiconto SIMP*, 38 (3): 1175-1187.

GOULD S. J., 1999. *Gli alberi non crescono fino in cielo*, Mondatori, Milano.

HASSAN F.A., 1986. Desert environment and origins of agriculture in Egypt. *Norwegian Archaeological Review* 19: 63-76.

HASSAN F.A., 1996. Abrupt Holocene climatic events in Africa. In Pwiti, G., and Soper, R. (eds.), *Aspects of African Archaeology*, University of Zimbabwe, Harare, pp. 83-89.

- HAYNES C.V.JR., 1987. Holocene migration rates of the Sudano-Sahelian wetting from the Arba' in Desert, Eastern Sahara. In *Prehistory of Arid North Africa* (ed. A.E. Close). Dallas, Texas: Southern Methodist University Press.
- HAYNES C.V.JR., EYLES C.H., PAVLISH L.A., RITCHIE J.C., RYBAK, M. 1989. Holocene palaeoecology of the eastern Sahara; Selima Oasis. *Quaternary Science Reviews*, 8, 109–136.
- HEDGES R. E. M., 2002. Bone diagenesis: an overview of process, *Archaeometry*, 44, 3.
- HEMMING D.L., SWITSUR V.R., WATERHOUSE J.S., HEATON T.H.E., CARTER A.H.C., 1998. Climate variation and the stable carbon isotope composition of tree ring cellulose: an intercomparison of *Quercus robur*, *Fagus silvatica* and *Pinus silvestris*. *Tellus B* 50:25–33.
- HENDERSON S.A., VON CAEMMERER S., FARQUHAR G.D., 1992. Short-term measurements of carbon isotope discrimination in several C4 species. *Aust. J. Plant Physiol.* 19:263–85.
- HERRMANN B., NEWESLY H., 1982. Long-term decomposition of bones. Mineral phase. *Anthropol Anz.* 40(1): 19-31.
- HIGGINS P., MACFADDEN B.J., 2004. “Amount Effect” recorded in oxygen isotopes of Late Glacial horse (*Equus*) and bison (*Bison*) teeth from the Sonoran and Chihuahuan deserts, southwestern United States. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 206, 337–353.
- HILLSON S., 1986. *Teeth*. Cambridge University Press, Cambridge.
- HOEFS J., 1997. *Stable Isotope Geochemistry*. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg: 201 pp.
- HOELZMANN P., KEDING B., BERKE H., KRUSE A., KROPELIN S., 2001. Environmental change and archaeology: Lake evolution and human occupation in the Eastern Sahara during the Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 169: 193-217.
- HONEGGER M., 2005. Kerma et les débuts du Néolithique Africain. *Genava*, 53: 239-250.
- HONEGGER M., 2007. Aux origines de Kerma. *Genava*, 55: 201-212.
- HUERTAS A.D., IACUMIN P., STENNI B., CHILL B.S., LONGINELLI A., 1995. Oxygen isotope variations of phosphate in mammalian bone and tooth enamel, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, (20): 4299-4305.
- IACUMIN P., BOCHERENS H., MARIOTTI A., LONGINELLI A., 1996. Oxygen isotope analyses of coexisting carbonate and phosphate in biogenic apatite: A way to monitor diagenetic alteration of bone phosphate? *Earth and Planetary Sciences Letters*. 142, (1-2): 1-6.
- IACUMIN P., BOCHERENS H., CHAIX L., MARIOTTI A., 1998. Stable carbon and nitrogen isotopes as dietary indicators of ancient Nubian populations (Northern Sudan). *Journal of Archaeological Science*, 25, 293-301.

IACUMIN P., 2008. Cemetery R12: an isotope approach. In: A Neolithic Cemetery in the Northern Dongola Reach: Excavations at Site R12. London: Sudan Archaeological Research Society.

JOHNSON S.C., 1967. Hierarchical clustering schemes, *Psychometrika*.

KEELING C. D., MOOK W. G., TANS P. P., 1979. Recent trends in the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratio of atmospheric carbon dioxide. *Nature* 277, 121-123.

KELLNER C.M., SCHOENINGER M.J., 2007. A simple carbon isotope model for reconstructing prehistoric human diet. *American Journal of Physical Anthropology* 133, 1112–1127.

KRUEGER H.W., SULLIVAN C.H., 1984. Models for carbon isotope fractionation between diet and bone. In: Turnlund, J., Johnson, P.E. (Eds.), *Stable Isotopes in Nutrition. ACS Symposium Series*, 258. American Chemical Society, Washington, DC, pp. 205–222.

LAMB H.F., GASSE F., BENKADDOUR A., EL HAMOUTI N., VAN DER KAARS S., PERKINS W.T., PEARCE N.J., ROBERTS C.N., 1995. Relations between century-scale Holocene arid intervals in tropical and temperate zones. *Nature*. 373:134-137.

LAMBERT J.B., SIMPSON V., BUIKSTRA J.E., HANSON D., 1983. Electron microprobe analysis of elemental distribution in excavated human femurs, *American Journal of Physical Anthropology*, 59, 131-140.

LEE-THORP J.A., VAN DER MERWE N.J., 1991. Aspects of the chemistry of modern and fossil biological apatites, *Journal of Archaeological Science*, 16, 585-599.

LEGEROS R.Z., 1981. Apatites in biological systems. *Progress in Crystal Growth Characteristics* 4 (29) 1–45.

LEGEROS R.Z., TRAUTZ O., KLEIN E., LEGEROS J.P., 1983. Two types of carbonate substitution in the apatite structure. *Experimentia* 15, 5-7.

LIBELLI M., 2009. Il sito neolitico di Gaione “Parco del Cinghio” 1 Anni di scavo 2001 e 2005 in Atti del convegno “Il pieno sviluppo del Neolitico in Italia” Finale Ligure 8-10 Giugno 2009; Rivista di Studi Liguri (in stampa).

LISENO M.G., MAZZIERI P., MUTTI A., 2002. L’abitato eneolitico di Benefizio (Parma), *Acta Naturalia de L’Ateneo Parmense*, 38, n. 4, pp. 165-17.

LIUA Z., WANGA Y., GALLIMOREA R., GASSEB F., JOHNSONC T., DEMENOCALD P., ADKINSE J., NOTAROA M., PRENTICEF I.C., KUTZBACHA J., JACOBG R., BEHLINGA P., WANGA L., ONGA E., 2007. Simulating the transient evolution and abrupt change of Northern Africa atmosphere-ocean-terrestrial ecosystem in the Holocene, *Quaternary Science Reviews*, 26, 1818–1837.

LONGINELLI A., NUTI S., 1973. Revised phosphate-water isotopic temperature scale. *Earth and Planetary Science Letters*, 9: 373-376.

- LONGINELLI A., PERETTI PALADINO A., 1980. Oxygen isotope composition of water from mammal blood: first results. *Mass Spectrometry in Biochemical Medical and Environmental Research*, 1, pp. 135–139.
- LONGINELLI A., 1984. Oxygen isotopes in mammal bone phosphate; a new tool for paleohydrological and paleoclimatological research, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, pp 385-390.
- LONGINELLI A., DEGANELLO S., 1999. *Introduzione alla geochimica*, Vol. 1., ed. Utet, Torino.
- LONGINELLI A., SELMO E.M., 2003. Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map, *Journal of Hydrogeology*, 270, (1-2): 75-88.
- LUZ B., KOLODNY Y., HOROWITZ M., 1984. Fractionation of oxygen isotopes between mammalian bone-phosphate and environmental drinking water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, pp. 1689–1693.
- MACDOWALL F.D.H., LOWDON J.A., 1989. Leaf carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and cold hardiness of wheat in relation to growth temperature and moisture stress. *Canadian Journal of Botany*, 67, pp 2828-2832.
- MAGGI R., 1997. Arene Candide: A Functional And Environmental Assessment of the Holocene Sequenze (Excavations Bernabò Brea-Cardini 1940-50), *Memorie dell'Istituto Italiano di Paleontologia Umana*.
- MAISCH M., 2000. The longterm signal of climate change in the Swiss Alps: glacier retreat since the end of the Little Ice Age and future ice decay scenarios. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 23, 139-151.
- MANGERUD J. ANDERSEN S. T., BERGLUND B. E., DONNER J. J., 1974. Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification. *Boreas* 3, 109-12.
- MARCHESELLI M., GOBBO I., MARVELLI S., 2009. La ricostruzione del paesaggio vegetale nel Neolitico medio nella Pianura dell'Emilia Romagna attraverso le indagini palinologiche, in Atti del convegno “Il pieno sviluppo del Neolitico in Italia” Finale Ligure 8-10 Giugno 2009; *Rivista di Studi Liguri* (in stampa).
- MARINO B.D., MCELROY M.B., 1991. Isotopic composition of atmospheric  $\text{O}_2$  inferred from carbon in  $\text{C}_4$  plant cellulose. *Nature* 349, pp. 127–131.
- MARIOTTI A., LANCELOT C., BILLEN G., 1984. Natural isotopic composition of nitrogen as a tracer of origin for suspended organic matter in the Scheldt estuary, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, Oxford, 549–555.
- MAZZIERI P., 2009. Il Sito vbq di stile “meandro-spiralico” di via Guidorossi a Parma, in Atti del convegno “Il pieno sviluppo del Neolitico in Italia” Finale Ligure 8-10 Giugno 2009; *Rivista di Studi Liguri* (in stampa).

- MAZZIERI P., GRIGNANO M., 2009. L'insediamento di vbq I di Benefizio (Parma), in Atti del convegno "Il pieno sviluppo del Neolitico in Italia" Finale Ligure 8-10 Giugno 2009; *Rivista di Studi Liguri* (in stampa).
- MEDINA, MINCHIN, 1980. Stratification of  $^{13}\text{C}$  values of leaves in Amazonian rain forests, *Oecologia*, 45, 377-378.
- MERCURI A.M., ACCORSI C.A., BANDINI MAZZANTI M., BOSI G., CARDARELLI A., LABATE D., MARCHESINI M., TREVISAN GRANDI, G. 2006. Economy and environment of Bronze Age settlements - Terramaras - on the Po Plain (Northern Italy): first results from archaeobotanical research at the Terramara di Montale, in "Vegetation History and Archaeobotany" 16.
- MUKHERJEE R., RAO C., TREVOR J., 1955. *The ancient inhabitants of Jebel Moya (Sudan)*. Cambridge.
- NEUMANN K., 1993. Holocene vegetation of the Eastern Sahara: charcoal from prehistoric sites. In *Environmental Change and Human Culture in the Nile Basin and Northern Africa until the Second Millenium B.C.*, (eds. L. Krzyzaniak, M. Kobusiewicz and J. Alexander): pp. 153-169. Poznan: Poznan Archaeological.
- NIELSEN-MARSH C. M., HEDGES R. E. M., 1997. Dissolution experiments on modern and diagenetically altered bone and their effect on the Infrared Splitting Factor, *Bulletin de la société Géologique de France*, 168, 458-90.
- NIELSEN-MARSH C. M., HEDGES R. E. M., 2000. Patterns of Diagenesis in Bone I: The Effects of Site Environments, *Journal of Archaeological Science* 27, pp. 1139-1150.
- NIELSEN-MARSH C. M., HEDGES R. E. M., 2000. Patterns of Diagenesis in Bone II: The Effects of Acetic Acid Treatment and the removal of Diagenetic  $\text{CO}_3^{2-}$ , *Journal of Archaeological Science* 27, pp. 1151-1159.
- NIELSEN-MARSH C. M., HEDGES R. E. M., MANN T., COLLINS M. J., 2000. A preliminary investigation of the application of differential scanning calorimetry to the study of collagen degradation in archaeological bone, *Thermochimica Acta*, 365, 129-39.
- O'LEARI, 1981. Carbon isotope fractionation in plants, *Phytochemistry*, 20, N° 4.
- PASSEY B.H., ROBINSON T.F., AYLIFFE L.K., CERLING T.E., SPONHEIMER M., DEARING D.M., ROEDER B.L., EHLERINGER, J.R., 2005. Carbon isotope fractionation between diet, breath  $\text{CO}_2$ , and bioapatite in different mammals: *Journal of Archaeological Science*, v. 32, p. 1459-1470.
- POSTLETHWAIT J.H., HOPSON J.L., VERES R.C., 1992. *Biologia*, MacGraw-Hill, Milano.
- POYART C.F., FREMINET A., BURSAUX E., 1975. The exchange of bone  $\text{CO}_2$  in vivo. *Respiratory Physiology* 25, (11), 101-107.
- RAVAZZI C., 2003. An Overview Of The Quaternary Continental Stratigraphic Units Based On Biological And Climatic Events In Italy. *Il Quaternario*, 16: 11-8.

REINOLD J., 2001. Kadruka and the Neolithic in the Northern Dongola Reach, *Sudan & Nubia* 5, 2-10.

RIOLO A., 1976. Medicina viva, Anatomia descrittiva, Vol VII: *La bocca e denti*, F.lli Fabbri Editori, Milano.

ROBERTS N., LAMB H.F., EL HAMOUTI N., BARKER P., 1994. Abrupt Holocene hydro-climatic events: palaeolimnological evidence from North-West Africa. In *Environmental Change in Drylands: biogeographical and geomorphological perspectives* (A.C. Millington and K. Pye): pp. 163-175. New-York: John Wiley.

ROZANSKI K., ARAGUÀS-ARAGUÀS L., GONFIANTINI R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In: P.K. Swart, K.C. Lohmann, J. McKenzie and S. Savin, Editors, *Climate Change in Continental Isotopic Records Geophysical Monograph Series* vol. 78, AGU, Washington, DC, pp. 1–36.

SAGE R. F., MONSON R. K. 1999. *C4 plant biology*. Academic Press, San Diego.

SALVATORI S., USAI D., 2002. The Second Excavation Season at R12, a Late Neolithic Cemetery in the Northern Dongola Reach”, *Sudan & Nubia* 6, 2-7.

SALVATORI S., USAI D., 2008. A Neolithic Cemetery in the Northern Dongola Reach: Excavations at Site R12. London: Sudan Archaeological Research Society.

SALVATORI S., USAI D., 2009. Scavi preistorici tra il deserto e il Nilo. Darwin, Marzo-Aprile  
Schild, R., and Wendorf, F., 2002. In Friedman, R (ed) *Palaeo-ecological and palaeo-climatic background to Socio-economic changes in the South Western Desert of Egypt in Egypt and Nubia: Gifts of the Desert*, British Museum Press.

SCHULZE E.D., MOONEY H.A., SALA O.E., JOBBÁGY E., BUCHMANN N., BAUER G., CANADELL J., JACKSON R.B., LORETI J., OESTERHELD M., EHLERINGER J.R., 1996. Rooting depth, water availability, and vegetation cover along an aridity gradient in Patagonia. *Oecologia* 108:503-511.

SCHWARCZ H.P., MELBYE F.J., KATZENBERG M.A., KNYF M., 1985. Stable isotopes in human skeletons of Southern Ontario: Reconstructing paleodiet. *Journal of Archaeological Science* 12, pp. 187–206.

SEALY J.C., VAN DER MERWE N.J., LEE-THORP J.A., LANHAM J., 1987. Nitrogen isotope ecology in southern Africa: implications for environmental and dietary tracing. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51, pp. 2707–2717.

SILLEN A., 1989. Diagenesis of the inorganic phase of cortical bone, *The chemistry of prehistoric human bone*, ed. T. D. Price, 211–229.

SMITH B.N., 1972. Natural Abundance of the stable isotopes of carbon in biological systems, *American Institute of Biological Sciences*, 22 (4), pp 226-231.

SOLIANI L., 2009. Statistica applicata alla ricerca e alle Professioni Scientifiche. Uni.Nova Ed.

STELE K.W., DANIEL R.M., 1978. Fraction of nitrogen isotopes by animals: a further complication to the use of variations in the natural abundance of  $^{15}\text{N}$  for tracer studies. *Journal of Agricultural Science*, 90, pp 7-9.

STUIVER M., BRAZIUNAS T.F., 1993. Modelling atmospheric  $^{14}\text{C}$  influences of marine sample to 10.000 BC, *Radiocarbon*, 35, N°1, p.137-189.

SULLIVAN C.H., KRUEGER H.W., 1981. Carbon isotope analysis of separate chemical-phases in modern and fossil bone, *Nature* 292: 333-335.

SUSI H., ARD J.S., CARROLL R.J., 1971. Hydration and Denaturation of Collagen as Observed by Infrared Spectroscopy, *Journal of American Leather Chemists Association*, 66 (11), pp. 508-519.

TIESZEN L.L., BOUTTON T.W., TESDAHL K.G., SLADE N.A., 1983. Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: Implications for  $\delta^{13}\text{C}$  analysis of diet, *Oecologia*, 57, pp. 1-2.

UBELAKER D.H., 1989. Human skeletal remains: excavation, analysis and interprétation. Washington: Smithsonian Institution.

UREY H. C., 1947. The thermodynamic properties of isotopic substances. *J. Chem. Soc.*, London, pp. 562–581.

USAI D., SALVATORI S., 2002. The IsIAO El-Salha Archaeological Project, *Sudan & Nubia* 6, 67-72.

USAI D., SALVATORI S., 2005. The Is.I.A.O. El Salha Project. Preliminary report, Istituto Italiano per l’Africa e l’Oriente.

USAI D., SALVATORI S., 2006. The Is.I.A.O. El Salha Project. Preliminary report, Istituto Italiano per l’Africa e l’Oriente.

USAI D., SALVATORI S., 2006. Archaeological research south of Omdurman. A preliminary assessment on ceramic and lithic materials from 10-X-6 multistratified mound site along the western bank of the White Nile in Central Sudan, *Archéologie du Nil Moyen*, X, 203-220.

USAI D., SALVATORI S., 2007. The Is.I.A.O. El Salha Project. Preliminary report, Istituto Italiano per l’Africa e l’Oriente.

USAI D., SALVATORI S., 2008. Is.I.A.O. El Salha Project: The Late Palaeolithic-Mesolithic-Neolithic and Post Meroitic cemetery of al Khiday 2, the associated Mesolithic Settlement of Al Khiday-1, and the Post-Meroitic cemetery 16-C-2, Central Sudan, Preliminary report, Istituto Italiano per l’Africa e l’Oriente

USAI D., SALVATORI S., IACUMIN P., DI MATTEO A., JAKOB T., ZERBONI A., 2010. Excavating a unique pre-Mesolithic cemetery in Central Sudan. *Antiquity*, Volume 84, Issue 323.

- VALSECCHI V., TINNER W., FINSINGER W., EMMANN B., 2006. Human impact during the Bronze Age in the vegetation at Lago Lucone (northern Italy). *Veg Hist Archaeobot.*, 15: 99-113.
- VAN DER MERWE N.J., MEDINA. E., 1989. Photosynthesis and  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in Amazonian rain forests. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53:1091-1094.
- VAN KLINKEN G.J., VANDER PLICHT H., HEDGES R.E.M., 1994. Bone  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios reflect paleoclimatic variations. *Geo-Phis. Res. Lett.*, 21, 445-448.
- WANG G. A., HAN J. M., ZHOU L. P., XIONG X. G., TAN M., WU Z. H., PENG J., 2006. Carbon isotope ratios of C4 plants in loess areas of North China, *Sci. China Ser. D*, 49(1), 97–102.
- WENDORF F., SCHILD R., 1986. The Wadi Kubbania skeleton: a Late Paleolithic burial from Southern Egypt. SMU press, Texas.
- WENDORF F., SCHILD R., 1990. "Prehistory of the Eastern Sahara", Academic Press, New York.
- WHITE W. M., 2009. *Geochemistry* (free online textbook).
- WILLIAMS M. A. J., ADAMSON D. A. , 1973. "The Physiography of the Central Sudan. *Geogr. J.*, 139: 498-508.
- WILLIAMS MARTIN A.J., ADAMSON B., McEVEDY, 2000. Late quaternary environment in the White Nile region, Sudan, *Global and Planetary Change*, 26:305-316.
- WILLIAMS MARTIN A.J., 2009. Late Pleistocene and Holocene environments in the Nile basin, The Nile, *Monographiae Biologicae*, Volume 89, II, 61-72.
- WILLIAMS MARTIN A.J., TALBOT M. R. 2009. Late Quaternary Environments in the Nile basin, *Global and Planetary Change*, 69, 1–15.
- WILLIAMS M.A.J., WILLIAMS F.M., DULLER G.A.T., MUNRO R.N., EL TOM O.A.M., BARROWS T.T., MACKLIN M., WOODWARD J., TALBOT M.R., HABERLAH D., FLUIN J., 2010. Late Quaternary foods and droughts in the Nile valley, Sudan: new evidence from optically stimulated luminescence and AMS radiocarbon dating, *Quaternary Science Reviews* 29, 1116-1137.
- ZAZZO A., LÉCUYER C., SHEPPARD S.M.F., GRANDJEAN P., MARIOTTI A., 2004. Diagenesis and reconstruction of paleoenvironments: a method to restore original  $\delta^{18}\text{O}$  values of carbonate and phosphate from fossil tooth enamel. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68, 2245–2258.
- ZERBONI A., 2010. The Geoarchaeological Contribution to the El Salha Project: from site to landscape at Al Khiday (central Sudan). 12th International Conference for Nubian Studies Londra, The British Museum, 1 - 6 Agosto 2010 (Poster Session).

**SITI INTERNET**

[www.GoogleMaps.it](http://www.GoogleMaps.it)

[www.Sercoop.con](http://www.Sercoop.con)

[www.stratigraphy.org](http://www.stratigraphy.org)

[www.Sudanplanet.org](http://www.Sudanplanet.org)

[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

[http://training.seer.cancer.gov/module\\_anatomy](http://training.seer.cancer.gov/module_anatomy)

## ***Ringraziamenti***

*Un sincero ringraziamento alla Prof.ssa Paola Iacumin per aver creduto in me offrendomi questa occasione e per aver contribuito alla mia crescita professionale. Ma un grazie di cuore va anche a Paola per avermi sempre incoraggiata, anche nei momenti di maggiore fatica e nonostante le difficoltà.*

*Grazie alla Dott.ssa Bernabò Brea e alla Dott.ssa Loretana Salvadei per la grande disponibilità che hanno dimostrato nei miei confronti in ogni occasione e per l'entusiasmo con il quale svolgete il vostro lavoro.*

*Grazie alla Dott.ssa Donatella Usai e al Dott. Sandro Salvatori per avermi aiutato con grande sollecitudine durante questi anni e per la revisione critica di questo testo.*

*Un sentito riconoscimento va anche al Prof. Antonio Longinelli, alla Dott.ssa Emma Salvioli al Dott. Tiziano Boschetti i quali si sono resi disponibili per collaborare alla parte analitica; e al Dott. Andrea Zerboni per gli spunti sempre interessanti che ha saputo fornirmi.*

*I tre anni appena trascorsi sono stati sotto diversi aspetti, sia professionali che personali, molto intensi, a tratti faticosi, ma le persone che hanno condiviso con me questa esperienza hanno reso tutto più leggero.*

*A cominciare da Enrico sempre disponibile ad agevolarmi nel lavoro, soprattutto quando il “fantasma del laboratorio” si impadroniva degli strumenti e l'umore della sua collega non era proprio al massimo. E a Omar, compagno d'ufficio, indaffarato e allegro: mi mancheranno molto le nostre “ebbrezze alcoliche” alle cinque del pomeriggio. E a Claudia che sullo sgabello dello “sfogo” è stata una grande interprete dei sentimenti che animano un dottorando.*

*Un ringraziamento speciale va a Luci per un'infinità di motivi ma credo che quello più importante sia il fatto di aver condiviso con me lacrime (tante) e risate (tantissime per fortuna) e per l'amicizia sincera e disinteressata che mi hai sempre dimostrato.*

*Grazie a Rosaria per essere stata pronta ad ascoltarmi e a capire i miei momenti di solitudine, ho apprezzato molto il modo in cui mi sei stata vicina, anche in maniera silenziosa quando era necessario; e a Simone che ha sempre trovato la frase giusta per mettermi di buon umore e per sdrammatizzare le situazioni un po' critiche.*

*Un grazie agli amici di sempre e ai miei familiari che sono rimasti una presenza costante e indispensabile nella mia vita e che hanno saputo starmi accanto anche solo con una semplice telefonata arrivata proprio al momento giusto.*

*Grazie a mamma, papà, a Rosa e a Mimmo stavolta non ho voluto coinvolgervi troppo in questo percorso per non caricarvi di tante ansie ma voi mi siete stati comunque vicini con l'affetto che nutrite per me e con la solita discrezione che vi contraddistingue. Questo traguardo non sarebbe stato possibile senza il vostro appoggio incondizionato.*

*Gli anni del Dottorato sono coincisi per me con un periodo di grandi difficoltà personali e sono convinta che senza l'amore di Giovanni non sarei stata in grado di concludere questo percorso conservando almeno un briciolo di sanità mentale. Abbiamo attraversato tempeste e scalato montagne, ma il fatto di essere rimasti sempre l'uno accanto all'altro ci ha resi più forti e uniti.*

*Adesso aspettiamo la calma...*

*Antonella*

# **APPENDICE**

LE MOSE (PC)														
				ANALISI CARBONATO				ANALISI COLLAGENE						
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{15}\text{N}$ dieta (V-SMOW)
T 01	Omero	F	15	VBQ I	-12,5	26,1	-21,5	26,9	8,0	8,6	3,6	-26,5	-22,2	-8,4
	M1				-14,6	25,2	-21,0	36,0	9,1	13,2	3,2	-26,0	-24,4	-9,7
	M3				-13,8	25,5	-21,4	37,1	7,8	14,1	3,1	-26,4	-23,6	-9,3
T 02	Costola	M	30-40	ENEOLITICO	-13,8	25,7	-20,7	39,4	8,0	15,1	3,0	-25,7	-23,6	-9,0
T 03	Osso lungo	M?	A	VBQ	-12,8	25,7	-21,9	18,7	7,8	6,1	3,6	-26,9	-22,5	-9,0
T 1	M1	?	15-20	VBQ I	-14,9	25,7							-24,7	-9,0
T 2	Clavicola	M	Ca 40	VBQ II	-12,2	24,6	-21,3	26,8	8,2	9,6	3,2	-26,3	-21,9	-10,7
	M1				-14,0	25,1	-21,3	36,2	8,3	13,4	3,1	-26,3	-23,8	-9,9
	M3				-14,2	24,7	-21,2	37,1	8,7	14,0	3,1	-26,2	-24,0	-10,5
T 3	Costola	M?	1,5 – 2	VBQ II	-12,8	26,1	-20,4	33,7	9,6	13,3	2,9	-25,4	-22,5	-8,4
	M1				-14,3	25,6	-20,1	37,3	11,3	14,9	2,9	-25,1	-24,1	-9,1
T 4	Costola	F	30-40	VBQ II	-12,6	24,5	-21,1	30,8	7,8	12,4	2,9	-26,1	-22,3	-10,8
	M1				-13,8	26,1	-20,3	37,1	10,7	14,7	2,9	-25,3	-23,6	-8,4
	M3				-13,1	24,5	-21,1	39,3	9,3	15,4	3,0	-26,1	-22,8	-10,8
T 5	Costola	M	30-40	VBQ II	-15,0	24,6	-21,1	33,2	8,7	12,9	3,0	-26,1	-24,8	-10,7
	M1				-13,6	25,8	-20,6	37,7	10,8	15,1	2,9	-25,6	-23,3	-8,8
	M3				-13,8	25,4	-20,9	40,2	9,9	14,9	3,1	-25,9	-23,6	-9,4
T 6	Costola	M	40-50	VBQ II	-13,3	25,3	-20,9	35,6	8,5	13,5	3,1	-25,9	-23,0	-9,6
	M1				-14,1	24,6	-21,2	37,7	9,6	15,1	2,9	-26,2	-23,9	-10,7
	M3				-14,0	25,1	-20,5	38,9	9,0	15,2	3,0	-25,5	-23,8	-9,9
T 7	Costola	F	20-25	VBQ II	-14,6	26,0	-20,3	37,5	7,9	14,3	3,0	-25,3	-24,4	-8,5
	M1				-13,6	25,3	-20,6	39,0	9,6	14,7	3,1	-25,6	-23,3	-9,6
	M3				-12,6	24,5	-20,8	37,9	9,0	14,9	3,0	-25,8	-22,3	-10,8
T 8	Costola	M	30-40	VBQ II	-14,5	24,8	-20,9	40,0	9,4	14,4	3,2	-25,9	-24,3	-10,4
	M1				-13,7	27,1	-20,6	37,3	9,2	12,7	3,4	-25,6	-23,4	-6,8
	M3				-14,2	24,7	-21,0	38,0	10,0	13,6	3,2	-26,0	-24,0	-10,5
T 9	Costola	F	14-15	VBQ II	-13,5	25,5	-21,3	42,3	9,4	13,6	3,6	-26,3	-23,2	-9,3
	M1				-15,1	25,2	-21,1	42,5	9,3	14,8	3,3	-26,1	-24,9	-9,7
	M3				-14,1	25,3	-21,1	43,1	9,3	14,8	3,4	-26,1	-23,9	-9,6
T 10	Costola	M	6	VBQ II	-13,6	25,9	-20,4	35,5	9,0	13,9	3,0	-25,4	-23,3	-8,7
	M1				-13,9	25,4	-19,8	38,5	12,4	15,6	2,9	-24,8	-23,7	-9,4
T 11	Costola	M	40-50	VBQ II	-14,3	25,1	-21,1	42,2	9,7	14,9	3,3	-26,1	-24,1	-9,9
	M1				-14,0	25,9	-20,1	35,1	9,3	14,2	2,9	-25,1	-23,8	-8,7
T 12	Costola	F	30-40	VBQ II	-15,0	24,6	-20,3	38,1	9,6	12,9	3,4	-25,3	-24,8	-10,7
	M1				-14,8	25,7	-20,6	47,1	11,4	14,8	3,7	-25,6	-24,6	-9,0
	M3				-14,1	25,1	-20,7	38,7	9,8	15,6	2,9	-25,7	-23,9	-9,9
T 13	Costola	F	30-40	VBQ II	-14,0	26,0	-20,8	40,2	8,9	14,2	3,3	-25,8	-23,8	-8,5
	M1				-14,2	25,7	-20,6	42,7	10,4	14,5	3,4	-25,6	-24,0	-9,0
	M3				-13,3	25,5	-20,4	42,9	8,9	14,4	3,5	-25,4	-23,0	-9,3
T 14	M1	?	1,5 – 2	VBQ II	-13,9	26,1	-20,2	39,0	11,3	12,4	3,6	-25,2	-23,7	-8,4
T 15	Costola	F	15-16	VBQ II	-12,6	24,5	-20,2	33,4	8,6	12,6	3,1	-25,2	-22,3	-10,8
	M1				-13,9	25,1	-20,7	38,2	9,4	14,9	3,0	-25,7	-23,7	-9,9
	M3				-13,7	25,0	-20,5	36,4	8,9	14,5	2,9	-25,5	-23,4	-10,1
T 16	Costola	M	45-55	ENEOLITICO	-12,8	24,6	-20,5	32,0	7,7	12,1	3,1	-25,5	-22,5	-10,7
	M1				-12,2	25,6	-19,8	37,6	11,4	14,3	3,1	-24,8	-21,9	-9,1
T 17	Costola	M	4	ENEOLITICO	-14,5	25,7	-20,4	30,8	7,6	11,3	3,2	-25,4	-24,3	-9,0
	M1				-13,7	26,8	-20,0	36,2	9,1	14,7	2,9	-25,0	-23,4	-7,3
T 18	M1	F	2,5 – 3	ENEOLITICO	-13,1	26,6	-19,9	34,4	10,1	14,0	2,9	-24,9	-22,8	-7,6
	Costola				-13,9	25,6	-19,9	34,3	9,6	13,5	2,9	-24,9	-23,7	-9,1

LE MOSE (PC)														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ acqua (V-SMOW)
T 19	Corticale	F	13-15	VBQ II	-12,7	25,1	-20,9	35,2	9,7	13,7	3,0	-25,9	-22,4	-9,9
	I				-14,5	25,8	-20,6	35,0	10,7	13,1	3,1	-25,6	-24,3	-8,8
T 20	Costola	M?	Ca 5	VBQ II	-13,3	26,0	-20,4	36,3	9,4	13,7	3,1	-25,4	-23,0	-8,5
	M1				-14,3	25,9	-20,5	35,1	10,2	14,2	2,9	-25,5	-24,1	-8,7
T 23	M3	F	20-22	VBQ II	-14,3	25,8	-20,6	39,9	9,6	14,7	3,1	-25,6	-24,1	-8,8
	M1				-14,2	25,2	-20,5	41,0	8,3	14,7	3,2	-25,5	-24,0	-9,7
T 24	Costola	M	Ca 40	VBQ I	-14,0	24,7	-20,4	43,2	10,6	15,3	3,3	-25,4	-23,8	-10,5
	M1				-14,2	26,0	-20,1	42,6	10,1	14,9	3,3	-25,1	-24,0	-8,5
	M3				-13,6	24,7	-19,9	44,9	10,2	15,1	3,4	-24,9	-23,3	-10,5
T 27	Costola	M	40-50	ENEOLITICO	-12,3	24,7	-21,0	23,2	8,0	9,1	3,0	-26,0	-22,0	-10,5
	M1				-12,6	26,3	-19,9	40,2	10,6	14,4	3,2	-24,9	-22,3	-8,0
	M3				-13,1	26,8	-20,3	43,4	8,4	16,1	3,1	-25,3	-22,8	-7,3
T 28	Costola	M	10 – 11	VBQ I	-12,4	24,9	-21,1	32,8	10,8	11,3	3,4	-26,1	-22,1	-10,2
	M1				-13,0	27,3	-21,0	44,3	9,6	16,3	3,2	-26,0	-22,7	-6,5
T 29	Femore	F	A	VBQ I	-12,0	24,4	-20,7	38,6	8,1	14,0	3,2	-25,7	-21,7	-11,0
T 30	M1	F?	Ca 2	VBQ I	-13,5	27,0	-20,4	41,8	11,4	14,6	3,3	-25,4	-23,2	-7,0
T 31	Osso lungo	M?	A	ENEOLITICO	-12,1	24,9	-21,1	25,6	7,0	9,1	3,3	-26,1	-21,8	-10,2
T 32	Costola	?	20-25	VBQ I	-12,8	25,2	-20,3	30,9	8,7	11,0	3,3	-25,3	-22,5	-9,7
T 33	Costola	F	30-40	VBQ I	-13,7	25,1	-20,7	44,0	9,5	15,4	3,3	-25,7	-23,4	-9,9
	M1				-14,3	25,7	-20,1	42,0	9,9	14,9	3,3	-25,1	-24,1	-9,0
	M3				-13,8	25,7	-20,5	40,8	9,8	15,3	3,1	-25,5	-23,6	-9,0
T 36	M1	M	25-30	VBQ II	-14,8	28,8	-20,1	44,3	9,1	16,4	3,1	-25,1	-24,6	-4,2
	M3				-13,8	27,6	-20,3	42,5	9,1	16,0	3,1	-25,3	-23,6	-6,0
T 37	Femore	M	30-40	VBQ II	-11,7	25,0	-20,9	25,3	7,4	7,8	3,8	-25,9	-21,4	-10,1
	M1				-13,5	25,4	-20,0	43,6	8,0	16,1	3,1	-25,0	-23,2	-9,4
	M3				-13,9	25,4	-20,1	43,7	8,5	16,0	3,2	-25,1	-23,7	-9,4
T 100	Femore	?	30-40	VBQ I	-12,9	25,4	-21,0	41,4	8,1	13,9	3,5	-26,0	-22,6	-9,4
T 101	Costola	?	A	VBQ I	-12,8	25,3	-20,6	35,9	8,5	14,4	2,9	-25,6	-22,5	-9,6
PNA 06 US5227 T	Costola	M	20-30	ENEOLITICO	-12,9	25,2	-20,7	39,0	8,1	15,8	2,9	-25,7	-22,6	-9,7
	M1				-13,8	25,9	-20,1	43,2	7,5	16,0	3,1	-25,1	-23,6	-8,7
	M3				-13,6	25,4	-20,6	44,1	8,7	16,4	3,1	-25,6	-23,3	-9,4
T AP3/URB 05 T1	Costola	M	25-30	VBQ I	-12,7	24,4	-20,6	41,7	8,5	14,3	3,4	-25,6	-22,4	-11,0
	M1				-13,2	26,9	-20,4	41,2	9,2	15,9	3,0	-25,4	-22,9	-7,1
	M3				-13,1	26,1	-20,8	42,2	9,5	15,7	3,1	-25,8	-22,8	-8,4
T AP3/URB 05 T2	Costola	F	20-30	VBQ I	-13,3	25,2	-20,5	40,2	8,0	14,5	3,2	-25,5	-23,0	-9,7
T AP3/URB 05 T3	Costola	M	30-35	VBQ I	-13,4	25,9	-20,4	39,7	8,8	14,8	3,1	-25,4	-23,1	-8,7
	M1				-13,7	26,6	-20,5	41,6	8,8	16,4	2,9	-25,5	-23,4	-7,6

BENEFIZIO														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ acqua (V-SMOW)
T1	Costola	?	?	VBQ I	-13,8	26,0	-20,7	36,8	9,8	11,7	3,6	-25,7	-23,6	-8,5
	M1				-12,9	25,5	-19,2	36,5	10,8	14,5	2,9	-24,2	-22,6	-9,3
T2	Costola	M?	2 – 3	VBQ I	-14,3	25,6	-20,2	35,9	7,7	14,1	3,0	-25,2	-24,1	-9,1
	M1				-13,5	26,0	-20,1	39,3	8,4	15,3	3,0	-25,1	-23,2	-8,5
T4	Costola	F?	Ca 3	VBQ I	-12,8	24,9	-19,9	36,8	8,9	14,3	3,0	-24,9	-22,5	-10,2
	M1				-13,0	26,1	-19,5	37,6	10,4	15,2	2,9	-24,5	-22,7	-8,4
T5	Costola	F	30-40	VBQ I	-12,7	24,4	-19,8	38,5	7,8	14,9	3,0	-24,8	-22,4	-11,0
	M1				-13,9	25,8	-20,1	39,6	10,9	15,9	2,9	-25,1	-23,7	-8,8
	M3				-13,2	25,5	-20,9	37,8	9,8	15,2	2,9	-25,9	-22,9	-9,3
T6	Costola	?	Ca 2	VBQ I	-12,0	25,8	-20,0	30,5	8,8	15,6	<b>2,3</b>	-25,0	-21,7	-8,8
	M1				-12,8	25,9	-19,1	16,9	5,6	2,3	<b>8,5</b>	-24,1	-22,5	-8,7
T7	Costola	M	30-40	VBQ I	-12,9	25,0	-20,0	26,6	8,7	10,8	2,9	-25,0	-22,6	-10,1
	M1				-14,8	26,1	-20,1	39,9	9,0	13,4	3,5	-25,1	-24,6	-8,4
	M3				-14,0	25,6	-20,2	34,1	9,2	13,8	2,9	-25,2	-23,8	-9,1
T8	Costola	M?	Ca 4	VBQ I	-12,7	26,8	-20,5	35,0	7,7	12,6	3,2	-25,5	-22,4	-7,3
	M1				-13,9	26,4	-20,2	36,9	9,3	14,6	2,9	-25,2	-23,7	-7,9
T9	Femore	?	7 – 8	VBQ I	-13,0	26,5	-23,9	40,0	7,6	14,6	3,2	-28,9	-22,7	-7,7
	M1				-13,8	26,1	-19,7	35,4	13,3	13,9	3,0	-24,7	-23,6	-8,4
T10	Costola	?	Ca 5	VBQ I	-12,8	26,1	-20,9	35,8	6,4	12,8	3,2	-25,9	-22,5	-8,4

GAIONE CATENA														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ acqua (V-SMOW)
A V B 002 SEP. 10	M1	M	16-20	VBQ II	-13,5	26,0	-19,9	42,0	10,1	14,7	3,3	-24,9	-23,2	-8,5
	M3				-13,6	24,9	-20,1	39,2	9,3	14,7	3,1	-25,1	-23,3	-10,2
A V SEP. 14	I2	M?	A	VBQ II	-13,4	26,9	-20,1	35,7	9,7	14,5	2,9	-25,1	-23,1	-7,1
A V 002 15 (IN E)	M1	?	50	VBQ II	-13,9	27,0	-20,7	41,8	9,8	13,2	3,7	-25,7	-23,7	-7,0
	M3				-13,2	25,8	-20,3	35,2	9,1	14,0	2,9	-25,3	-22,9	-8,8
2 M S/O DA T 17	M1	?	Ca 7	VBQ II	-13,8	26,6	-20,5	40,1	9,8	13,9	3,3	-25,5	-23,6	-7,6
SEP. 3 IN C III	M1	M?	Ca 15	VBQ II	-14,4	25,6	-20,9	35,3	7,5	13,1	3,1	-25,9	-24,2	-9,1
	M3				-14,1	25,4	-20,4	40,7	9,4	13,2	3,6	-25,4	-23,9	-9,4
N./NE SEP. 4	M1	F	35-40	VBQ II	-13,1	25,1	-20,5	39,7	10,0	13,5	3,4	-25,5	-22,8	-9,9
SEP. IN C/IV	M1	M	25-30	VBQ II	-13,5	25,5	-19,6	30,8	8,2	11,8	3,0	-24,6	-23,2	-9,3
	M3				-13,5	25,1	-20,3	31,7	8,9	12,8	2,9	-25,3	-23,2	-9,9

GAIONE CINGHIO														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ acqua (V-SMOW)
FRUTTURA	Costola	M	3	VBQ I	-12,4	26,2	-20,1	37,7	9,7	14,6	3,0	-25,1	-22,1	-8,2
	M1				-13,3	26,7	-19,7	34,5	10,7	14,3	2,8	-24,7	-23,0	-7,4
RUTTURA	Costola	M	25-30	VBQ I	-12,1	25,6	-21,7	35,4	7,6	14,5	2,8	-26,7	-21,8	-9,1
	M1				-13,6	25,5	-20,5	42,1	7,1	14,7	3,3	-25,5	-23,3	-9,3
	M3				-13,4	25,6	-20,4	40,3	7,5	14,4	3,2	-25,4	-23,1	-9,1
T3	Costola	F	18-20	VBQ I	-11,8	25,5	-20,9	39,7	8,4	13,7	3,4	-25,9	-21,5	-9,3
	M1				-14,1	26,7	-20,2	41,4	9,7	14,4	3,3	-25,2	-23,9	-7,4
T4	Costola	M	Ca 30	VBQ I	-11,6	26,6	-19,8	29,3	8,7	13,4	2,5	-24,8	-21,3	-7,6
	M1				-13,6	26,6	-20,4	39,9	8,7	14,5	3,2	-25,4	-23,3	-7,6
	M3				-12,3	26,4	-20,1	39,9	9,4	14,7	3,1	-25,1	-22,0	-7,9
T5	Costola	M	9 – 10	VBQ I	-11,5	26,0	-20,0	33,1	8,4	12,9	3,0	-25,0	-21,2	-8,5
	M1				-13,4	26,1	-20,1	41,3	9,3	14,5	3,3	-25,1	-23,1	-8,4
T6	Costola	M	8	VBQ I	-12,0	26,3	-20,1	35,3	7,7	14,2	2,9	-25,1	-21,7	-8,0
	M1				-13,7	25,8	-20,2	35,9	9,7	14,3	2,9	-25,2	-23,4	-8,8
T7	Costola	M	4 – 5	VBQ I	-11,3	27,4	-20,4	39,4	9,0	15,7	2,9	-25,4	-21,0	-6,3
	M1				-13,1	26,7	-20,0	40,2	10,8	14,9	3,1	-25,0	-22,8	-7,4
T8	Costola	F?	6	VBQ I	-11,7	25,3	-20,9	33,6	8,2	13,0	3,0	-25,9	-21,4	-9,6
	M1				-13,6	26,2	-20,3	41,4	10,0	14,8	3,2	-25,3	-23,3	-8,2
T9	Costola	M	7	VBQ I	-12,2	24,9	-20,6	33,5	8,0	13,2	2,9	-25,6	-21,9	-10,2
	M1				-13,7	25,4	-20,1	40,1	9,6	14,9	3,1	-25,1	-23,4	-9,4
T10	Costola	F	10	VBQ I	-11,8	25,9	-20,4	29,3	8,2	11,6	2,9	-25,4	-21,5	-8,7
	M1				-13,1	27,1	-19,8	41,8	10,7	14,4	3,4	-24,8	-22,8	-6,8
T11	Costola	M	40-50	VBQ I	-12,4	25,4	-20,6	36,9	8,6	14,9	2,9	-25,6	-22,1	-9,4
	M1				-13,5	25,6	-20,0	41,2	10,3	14,7	3,3	-25,0	-23,2	-9,1
T12	Costola	M	30-40	VBQ I	-12,9	25,8	-20,4	28,4	9,5	11,3	2,9	-25,4	-22,6	-8,8
	M1				-14,4	27,1	-19,5	37,3	10,6	14,6	3,0	-24,5	-24,2	-6,8

VIA GUIDOROSI (PR)														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ Dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ Dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ Oacqua (V-SMOW)
T1	Costola	F	25-30	VBQ II	-13,7	25,3	-21,2	40,9	8,2	15,3	3,1	-26,2	-23,4	-9,6
	C				-13,6	27,8	-20,1	42,7	8,7	14,9	3,3	-25,1	-23,3	-5,7
	M1				-13,7	27,2	-19,8	40,8	9,2	14,9	3,2	-24,8	-23,4	-6,7
T2	Costola	F	15-18	VBQ II	-14,2	26,5	-20,5	42,7	7,8	15,0	3,3	-25,5	-24,0	-7,7
	C				-14,2	26,1	-20,7	43,3	8,7	14,8	3,4	-25,7	-24,0	-8,4
	M1				-14,9	26,6	-20,0	40,7	9,0	15,0	3,1	-25,0	-24,7	-7,6
T3	Costola	M	Ca 30	VBQ II	-14,2	26,7	-20,2	37,9	7,6	15,4	2,9	-25,2	-24,0	-7,4
	M1				-14,9	26,9	-20,7	38,8	7,6	14,8	3,0	-25,7	-24,7	-7,1
	M3				-13,3	25,5	-20,4	43,1	7,0	14,7	3,4	-25,4	-23,0	-9,3
T4	Costola	M	50	VBQ II	-13,2	25,8	-20,5	39,9	7,8	14,9	3,1	-25,5	-22,9	-8,8
	C				-14,2	26,0	-21,2	43,7	9,8	15,0	3,4	-26,2	-24,0	-8,5
T5	M1	?	6 MESI	VBQ II			-19,5	35,5	11,2	13,5	3,1	-24,5	-9,2	-48,7
T6	Costola	F	30-40	VBQ II	-12,8	26,1	-21,1	36,9	8,0	14,7	2,9	-26,1	-22,5	
	M1				-14,1	26,4	-20,6	45,7	8,2	14,6	3,6	-25,6	-23,9	-7,9
	M3				-13,9	25,9	-20,6	42,3	8,8	14,0	3,5	-25,6	-23,7	-8,7
T7	Costola	F	20-25	VBQ II	-13,0	25,9	-20,8	38,4	7,5	15,3	2,9	-25,8	-22,7	-8,7
	M1				-13,9	26,1	-20,0	39,0	9,8	14,4	3,1	-25,0	-23,7	-8,4
	M3				-14,0	25,3	-20,9	39,8	8,3	13,8	3,3	-25,9	-23,8	-9,6
T8	Costola	F	30-40	VBQ II	-12,6	25,6	-20,7	39,8	7,6	14,9	3,1	-25,7	-22,3	-9,1
	C				-13,5	25,5	-21,2	38,3	10,2	15,3	2,9	-26,2	-23,2	-9,3
T9	Costola	?	6 MESI	VBQ II	-12,7	26,4	-21,6	34,5	9,4	11,8	3,4	-26,6	-22,4	-7,9
	M1						-19,7	34,6	9,9	12,4	3,2	-24,7	-9,2	
T10	Costola	M	30-40	ENEOLITICO	-13,0	26,7	-20,4	41,3	8,0	14,3	3,4	-25,4	-22,7	-7,4
T11	Costola	?	1,5	VBQ II	-13,4	27,4	-19,8	45,8	10,7	14,6	3,6	-24,8	-23,1	-6,3
	M1				-13,5	26,2	-19,5	39,4	11,4	15,0	3,0	-24,5	-23,2	-8,2
T12	Costola	F	50	VBQ II	-14,2	27,9	-21,2	40,6	9,5	14,8	3,2	-26,2	-24,0	-5,6
	M1				-15,3	26,2	-21,0	39,2	11,0	15,8	2,9	-26,0	-25,1	-8,2
	M3				-14,8	26,6	-20,9	38,2	11,0	14,4	3,1	-25,9	-24,6	-7,6
T13	Costola	?	2	VBQ II	-14,0	27,6	-20,0	38,5	9,5	12,6	3,5	-25,0	-23,8	-6,0
	M1				-14,0	25,8	-19,9	37,8	10,4	14,4	3,0	-24,9	-23,8	-8,8
T15	Costola	M	16-18	VBQ II	-13,7	27,9	-20,7	42,2	7,7	16,3	3,0	-25,7	-23,4	-5,6
	M1				-14,7	25,7	-20,8	38,4	8,8	13,0	3,4	-25,8	-24,5	-9,0
	M3				-14,8	25,2	-20,7	39,4	11,1	14,9	3,1	-25,7	-24,6	-9,7
T16	M1	M	40-50	VBQ II	-15,1	28,3	-20,5	40,8	9,5	15,1	3,1	-25,5	-24,9	-5,0
	M3				-14,4	27,1	-20,3	40,2	9,9	15,1	3,1	-25,3	-24,2	-6,8
T17	Costola	F	30-40	VBQ II	-12,7	26,8	-20,0	39,2	9,5	14,9	3,1	-25,0	-22,4	-7,3
	M1				-14,9	28,0	-20,0	41,0	9,6	15,1	3,1	-25,0	-24,7	-5,4
	M3				-14,5	27,5	-19,7	41,3	10,6	14,8	3,2	-24,7	-24,3	-6,2
T18	Costola	M	6 – 7	VBQ II	-12,6	27,5	-20,4	40,3	8,0	15,4	3,0	-25,4	-22,3	-6,2
	C				-14,0	26,4	-20,2	39,3	8,7	14,7	3,1	-25,2	-23,8	-7,9
	M1				-14,7	26,6	-20,0	42,1	8,1	14,3	3,4	-25,0	-24,5	-7,6
T19	Costola	F	25-30	VBQ II	-12,7	26,7	-20,6	41,9	6,9	14,2	3,4	-25,6	-22,4	-7,4
	M1				-14,3	25,7	-19,9	38,0	10,5	13,8	3,2	-24,9	-24,1	-9,0
	M3				-13,6	25,3	-21,2	40,9	7,7	14,9	3,2	-26,2	-23,3	-9,6

VIA GUIDOROSI (PR)														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{15}\text{N}$ Oacqua (V-SMOW)
T20	Costola	M	Ca 15	VBQ II	-12,1	26,7	-19,7	41,8	9,6	14,2	3,4	-24,7	-21,8	-7,4
	M1				-15,3	29,3	-19,6	41,1	9,4	14,8	3,2	-24,6	-25,1	-3,4
	M3				-13,6	28,7	-19,5	41,4	9,8	15,3	3,1	-24,5	-23,3	-4,3
T21	Costola	F	25-30	VBQ II	-11,7	25,7	-20,6	36,2	6,9	12,6	3,3	-25,6	-21,4	-9,0
	M3				-13,8	25,2	-20,5	39,7	8,7	14,7	3,1	-25,5	-23,6	-9,7
T22	Costola	M	6 – 7	VBQ II	-12,3	27,5	-20,8	40,0	9,9	14,2	3,3	-25,8	-22,0	-6,2
	C				-14,7	27,5	-20,7	36,9	10,9	14,6	2,9	-25,7	-24,5	-6,2
	M1				-15,4	28,4	-20,3	37,5	11,0	14,0	3,1	-25,3	-25,2	-4,8
T23	Costola	F	8 – 9	VBQ II	-12,8	25,9	-20,6	41,9	8,5	14,6	3,3	-25,6	-22,5	-8,7
	C				-13,6	25,3	-20,7	35,5	9,2	14,3	2,9	-25,7	-23,3	-9,6
	M1				-13,8	25,8	-20,1	39,6	9,1	14,6	3,1	-25,1	-23,6	-8,8
T24	Costola	F	20-25	VBQ II	-14,4	26,6	-20,5	41,2	7,5	15,0	3,2	-25,5	-24,2	-7,6
	M1				-15,1	25,4	-20,2	42,5	11,0	15,4	3,2	-25,2	-24,9	-9,4
	M3				-14,4	25,4	-20,4	43,1	8,8	15,3	3,3	-25,4	-24,2	-9,4
T25	M1	F	30-40	VBQ II	-14,9	25,9	-21,0	39,8	9,8	15,4	3,0	-26,0	-24,7	-8,7
	M3				-14,5	25,7	-21,0	40,9	8,3	15,4	3,1	-26,0	-24,3	-9,0
T26	Costola	F	Ca 15	VBQ II	-14,6	26,6	-20,3	40,0	8,0	12,9	3,6	-25,3	-24,4	-7,6
	M1				-15,0	26,0	-20,3	39,4	10,7	14,9	3,1	-25,3	-24,8	-8,5
	M3				-14,5	25,7	-20,4	38,4	8,8	14,3	3,1	-25,4	-24,3	-9,0
T27	Costola	F	40	VBQ II	-12,8	24,8	-21,0	38,8	8,1	13,9	3,2	-26,0	-22,5	-10,4
	M1				-15,1	26,9	-20,5	37,0	8,1	14,3	3,0	-25,5	-24,9	-7,1
	M3				-14,4	27,1	-20,8	41,1	8,0	16,5	2,9	-25,8	-24,2	-6,8
T28	Costola	F	40	VBQ II	-12,6	25,4	-20,8	37,3	7,4	12,7	3,4	-25,8	-22,3	-9,4
	M1				-14,3	25,1	-20,0	39,8	10,8	15,4	3,0	-25,0	-24,1	-9,9
	M3				-13,9	25,2	-20,6	37,8	8,0	15,2	2,9	-25,6	-23,7	-9,7
T29	Costola	F	25-30	VBQ II	-14,0	27,0	-20,7	44,1	8,0	15,2	3,4	-25,7	-23,8	-7,0
	M1				-14,8	26,5	-21,0	39,8	10,4	14,9	3,1	-26,0	-24,6	-7,7
	M3				-14,6	26,3	-21,2	41,4	8,9	15,1	3,2	-26,2	-24,4	-8,0
T30	Costola	M	50	VBQ II	-14,2	26,2	-20,5	40,2	8,1	15,8	3,0	-25,5	-24,0	-8,2
	C				-14,0	25,8	-20,8	43,8	10,1	15,2	3,3	-25,8	-23,8	-8,8
	M1				-14,3	25,1	-20,5	42,2	10,1	15,9	3,1	-25,5	-24,1	-9,9
T31	Costola	F?	8	VBQ II	-13,2	26,6	-20,3	39,9	7,0	14,8	3,1	-25,3	-22,9	-7,6
	C				-14,5	26,1	-20,4	41,6	8,5	16,3	3,0	-25,4	-24,3	-8,4
	M1				-15,0	26,0	-20,2	41,5	10,2	14,0	3,4	-25,2	-24,8	-8,5
T32	Costola	M	30-40	VBQ II	-13,5	25,9	-20,5	40,5	8,1	14,7	3,2	-25,5	-23,2	-8,7
	C				-14,1	26,4	-20,6	42,6	9,2	16,2	3,1	-25,6	-23,9	-7,9
	M1				-14,1	26,1	-20,0	41,6	9,6	15,5	3,1	-25,0	-23,9	-8,4
T34	Costola	?	6-9 MESI	ENEOLITICO	-12,4	26,0	-21,1	38,7	8,5	15,1	3,0	-26,1	-22,1	-8,5
	M1				-14,4	25,8	-21,1	39,5	10,7	16,0	2,9	-26,1	-24,2	-8,8
	M3				-14,9	26,8	-21,3	38,5	9,7	14,7	3,0	-26,3	-24,7	-7,3
T35	Costola	M	30-40	VBQ II	-13,1	26,0	-21,0	38,9	8,8	15,3	2,9	-26,0	-22,8	-8,5
	M1				-14,2	25,7	-20,2	41,7	9,5	15,6	3,1	-25,2	-24,0	-9,0
	M3				-13,4	26,1	-18,9	42,8	10,6	16,3	3,0	-23,9	-23,1	-8,4
T36	Costola	?	Ca 5	VBQ II	-11,8	24,3	-20,6	35,6	7,9	14,4	2,9	-25,6	-21,5	-11,1
	M1				-14,0	26,2	-20,2	40,9	8,6	15,8	3,0	-25,2	-23,8	-8,2
T37	Costola	F	Ca 40	VBQ II	-12,3	23,9	-20,8	36,4	7,7	13,9	3,0	-25,8	-22,0	-11,8
	M1				-13,9	26,0	-20,4	38,5	8,8	15,4	2,9	-25,4	-23,7	-8,5
	M3				-14,2	26,3	-20,6	44,2	8,8	16,0	3,2	-25,6	-24,0	-8,0
T38	Costola	M	Ca 30	VBQ II	-14,1	26,5	-20,5	44,5	9,1	15,9	3,2	-25,5	-23,9	-7,7
	M1				-14,4	25,3	-20,1	44,5	9,9	15,3	3,4	-25,1	-24,2	-9,6
	M3				-13,9	25,6	-20,6	45,0	9,3	16,2	3,2	-25,6	-23,7	-9,1
T40	Costola	M	20-30	VBQ II	-12,5	23,3	-20,1	34,7	7,9	14,0	2,9	-25,1	-22,2	-12,7
T41	Costola	M	7 – 8	VBQ II	-12,7	24,1	-20,5	38,1	7,4	14,7	3,0	-25,5	-22,4	-11,4

PONTE GHIARA														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ acqua (V-SMOW)
T 03	Costola	F	20-25	VBQ I	-12,7	25,9	-20,8	33,2	8,8	12,0	3,2	-25,8	-22,4	-8,7
	M1				-15,1	26,4	-20,7	40,2	11,3	15,0	3,1	-25,7	-24,9	-7,9
T 04	Costola	F	12	VBQ I	-13,7	26,6	-20,8	39,9	8,2	14,1	3,3	-25,8	-23,4	-7,6
	M1				-14,4	26,5	-21,2	39,4	10,5	15,4	3,0	-26,2	-24,2	-7,7
	M3				-14,3	25,7	-20,6	40,1	9,2	15,4	3,0	-25,6	-24,1	-9,0
T 06	Costola	M	30-40	VBQ I	-13,2	24,9	-21,0	36,8	8,5	13,5	3,2	-26,0	-22,9	-10,2
	M1				-14,5	26,8	-20,9	40,9	8,5	14,8	3,2	-25,9	-24,3	-7,3
	M3				-14,3	25,6	-20,6	37,6	9,5	15,3	2,9	-25,6	-24,1	-9,1

PONTE TARO														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ acqua (V-SMOW)
US 144	Costola	F?	5 – 6	VBQ I	-13,2	25,8	-20,7	22,6	9,2	9,1	2,9	-25,7	-22,9	-8,8
	M1				-13,9	26,5	-20,7	38,4	10,3	15,6	2,9	-25,7	-23,7	-7,7
US 157	Costola	F	Ca 12	VBQ I	-12,9	26,1	-20,2	30,0	7,5	12,0	2,9	-25,2	-22,6	-8,4
	M1				-14,2	26,4	-19,9	39,4	9,5	16,0	2,9	-24,9	-24,0	-7,9
US 159	Costola	F	Ca 11	VBQ I	-12,6	25,2	-20,9	29,2	7,1	11,8	2,9	-25,9	-22,3	-9,7
	M1				-13,9	26,4	-20,6	39,3	8,0	15,8	2,9	-25,6	-23,7	-7,9
US 162	Costola	F	30-40	VBQ I	-12,7	25,1	-20,4	26,7	8,4	10,6	2,9	-25,4	-22,4	-9,9
	M1				-14,3	26,9	-21,0	39,0	10,6	15,3	3,0	-26,0	-24,1	-7,1
	M3				-14,0	26,5	-20,7	38,4	10,6	15,6	2,9	-25,7	-23,8	-7,7
US 270	Metatarso	M	50	VBQ I	-13,3	24,9	-21,2	35,3	8,2	12,9	3,2	-26,2	-23,0	-10,2
	M1				-13,4	25,3	-21,3	39,6	8,5	15,3	3,0	-26,3	-23,1	-9,6
	M3				-14,1	24,4	-21,2	37,9	8,7	15,0	2,9	-26,2	-23,9	-11,0
US 267	M1	M	20-25	VBQ I	-13,8	29,1	-18,2	38,0	11,8	15,4	2,9	-23,2	-23,6	-3,7
	M3				-13,8	27,9	-19,4	36,7	10,6	14,6	2,9	-24,4	-23,6	-5,6
US 94	Costola	M?	Ca 50	VBQ I	-12,4	26,5	-19,8	37,9	8,4	15,2	2,9	-24,8	-22,1	-7,7

**VIA TRAVERSETOLO (PR)**

				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ Oacqua (V-SMOW)
T1 A/B	Osso	F	40-50	Bronzo	-12,6	24,3	-20,5	32,9	9,4	12,6	3,0	-25,5	-22,3	-11,1
T1 B/B	Osso	M	25-30	Bronzo	-12,6	24,6	-20,2	35,5	9,2	13,6	3,0	-25,2	-22,3	-10,7
	M1				-14,0	26,4	-20,0	37,0	12,0	13,3	3,2		-23,7	-8,0
	Canino				-13,3	25,8	-20,1	36,5	9,6	14,6	2,9	-25,1	-23,1	-8,8
T2 A/B	Osso	M	15	Bronzo	-12,0	25,2	-20,4	35,0	9,0	13,3	3,1	-25,4	-21,7	-9,8
	M1				-14,0	25,9	-19,9	35,3	10,0	13,7	3,0	-24,9	-23,8	-8,7
T2 B	Osso	F	?	Bronzo	-12,7	24,4	-20,5	34,5	9,0	13,4	3,0	-25,5	-22,4	-10,9
	Canino				-13,8	25,7	-20,6	25,9	10,5	7,6	<b>4,0</b>	-25,6	-23,5	-9,0
T3 B	Osso	?	Infante	Bronzo	-12,2	24,3	-18,7	8,5					-21,9	-11,2
	M1				-13,7	26,1	-20,2	35,7	9,9	14,4	2,9	-25,2	-23,4	-8,3
	Canino				-13,8	25,7	-20,1	37,8	10,5	15,3	2,9	-25,1	-23,5	-9,0
T5 B	Osso	?	1	Bronzo	-12,7	25,9	-20,1	36,0	12,3	14,1	3,0	-25,1	-22,4	-8,7
	M1				-13,1	26,2	-19,9	28,3	12,9	11,4	2,9	-24,9	-22,9	-8,2
T6 B	Osso	M	?	Bronzo	-14,4	25,4							-24,1	-9,5
	M1				-15,0	27,5	-20,3	39,6	9,7	15,3	3,0	-25,3	-24,8	-6,2
	Canino				-14,8	26,6	-20,5	39,6	10,2	14,8	3,1	-25,5	-24,6	-7,6
T10	Osso	F?	50	Bronzo	-12,3	25,5	-16,6	7,5					-22,0	-9,3
T11	Osso	F	?	Bronzo	-12,3	25,0	-20,8	23,4	10,1	8,4	3,2	-25,8	-22,0	-10,1
	M1				-14,0	26,8	-19,3	33,6	12,4	13,6	2,9	-24,3	-23,8	-7,3
	Canino				-13,6	26,1	-20,6	36,2	10,9	14,7	2,9	-25,6	-23,3	-8,4
T12	Osso	M	?	Bronzo	-13,2	24,2	-20,2	37,6	11,2	15,0	2,9	-25,2	-23,0	-11,2
	M1				-13,6	25,9	-20,2	39,5	10,4	14,6	3,1	-25,2	-23,3	-8,6
	Canino				-13,7	25,9	-20,2	38,8	11,2	15,3	2,9	-25,2	-23,4	-8,6
T 13	Osso	M	?	Bronzo	-11,8	25,6							-21,4	-9,2
	M1				-13,9	22,2							-23,7	-14,3
	Canino				-12,8	25,9	-20,8	39,2	12,8	15,0	3,0	-25,8	-22,5	-8,7
T 14 A	Osso	F	?	Bronzo	-12,1	26,0	-21,2	33,9	11,8	12,7	3,1	-26,2	-21,8	-8,6
	M1				-14,3	26,3	-19,9	40,6	12,7	15,2	3,1	-24,9	-24,1	-8,0
	Canino				-13,9	26,2	-20,2	40,8	12,5	15,2	3,1	-25,2	-23,6	-8,2
T 15	Osso	?	Infante	Bronzo	-11,5	25,6							-21,1	-9,1
T 17	Osso	F	8 – 9	Bronzo	-12,6	25,1	-21,1	36,2	10,7	14,7	2,9	-26,1	-22,3	-10,0
	Canino				-13,9	25,7	-21,1	41,6	11,6	15,3	3,2	-26,1	-23,7	-8,9
	M1				-13,9	26,1	-20,3	38,1	14,7	14,3	3,1	-25,3	-23,6	-8,4
T18	Osso	F	?	Bronzo	-14,0	25,8	-20,6	34,0	9,8	11,7	3,4	-25,6	-23,8	-8,9
T19	Osso	?	Infante	Bronzo	-11,4	24,5	-15,1	8,0					-21,1	-10,8
T 20	Osso	M	?	Bronzo	-12,5	25,6	-20,4	29,3	13,3	10,9	3,1	-25,4	-22,2	-9,1
	Canino				-15,0	27,7	-20,6	41,6	14,4	14,7	3,3	-25,6	-24,8	-5,9
	M1				-13,8	26,4	-20,7	40,7	13,3	15,0	3,1	-25,7	-23,6	-7,9
T 21	Osso	?	1 – 1,5	Bronzo	-12,5	25,7							-22,2	-9,0
	M1				-13,5	26,6							-23,3	-7,6
T 22	Osso	F	?	Bronzo	-13,0	25,6							-22,8	-9,1
	M1				-14,1	26,1	-20,2	40,2	13,2	12,8	3,6	-25,2	-23,9	-8,3
T 23	Osso	M	?	Bronzo	-13,0	24,6	-20,5	35,2	12,2	11,2	3,6	-25,5	-22,8	-10,7
	M1				-13,8	25,8	-20,6	41,3	13,1	14,3	3,4	-25,6	-23,5	-8,7
	Canino				-13,5	25,7	-20,7	43,3	12,3	14,2	3,5	-25,7	-23,3	-9,0
T 25	Osso	M?	?	Bronzo	-12,2	25,2							-21,9	-9,7
	M1				-12,6	25,8	-20,1	42,8	14,5	14,4	3,4	-25,1	-22,3	-8,7
	Canino				-12,3	25,0	-20,4	37,0	13,8	11,9	3,6	-25,4	-22,0	-10,0
T 26	Osso	?	3	Bronzo	-11,3	26,5							-20,9	-7,7
	M1				-14,1	25,8							-23,9	-8,8
T 28	Osso	M?	?	Bronzo	-11,9	26,3							-21,6	-8,1
	M1				-13,8	26,3	-19,6	42,3	15,2	15,3	3,2	-24,6	-23,5	-8,0

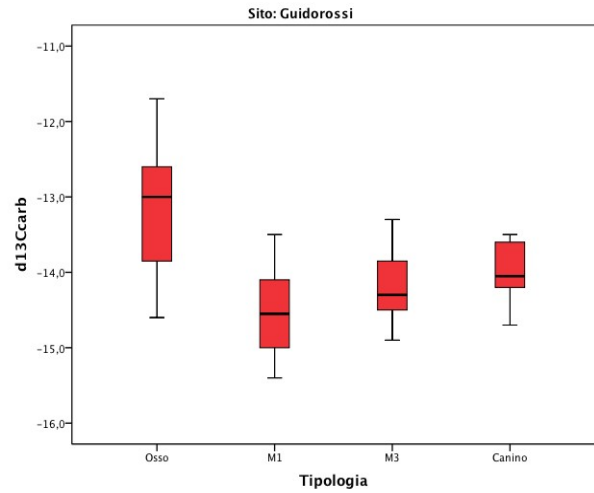
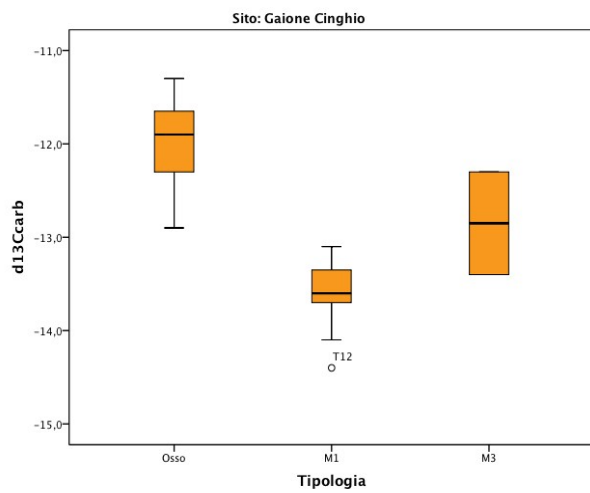
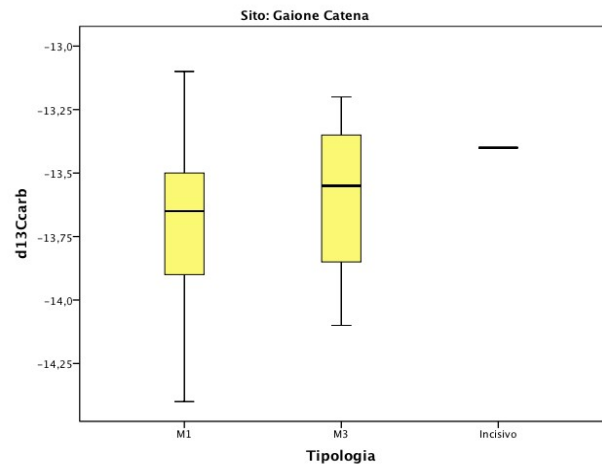
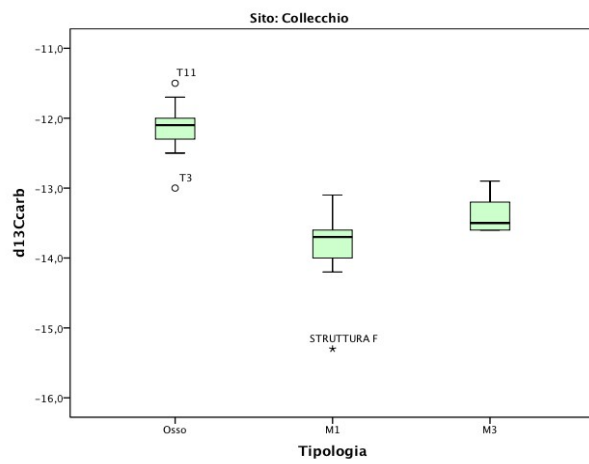
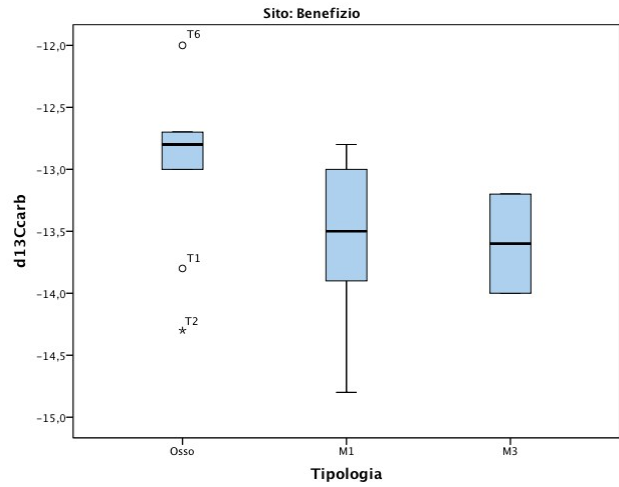
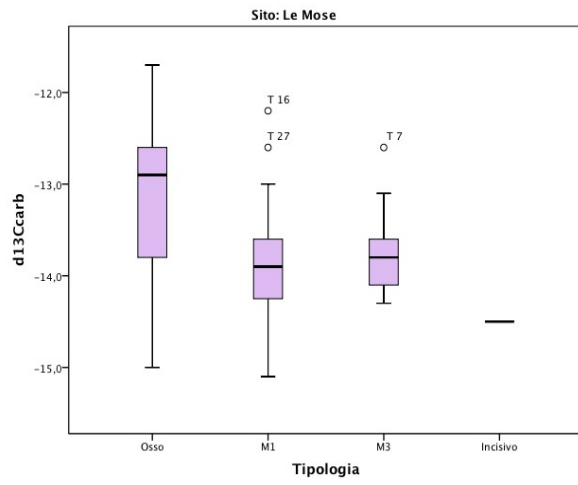
VICOFERTILE														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ acqua (V-SMOW)
T1	Costola	F?	6 – 7	VBQ2	-12,8	25,2	-19,8	27,4	7,7	11,0	2,9	-24,8	-22,5	-9,7
	M1				-13,9	25,6	-20,0	38,3	8,2	15,5	2,9	-25,0	-23,7	-9,1
T2	Costola	M	20-25	VBQ2	-13,1	25,3	-20,4	33,7	8,3	12,4	3,2	-25,4	-22,8	-9,6
	M1				-14,3	26,3	-20,1	35,2	7,8	14,2	2,9	-25,1	-24,1	-8,0
	M3				-13,6	26,1	-20,2	38,9	8,5	14,7	3,1	-25,2	-23,3	-8,4
T4	Costola	M	8 – 9	VBQ2	-12,7	25,1	-19,9	26,4	7,8	10,3	3,0	-24,9	-22,4	-9,9
	M1				-14,7	26,4	-19,9	37,8	10,5	14,8	3,0	-24,9	-24,5	-7,9
T5	Costola	M	25-30	VBQ2	-13,0	25,6	-20,8	33,9	8,8	13,1	3,0	-25,8	-22,7	-9,1
	M1				-14,2	27,2	-20,0	36,5	10,6	14,8	2,9	-25,0	-24,0	-6,7
	M3				-13,7	25,7	-20,3	44,8	9,4	14,3	3,6	-25,3	-23,4	-9,0
T6	Costola	M	25-30	VBQ2	-12,6	24,7	-20,2	29,8	7,9	11,5	3,0	-25,2	-22,3	-10,5
	M1				-14,8	27,6	-20,1	39,3	9,9	15,2	3,0	-25,1	-24,6	-6,0
	M3				-14,1	25,8	-20,2	36,9	9,2	15,0	2,9	-25,2	-23,9	-8,8

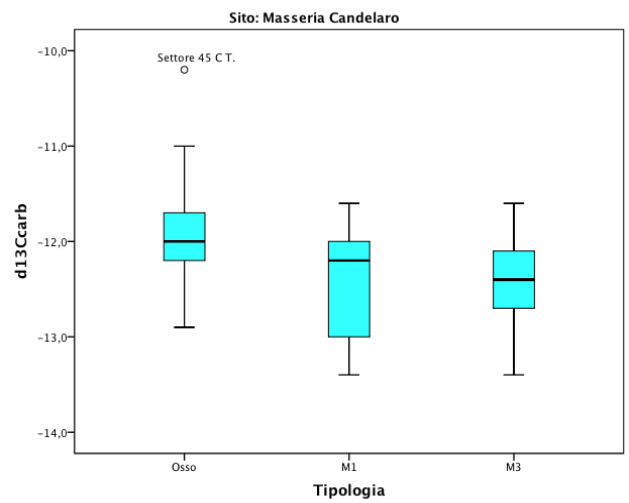
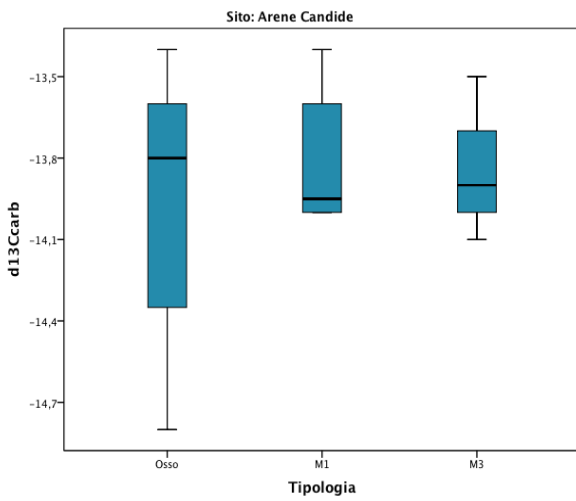
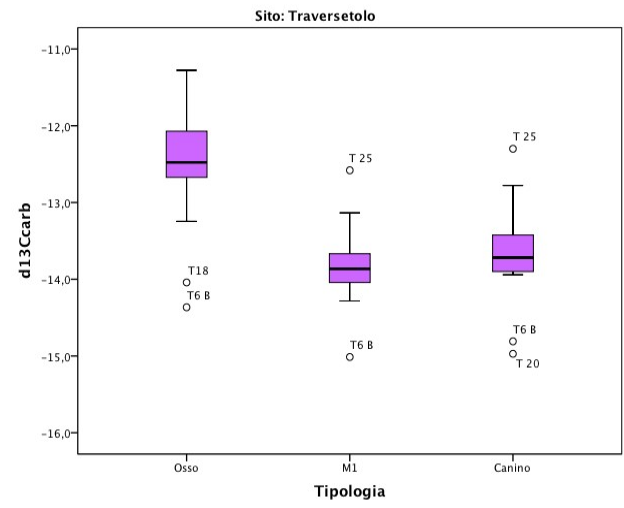
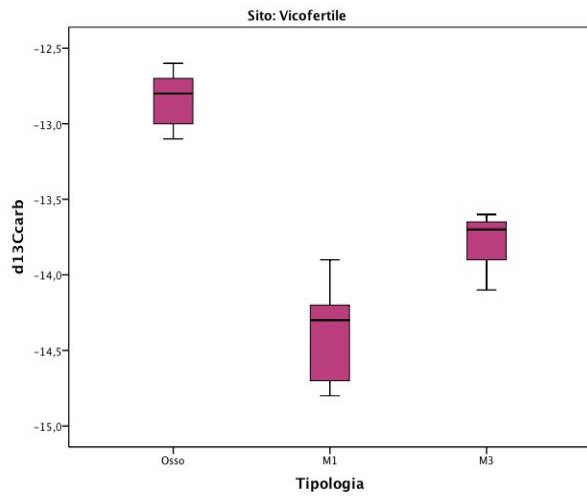
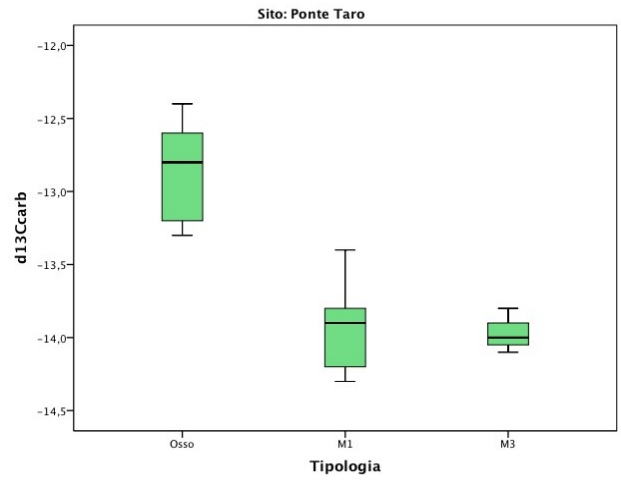
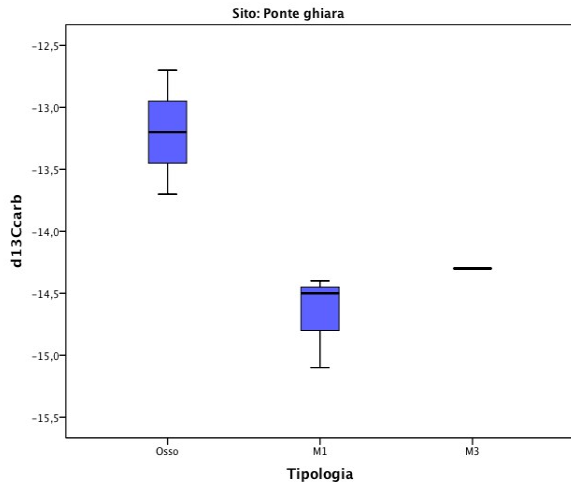
ARENE CANDIDE														
					ANALISI CARBONATO		ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ acqua (V-SMOW)
T I	M1 ds	M	15-18	VBQ I	-14,0	27,5	-19,4	40,9	10,5	13,5	3,0	-23,8	-24,4	-6,1
	Costola				-13,4	26,8	-19,7	43,6	8,2	15,1	2,9	-23,1	-24,7	-7,2
T II	M1 sn	M	50	VBQ I	-13,4	27,9	-20,2	41,5	10,1	13,8	3,0	-23,1	-25,2	-5,5
	M3 ds				-13,5	27,6	-19,7	43,1	9,4	14,2	3,0	-23,2	-24,7	-6,0
	Costola				-13,8	27,7	-19,9	43,3	8,8	14,5	3,0	-23,6	-24,9	-5,8
T III	M1 sn	M	25-30	VBQ I	-14,0	27,2	-20,1	42,6	8,7	13,7	3,1	-23,8	-25,1	-6,6
	M3 ds				-14,1	28,0	-20,8	40,3	9,2	14,7	2,7	-23,9	-25,8	-5,4
	Costola				-14,8	27,1	-20,1	41,8	8,8	14,0	3,0	-24,6	-25,1	-6,7
T IV	M1 sn	M	50	VBQ I	-14,1	28,2	-20,4	40,4	9,6	13,9	2,9	-23,9	-25,4	-5,1
	M3 ds				-13,9	27,6	-19,6	40,3	9,8	13,8	2,9	-23,7	-24,6	-6,0
	Costola				-14,0	27,2	-20,3	42,7	9,6	14,7	2,9	-23,8	-25,3	-6,6
T V	Costola	?	5-7	VBQ I	-13,4	28,1	-20,2	45,5	8,4	14,9	3,1	-23,1	-25,2	-5,2
T VI	M1 sn	?	1 – 2,5	VBQ I	-13,9	28,2	-19,0	44,7	10,5	15,3	2,9	-23,7	-24,0	-5,1
	Costola				-14,6	29,7	-19,2	43,3	10,9	14,9	2,9	-24,4	-24,2	-2,8
T VII	M1 sn	?	1,5 – 2,5	VBQ I	-13,7	28,0	-19,0	40,1	10,4	14,0	2,9	-23,4	-24,0	-5,4
	Costola				-13,6	27,9	-19,3	44,5	9,6	15,3		-23,3	-24,3	-5,5

MASSERIA CANDELARO														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ acqua (V-SMOW)
Fossato F, strato 3	M1 ds	F	20-30	VBQ II	-13,2	27,5	-19,1	40,5	10,9	12,9	3,6	-24,1	-22,9	-6,1
	Falange			VBQ II	-11,5	25,8	-19,4	43,9	9,0	15,3	3,3	-24,4	-21,2	-8,7
Fossato F, T. 1	M1 sn	F	50	VBQ II	-13,4	26,8	-19,4	40,9	11,1	14,6	3,2	-24,4	-23,1	-7,2
	M3 sn			VBQ II	-12,6	26,7	-19,4	42,8	10,3	15,0	3,3	-24,4	-22,3	-7,4
	Osso lungo			VBQ II	-12,3	26,2	-19,4	44,7	9,4	15,6	3,3	-24,4	-22,0	-8,1
Fossato F, T. 2	M1 sn	F	30-40	VBQ II	-12,2	26,6	-18,5	42,5	10,6	13,8	3,6	-23,5	-21,9	-7,5
	M3 sn			VBQ II	-12,2	26,5	-18,9	40,4	9,3	15,5	3,0	-23,9	-21,9	-7,7
	Costola			VBQ II	-12,0	26,5						-5,0	-21,7	-7,7
Fossato F, T. 3	M1 ds	M	20-30	VBQ II	-13,1	26,9	-18,9	42,4	10,4	13,5	3,6	-23,9	-22,8	-7,0
	M3 ds			VBQ II	-13,3	26,3	-19,3	40,5	10,1	13,9	3,4	-24,3	-23,0	-8,0
	Costola			VBQ II	-12,0	25,6	-19,2	37,5	9,2	12,5	3,5	-24,2	-21,7	-9,0
Fossato F, strato 6 ind. A	M1 ds	F	25-30	VBQ II	-12,7	28,4	-18,8	43,5	10,1	15,2	3,3	-23,8	-22,4	-4,7
	M3 ds			VBQ II	-12,6	28,7	-19,2	45,3	9,2	15,6	3,4	-24,2	-22,3	-4,3
	Femore			VBQ II	-11,5	27,7	-19,1	39,6	8,8	15,4	3,0	-24,1	-21,2	-5,8
Fossato F, strato 6 ind. B	M1 ds	M	30-40	VBQ II	-12,2	27,9	-19,4	43,7	8,2	14,2	3,6	-24,4	-21,9	-5,5
	Femore			VBQ II	-12,1	27,5	-18,3	19,9				-23,3	-21,8	-6,1
Fossato F, strato 4	Ulna	?	A	VBQ II	-12,2	27,9	-19,2	44,5	9,8	15,3	3,4	-24,2	-21,9	-5,5
Settore 40 D P2 8 base	M3 sn	M	A	VBQ I	-13,4	27,4	-19,2	44,9	10,3	15,4	3,4	-24,2	-23,1	-6,3
	Femore			VBQ I	-11,9	28,7	-18,9	38,9	11,4	15,8	2,9	-23,9	-21,6	-4,3
Settore 40 D T. 1	M1 sn	M	50	VBQ I	-11,8	27,5	-18,8	47,2	8,8	15,5	3,5	-23,8	-21,5	-6,1
	M3 ds			VBQ I	-11,9	27,1	-18,7	43,1	9,2	15,5	3,2	-23,7	-21,6	-6,7
	Femore			VBQ I	-12,9	26,7	-18,9	45,8	9,0	15,6	3,4	-23,9	-22,6	-7,4
Settore 40 D P3/4 ind A	M1 sn	F	15-17	VBQ I	-11,6	27,8	-17,6	42,3	10,5	15,4	3,2	-22,6	-21,3	-5,7
Settore 40 D P3/4 ind B	M1 ds	F	50,0	VBQ I	-12,4	27,4	-18,6	43,7	9,3	15,9	3,2	-23,6	-22,1	-6,3
	Costola			VBQ I	-12,1	27,0	-19,2	42,0	8,5	16,2	3,0	-24,2	-21,8	-6,9
Settore 40 D P2 8	M1 ds	F	30-40	VBQ I	-12,1	27,2	-18,9	43,5	10,7	15,5	3,3	-23,9	-21,8	-6,6
	M3 ds			VBQ I	-11,6	27,3	-19,3	36,6	9,5	14,2	3,0	-24,3	-21,3	-6,4
	Clavicola			VBQ I	-11,7	26,2	-19,5	38,4	8,6	15,0	3,0	-24,5	-21,4	-8,1
Settore 45 C T.1	M1 ds	M	25-30	VBQII	-12,0	27,5	-17,7	38,0	11,1	14,7	3,0	-22,7	-21,7	-6,1
	M3 sn			VBQII	-12,1	26,8	-19,0	39,7	8,9	15,3	3,0	-24,0	-21,8	-7,2
	Costola			VBQII	-10,2	27,4	-19,3	40,6	7,9	14,6	3,2	-24,3	-19,8	-6,3
Settore 45 C T. 2 ind 1	M1 ds	M	20-25	VBQII	-12,1	27,2	-19,2	41,8	9,5	14,9	3,3	-24,2	-21,8	-6,6
	Costola			VBQII	-12,6	29,1	-18,6	24,4				-23,6	-22,3	-3,7
Settore 45 C T. 2 ind 2	M1 ds	M	50,0	VBQII	-11,8	26,1	-18,8	40,5	9,5	14,5	3,2	-23,8	-21,5	-8,3
	Femore			VBQII	-12,0	25,9	-18,8	43,1	8,8	15,9	3,1	-23,8	-21,7	-8,6
Struttura Q 40 C/D 4 d2	M1 sn	M	40,0	VBQ I	-13,0	25,8	-19,7	43,0	10,0	15,6	3,2	-24,7	-22,7	-8,7
	M3 sn			VBQ I	-12,7	26,4	-19,4	41,0	9,4	15,9	3,0	-24,4	-22,4	-7,8
	Tibia			VBQ I	-11,0	27,5	-19,4	36,2	8,8	14,5	2,9	-24,4	-20,6	-6,1
Struttura Q 40 C/D 4 d3	Omero	F?	20-30	VBQ I	-12,3	27,0	-19,3	37,8	9,2	14,4	3,0	-24,3	-22,0	-6,9
Struttura Q 40 D 2D	Omero	?	A	VBQ I	-12,1	26,2	-18,2	32,6	8,2	12,3	3,1	-23,2	-21,8	-8,1
Struttura Q 40 B, A1	M3 sn	?	7-8	VBQ I	-12,1	27,1	-19,9	39,2	9,2	15,2	3,0	-24,9	-21,8	-6,7

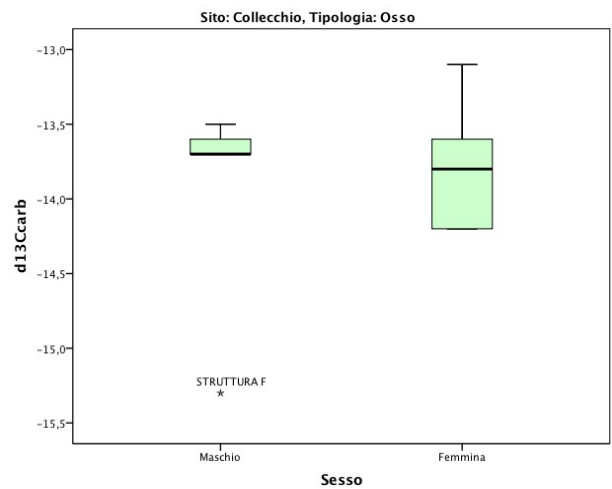
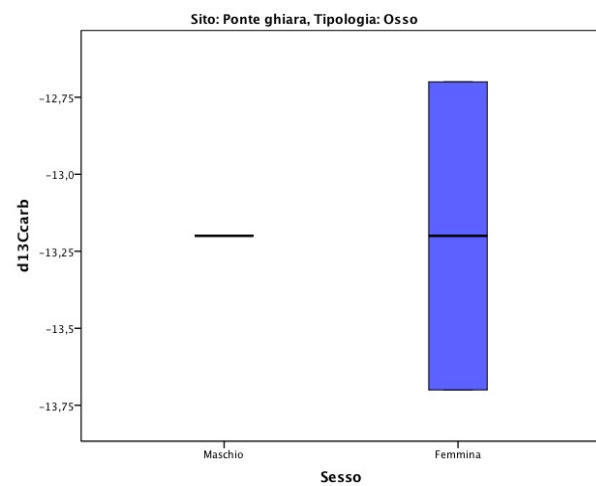
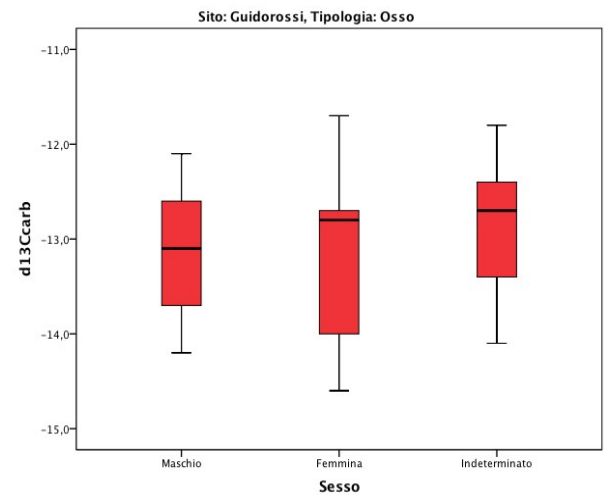
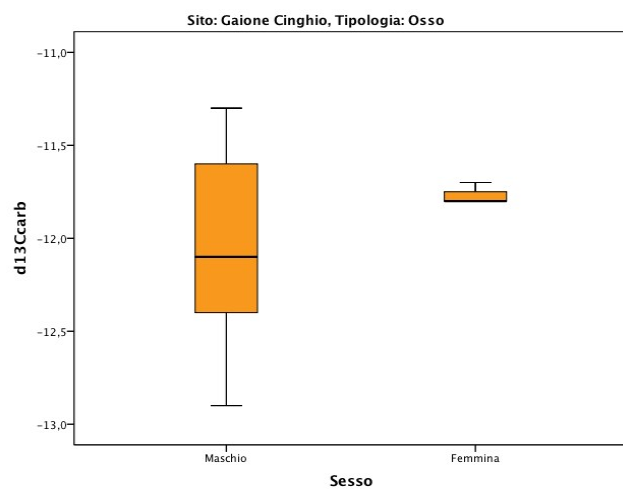
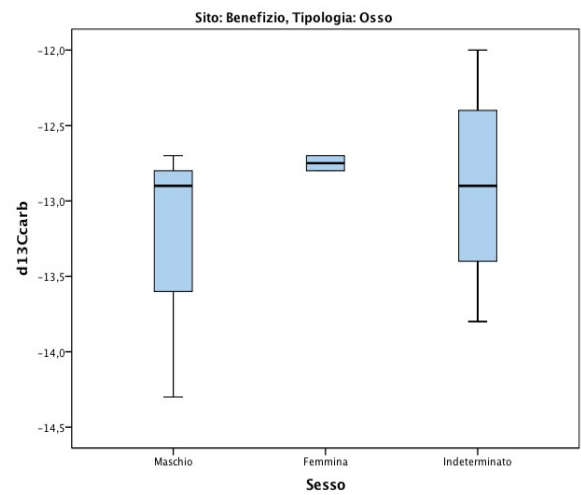
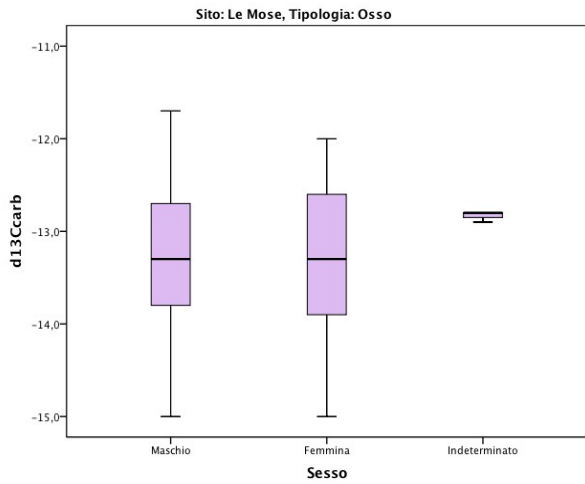
COLLECCHIO														
				ANALISI CARBONATO			ANALISI COLLAGENE							
Campione	Tipologia	Sesso	Età	Cronologia	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	%C	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ dieta coll (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ dieta ap (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ acqua (V-SMOW)
STRUTTURA ST3	Femore	M	41	VBQ II	-12,1	25,6							-21,8	-9,1
	M1				-13,7	25,4	-19,5	31,7	11,5	11,4	3,2	-24,5	-23,4	-9,4
STRUTTURA F	Costola	M	7 – 12	VBQ II	-12,0	25,1	-20,5	34,6	9,0	12,7	3,2	-25,5	-21,7	-9,9
	M1				-15,3	26,5	-20,5	17,5	9,4	7,0	2,9	-25,5	-25,1	-7,7
T1	Costola	M?	9 – 10	VBQ II	-12,5	25,2	-20,1	39,5	8,6	15,1	3,0	-25,1	-22,2	-9,7
	M1				-13,7	25,7	-20,2	38,3	9,6	12,8	3,5	-25,2	-23,4	-9,0
T2	Costola	F	25-30	VBQ II	-12,2	25,9	-20,7	37,1	8,4	13,9	3,1	-25,7	-21,9	-8,7
	M1				-13,8	26,0	-20,3	32,5	10,6	11,3	3,3	-25,3	-23,6	-8,5
T3	Costola	M	Ca 50	VBQ II	-13,0	26,2	-20,2	35,6	8,9	13,3	3,1	-25,2	-22,7	-8,2
	M1				-13,7	25,9	-21,1	33,6	10,0	12,2	3,2	-26,1	-23,4	-8,7
T4	Costola				-12,1	24,7	-20,2	36,4	8,2	13,5	3,1	-25,2	-21,8	-10,5
T5	Costola	M	18-20	VBQ II	-11,9	25,1	-20,2	35,9	8,5	12,8	3,3	-25,2	-21,6	-9,9
	M1				-13,6	25,9	-20,4	39,5	10,0	13,2	3,5	-25,4	-23,3	-8,7
	M3				-13,2	25,0	-20,4	37,1	9,9	13,0	3,3	-25,4	-22,9	-10,1
T6	Costola	F	25-30	VBQ II	-12,0	25,6	-20,4	37,6	8,8	13,6	3,2	-25,4	-21,7	-9,1
	M1				-13,1	25,1	-20,2	36,2	9,2	12,3	3,4	-25,2	-22,8	-9,9
	M3				-13,6	25,8	-20,3	36,1	10,1	12,2	3,4	-25,3	-23,3	-8,8
T7	Costola	F	30-35	VBQ II	-12,3	24,7	-20,3	34,2	8,7	12,5	3,2	-25,3	-22,0	-10,5
	M1				-14,2	26,1	-19,8	35,0	9,5	11,2	3,6	-24,8	-24,0	-8,4
	M3				-13,5	24,8	-19,8	33,5	9,2	11,3	3,4	-24,8	-23,2	-10,4
T8	Costola	M	35-40	VBQ II	-12,3	24,4	-20,1	37,2	9,4	13,3	3,2	-25,1	-22,0	-11,0
	M1				-13,5	26,1	-20,4	38,5	8,7	12,3	3,6	-25,4	-23,2	-8,4
	M3				-12,9	25,1	-20,0	39,9	10,4	13,1	3,5	-25,0	-22,6	-9,9
T9	Costola	F	30-40	VBQ II	-12,0	25,0	-20,4	35,6	9,2	13,2	3,1	-25,4	-21,7	-10,1
	M1				-13,6	26,1	-19,8	36,2	9,9	13,9	3,0	-24,8	-23,3	-8,4
	M3				-13,6	25,8	-20,3	38,2	9,7	12,2	3,6	-25,3	-23,3	-8,8
T10	Costola	?	4 – 5	VBQ II	-11,7	24,6	-20,3	38,5	9,0	13,7	3,3	-25,3	-21,4	-10,7
T11	Costola	F	40-50	VBQ II	-11,5	24,0	-20,9	39,6	8,1	13,9	3,3	-25,9	-21,2	-11,6
	M1				-14,2	26,0	-20,4	37,2	8,5	13,0	3,3	-25,4	-24,0	-8,5
	M3				-13,5	25,1	-20,6	39,5	9,0	12,6	3,6	-25,6	-23,2	-9,9

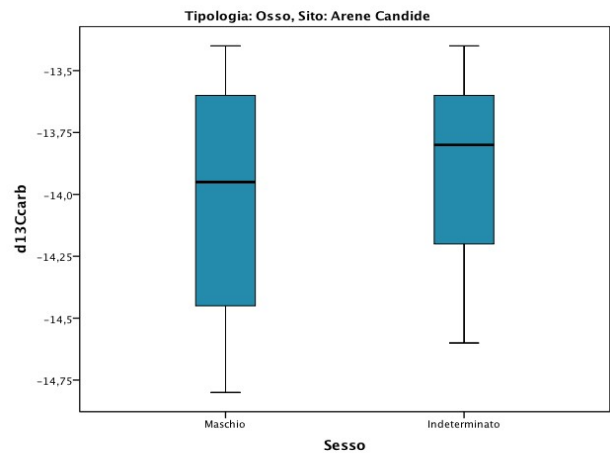
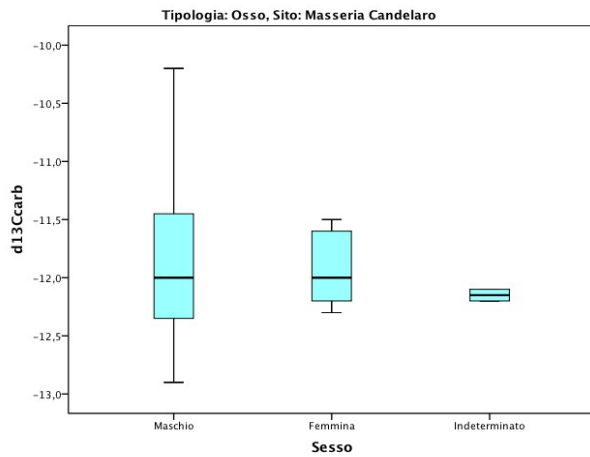
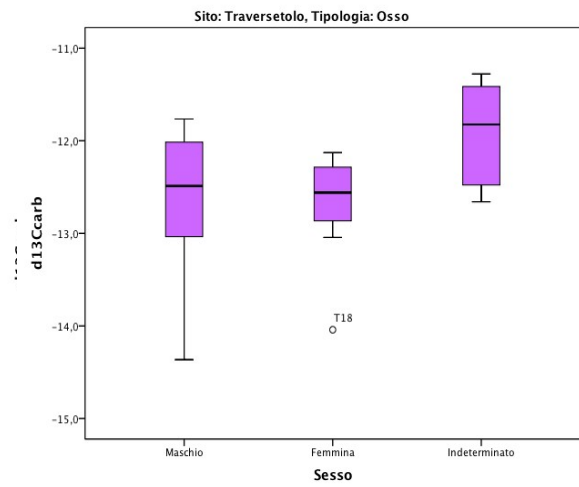
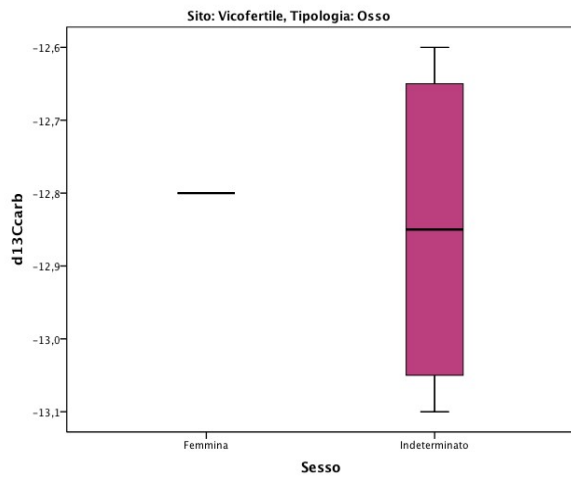
## Elaborazione statistica del $\delta^{13}\text{C}$ carbonato dei siti per tipologia di reperto



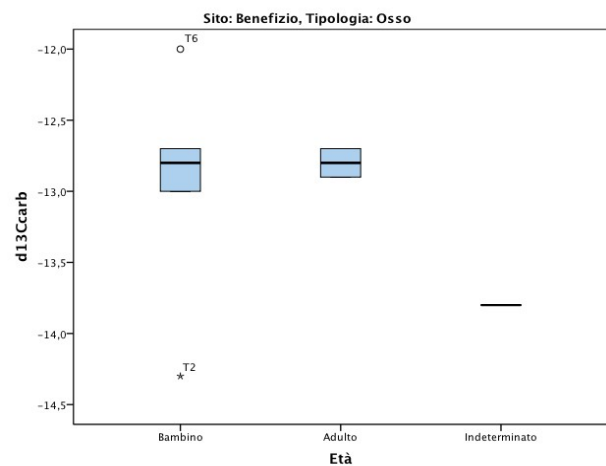
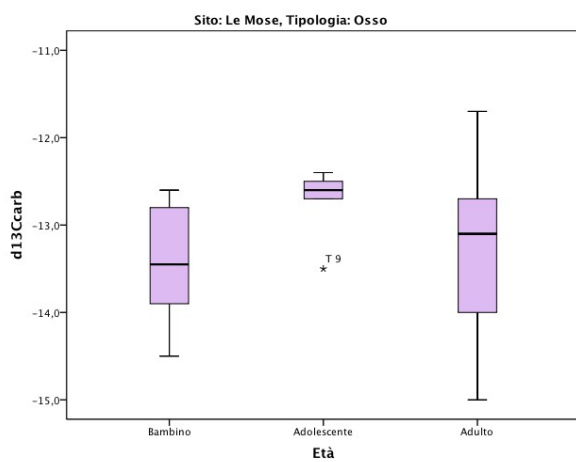


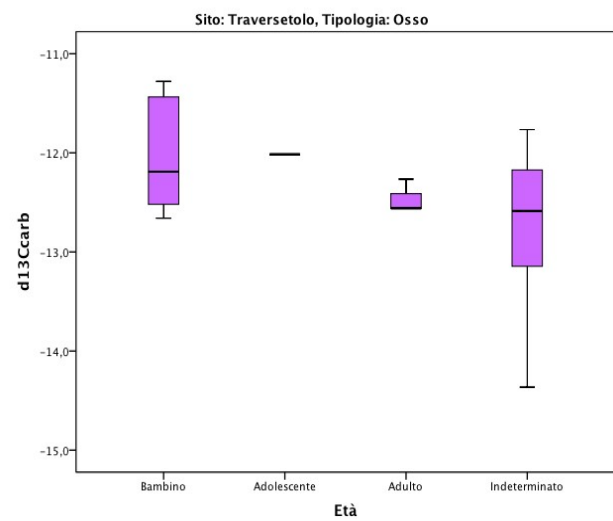
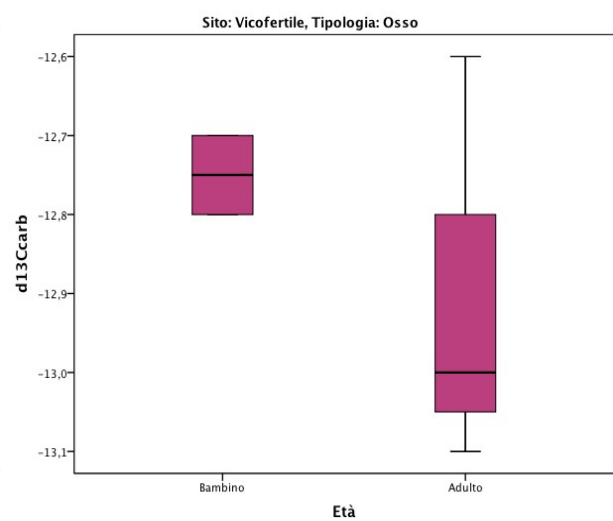
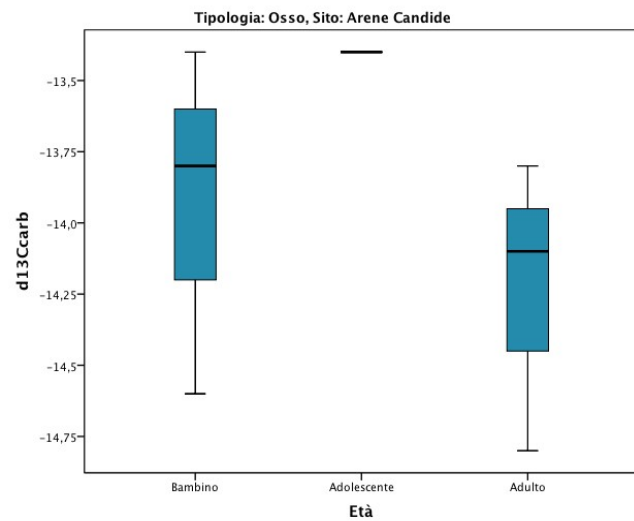
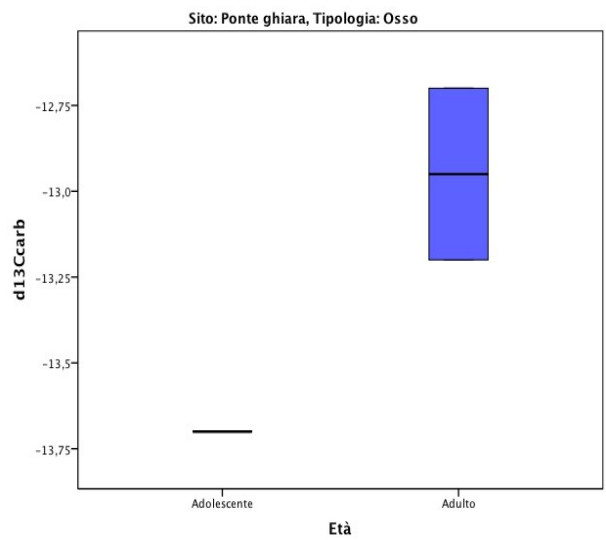
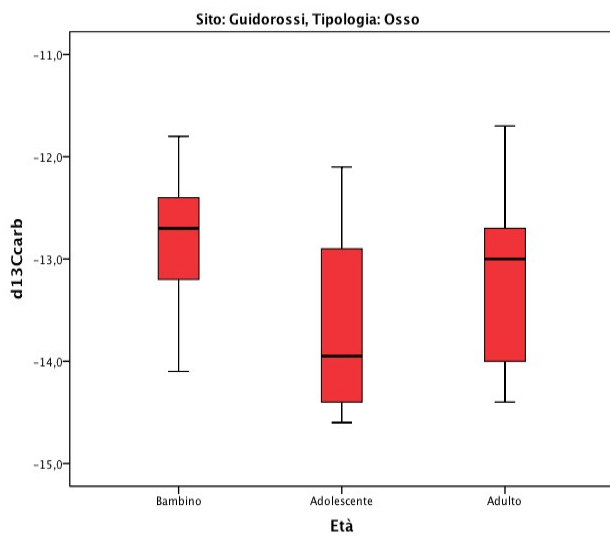
## Elaborazione statistica del $\delta^{13}\text{C}$ carbonato delle ossa in funzione del sesso



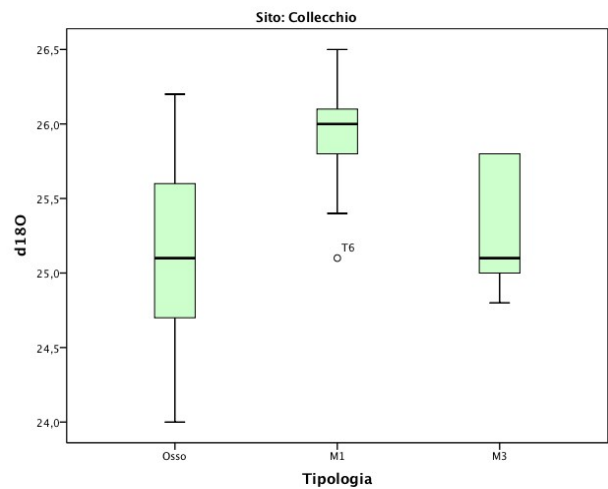
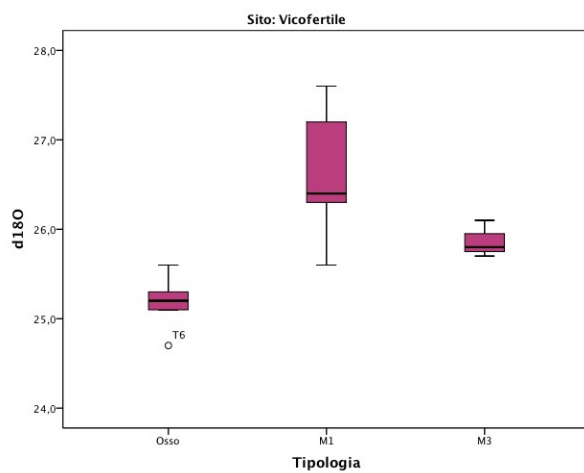
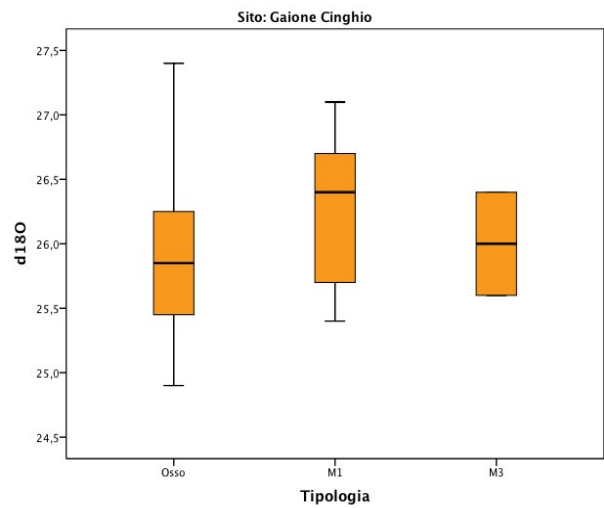
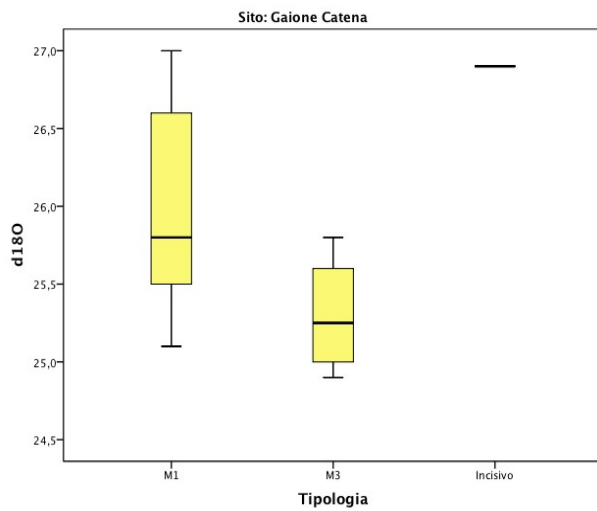
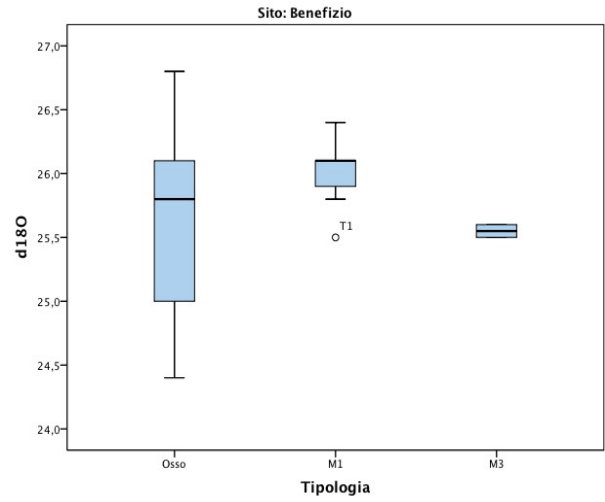
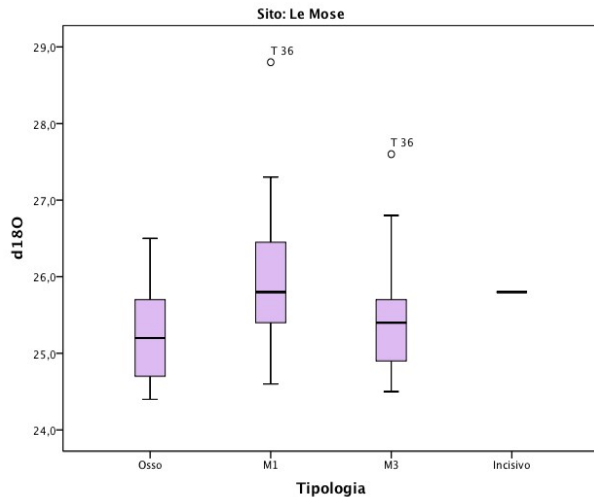


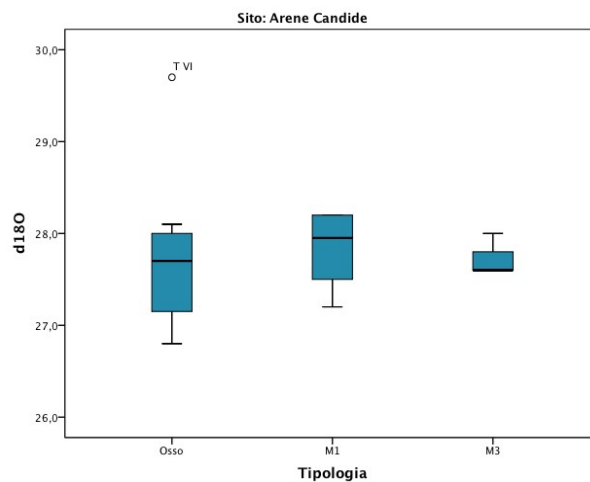
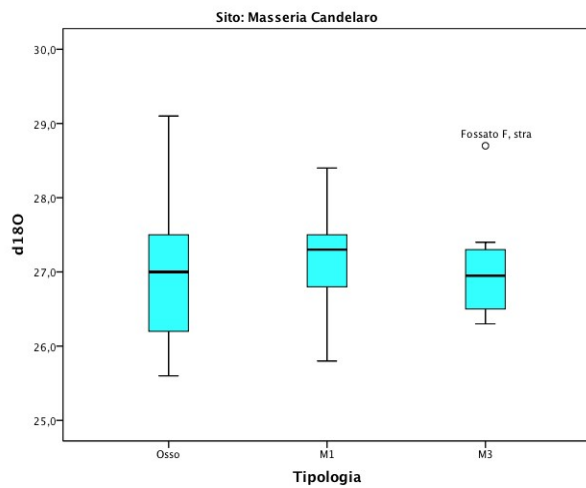
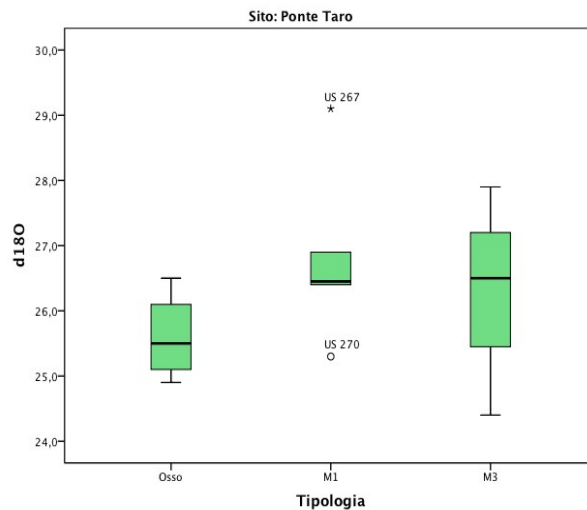
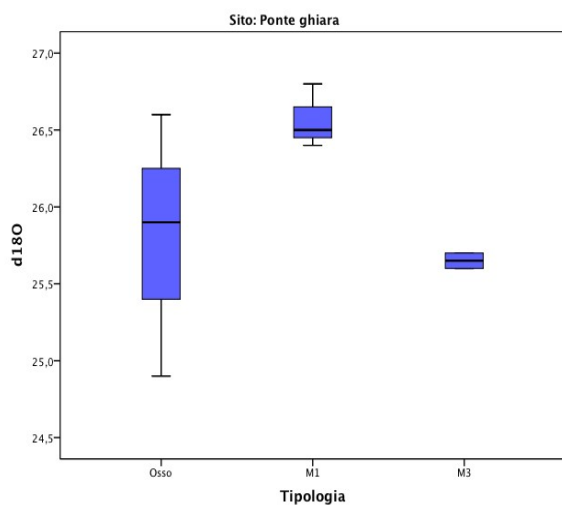
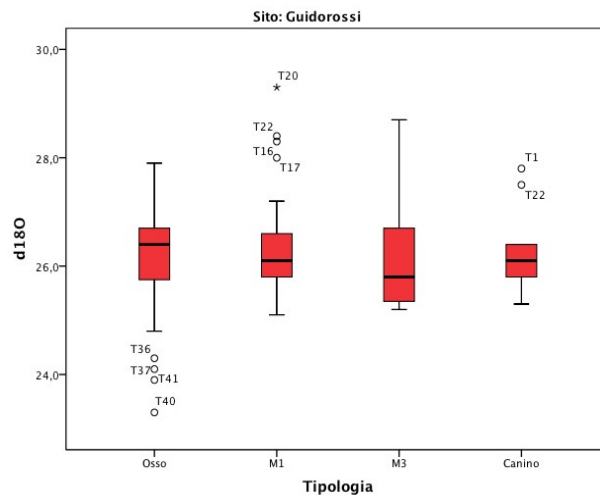
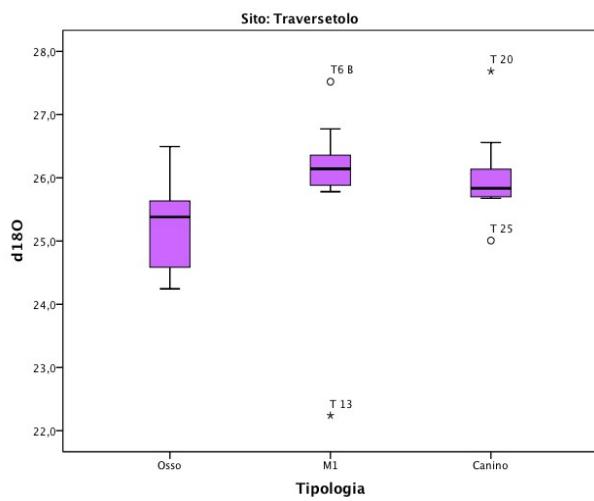
## Elaborazione statistica del $\delta^{13}C_{carbonato}$ dei siti per età al momento della morte



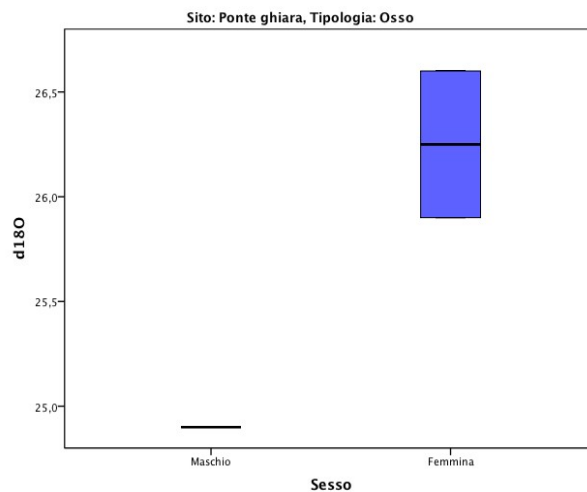
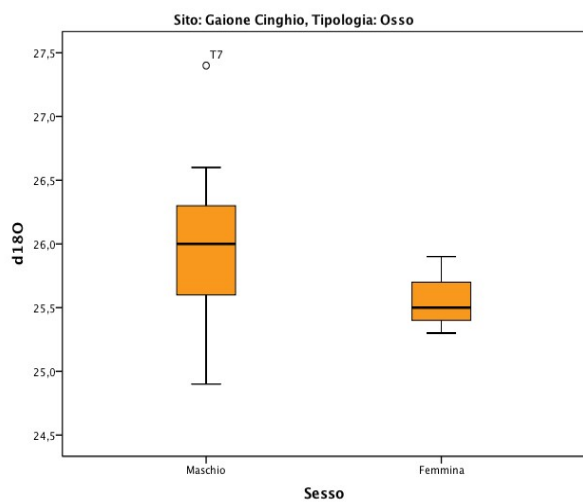
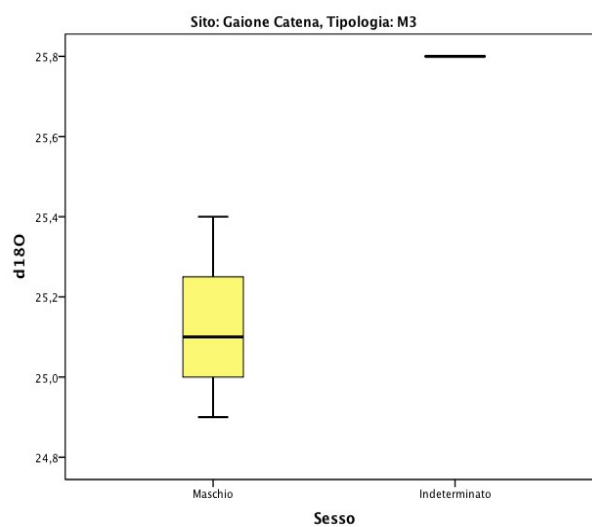
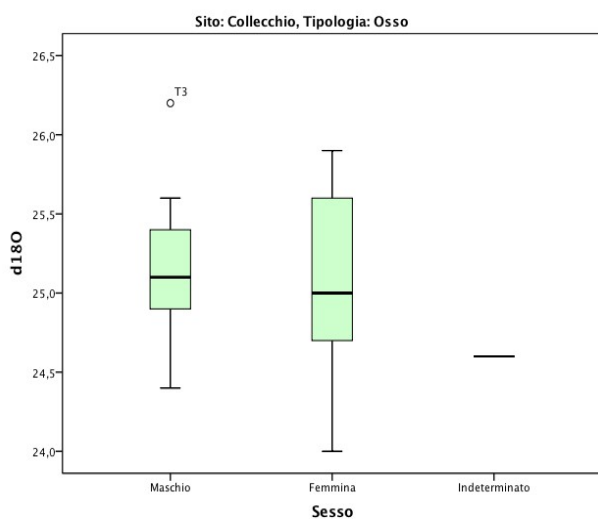
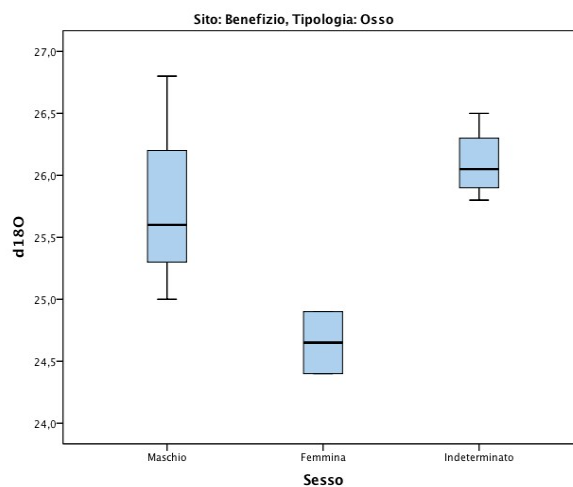
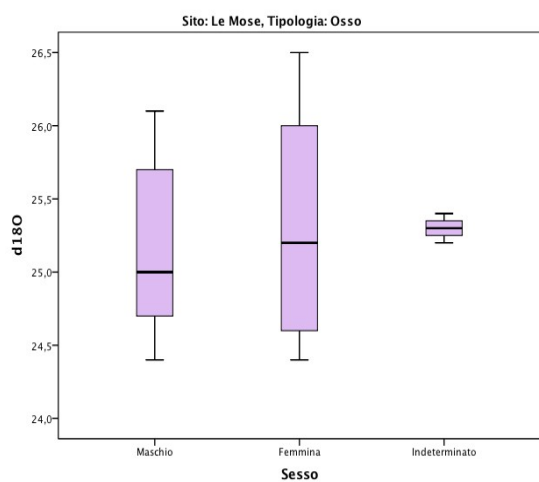


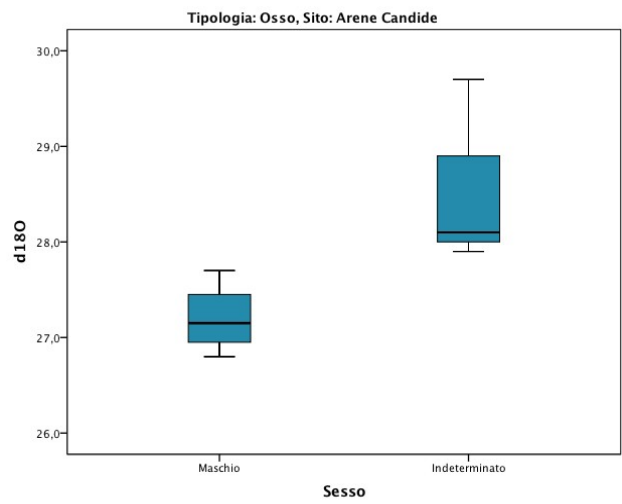
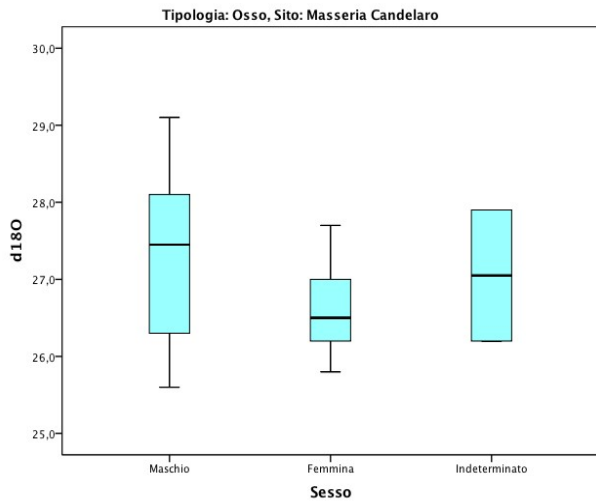
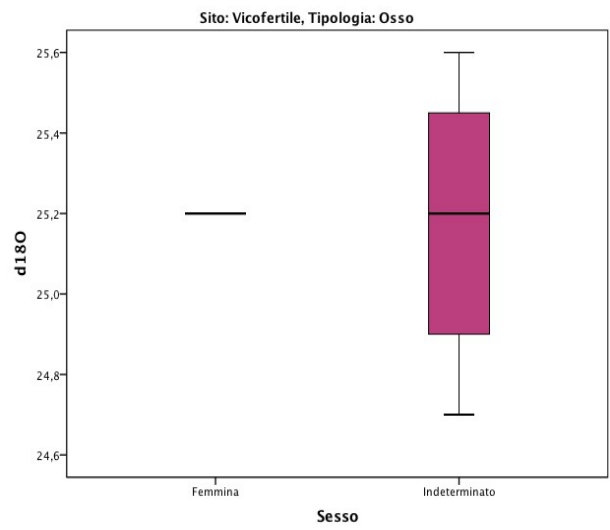
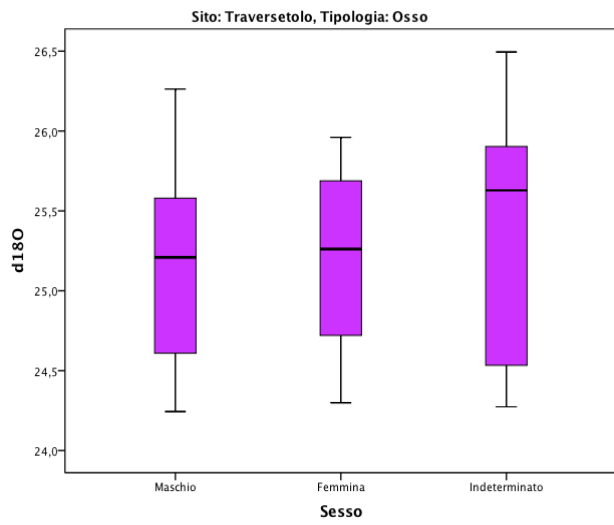
## Elaborazione statistica del $\delta^{18}\text{O}$ dei siti per tipologia di reperto



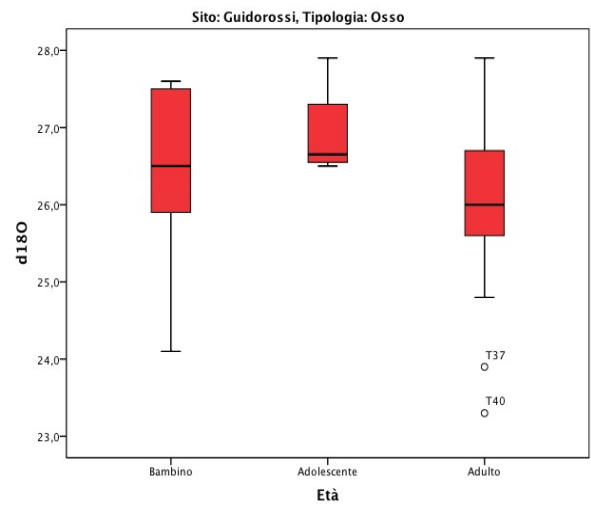
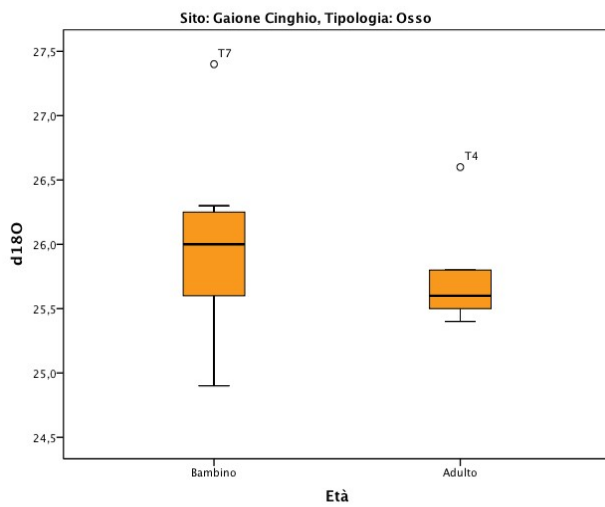
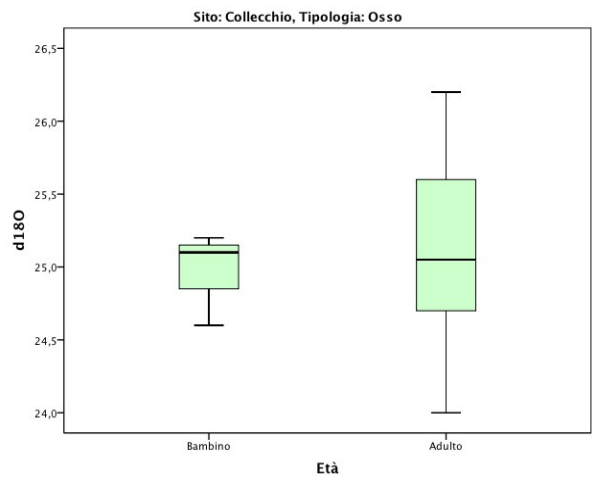
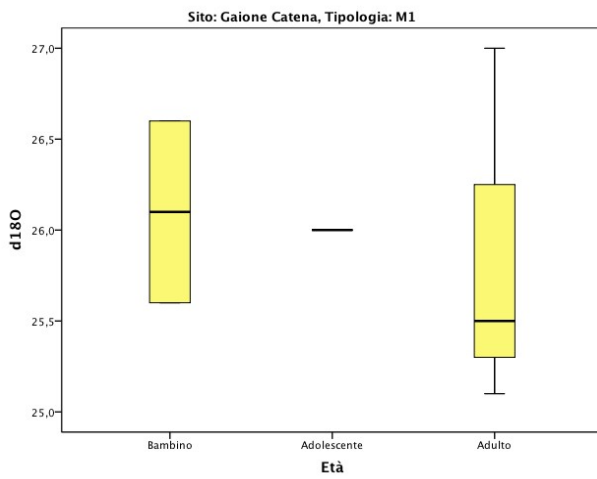
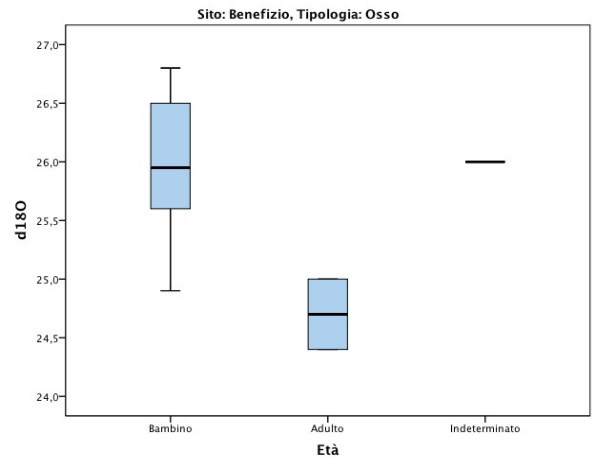
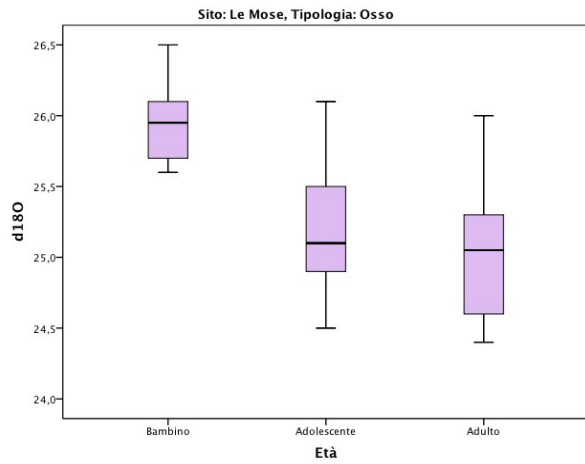


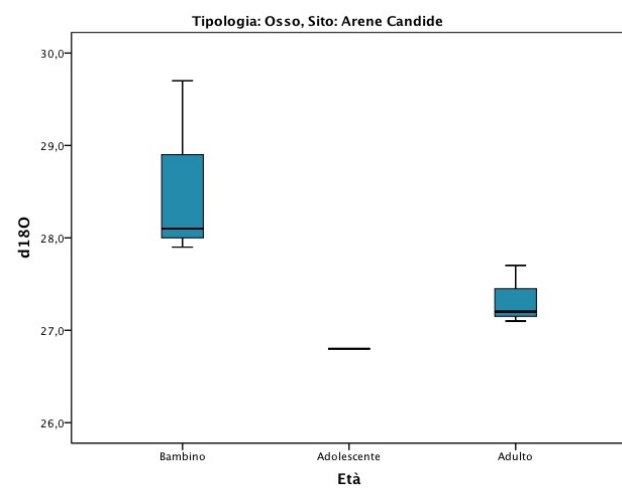
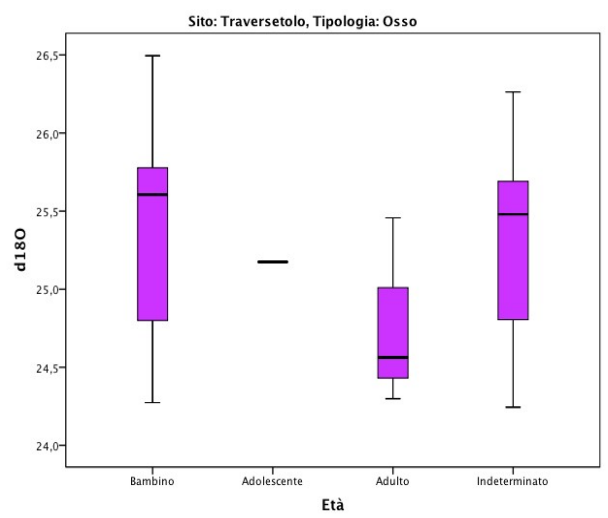
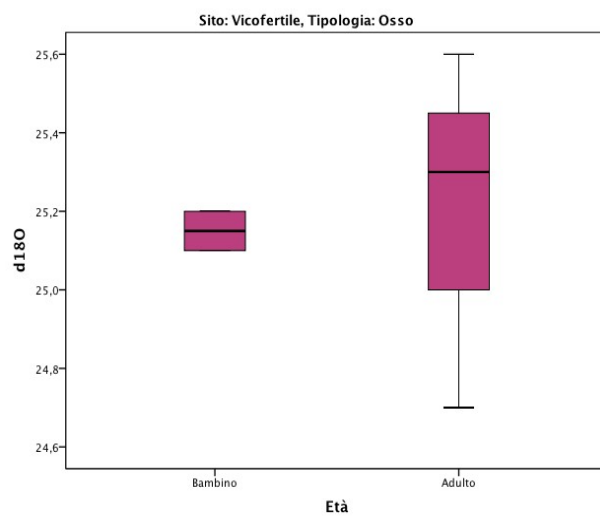
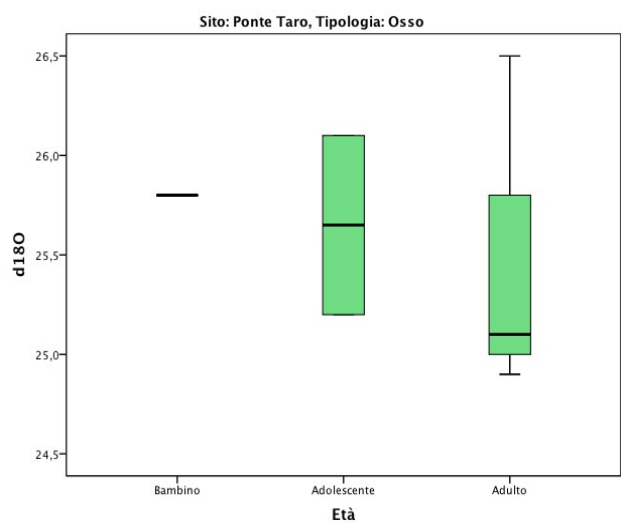
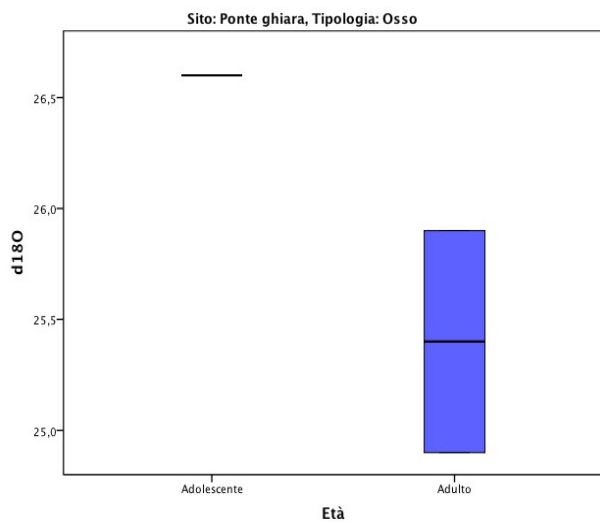
## Elaborazione statistica del $\delta^{18}\text{O}$ delle ossa in funzione del sesso



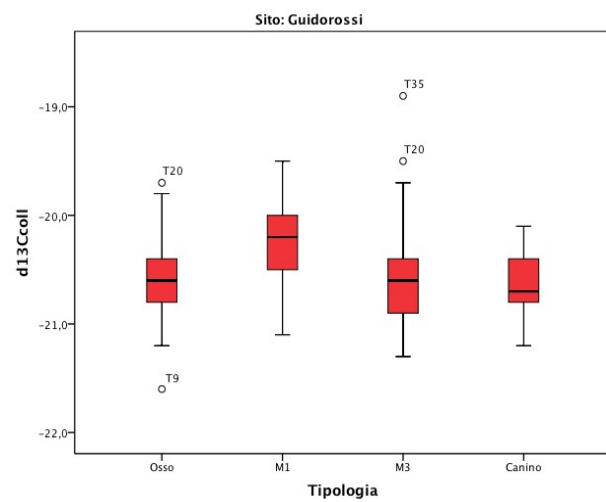
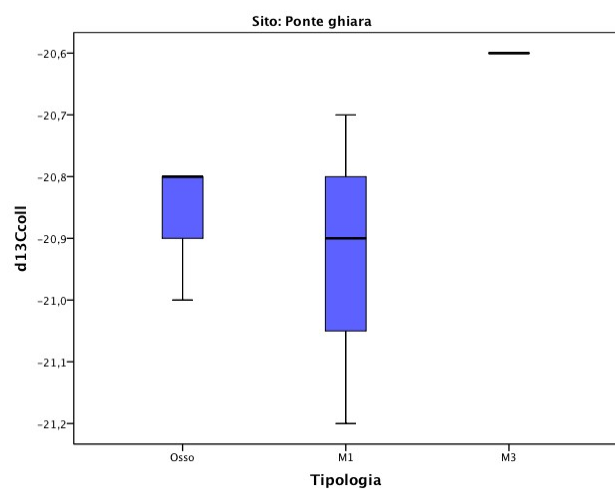
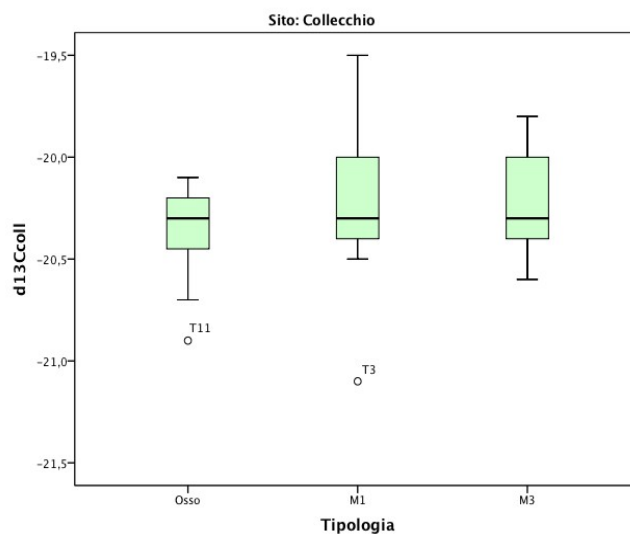
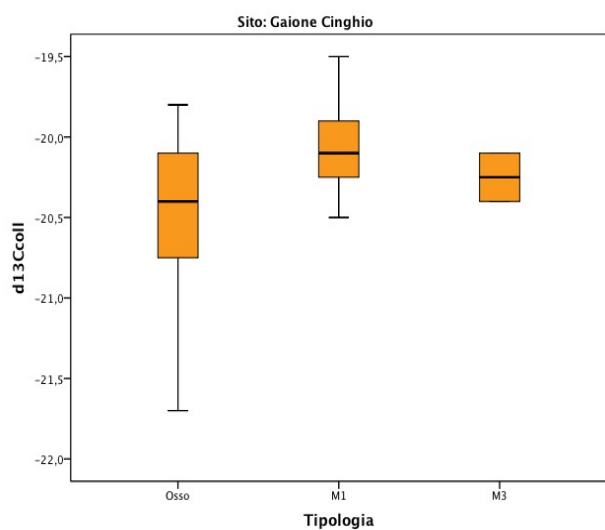
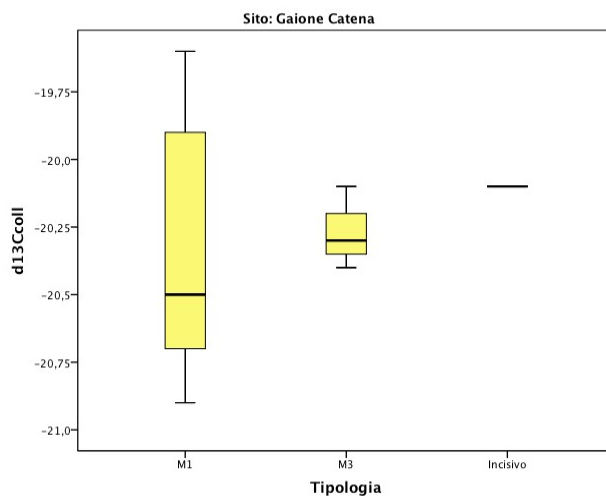
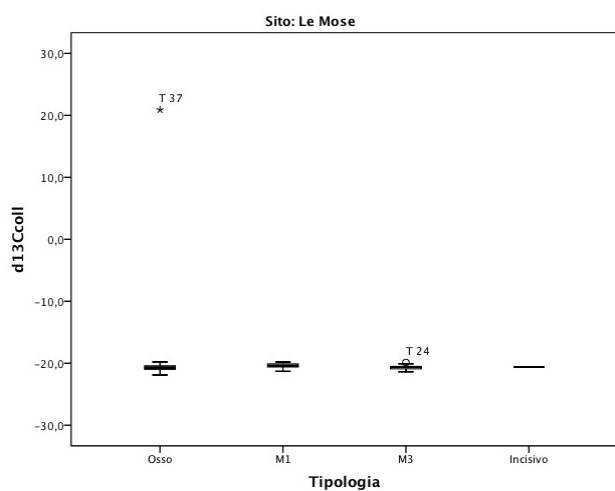


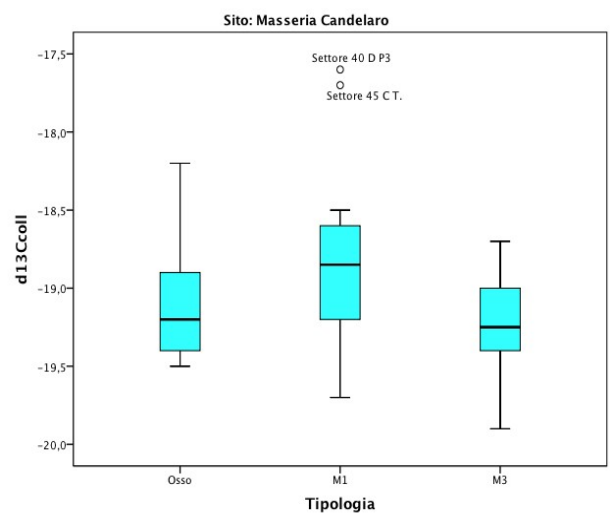
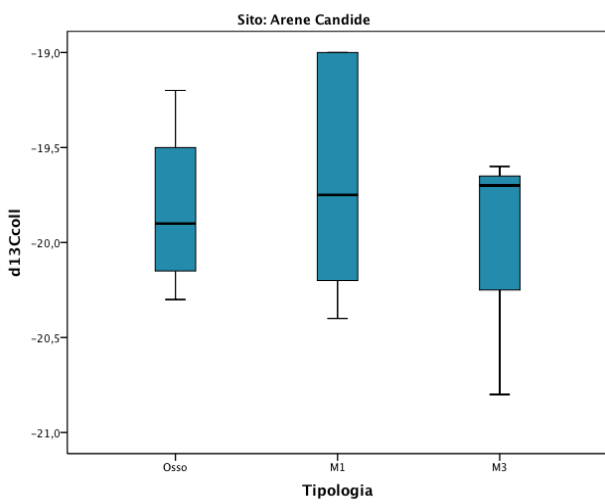
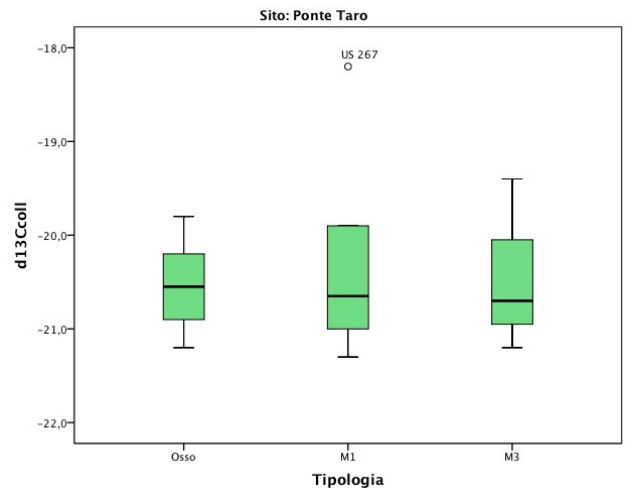
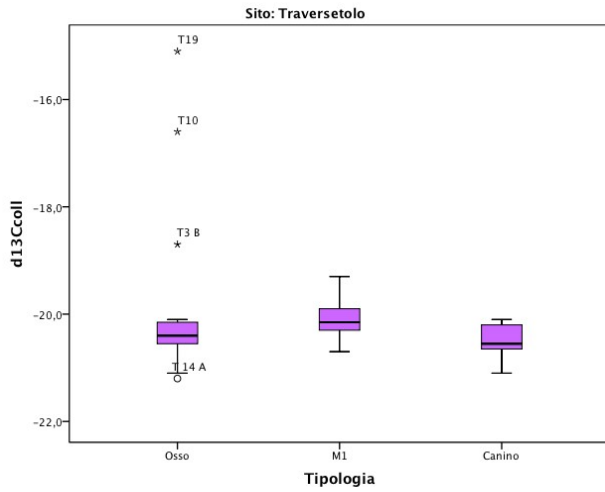
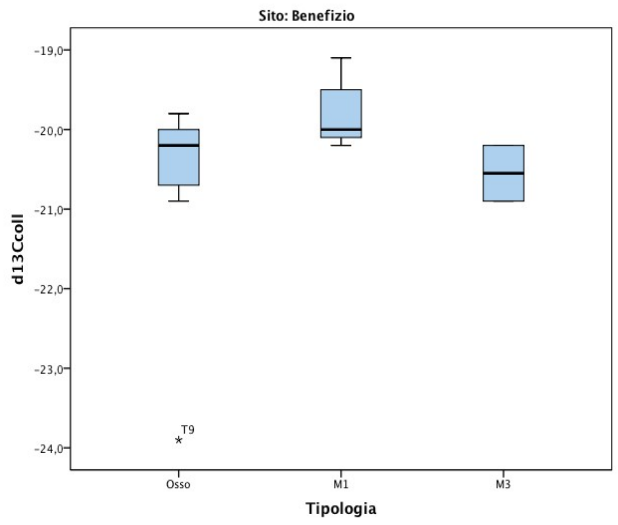
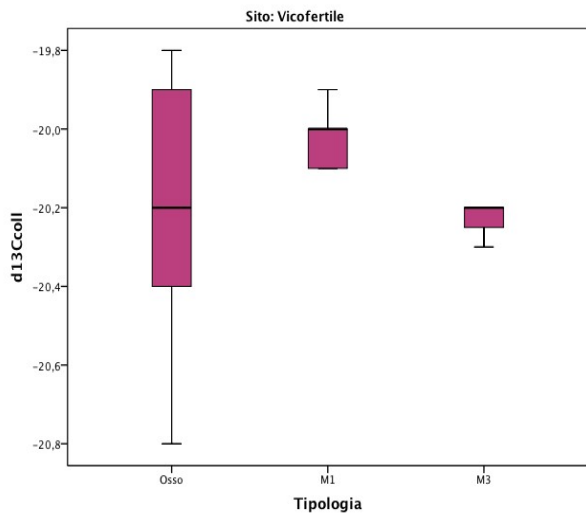
## Elaborazione statistica del $\delta^{18}\text{O}$ dei siti per età al momento della morte



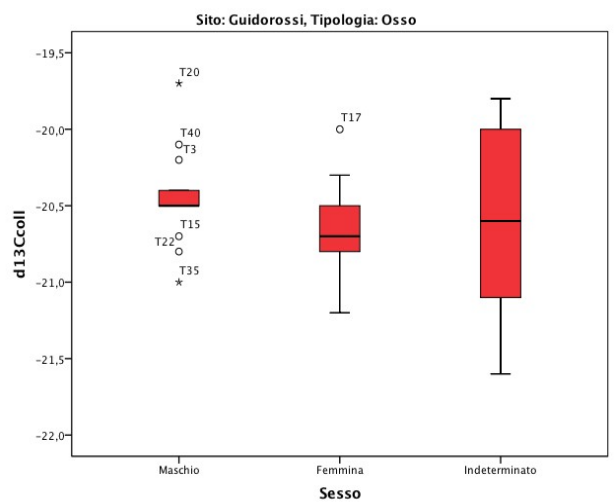
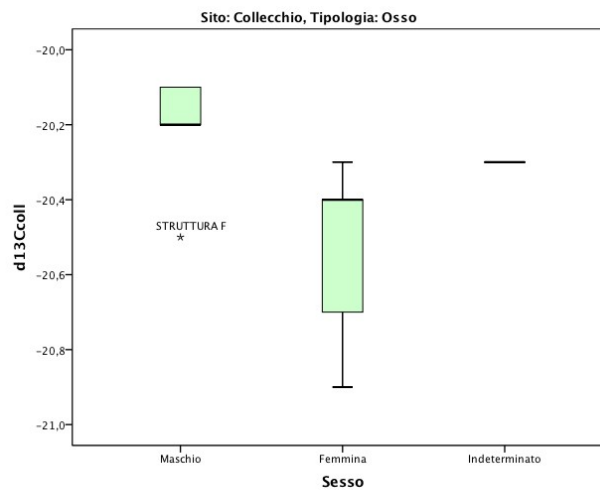
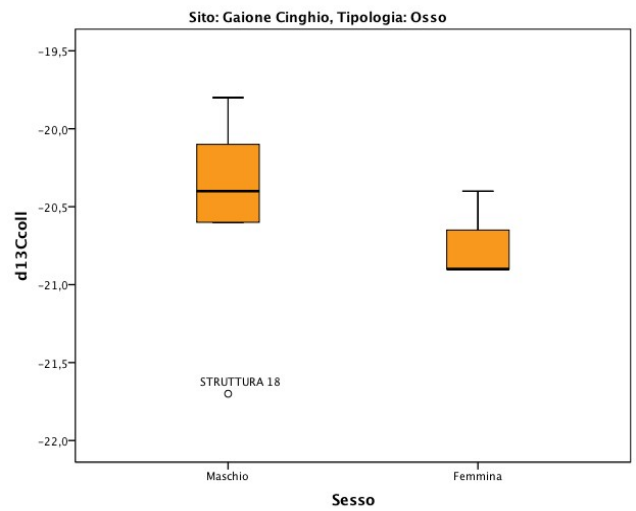
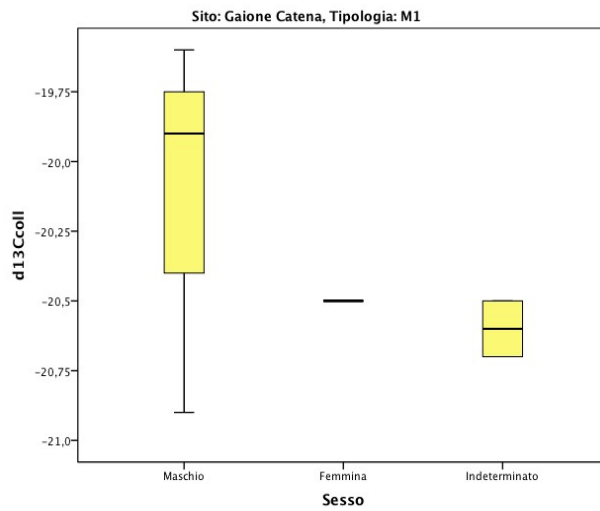
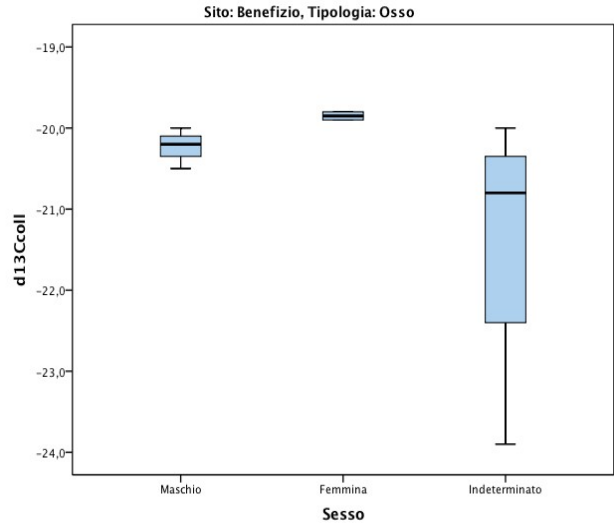
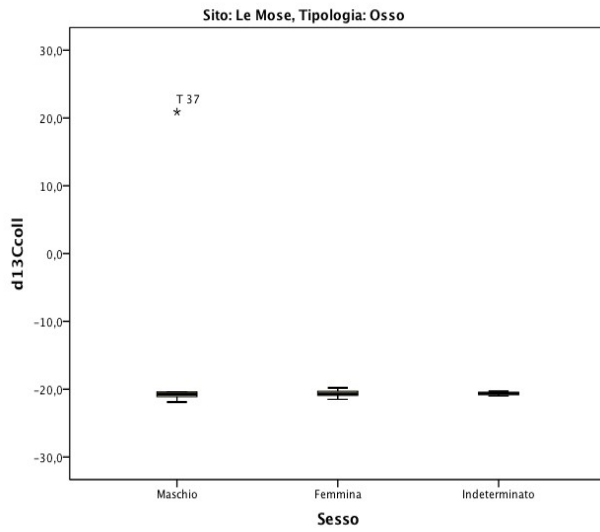


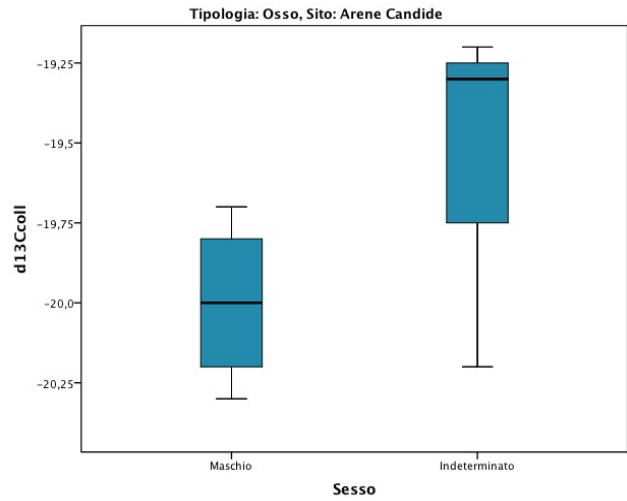
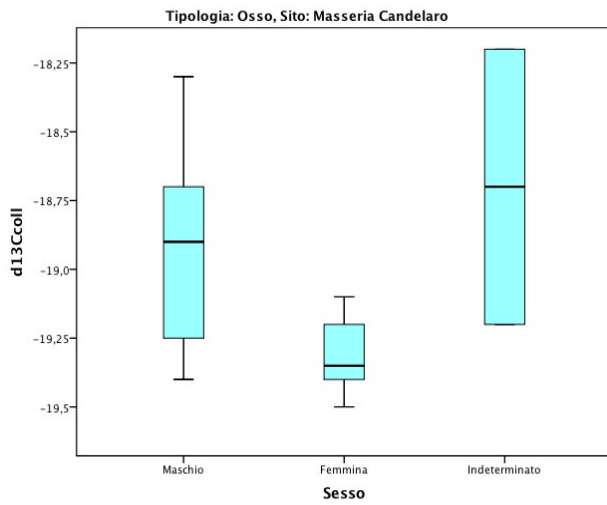
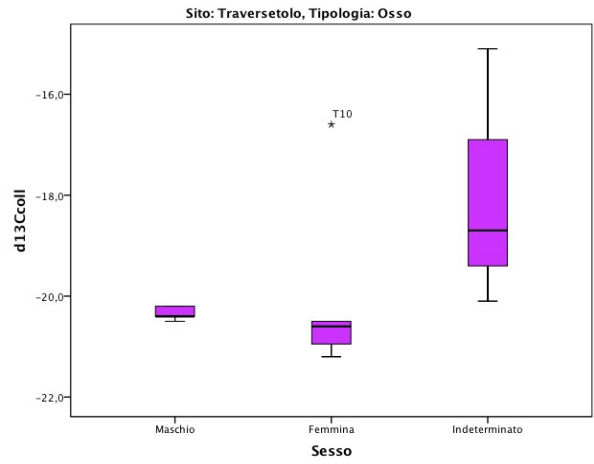
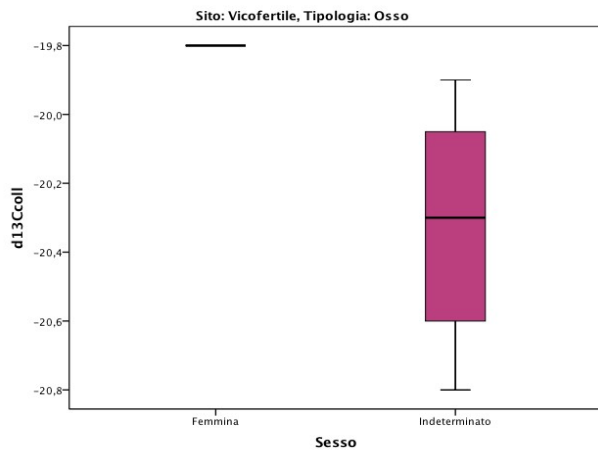
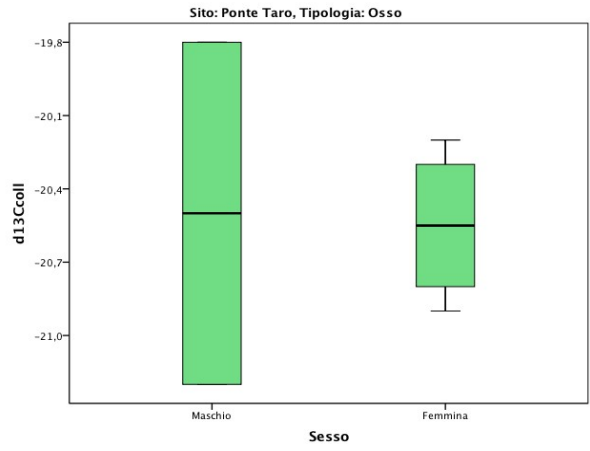
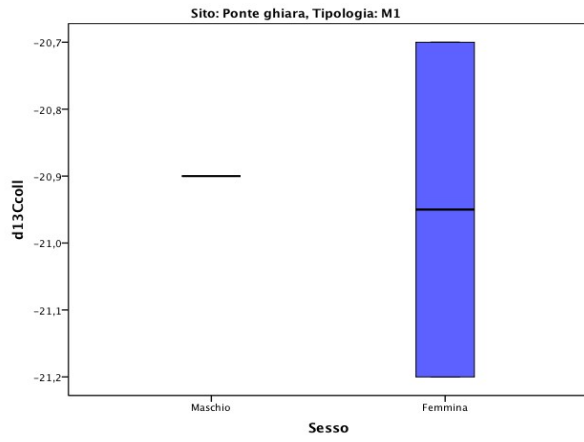
## Elaborazione statistica del $\delta^{13}\text{C}$ collagene dei siti per tipologia



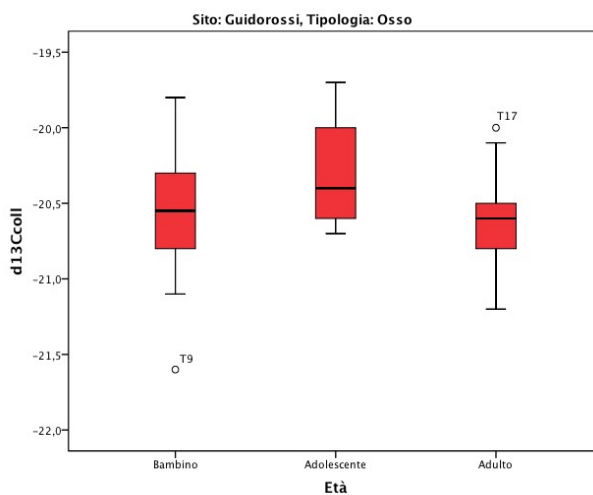
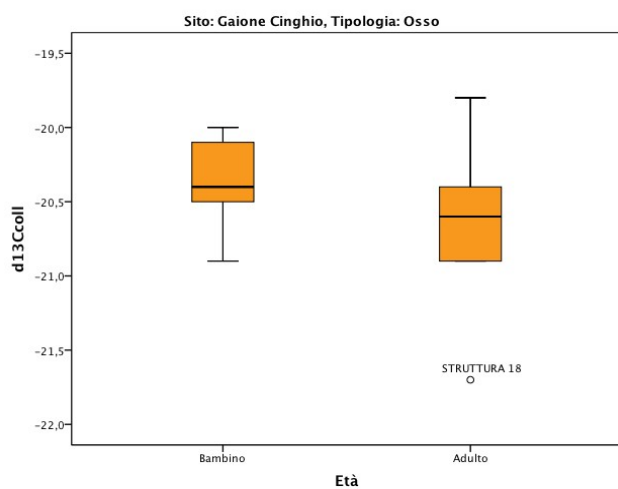
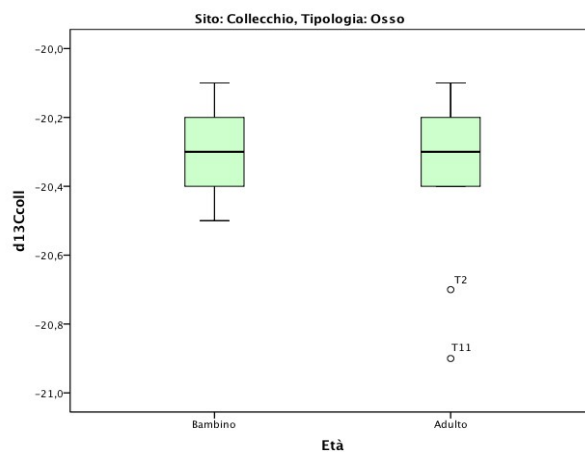
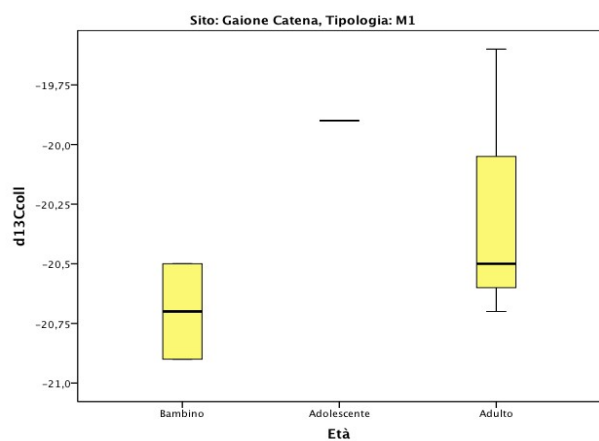
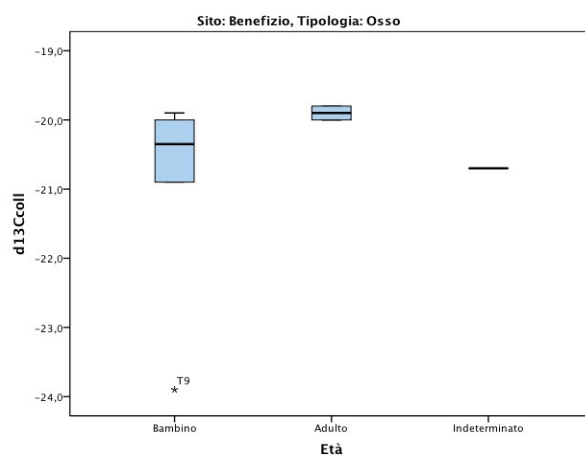
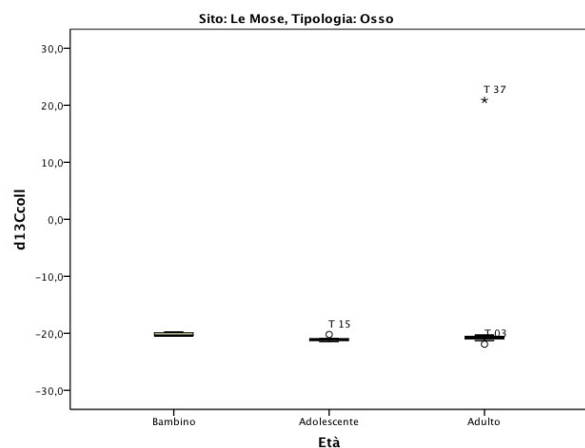


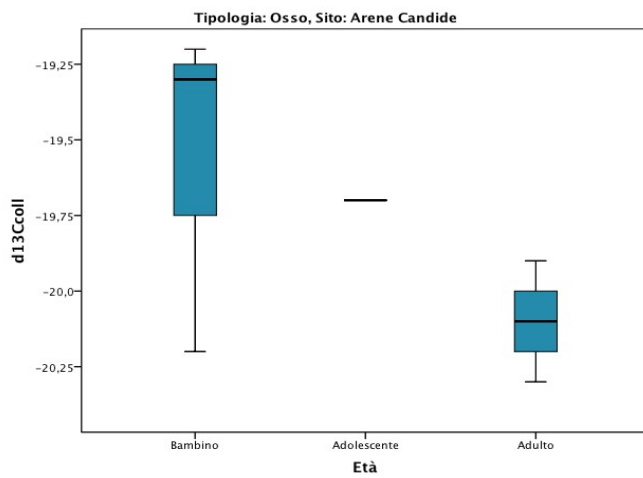
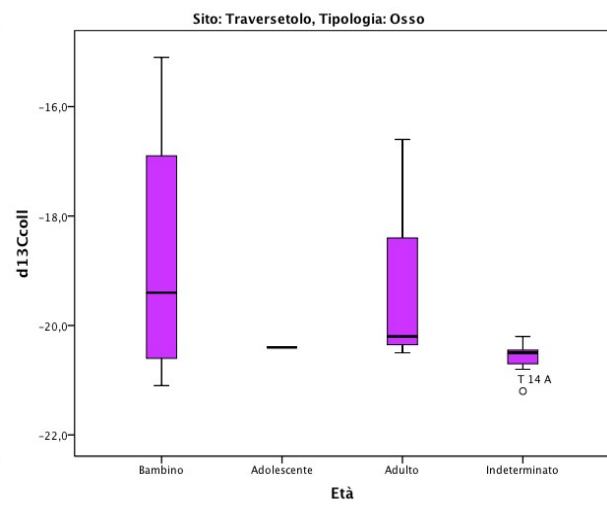
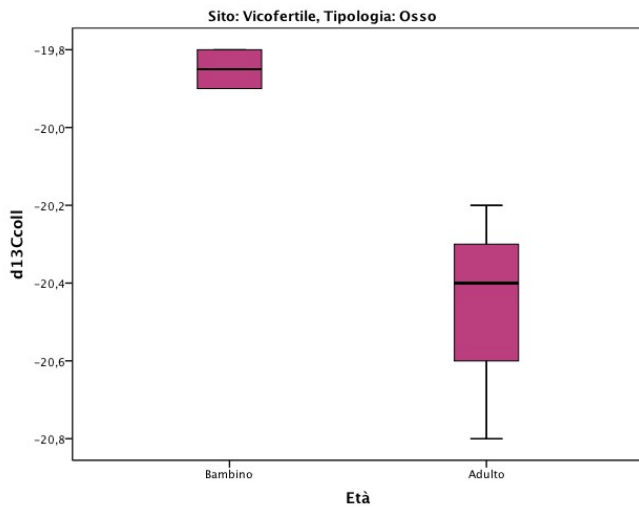
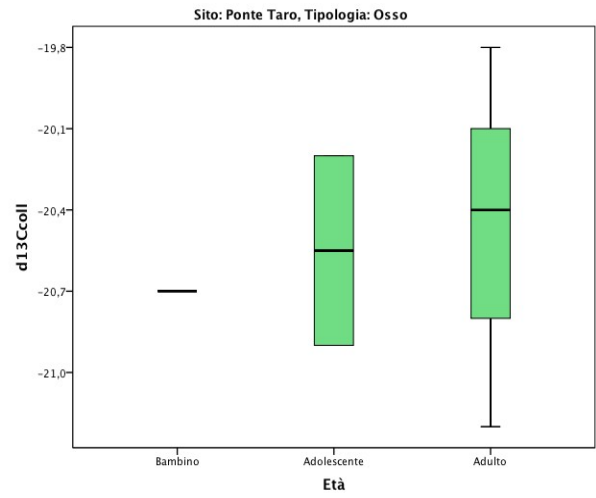
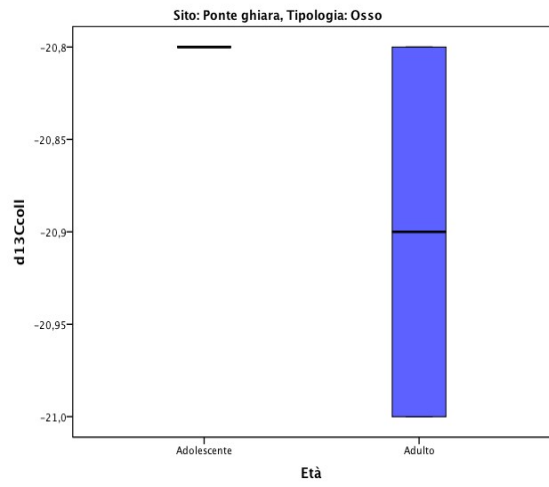
## Elaborazione statistica del $\delta^{18}\text{C}$ collagene dei siti per sesso



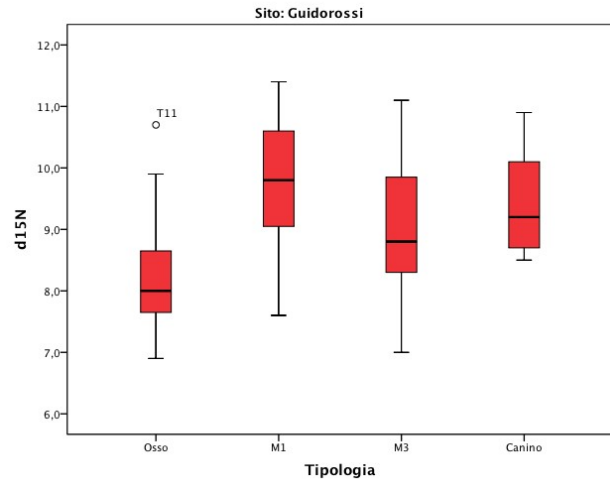
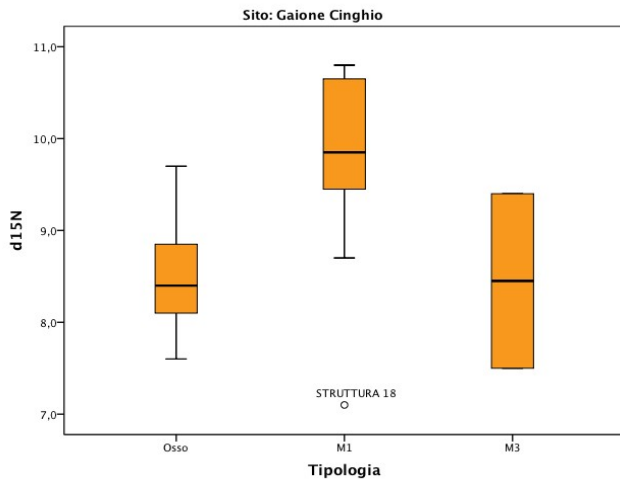
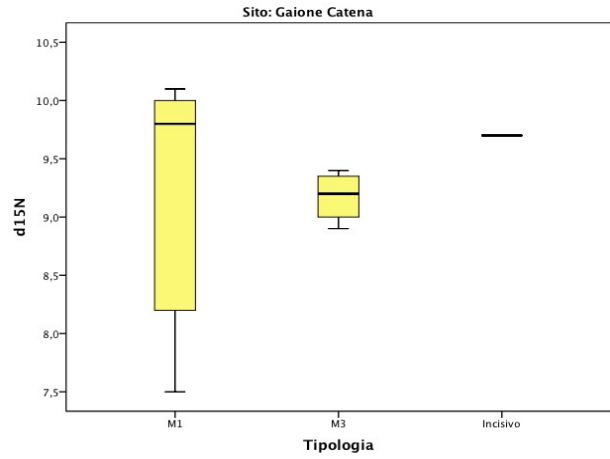
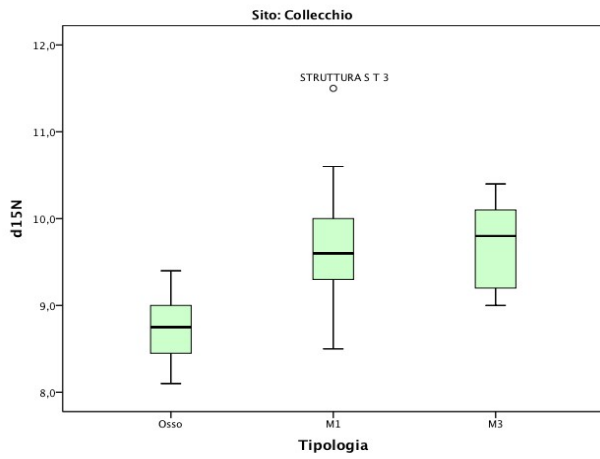
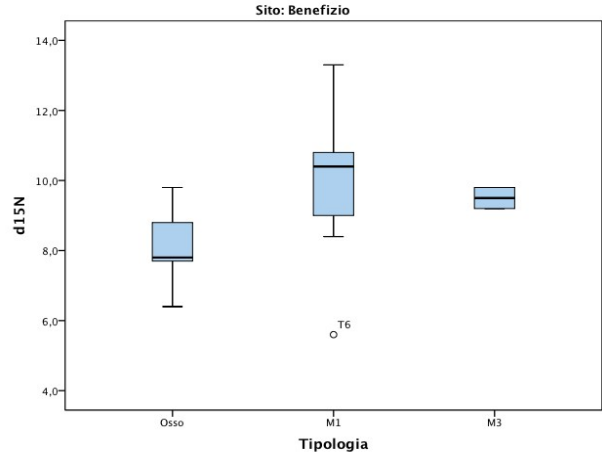
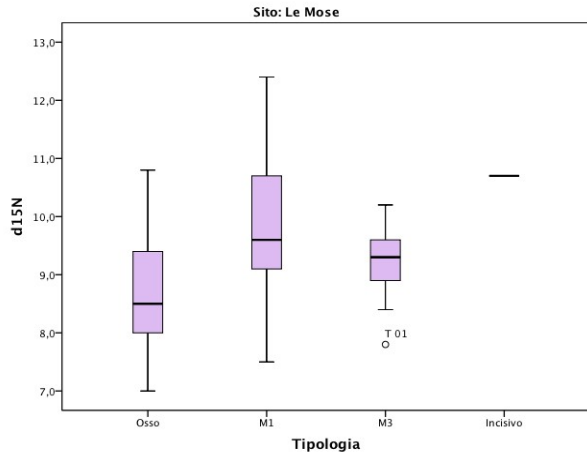


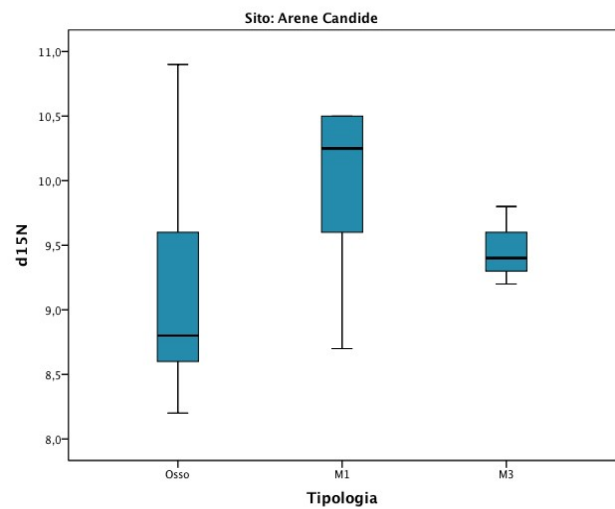
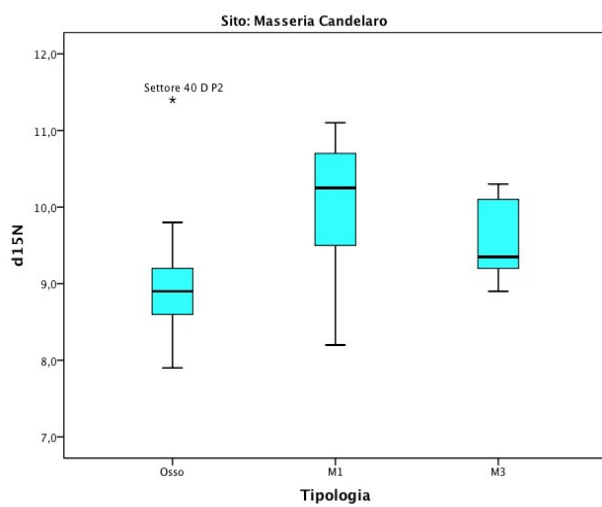
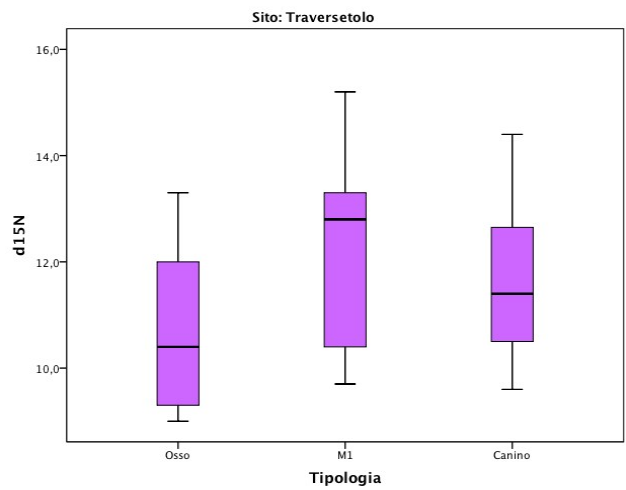
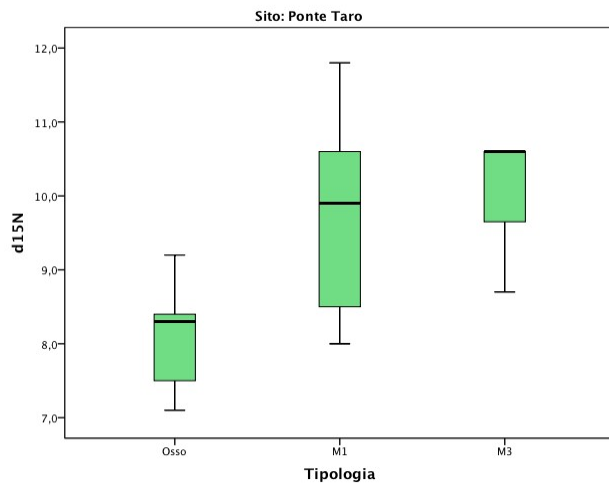
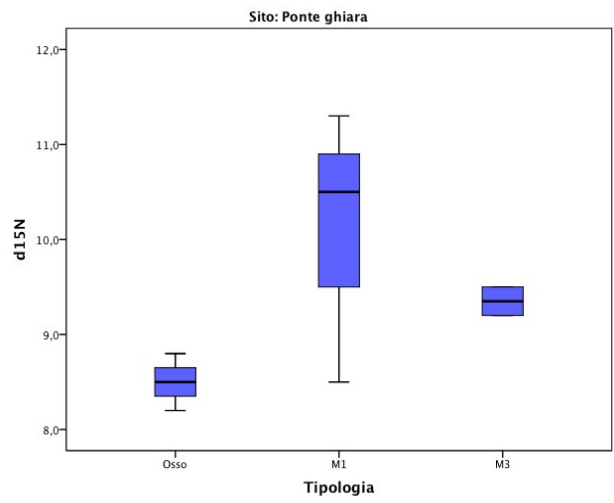
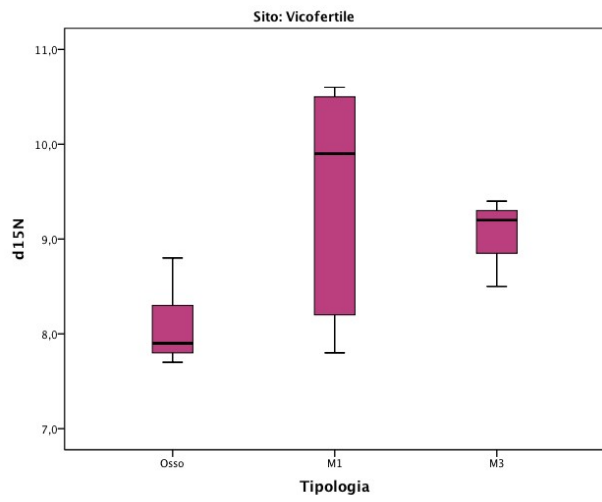
## Elaborazione statistica del $\delta^{18}\text{C}_{\text{collagene}}$ dei siti per età al momento della morte



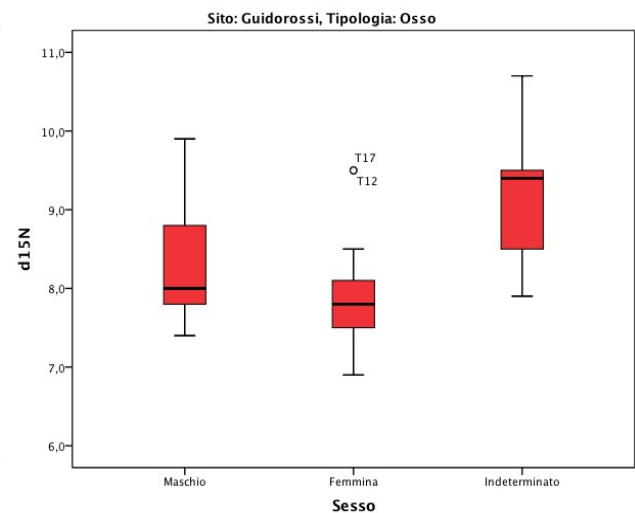
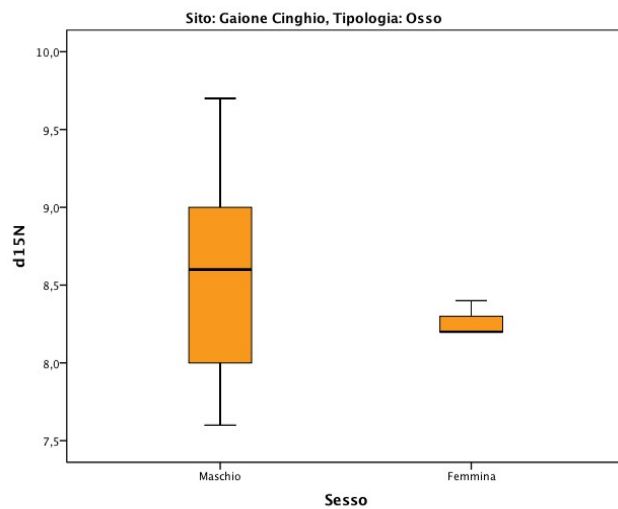
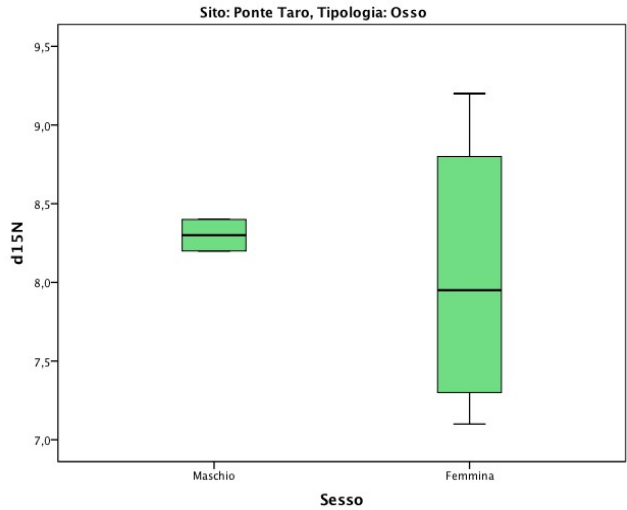
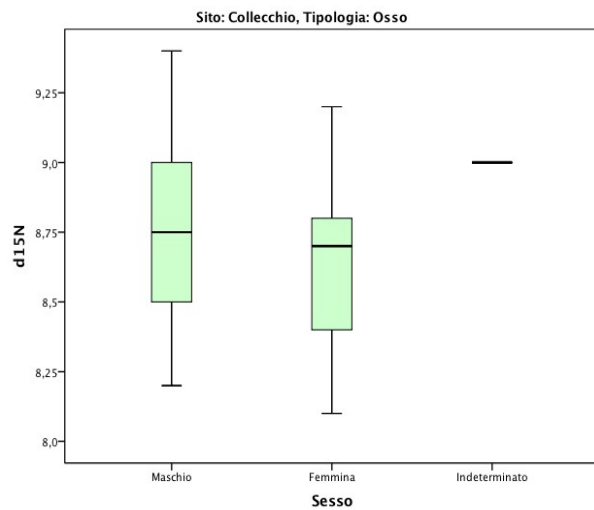
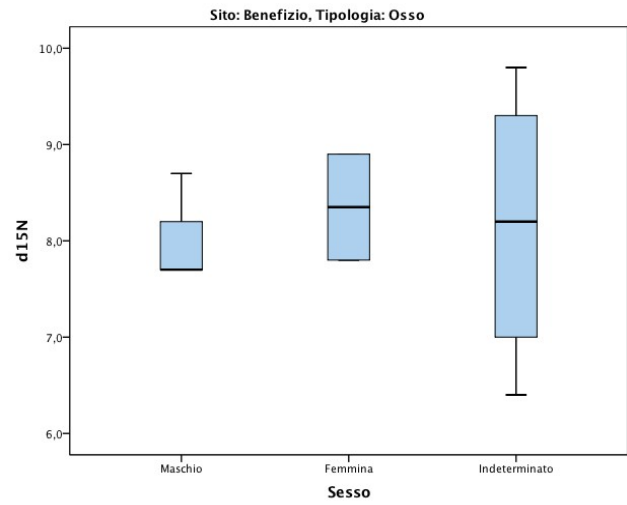
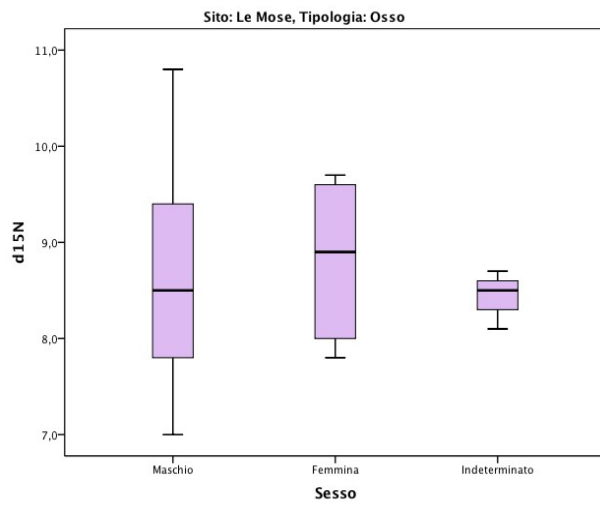


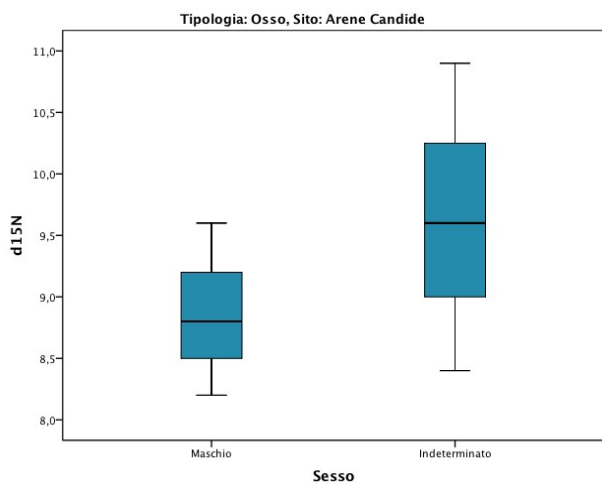
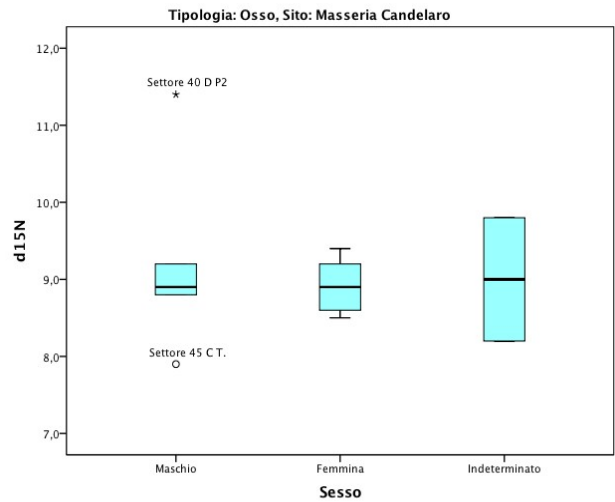
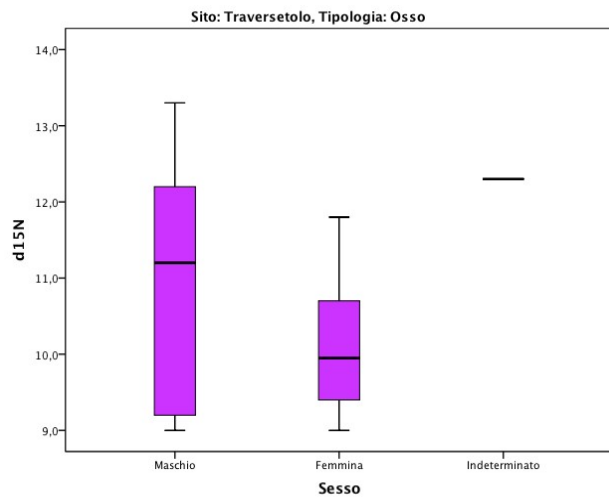
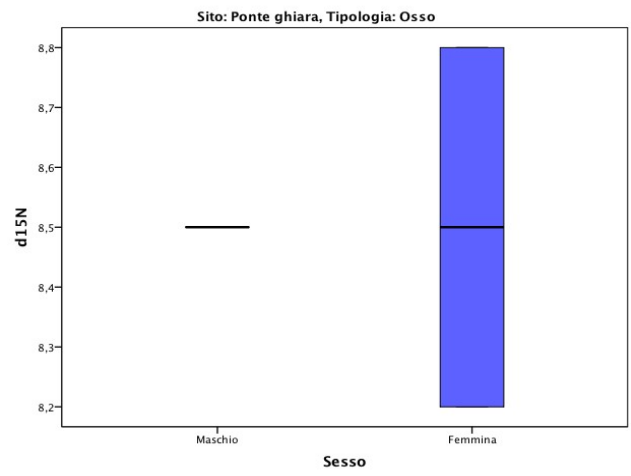
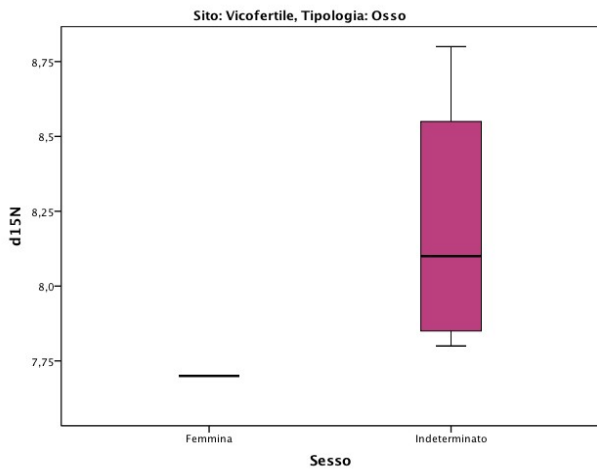
## Elaborazione statistica del $\delta^{15}\text{N}$ collagene dei siti per tipologia



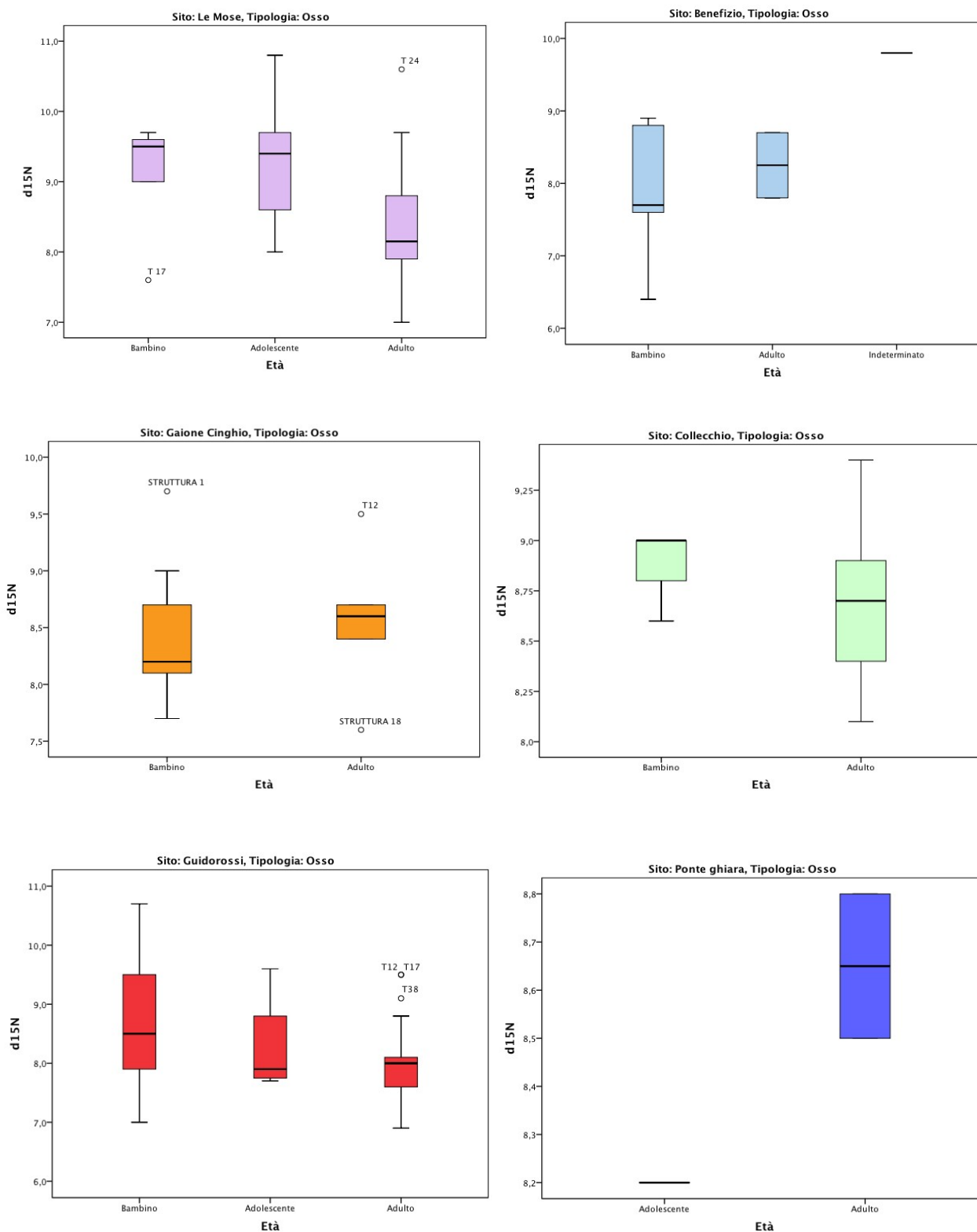


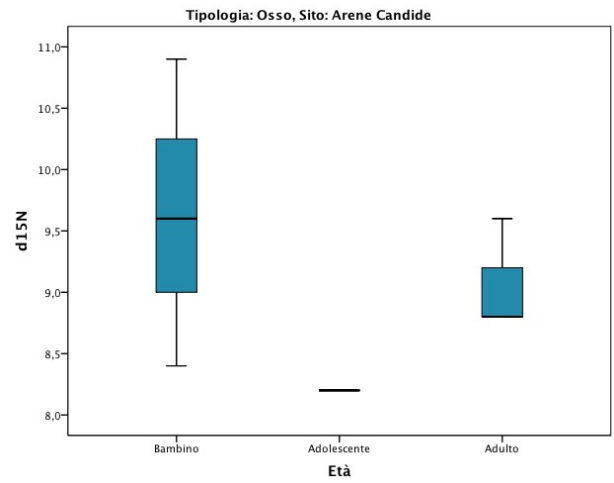
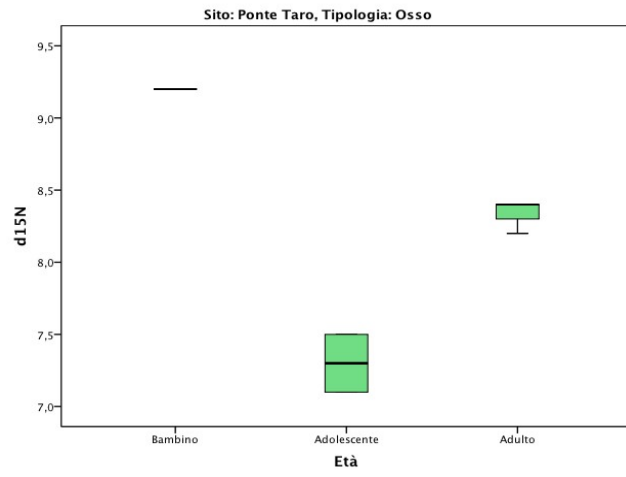
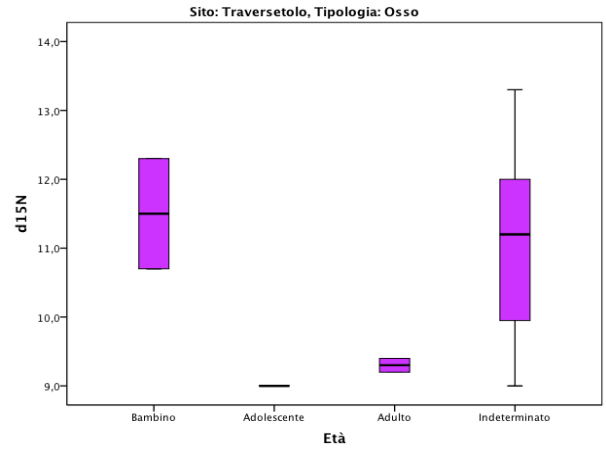
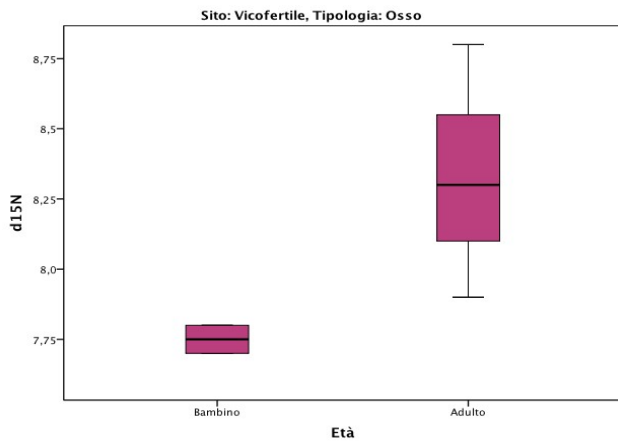
## Elaborazione statistica del $\delta^{15}\text{N}$ collagene dei siti per sesso

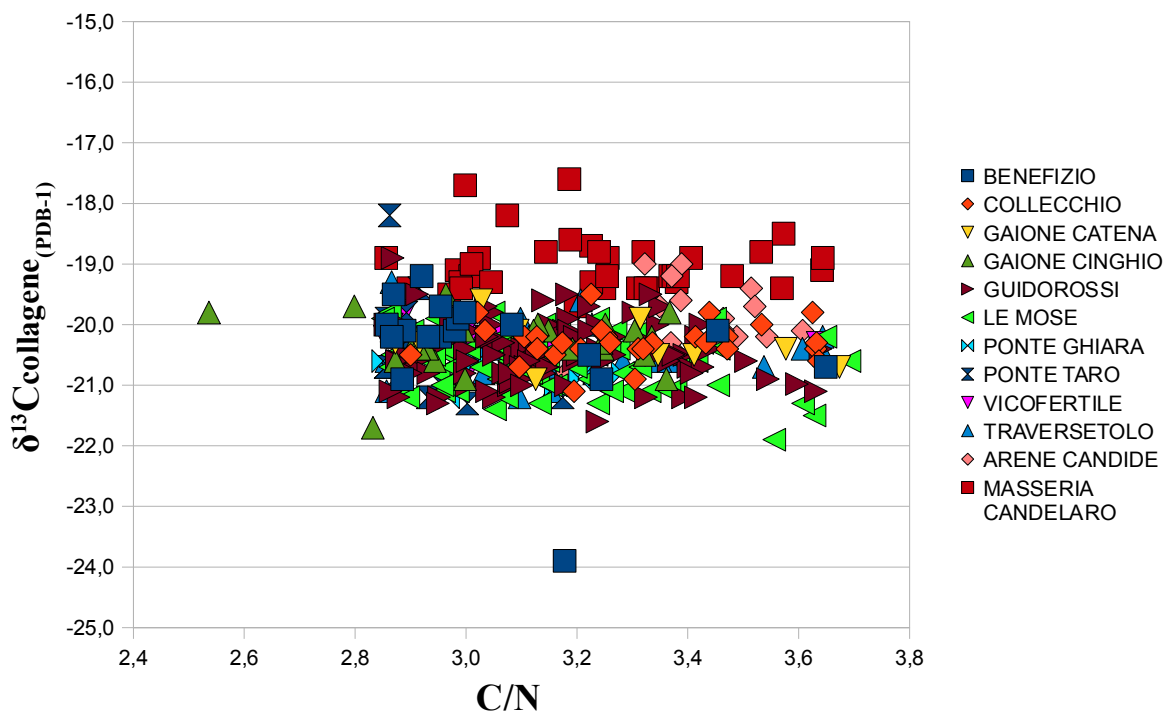
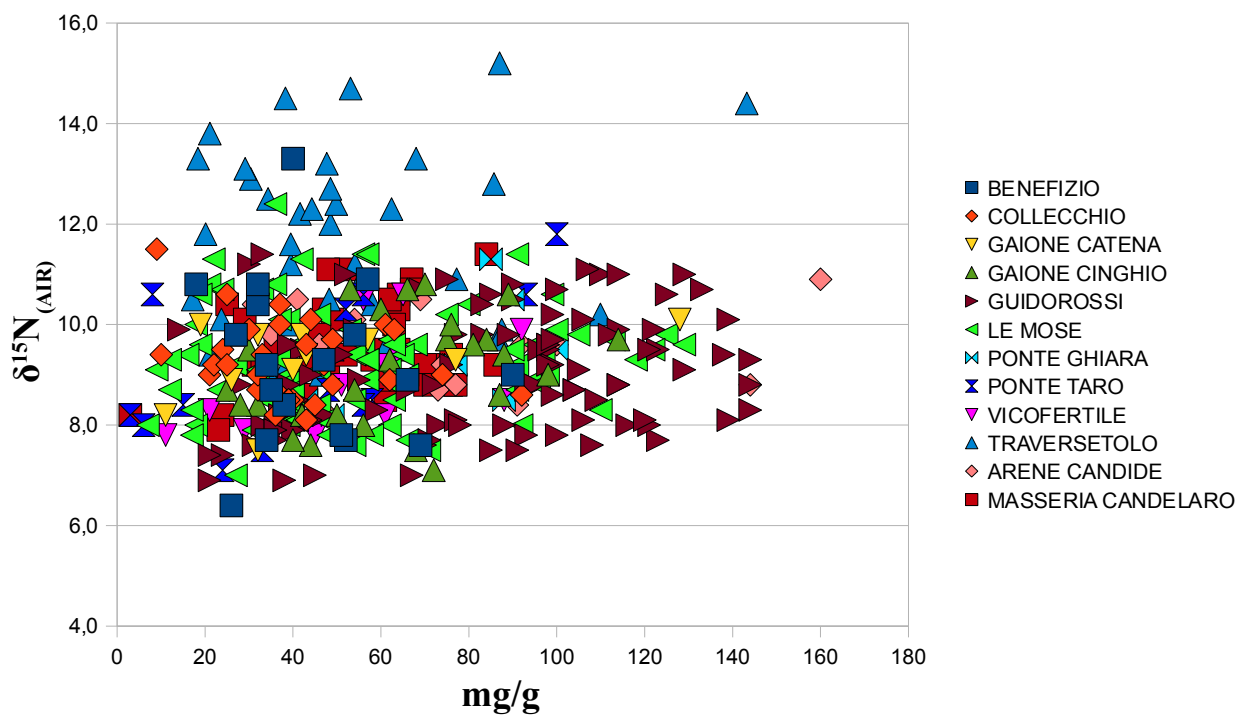




## Elaborazione statistica del $\delta^{18}\text{C}$ Collagene dei siti per età al momento della morte





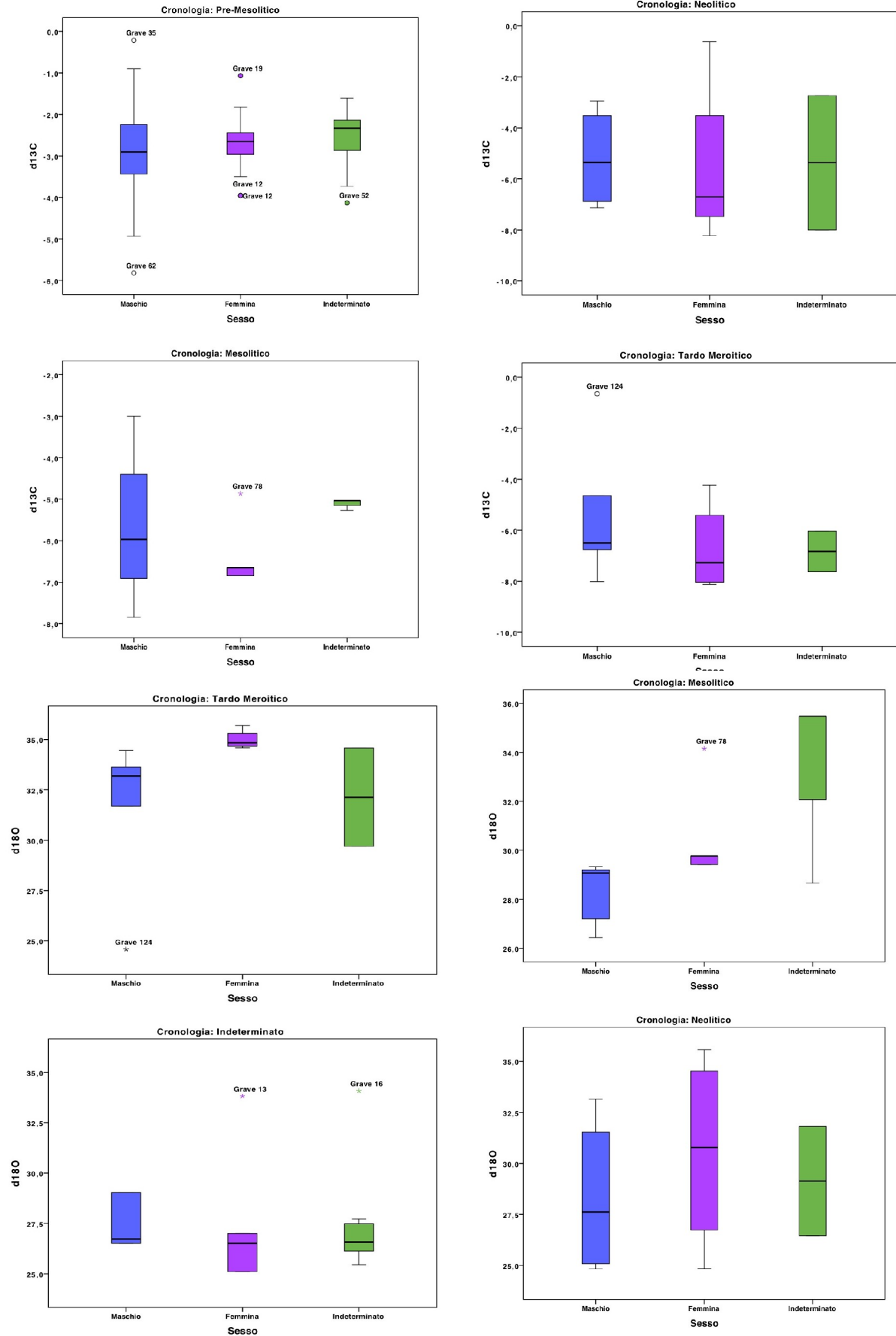


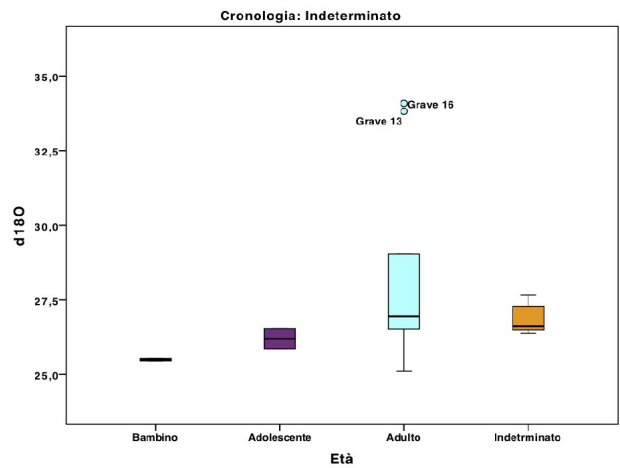
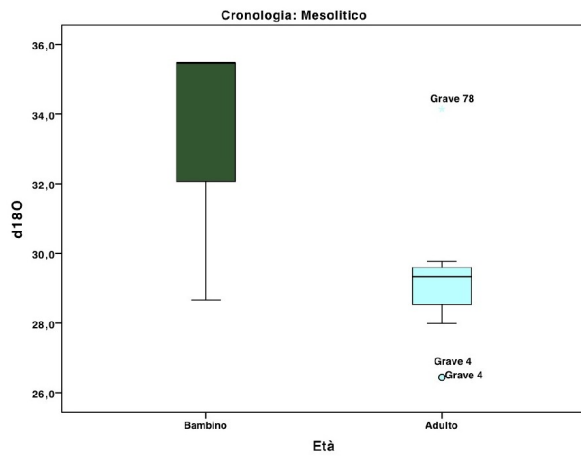
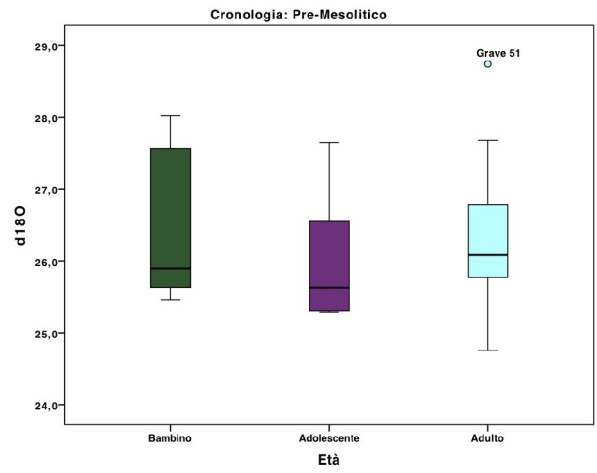
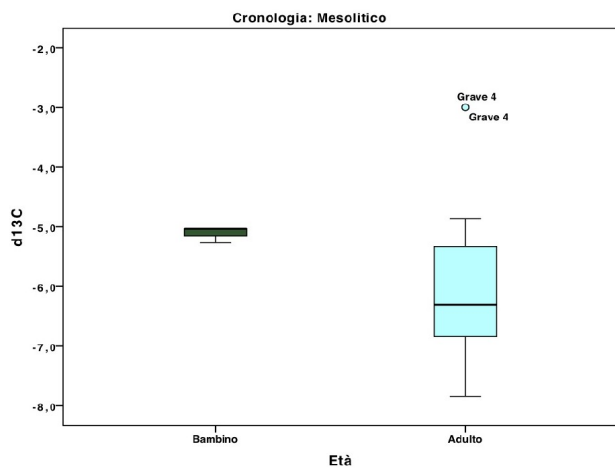
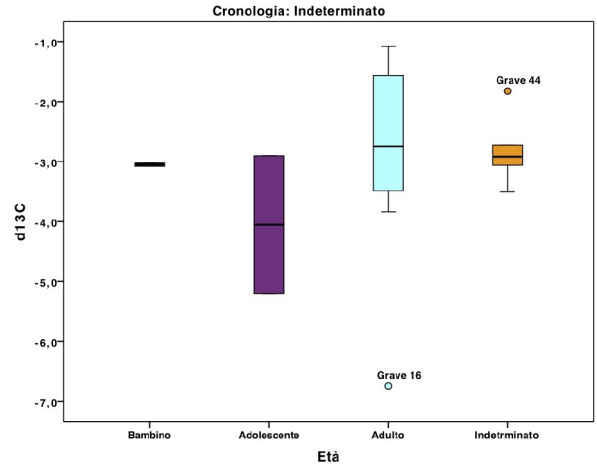
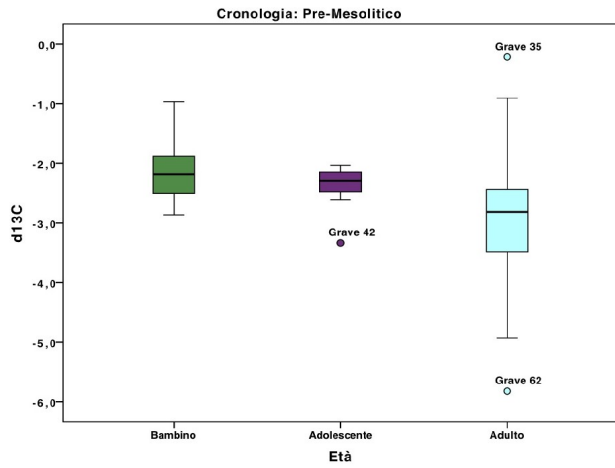
UMANI DI AL KHIDAY 2							
Campione	$\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$	$\delta^{18}\text{O}_{(\text{V-SMOW})}$	Cronologia	Sesso	Età	$\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}_{(\text{V-SMOW})}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{dieta}}_{(\text{PDB})}$
Grave 2	-5,0	35,5	M?	N/A	B	6,1	-14,4
Grave 3	-6,8	29,4	M?	F	A	-3,2	-16,3
Grave 4	-3,0	26,4	M?	M	A	-7,8	-12,3
Grave 5	-3,5	29,0	?	M	A	-3,8	-12,8
Grave 6	-1,5	26,5	?	M	A	-7,7	-10,8
Grave 7	-2,2	25,1	?	F	A	-9,9	-11,5
Grave 8	-6,0	29,3	M?	M	A	-3,4	-15,4
Grave 9	-7,8	29,1	M?	M	A	-3,8	-17,4
Grave 10-I	-6,7	29,8	M?	F	A	-2,7	-16,1
Grave 11	-2,2	25,8	pre-M	M	A	-8,8	-11,5
Grave 12	-4,0	26,1	pre-M	F	A	-8,4	-13,3
Grave 13	-3,8	33,8	?	F	A	3,6	-13,2
Grave 14	-1,9	26,1	pre-M	M	A	-8,4	-11,2
Grave 15	-2,5	27,3	?	?	A	-6,5	-11,8
Grave 16	-6,7	34,1	?	?	A	4,0	-16,2
Grave 18	-2,8	27,7	pre-M	F	A	-5,9	-12,1
Grave 19	-1,1	27,1	pre-M	F	A	-6,9	-10,3
Grave 20	-3,8	26,9	pre-M	M	A	-7,1	-13,2
Grave 21	-7,5	35,3	N?	F	A	5,8	-17,0
Grave 23	-2,5	25,5	pre-M	?	B	-9,3	-11,8
Grave 24	-3,5	26,8	pre-M	M?	A	-7,3	-12,8
Grave 26	-2,9	25,7	pre-M	F	A	-9,0	-12,2
Grave 27	-1,6	26,6	?	M	A	-7,6	-10,8
Grave 30	-2,2	25,2	pre-M	F	A	-9,8	-11,5
Grave 31	-1,8	31,4	N?	F?	A	-0,2	-11,0
Grave 32	-8,1	35,7	Mer	F	A	6,5	-17,7
Grave 34	-7,6	35,6	N?	F	A	6,3	-17,1
Grave 35	-0,2	26,3	pre-M	M	A	-8,0	-9,4
Grave 36	-7,1	33,1	N?	M	A	2,5	-16,6
Grave 37	-2,0	25,3	pre-M	?	AD	-9,6	-11,3
Grave 39	-5,8	28,0	M?	M	A	-5,4	-15,2
Grave 40	-3,5	27,7	?	?	A	-5,8	-12,8
Grave 41	-3,5	26,3	pre-M	F	A	-8,0	-12,8
Grave 42	-3,3	27,6	pre-M	?	AD	-6,0	-12,7
Grave 43	-2,2	25,6	pre-M?	?	B	-9,1	-11,5
Grave 44	-1,8	26,6	?	?	I	-7,6	-11,1
Grave 45	-2,6	27,2	pre-M	F	A	-6,7	-11,9
Grave 46	-7,6	29,7	Mer	?	I	-2,8	-17,1
Grave 47	-4,2	34,8	Mer	F	A	5,1	-13,6
Grave 48	-1,0	27,6	pre-M	M	B	-6,1	-10,2
Grave 49	-3,7	26,7	pre-M	M	A	-7,4	-13,0
Grave 50	-6,6	34,9	Mer	F	A	5,3	-16,1
Grave 50 baby	-6,0	34,6	Mer	?	B	4,7	-15,5
Grave 51	-1,6	28,7	pre-M	?	A	-4,3	-10,9
Grave 52	-4,1	26,3	pre-M	?	A	-8,0	-13,5
Grave 53	-3,1	25,5	?	?	B	-9,2	-12,4
Grave 54	-6,5	31,7	Mer	M	A	0,3	-16,0
Grave 55	-3,4	26,1	pre-M	M	A	-8,4	-12,7
Grave 56	-3,3	25,9	pre-M	M	A	-8,7	-12,6
Grave 57	-3,1	26,4	?	?	I	-7,9	-12,4
Grave 58	-8,0	33,2	Mer	M	A	2,6	-17,5
Grave 59	-5,3	28,7	M?	?	B	-4,4	-14,7
Grave 60	-2,6	26,8	pre-M	?	AD	-7,3	-11,9
Grave 61	-3,5	27,3	?	?	I	-6,5	-12,8
Grave 62	-5,8	26,0	pre-M	M	A	-8,5	-15,3

UMANI DI AL KHIDAY 2							
Campione	$\delta^{13}\text{C}$ <sub>(PDB)</sub>	$\delta^{18}\text{O}$ <sub>(V-SMOW)</sub>	Cronologia	Sesso	Età	$\delta^{18}\text{O}$ <sub>Acqua</sub> <sub>(V-SMOW)</sub>	$\delta^{13}\text{C}$ <sub>dieta</sub> <sub>(PDB)</sub>
Grave 63	-2,3	26,6	pre-M	?	A	-7,6	-11,6
Grave 64	-3,3	25,4	pre-M	M	A	-9,4	-12,6
Grave 65	-3,7	26,5	pre-M	?	A	-7,7	-13,1
Grave 66	-2,9	26,5	?	?	I	-7,8	-12,2
Grave 70	-2,7	27,7	?	?	I	-5,9	-12,0
Grave 71	-4,9	26,0	pre-M	M	A	-8,4	-14,3
Grave 72	-2,5	27,3	pre-M	F	A	-6,5	-11,7
Grave 73	-2,7	25,8	pre-M	M	A	-8,9	-12,0
Grave 75	-2,9	26,5	?	?	AD	-7,7	-12,2
Grave 76	-2,1	26,3	pre-M	M	AD	-8,0	-11,4
Grave 77	-3,3	25,2	pre-M	M	A	-9,7	-12,6
Grave 78	-4,9	34,1	M?	F	A	4,1	-14,3
Grave 80	-2,5	26,6	pre-M	F	A	-7,6	-11,8
Grave 82	-1,9	25,9	pre-M	?	B	-8,7	-11,2
Grave 83	-2,5	26,8	pre-M	M	A	-7,3	-11,8
Grave 84	-2,9	28,0	pre-M		B	-5,4	-12,2
Grave 85	-4,0	26,8	pre-M	M	A	-7,3	-13,4
Grave 88	-2,5	26,2	pre-M	M	A	-8,2	-11,8
Grave 90	-8,2	34,4	N?	F	A	4,5	-17,8
Grave 93	-5,1	28,0	N	F	A	-5,5	-14,5
Grave 95	-7,2	34,6	N	F	A	4,8	-16,7
Grave 96	-7,4	31,3	N	F	A	-0,2	-16,9
Grave 98	-6,6	29,9	N	M	A	-2,5	-16,1
Grave 99-I	-4,6	33,6	Mer	M	A	3,3	-14,0
Grave 100	-7,9	34,6	Mer	F	A	4,8	-17,5
Grave 103	-6,2	28,9	N	F	A	-4,1	-15,7
Grave 104	-7,4	30,2	N	F	A	-2,0	-16,9
Grave 106	-6,8	34,4	Mer	M	A	4,6	-16,2
Grave 107	-8,0	31,8	N	?	A	0,5	-17,5
Grave 110	-3,4	27,3	pre-M	M	A	-6,5	-12,8
Grave 111	-1,8	25,3	pre-M	F	A	-9,6	-11,1
Grave 116	-0,6	24,8	N?	F?	A	-10,3	-9,8
Grave 117	-3,0	26,0	pre-M	F	A	-8,5	-12,3
Grave 118	-1,1	26,5	?	F?	A	-7,7	-10,3
Grave 120	-4,5	25,5	N?	F	A	-9,3	-13,9
Grave 121	-2,4	25,3	pre-M	N/A	AD	-9,6	-11,6
Grave 123	-2,6	24,8	pre-M	M	A	-10,4	-11,9
Grave 124	-0,7	24,6	pre-M	M	A	-10,7	-9,9
Grave 126	-2,1	25,3	pre-M?	N/A	AD	-9,6	-11,4
Grave 127	-3,7	26,9	?	M	A	-7,1	-13,0
Grave 128	-4,1	25,3	N?	M?	A	-9,5	-13,5
Grave 130	-5,2	25,9	?	N/A	AD	-8,7	-14,6
Grave 131	-3,1	25,1	pre-M?	M	A	-9,8	-12,4
Grave 132	-3,4	26,4	pre-M	M	A	-7,9	-12,7
Grave 133	-3,0	27,0	?	F?	A	-7,0	-12,3
Grave 135	-3,0	25,5	?	N/A	B	-9,4	-12,3
Grave 141	-2,7	26,5	N?	?	A	-7,8	-12,0
Grave 142	-2,5	25,3	N?	F	A	-9,7	-11,8
Grave 143	-2,9	26,1	pre-M?	F?	A	-8,4	-12,2
Grave 147	-0,9	24,9	pre-M	M	A	-10,3	-10,1
Grave 148	-2,4	27,5	pre-M?	F?	A	-6,2	-11,7
Grave 150	-3,0	24,8	N?	M	A	-10,3	-12,3
Grave 151	-2,3	25,6	pre-M	N/A	AD	-9,1	-11,6
Grave 152	-2,7	25,1	pre-M	M	A	-9,8	-12,0
Grave 153	-2,6	25,2	pre-M	M	A	-9,7	-11,9

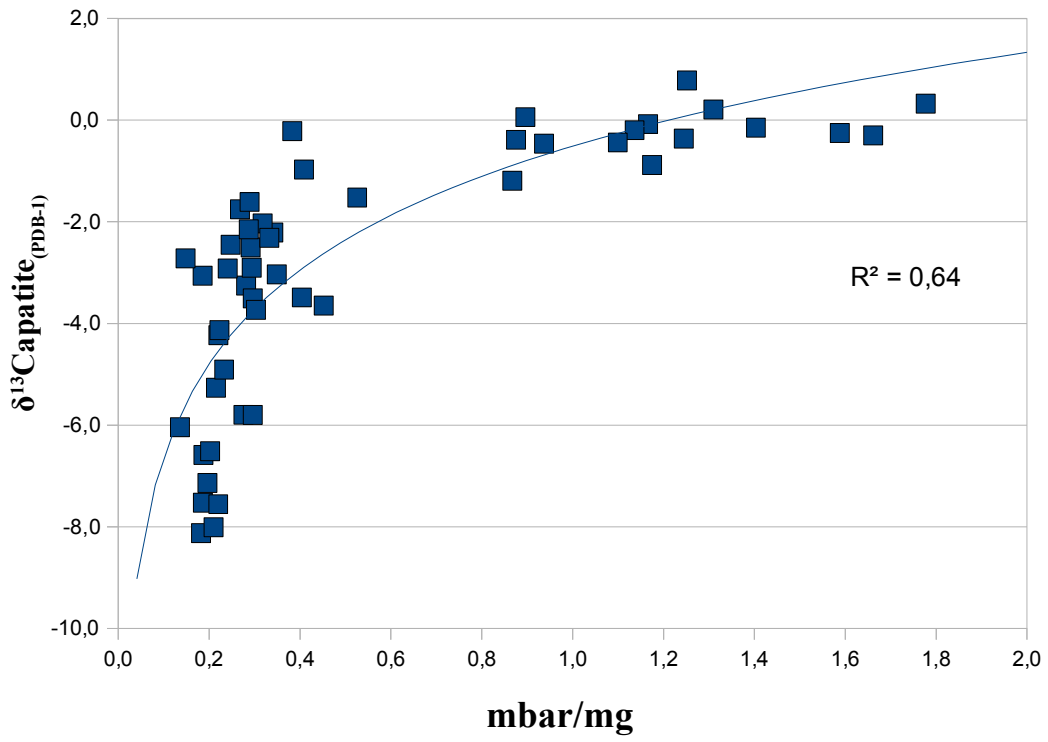
B=bambino(0-12) AD=adolescente(12-18) A=adulto(>18)  
 Pre-M= pre-Mesolitico M=Mesolitico N=Neolitico Mer= Meroitico

## Elaborazione statistica dei dati in funzione del sesso e dell'età al momento della morte

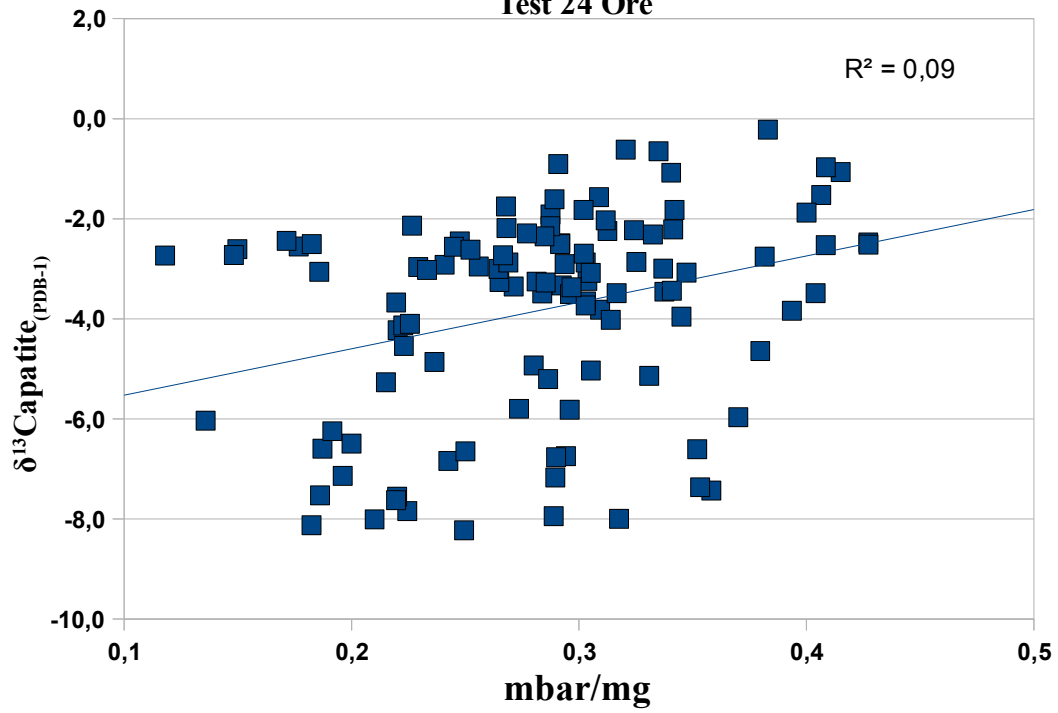




Test 12 Ore



Test 24 Ore



ANIMALI DI AL KHIDAY			
Campione	Tipologia	$^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$	$\delta^{18}\text{O}_{(\text{V-SMOW})}$
462 A	Bovid	-0,6	26,0
462 B	Bovid	-3,1	25,9
462 C	Bovid	-0,8	27,1
462 D	Rhino	-8,6	28,5
462 E	Bovid	-1,2	24,0
462 F	Bovid	-1,6	21,0
455 A	Bovid	0,1	24,9
455 B	Bovid	-1,6	24,8
455 C	Bovid	-0,5	29,0
455 D	Bovid	-0,1	24,5
455 E	Bovid	-4,1	24,5
452 A	Bovid	0,5	29,0
452 B	Bovid	-8,1	24,4
452 C	Bovid	-0,2	29,9
452 D	Bovid	-0,1	30,3
452 E	Bovid	0,2	29,8
48 B	Bovid	-0,4	27,7
48 C	Bovid	0,0	26,9
48 D	Bovid	1,2	29,0
48 E	Bovid	0,4	28,5
48 F	Bovid	0,2	29,3
38 A	Bovid	1,1	29,5
38 B	Bovid	0,4	28,1
38 C	Bovid	0,7	28,0
38 D	Bovid	1,0	29,4
38 E	Bovid	0,7	29,3
455 F	Phacochoerus	-4,0	25,5
455 G	Carnivore	-4,9	24,8
444 A	Carnivore	-4,9	26,4
48 A	Carnivore	-2,5	25,1
38 F	Carnivore	0,0	28,2
38 G	Carnivore	-2,3	27,2
38 H	Carnivore	-2,0	30,3
48 G	Fish	-2,4	26,5
48 H	Fish	-1,7	26,8
48 I	Fish	-2,0	29,0
48 L	Fish	-3,1	22,5
48 M	Fish	-0,9	26,0
38 I	Fish	-3,6	24,4
38 L	Fish	-3,8	24,1
38 M	Fish	-3,1	25,7
38 N	Fish	-2,0	28,0
38 O	Fish	-1,9	27,8
455 H	Fish	-2,9	26,8
455 I	Fish	-3,7	22,9
455 L	Fish	-3,0	23,7
455 M	Fish	-2,1	26,2
455 N	Fish	-0,9	25,4
444 B	Fish	-2,2	25,2
444 C	Fish	-4,5	20,6
444 D	Fish	-1,6	27,6

Arene Candide		$\delta^{13}\text{C}$ Capatite (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ collagene (PDB)	$\delta^{15}\text{N}$ (AIR)
T IV Caprino	Osso	-12,7	29,4	-20,7	3,7
T IV Maiale 1	Osso	-10,1	29,4	-21,2	5,1
T IV Tasso	Osso	-13,4	29,8	-19,5	7,4
T IV Maiale 2	Osso	-14,4	28,5		
Benefizio					
US2680 BUE	Osso	-11,9	27,2	-19,8	5,6
S2680 OVICAPRIN	Osso	-11,8	25,1	-19,8	5,3
S2680 OVICAPRIN	Dente	-12,1	24,6	-16,7	8,0
US2701 MAIALE	Dente	-13,1	27,1	-21,0	7,1
US2701 MAIALE	Osso	-12,6	24,6	-20,3	6,9
US2701 PECORA	Osso	-12,7	26,2	-20,9	6,8
Collecchio					
S185 OVICAPRIN		-13,4	26,2	-20,9	5,5
US185 BUE		-10,7	25,2	-20,1	4,8
Le Mose					
ovicaprino	Osso	-13,5		-22,5	
cinghiale	Osso	-11,5	27,4	-20,7	
maiale	Osso	-13,3	24,7	-20,7	
Masseria Candelaro			25,2		
Cane	Osso	-12,7	27,9		
Maiale	Osso	-13,3	29,7		
Ovicaprino	Osso	-13,2	29,8		
Bue	Osso	-11,1	27,5		
Ponte Taro					
US 92 CERVO	Osso	-12,5	25,9	-22,0	4,2
US 92 BUE	Osso	-11,5	25,9	-20,6	3,7
US 92 MAIALE	Dente	-13,4	25,2	-20,4	5,0
US 92 MAIALE	Osso	-14,5	25,0	-21,1	6,9
S 130 OVICAPRIN	Osso	-12,3	25,7	-21,0	4,4

