



Isótopos estáveis em reconstrução paleodietética na costa do Brasil: recomendações para uma agenda de pesquisa arqueológica

Luis Pezo-Lanfranco* e André Carlo Colonese**

* Laboratório de Antropologia Biológica, Departamento de Genética e Biologia Evolutiva, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, Brasil & Institute of Environmental Science and Technology (ICTA), Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Espanha, Luis.Pezo@uab.cat

** Department of Prehistory & Institute of Environmental Science and Technology (ICTA), Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Espanha, andrecarlo.colonese@uab.cat

Recibido el 21 de marzo de 2022, aceptado para su publicación el 20 de mayo de 2022.

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.7234211>

Palavras-chave:

isótopos estáveis de carbono e nitrogênio;
colágeno;
apatita;
dieta e interações tróficas.

Key words:

stable carbon and nitrogen isotopes;
collagen;
apatite;
diet and trophic interactions.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivos: a) refletir sobre o potencial de aplicação dos métodos de análise isotópica para o estudo arqueológico da dieta, e b) fazer algumas recomendações para abordar problemas arqueológicos com estes métodos em populações pré-coloniais e históricas no litoral do Brasil. Para tanto, fazemos uma introdução aos princípios gerais dos métodos isotópicos e suas aplicações, e discutimos o avanço atual do conhecimento sobre a matéria na região, formulando algumas ideias sobre a diversidade de temas que podem ser abordados em pesquisas futuras com isótopos estáveis.

ABSTRACT

This study aims a) to reflect on the potential application of stable isotopes for the archaeological study of diet, and b) to make some recommendations to address archaeological problems with isotopic methods in pre-colonial and historical populations on the Brazilian coast. To reach these objectives, we introduce the reader to the general principles of stable isotopes and their applications, discussing the some of the most significant advances on the subject in the region, and developing some ideas on the diversity of topics that can be addressed in future research with stable isotopes.



Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución - No Comercial 2.5 Argentina.

1. O estudo arqueológico da dieta

O estudo da dieta fornece valiosa informação sobre o modo de vida das populações humanas. Do ponto de vista arqueológico, muito além dos itens do cardápio, a reconstrução paleodietética permite aproximações aos sistemas e tecnologias de produção, processamento, conservação e preparo do alimento, às formas de partilha e seu impacto no desenvolvimento e saúde dos indivíduos, entre outras muitas informações.

Da perspectiva biocultural, várias teorias interpretam a produção de alimento como um mecanismo de previsão contra eventuais riscos futuros. A partir da sua partilha, o alimento é usado para construir prestígio, criar dívida social, travar alianças com os pares e cimentar relações de reciprocidade úteis à sobrevivência, tanto em eventos específicos de integração social (i.e., banquetes ou festas) quanto durante a vida cotidiana, (Hayden, 2009; Kujit, 2009).

Dentro da esfera simbólica, o alimento funciona como um veículo de expressão de identidade cultural e tem uma forte conexão com a memória individual e

coletiva. Entre os humanos o consumo de alimentos está fortemente socializado e até ritualizado (Lévi-Strauss, 1968). Sua produção e partilha criam espaços de encontro propícios para a interação social e a troca de informação. Saber o que um povo comia é essencial para entender detalhes sobre seus costumes, cosmovisão e circunstâncias em que se reproduzia a vida social (Flandrin & Montanari, 1996).

O alimento é um elemento capital nos mecanismos de comércio pré-histórico e fator crucial nos processos de urbanização e complexificação social (Oka & Kusimba, 2008). Há uma série de questões arqueológicas sobre estruturas de poder, distribuição social do trabalho, atribuições de gênero, hierarquização social, diferenças de acesso a recursos etc., que podem ser respondidas através da dieta (White, 2005; Kellner & Schoeninger, 2008), mas para poder respondê-las com propriedade precisamos conhecer aqueles “pequenos” detalhes sobre o quê comiam os indivíduos.

A arqueologia utiliza diversas abordagens analíticas para se aproximar das dietas do passado. Os estudos de macro-restos de fauna costumam ser as mais comuns

devido à boa preservação relativa dos materiais calcificados ou queratinizados (ossos, cochas, carapaças etc.: Lyman, 2008). Estudos de macro-vestígios de plantas dos contextos arqueológicos, assim como de micro-vestígios contidos em sedimentos, artefatos, ferramentas, ou cálculo dentário, são abordagens fundamentais para descobrir sua importância nas dietas (Pearsall, 2015). Inclusive abordagens bioantropológicas, que estudam o efeito das dietas na biologia dos indivíduos, têm aportado dados fundamentais para entender o impacto das grandes transições dietéticas da história humana (Cohen & Crane-Kramer, 2008). Porém, todas elas possuem vantagens e limitações fortemente condicionadas pelo potencial de preservação e visibilidade dos vestígios nos contextos arqueológicos (Lyman, 1994), e devem ser integradas para uma correta interpretação dos dados.

Em anos recentes, as abordagens biomoleculares têm surgido como uma alternativa metodologicamente robusta para extrair informações dietéticas de biomoléculas preservadas em uma variedade de repositórios. Dentre elas, a mais amplamente utilizada é a análise de isótopos estáveis, que permite obter informação sobre a composição da dieta e padrões de mobilidade de indivíduos e grupos, e condições ambientais (Schoeninger, 2010). Neste trabalho, dirigido a uma audiência lusófona e pouco especializada no tema, discutiremos sobre suas aplicações na reconstrução da

dieta (i.e., isótopos de carbono e nitrogênio), focando nas comunidades pré-coloniais e históricas da costa brasileira, e faremos algumas recomendações sobre tópicos que poderiam ser abordados com análises isotópicas e que, a nosso critério, precisam ser incluídos na “agenda” de pesquisa arqueológica desta região.

2. A costa brasileira como laboratório para estudos isotópicos na América do Sul

A costa do Brasil é uma faixa litorânea que se estende por 7491 km à beira do oceano Atlântico e pode ser dividida em pelo menos quatro regiões (Figura 1): a) costa norte, marcada pela presença da foz do rio Amazonas, a Floresta Amazônica e a corrente de águas equatoriais quentes das Guianas, onde abundam restingas, lagunas e manguezais; b) costa nordeste, a mais extensa e variada em ambientes costeiros (praias, falésias, lagoas, recifes, coqueirais) caracterizada pelas altas temperaturas marinhas da corrente do Brasil; c) a costa sudeste, uma faixa litorânea de largura variável que se estende entre o oceano Atlântico e a Serra do Mar, dominada pelo ecossistema Mata Atlântica, com baixadas, restingas, baías, lagunas, estuários e manguezais; e d) a costa sul, com extensões da Mata Atlântica, caracterizada pelas costas baixas de arena e grandes lagunas, banhada pela corrente fria das Malvinas (Short & Klein, 2016).



Figura 1. Costa do Brasil e áreas de interesse arqueológico (mapa base Natural Earth, 2021).



Por suas dimensões continentais, variedade de ecossistemas e longa ocupação, a costa brasileira é um “laboratório arqueológico” com potencial para estudar uma ampla variedade de adaptações humanas aos ambientes aquáticos. Todas as regiões possuem um rico registro arqueológico pré-histórico e histórico. A costa norte caracteriza-se por uma longa ocupação (~8000 BP) que vai dos construtores de montículos com cerâmica da Ilha de Marajó e do litoral Paraense e Maranhense, até os povos ribeirinhos da época colonial (Bandeira, 2011; Pugliese et al., 2018). Na costa nordeste, o registro pré-histórico é mais limitado pela falta de pesquisas, mas a região foi especialmente relevante durante o período colonial (Gaspar, 2014). Nas costas sudeste e sul a paisagem arqueológica está dominada pela presença de *sambaquis* e *cerritos*, sítios de grande importância para o desenvolvimento técnico-metodológico da arqueologia brasileira mais recente (De Blasis et al., 2007; Milheira & Gianotti, 2018).

Em geral, há uma necessidade de estudar as grandes mudanças econômicas que operaram nas populações costeiras brasileiras ao longo dos períodos pré-histórico e histórico. Apesar da noção dominante na teoria arqueológica da agricultura ter sido o motor das principais mudanças demográficas e socioeconômicas da história humana, novos dados vêm demonstrando o sucesso adaptativo de economias mistas baseadas no manejo e/ou cultivo de plantas (selvagens e domesticadas), caça e pesca, em áreas consideradas periféricas aos centros de domesticação, especialmente na América do Sul (Piperno, 2011) e, nesse sentido, o litoral do Brasil é um ímpar repositório de informação arqueológica sobre economias mistas de longa duração, importante para entender a relação dos sistemas de subsistência dependentes de recursos marinhos com a emergência de traços tipicamente associados ao desenvolvimento da agricultura, como sedentarismo, crescimento populacional e complexidade social (Moseley, 1975; Yesner, 1980; De Blasis et al., 2007; Milheira & Gianotti, 2018; Toso et al., 2021).

Por outro lado, persiste uma grande incerteza sobre a contribuição efetiva das plantas na dieta das populações costeiras, sobre o estado de domesticação destas, e seu papel na economia destes povos, anteriormente referidos como “pescadores-caçadores-coletores” e, atualmente reconhecidos como “sociedades de economia mista” (Toso et al., 2021) ou “pescadores-horticultores” (Scheel-Ybert & Boyadjian, 2020).

As populações costeiras, por terem uma subsistência com um aporte proteico de origem marinha relativamente garantido, possuem valores isotópicos teoricamente mais conservadores e, por tanto, mais sensíveis às mudanças na dieta, convenientes para estudar processos de transição nos sistemas de

produção de alimentos (*i.e.*, incremento do consumo de plantas provenientes do manejo ou domesticação, adoção e intensificação da agricultura, etc.). Há também várias questões em aberto sobre interações interpopulacionais (Okumura, 2008) e a adoção de novas formas de subsistência em relação à introdução da cerâmica em algumas regiões (De Blasis et al., 2007; Pugliese et al., 2018), assim como aspectos relacionados ao acesso diferenciado a várias categorias de alimento em função do sexo, idade, posição social, entre outros, dentro de um mesmo grupo. Por outro lado, as relações entre humanos e animais mais além do aspecto venatório, como comensalismo ou manejo, ainda se encontram pouco exploradas na arqueologia costeira no Brasil. É nessas áreas de pesquisa que os métodos de isótopos estáveis têm grandes aportes a fazer.

O rico registro de contextos arqueológicos costeiros do Brasil abre um leque de oportunidades para abordar diferentes problemas arqueológicos, alguns deles ainda inexplorados, com as ferramentas desta fascinante área de pesquisa. Idealmente, deveríamos fazer um exercício de “História Reversa”, analisando de início a dieta das populações históricas mais próximas, onde as mudanças dietéticas possam ser interpretadas à luz de informação historiográfica, para depois remontarmos para profundezas temporais cada vez maiores contrastando o registro arqueológico com a informação isotópica.

3. Os princípios da análise de isótopos estáveis na reconstrução da dieta

A importância atual dos métodos de isótopos estáveis no estudo da dieta mereceria uma síntese completa sobre sua base teórica e aplicações, mas, por questões de espaço, e porque estas sínteses já existem (vide Fry 2006; Martínez del Rio et al., 2009; Schoeninger, 2010; Price & Burton, 2011; Phillips, 2012), neste trabalho faremos apenas uma breve explicação dos princípios básicos destas análises.

Os isótopos (do grego “mesmo lugar”) são átomos de um elemento químico com o mesmo número atômico (mesmo número de prótons), mas diferente peso atômico (diferente número de nêutrons). Fora algumas exceções, a maior parte dos elementos químicos conhecidos possui isótopos “leves” e “pesados” com comportamento químico diferenciado nas reações químicas (Schoeninger, 2010). No caso do carbono, por exemplo, seu átomo possui 6 prótons e 6 nêutrons pelo que sua massa atômica é 12 (^{12}C), mas tem um isótopo “pesado” que possui 7 nêutrons no seu núcleo, o ^{13}C (sem atividade radiativa ou estável), e um isótopo com 8 nêutrons (radiativo ou instável), o ^{14}C (Fry, 2006; Panarello et al., 2021).

Nas cadeias tróficas, durante a transferência dos elementos químicos de uma fonte para outra, como por exemplo, dos tecidos vegetais para os tecidos animais (produtor e consumidor, respectivamente), diferentes velocidades de reação produzem taxas isotópicas (proporções de *isótopo pesado / isótopo leve*) também diferentes. Como a velocidade de reação depende da massa dos átomos dos elementos envolvidos, geralmente as reações costumam ser mais rápidas para os isótopos leves. Esta incorporação diferenciada de isótopos “leves” e “pesados” aos organismos está relacionada principalmente com a intervenção de enzimas distintas para sintetizar moléculas nas vias metabólicas. A esta transformação da proporção *isótopo pesado / isótopo leve* de um organismo para outro se denomina “fracionamento isotópico” ou “fator de discriminação isotópica” (Fry, 2006; Schoeninger, 2010; Price & Burton, 2011).

O fracionamento isotópico é o princípio que permite estimar as fontes de nutrientes de uma determinada dieta. No entanto, deve ser cuidadosamente ponderado, pois está influenciado por múltiplos fatores, entre eles o isótopo analisado, a fisiologia do organismo analisado, o tecido específico analisado, etc. (Ambrose, 2000; Martínez del Rio, 2009). Os principais problemas de interpretação de dados isotópicos derivam justamente

de erros na estimativa do seu valor médio, sua faixa de variabilidade, e de como lidamos com estas incertezas (Phillips, 2012).

As taxas isotópicas se detectam por espectrometria de massas (*Isotopic Ratio Mass Spectrometry-IRMS*). Este método permite medir a abundância e massa dos isótopos estáveis na forma de íons em amostras convertidas em gás (*i.e.*, CO₂, N₂). No entanto, como as medidas costumam ser minúsculas, para as composições isotópicas de amostras distintas se usa como parâmetro de comparação o valor isotópico de um material padrão. A taxa dos isótopos (Y^{X+1}/Y^X) se expressa em termos de delta (δY^{X+1}) em partes por mil (‰) segundo a equação:

$$\delta \text{ Isótopo pesado } (\text{‰}) = \left[\frac{\text{Taxa da amostra}}{\text{Taxa do padrão}} - 1 \right] \times 1000$$

Assim, os valores isotópicos (δ) representam diferenças relativas entre a taxa da amostra, ou seja, a relação entre o isótopo pesado e o isótopo leve, e a taxa do padrão internacional do elemento. Isótopos estáveis de diferentes elementos se incorporam nos tecidos dos consumidores através da digestão e assimilação de

Elemento	Relação isotópica	Notação	Padrão internacional	Fonte em estudos isotópicos	Aplicação em arqueologia
Carbono	¹³ C/ ¹² C	δ ¹³ C	Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)	Colágeno (orgânico) e apatita óssea e dentária (mineral), tecidos vegetais.	Reconstrução paleodietética. Pesquisa de fontes de energia e proteína. Potencial para discriminar entre plantas C ₃ e C ₄ , e C ₃ e recursos marinhos.
Nitrogênio	¹⁵ N/ ¹⁴ N	δ ¹⁵ N	N ₂ atmosférico (AIR)	Colágeno ósseo e dentário, tecidos vegetais (orgânico).	Reconstrução paleodietética. Pesquisa de fontes de proteína, posição trófica, discriminação de dietas carnívoras e herbívoras, dietas aquáticas (marinha, fluvial e lacustre) e terrestres.
Enxofre	³⁴ S/ ³² S	δ ³⁴ S	Vienna Canyon Diablo Troilite (VCDT)	Colágeno ósseo e dentário, tecidos vegetais.	Reconstrução paleodietética. Pesquisa de fontes de proteína, (marinha/terrestre), padrões de mobilidade.
Oxigênio	¹⁸ O/ ¹⁶ O	δ ¹⁸ O	Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)	Apatita óssea e dentária, tecidos vegetais, água.	Reconstrução paleodietética. Pesquisa de fontes de água de consumo, padrões de mobilidade.
Estrôncio	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	NBS-987 NIST SRM-987	Apatita óssea e dentária, tecidos vegetais, água, solo, rochas.	Padrões de mobilidade.
Zinco	⁶⁶ Zn/ ⁶⁴ Zn	δ ⁶⁶ Zn	JMC-Lyon	Apatita óssea e dentária, tecidos vegetais, água.	Reconstrução paleodietética. Pesquisa de fontes de proteína. Potencial para discriminar posição trófica, dietas carnívoras e herbívoras, dietas marinhas e terrestres.

Tabela 1. Isótopos estáveis mais usados em arqueologia.



distintas frações de macronutrientes (proteínas, lipídios, carboidratos) e podem ser quantificados para estudar, no caso da arqueologia, principalmente dieta e padrões de mobilidade (Tabela 1).

4. Considerações necessárias sobre o uso de ossos e dentes para estudos isotópicos

Devido à sua estrutura histológica, que lhes confere uma maior resistência à decomposição, os tecidos orgânicos que mais sobrevivem ao passo do tempo em contextos arqueológicos são ossos e dentes. Ossos e dentes contêm na sua estrutura dois materiais úteis para a análise isotópica (Figura 2): a) colágeno, a principal proteína estrutural da sua matriz orgânica, do qual é possível obter valores isotópicos, por exemplo, de carbono ($\delta^{13}C_{col}$), nitrogênio ($\delta^{15}N$) e enxofre ($\delta^{34}S$); e b) bioapatita, na forma de cristais, que conforma a matriz inorgânica, que permite obter valores isotópicos de carbono ($\delta^{13}C_{ap}$), oxigênio ($\delta^{18}O$) e razões isotópicas de estrôncio ($^{87}Sr/^{86}Sr$), entre outros elementos.

Em ossos e dentes, colágeno e bioapatita se encontram em diferentes proporções. O esmalte dentário, o tecido humano mais duro, está constituído praticamente integralmente por cristais de apatita (96% de matriz inorgânica, 4% de matriz orgânica e água), a dentina, segunda no ranking, tem uma maior proporção de proteínas estruturais (70% de matriz inorgânica, 30% de matriz orgânica e água), semelhante ao osso (65% de matriz inorgânica, 35% de matriz orgânica e água). Assim, do osso é possível extrair colágeno e bioapatita, e o esmalte, por sua estrutura quase totalmente cristalina, é uma boa fonte de apatita. A dentina é uma excelente fonte de colágeno, sobretudo em arqueologia, pela sua maior resistência à diagênese em comparação ao osso (Nanci, 2011)

Estes distintos tipos de tecido têm também distintos padrões de desenvolvimento e podem refletir valores isotópicos assimilados em diferentes épocas da vida. O osso remodela periodicamente durante a vida e sua velocidade de substituição (*turnover* ou taxa de

recâmbio ósseo) depende principalmente da idade (mais acelerada em indivíduos mais jovens) e o estado nutricional (Tsutaya & Yoneda, 2013). Os valores isotópicos de nitrogênio, carbono ou quaisquer outros isótopos que conformam o colágeno ósseo refletem a dieta de um período da vida do indivíduo variável entre alguns poucos meses até 20 anos, dependendo da idade do indivíduo e do tipo de osso amostrado (Hedges & Reynard, 2007). As costelas, normalmente o material de eleição para estudos de reconstrução da dieta, remetem a um período entre 2 e 5 anos prévios à morte do indivíduo (Lamb et al., 2014).

Nos dentes, o processo é diferente. O esmalte dentário não remodela uma vez mineralizado e a dentina apenas remodela quando submetida a estímulos fisiológicos (desgaste dental) ou patológicos (cárie de dentina) específicos (Nanci, 2011). Por tanto, os isótopos de diferentes elementos que passaram a formar sua estrutura conservam as mesmas proporções ao longo da vida e permitem uma aproximação às condições dietéticas do momento em que o dente se formou, ou seja, à época infantil ou adolescência do indivíduo (Fuller et al., 2003; Eerkens et al., 2011). Diferentes dentes, por ter cronologias de desenvolvimento também diferentes, fornecerão dados de distintos períodos da infância. Isso é particularmente útil em estudos isotópicos focados na reconstrução de dietas infantis ou do processo de desmame (Czermak et al., 2020) e em estudos de mobilidade (Knudson, 2009; Richards et al., 2008).

Estratégias multi-amostragem de ossos, dentes, unhas e cabelo (estas duas últimas com resolução temporal de 0.3 cm/mês e 1 cm/mês, respectivamente: O'Connell et al., 2001) fornecem um escopo temporal amplo e detalhado da dieta de um indivíduo, simulando um estudo longitudinal.

5. Isótopos estáveis de carbono e nitrogênio do colágeno em reconstrução paleodietética

Os isótopos de carbono e nitrogênio são os mais usados para estudar dieta. Em linhas gerais, os animais

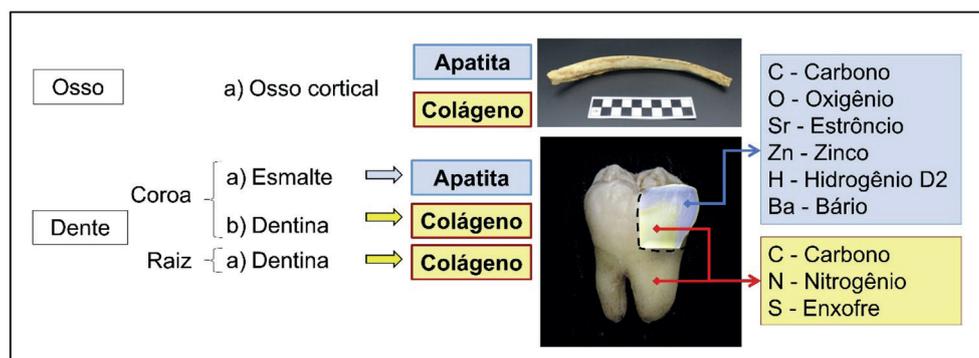


Figura 2. Possibilidades de análise isotópica de tecidos ósseos e dentários.

herbívoros têm valores $\delta^{13}\text{C}$ maiores que as plantas que consomem. Este incremento, que ocorre pelo mecanismo de fracionamento isotópico, é crucial para reconstruir a dieta de um indivíduo (Schoeninger, 2010). Ao fixarem o CO_2 atmosférico as plantas podem usar três vias fotossintéticas: 1) Calvin-Benson ou C_3 ; 2) Hatch-Slack ou C_4 ; 3) *Crassulacean Acid Mechanism* ou CAM. Estas diferenças metabólicas afetam o fracionamento do carbono entre a atmosfera e os tecidos e, por tanto, os valores isotópicos das plantas (Schoeninger, 2010). Convencionalmente, valores $\delta^{13}\text{C}$ permitem distinguir entre plantas C_3 , que representam a maioria de espécies e têm valores de $\delta^{13}\text{C}$ aproximadamente entre -33 e -22‰ , dependendo de condições climáticas (Kohn 2010), plantas C_4 , que incluem espécies como o milho e cana de açúcar, com valores de $\delta^{13}\text{C}$ aproximadamente entre -16 e -9‰ e plantas CAM, como as cactáceas, com valores intermediários (Smith & Epstein, 1971; Schoeninger & DeNiro, 1984; O'Leary, 1988).

A diferença entre a composição isotópica do colágeno de um indivíduo e o valor isotópico da sua dieta é de $+5\text{‰}$, independentemente do tipo de planta, o que permite discriminar entre herbívoros que se alimentam de plantas C_3 ou C_4 (Figura 3). A diferença entre herbívoros e carnívoros é também de $+5\text{‰}$ (De Niro & Epstein, 1978; Chisholm, 1989).

Também é possível discriminar entre ecossistemas marinhos e terrestres. Algas e fitoplâncton marinhos obtêm carbono de várias fontes inorgânicas, em particular bicarbonato dissolvido, que são geralmente enriquecidos em ^{13}C em relação ao CO_2 atmosférico. Portanto os valores do $\delta^{13}\text{C}$ na base da cadeia alimentar marinha são mais altos que na terrestre. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do plâncton e algas marinhas variam entre aproximadamente -8‰ e -27‰ , enquanto os vertebrados marinhos consumidores destas plantas apresentam valores médios de aproximadamente -13.5‰ e os peixes carnívoros (consumidores de outros peixes) apresentam valores médios de -12.5‰ . No entanto, como os valores das algas e fitoplâncton são significativamente diferentes dos das plantas terrestres C_3 , mas se superpõem aos valores médios das plantas C_4 , resulta difícil distinguir entre cadeias tróficas marinhas e cadeias C_4 (Chisholm, 1989). Há também diferenças nos valores $\delta^{13}\text{C}$ entre plantas de água doce e água salgada relacionadas com diferentes concentrações do CO_2 atmosférico e do bicarbonato dissolvido na água (Casey & Post, 2011).

O nitrogênio existe na atmosfera terrestre como gás (N_2), mas sua dinâmica está modulada pelas reações biológicas de assimilação, nitrificação e desnitrificação em sistemas aquáticos ou terrestres, onde é relativamente escasso. As plantas assimilam o nitrogênio disponível da degradação da matéria orgânica do solo

(com valores $\delta^{15}\text{N}$ entre -4‰ e $+14\text{‰}$), ou da matéria orgânica oceânica (com valores entre -2‰ e $+11\text{‰}$). Plantas terrestres e plantas não-fixadoras de nitrogênio, que tomam o elemento do solo na forma de nitratos, amoníaco e amônia, têm um valor médio de $+3\text{‰}$, enquanto as leguminosas, associadas com bactérias fixadoras de nitrogênio, capazes de usar o nitrogênio atmosférico, tem valores de $+1\text{‰}$, próximos aos da atmosfera cujo valor es 0‰ (Fry, 2006; Szpak, 2014).

Átomos de nitrogênio no colágeno provém diretamente da proteína consumida. Os valores $\delta^{15}\text{N}$ refletem o nível trófico do consumidor, devido ao fracionamento isotópico que ocorre na transferência do nitrogênio de um aminoácido para outro, somado ao fracionamento resultante dos efeitos fisiológicos na excreção de ureia renal (o isótopo leve ^{14}N é mais facilmente excretado: Sealy et al., 1987). O fator de discriminação isotópica de $\delta^{15}\text{N}$ entre presa e predador ou "efeito carnívoro" varia entre 2 e 6‰ (DeNiro & Epstein, 1978; Minagawa & Wada, 1984; Bocherens & Drucker, 2003; O'Connell et al., 2012).

Os organismos marinhos apresentam valores $\delta^{15}\text{N}$ maiores que os terrestres porque o nitrogênio absorvido pelo fitoplâncton na base de cadeia trófica está na forma de nitrato e amônia, mais enriquecidos em ^{15}N , e também porque as cadeias tróficas marinhas são mais complexas (Ambrose, 1991; Panarello et al., 2021). Em geral se espera que animais com dietas exclusivamente terrestres tenham valores $\delta^{15}\text{N}$ do colágeno ósseo inferiores a $+9\text{‰}$ (mas pode haver exceções, Szpak 2014), enquanto animais com dieta marinha exclusiva têm valores superiores, porém, também com variações significativas devido aos valores isotópicos na base da cadeia alimentar e à complexidade na ecologia e comportamento das espécies. Por exemplo, uma rápida revisão da literatura produzida sobre exemplares de peixes recuperados em sítios arqueológicos no litoral sul do Brasil demonstra que os valores de $\delta^{15}\text{N}$ podem variar de $+8\text{‰}$ a $+15\text{‰}$, e que predadores marinhos podem atingir valores $\delta^{15}\text{N}$ de até $+20\text{‰}$ (Toso et al., 2021). Em cadeias tróficas de rios e lagos acontece algo semelhante. Peixes de água doce têm valores de $\delta^{15}\text{N}$ que podem variar de $+7\text{‰}$ a $+12\text{‰}$ (Toso et al., 2021), e os humanos consumidores terão valores proporcionais considerando o fracionamento isotópico e a contribuição destes recursos na dieta (Schoeninger & DeNiro, 1984).

Em resumo, alimentos vegetais localizados na base da cadeia trófica possuem valores $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, mais ou menos conhecidos, que podem ser rastreados, através do fracionamento relativamente constante entre níveis, até os predadores e consumidores finais como os humanos. Esta é a base teórica da reconstrução peleodietética, mas a definição de linhas



de base específicas para diferentes ecossistemas é um necessário ponto de partida.

colágeno ($\delta^{13}\text{C}$) é um bom indicador do tipo de proteína consumida devido a que uma ampla proporção dos

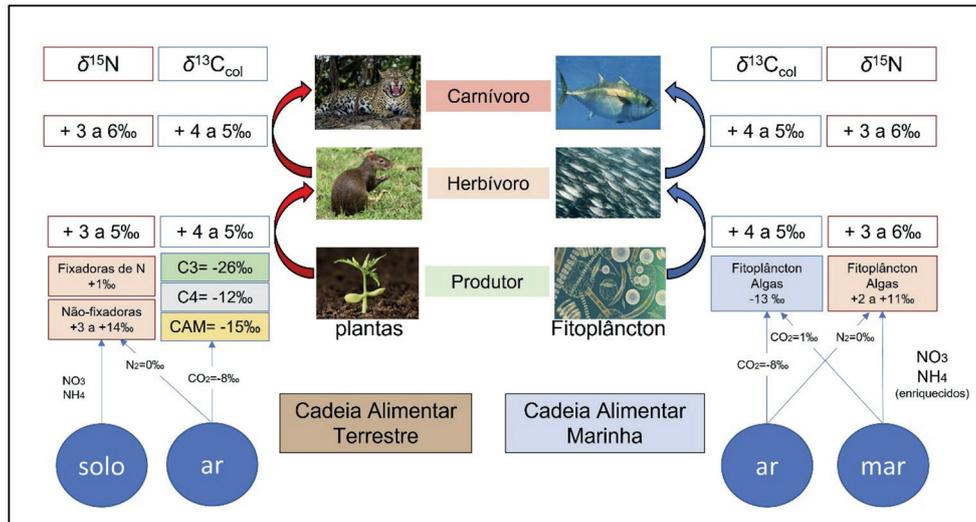


Figura 3. Fatores de discriminação de isótopos de carbono ($\Delta^{13}\text{C}_{\text{dieta-tecido}}$) e nitrogênio ($\Delta^{15}\text{N}_{\text{dieta-tecido}}$) para colágeno ósseo em cadeias tróficas terrestres e marinhas (De Niro & Epstein, 1978; Chisholm, 1989; Panarello et al., 2021).

6. O estudo isotópico das dietas onívoras humanas

A principal limitação dos isótopos de carbono e nitrogênio do colágeno na reconstrução de dietas é como identificar dietas onívoras. Dietas que combinam vegetais C_3 e C_4 terão valores $\delta^{13}\text{C}$ entre -21.5 e -7.5 ‰, que envolvem os valores $\delta^{13}\text{C}$ dos herbívoros e carnívoros marinhos (-13.5 e -12.5 ‰, respectivamente). Em ausência de plantas C_4 a diferença entre consumidores de C_3 e consumidores de alimentos marinhos será facilmente discernível, mas quando existam plantas C_4 (por exemplo, o milho) na dieta ou recursos de água doce cujos valores $\delta^{13}\text{C}$ se superpõem aos de plantas C_3 (Watson et al., 2013), a discriminação apenas será possível com a inclusão de valores $\delta^{15}\text{N}$ (Ambrose & Norr, 1993; Kellner & Schoeninger, 2007).

Por outro lado, a ampla variabilidade dos fatores de discriminação isotópica de $\delta^{15}\text{N}$ entre presas e consumidores, animais e humanos, dificulta o reconhecimento do grau de carnivorismo das dietas onívoras (DeNiro & Epstein, 1981; O'Connell et al., 2012), especialmente em dietas que combinam recursos terrestres com recursos de água doce (Hedges & Reynard, 2007). Para encarar estas limitações foram introduzidos outros marcadores isotópicos, entre eles carbono da apatita e, mais recentemente, aminoácidos individuais.

6.1. Carbono da apatita no estudo da dieta

O carbono da apatita ($\delta^{13}\text{C}_{\text{ap}}$) reflete a energia da dieta como um todo (o aporte isotópico de proteínas, carboidratos e lipídios), enquanto o carbono do

aminoácidos intactos da dieta ingressa na estrutura do colágeno¹ (Schwarcz, 2000). Num modelo bastante popular, Kellner e Schoeninger (2007) usaram valores isotópicos de dietas experimentais para gerar um espaço gráfico que confronta $\delta^{13}\text{C}_{\text{ap}}$ e $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ e discrimina a origem da proteína da dieta através de três linhas de regressão (marinha, C_3 e C_4), e permite inferir, pela localização dos valores ao longo das linhas de regressão, a proporção relativa de energia C_3 e C_4 consumida. Uma sofisticação mais recente deste método é o espaço discriminante proposto por Froehle et al. (2012), que utilizaram $\delta^{13}\text{C}_{\text{ap}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$ e $\delta^{15}\text{N}$ para calcular duas funções discriminantes que permitem classificar os valores isotópicos de um indivíduo dentro de um espaço isotópico de cinco dietas experimentais (Figura 4).

No Brasil, Crouch (2013) foi a primeira em incluir valores $\delta^{13}\text{C}_{\text{ap}}$ em reconstrução paleodietética no seu estudo de mudanças na subsistência associadas à introdução da cerâmica em *sambaquis* de Rio de Janeiro e Santa Catarina. Aplicando o modelo de Kellner & Schoeninger (2007) observou que as dietas das populações pré-históricas do sul do Brasil incluíam plantas C_3 , algumas delas com ampla dependência à proteína marinha e outras com uma gama mais ampla de recursos de água doce ou marinhos de baixo nível trófico, com muita variabilidade inter-sítio. Também detectou um incremento no consumo de alimentos

¹ O colágeno proveniente da fração proteica da dieta foi calculado em 74%, o restante 26% deriva da fração energética (Fernandes et al., 2012).

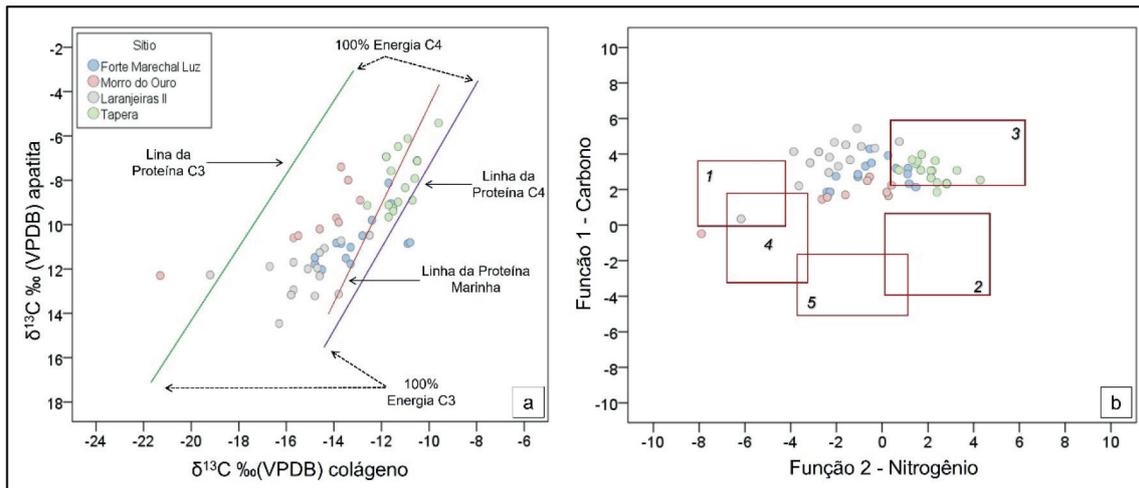


Figura 4. a) Espaço isotópico de $\delta^{13}C_{ap}$ e $\delta^{13}C_{col}$ de Kellner e Schoeninger (2007); b) Espaço de Froehle et al. (2012) de duas funções discriminantes derivadas de $\delta^{13}C_{ap}$, $\delta^{13}C_{col}$ e $\delta^{15}N$. Os retângulos representam as cinco dietas experimentais: (1) 100% C3 dieta/proteína; (2) 30:70 C3:C4 dieta / >50% proteína C4; (3) 50:50 C3:C4 dieta / proteína marinha; (4) 70:30 C3:C4 dieta / $\geq 65\%$ proteína C3; (5) 30:70 C3:C4 dieta / $\geq 65\%$ proteína C3. Ambos os modelos foram gerados com dados de sambaquis do sul do Brasil (Crouch, 2013; Pezo-Lanfranco et al., 2018a).

marinhos para a época cerâmica em relação à época pré-cerâmica. Crouch (2013, p. 129), não encontrou evidência de consumo de plantas C_4 , como o milho, nas populações que avaliou.

Bastos (2014) incluiu valores $\delta^{13}C_{ap}$ de esmalte e um modelo linear para reconstruir a dieta dos *sambaquis* Forte Marechal Luz e Tapera (SC), inferindo dietas mistas que incluíam proteína marinha, plantas C_3 e plantas C_4 em menor proporção. A importância destes estudos é que deram “visibilidade” isotópica às plantas, porém, deixavam uma importante questão a meio responder: se consumia milho? qual era sua importância na dieta? A possível presença do milho parecia precisar de respostas mais contundentes, impossíveis de atingir apenas com análises isotópicas.

Valores $\delta^{13}C_{ap}$, especialmente de esmalte dentário, têm sido relevantes em estudos isotópicos de contextos muito antigos (paleoantropológicos) ou aqueles onde a extração de colágeno é impossível (Cerling et al., 2013). Devido à diferença de tamanho dos cristais de apatita, o esmalte (centenas de nanômetros) é mais resistente que o osso (dezenas de nanômetros) à diagênese (Zhao et al., 2021). Assim, para validar a confiabilidade dos valores $\delta^{13}C_{ap}$, é necessário demonstrar a integridade da apatita por meio de Espectroscopia Raman, difração de raios X ou FTIR (*Fourier transform infrared spectroscopy*) e a avaliação de vários índices (*i.e.*, índice carbonato/fosfato, índice carbonil/carbonato, índice de cristalinidade, etc.). Quando o espectro da amostra é muito diferente do espectro do osso/dente moderno se infere que sua estrutura mineral tem sido afetada por fatores diagenéticos e que as leituras isotópicas correspondem a minerais absorvidos do ambiente vizinho (France et al., 2020). Até o momento, a análise da fração mineral

dos ossos de vários sítios da costa brasileira com espectroscopia Raman (Colonese et al., 2014; Colonese, dados não publicados sobre Rio Comprido e Morro do Ouro) indicam uma pobre preservação da apatita em alguns depósitos arqueológicos.

Para garantir a qualidade dos resultados devemos reportar os protocolos utilizados no processamento e análise das amostras, assim como os critérios e valores relativos à preservação do colágeno (razão C:N; Wt% C; Wt% N; % de colágeno recuperado: DeNiro, 1985; van Klinken, 1999) e apatita (France et al., 2020). Isto, além do uso do léxico isotópico apropriado nos reportes de dados (Szpak, 2017), é imperativo.

6.2. Análise de aminoácidos individuais

Atualmente há outras formas de abordar dietas onívoras. A análise isotópica de aminoácidos individuais ou *Compound-specific isotope analysis - CSIA*, permite a distinção das rotas biosintéticas dos aminoácidos em humanos e animais e o reconhecimento mais preciso da origem trófica das fontes (Corr et al., 2005; Choy et al., 2010).

A composição isotópica do colágeno nos animais está fortemente influenciada pelo consumo de proteína e aminoácidos². Enquanto os valores $\delta^{13}C$ dos aminoácidos essenciais (AAEs) do colágeno refletem os valores dos AAEs da dieta devido ao seu roteamento

² Do ponto de vista metabólico, os aminoácidos se classificam em: 1) aminoácidos essenciais, aqueles que o organismo não sintetiza e devem ser obtidos através da dieta; 2) aminoácidos não-essenciais, aqueles que podem ser sintetizados no organismo a partir de outras fontes como carboidratos, lipídios e outros aminoácidos (Choy et al., 2010).



direto dieta-tecido, os valores $\delta^{13}\text{C}$ dos aminoácidos não-essenciais (AANEs) estão modulados pelo carbono total da dieta, derivado da combinação de carboidratos, lipídios e proteínas (Ambrose & Norr, 1993; Fogel & Tuross, 2003; Jim et al., 2006).

Em dietas com alto conteúdo de proteínas mais AANEs serão diretamente transferidos ao colágeno e seus valores $\delta^{13}\text{C}$ serão semelhantes aos valores dos AAEs, enquanto nas dietas com baixo conteúdo proteico mais AANEs deverão ser sintetizados a partir de carboidratos e lipídios, levando a uma clara diferença de valores entre AANEs e AAEs, sobretudo em dietas onívoras onde as fontes de proteína e energia são isotopicamente distintas. Os aminoácidos AAEs dos animais marinhos têm valores $\delta^{13}\text{C}$ mais altos porque derivam de algas e fitoplâncton enriquecidos em ^{13}C , enquanto os aminoácidos dos herbívoros terrestres originam-se de plantas terrestres pobres em ^{13}C (Choy et al., 2010).

No Brasil, este método foi aplicado para esclarecer as fontes de proteína e examinar o problema do possível consumo de milho em populações pré-históricas da costa sul (Colonese et al., 2014). A análise de carbono de 15 aminoácidos do colágeno de indivíduos dos sítios Jabuticabeira II (n=10) e Galheta IV (n=7) da região de Laguna (SC), desvendou uma forte correlação dos valores $\delta^{13}\text{C}$ dos aminoácidos com os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do colágeno, confirmando que tanto AAEs quanto AANEs eram derivados de proteínas marinhas. Aliás, no gráfico de dispersão de valores $\delta^{13}\text{C}$ da fenilalanina e valina observou-se uma dieta mista, marinha/ C_3 terrestre, para alguns indivíduos e alto consumo de proteína marinha para outros (Figura 5).

Um indivíduo do sítio Galheta IV mostrou um valor $\delta^{13}\text{C}$ muito baixo do AANE alanina (Ala), o que foi interpretado como produto de uma dieta de alto consumo de carboidratos pouco enriquecidos em ^{13}C , provavelmente plantas C_3 . Estas interpretações foram

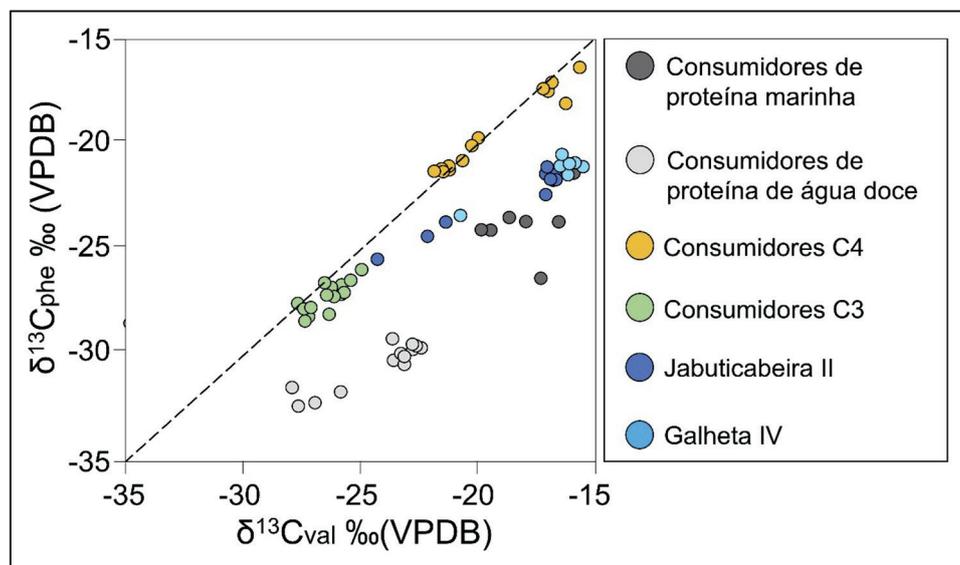


Figura 5. Gráfico de dispersão valores $\delta^{13}\text{C}$ de fenilalanina e valina dos sítios Jabuticabeira II e Galheta IV comparados com dados de consumidores de diferentes tipos de dieta (modificado de Colonese et al., 2014, Figure 6).

Para discriminar a superposição de valores $\delta^{13}\text{C}$ entre dietas terrestres e aquáticas (marinhas e de água doce), e combinações de plantas C_3 e C_4 , têm sido postuladas algumas relações gráficas entre aminoácidos: a) dispersão de valores $\delta^{13}\text{C}$ de fenilalanina e valina (Honch et al., 2012); b) dispersão de valores $\Delta^{13}\text{C}_{\text{serina-fenilalanina}}$ e $\delta^{13}\text{C}$ da treonina, o aminoácido mais variável entre animais marinhos e terrestres (diferença de -8‰); e c) dispersão de valores $\delta^{15}\text{N}$ e $\Delta^{13}\text{C}_{\text{glicina-fenilalanina}}$ (Corr et al. 2005; Choy et al., 2010). Aliás, há uma diferença diagnóstica nos valores $\Delta^{15}\text{N}_{\text{glicina-fenilalanina}}$ nos produtores primários: algas e cianobactérias ($+3.4\text{‰}$), plantas C_3 (-8.4‰) e plantas C_4 ($+0.4\text{‰}$) que teoricamente permite sua discriminação (Naito et al., 2010).

corroboradas com o estudo de lipídeos de restos alimentares preservados em cerâmica. Com estes dados, concluiu-se a continuidade das estratégias de subsistência baseadas na exploração de recursos aquáticos a despeito da introdução da cerâmica. Não foi observado nenhum indicador associado ao milho.

Na costa do Brasil, o método poderia ser adequado para discriminar fontes proteicas entre espécies marinhas e de água doce, ou dietas terrestres com ocasional consumo de peixes de água doce, difíceis de distinguir apenas com valores $\delta^{15}\text{N}$.

6.3. O problema da quantidade e os Modelos Mistos Bayesianos

Possivelmente a questão mais difícil de responder em análise paleodietética com isótopos estáveis, especialmente em dietas onívoras, é o *quanto?* Quais eram as proporções de diversos tipos de alimentos no cardápio? Esta é uma pergunta que tem preocupado aos especialistas durante décadas (Martínez del Rio et al., 2009). Uma alternativa atual para encarar este problema são os Modelos Isotópicos Bayesianos Mistos (*Bayesian Stable Isotope Mixing Models - BSIMMs*), uma contribuição da ecologia derivada de um longo percurso de desenvolvimento na interpretação de dados isotópicos (para uma síntese sobre esta evolução, dos modelos lineares mais simples até os *BSIMMs*, vide Phillips, 2012).

estimativa das proporções mais prováveis (distribuição de probabilidade) da contribuição de cada tipo de alimento na dieta (Parnell et al., 2010; Fernandes et al., 2014).

Os BSIMMs permitem modelar as múltiplas fontes de recursos e múltiplos parâmetros de incerteza das dietas complexas, entre eles: número de marcadores isotópicos, os valores dos fatores de discriminação, valores isotópicos de diversos grupos de alimentos (*i.e.*, animais terrestres, animais marinhos, plantas C_3 e plantas C_4), valores isotópicos das frações de macronutrientes dos diferentes tipos de alimentos (proporções de proteínas, lipídios e carboidratos), e a faixa de variabilidade de cada um destes parâmetros (Figura 6).

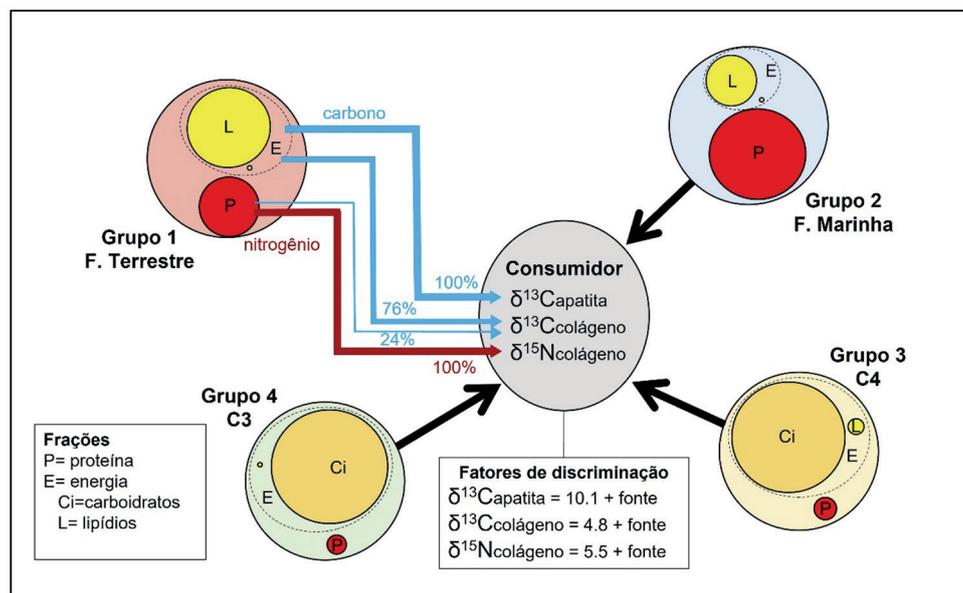


Figura 6. Esquema de um Modelo Misto com roteamento e dependente da concentração, que considera quatro grupos de alimentos (fauna terrestre, fauna marinha, plantas C_3 e plantas C_4), com três frações de macronutrientes e fatores de discriminação isotópica para os três indicadores isotópicos do consumidor (modificado de Fernandes, 2016).

Os BSIMMs usam estatística Bayesiana³ e trabalham sob a base conceitual da resolução de um problema de decomposição de mistura geral (*general mixture decomposition problem*) e geram, a partir da decomposição dos valores isotópicos de acordo com determinados parâmetros “carregados” no modelo, uma

Por exemplo, FRUITS (*Food Reconstruction Using Isotopic Transferred Signals*, Fernandes et al., 2014, 2015), permite a implementação de modelos dependentes da concentração e a modelagem do “roteamento” de macronutrientes da dieta e estima a contribuição relativa à dieta dos diferentes grupos de alimentos e das suas frações nutricionais (proteína, energia) em termos de conteúdo de carbono ou contribuições calóricas equivalentes (Figura 7).

Análises com FRUITS utilizando três indicadores isotópicos ($\delta^{13}C_{ap}$, $\delta^{13}C_{col}$, $\delta^{15}N_{col}$) quantificaram a contribuição calórica relativa de quatro principais grupos de alimentos: plantas, peixes marinhos-estuarinos, peixes de água doce e mamíferos terrestres, em várias

³ A estatística Bayesiana, baseada nos princípios estatísticos de *probabilidade condicional* (o uso de probabilidades a priori, derivadas de conhecimento prévio, para calcular probabilidades a posteriori) e *máxima verossimilhança* (a plausibilidade dos valores obtidos baseadas em observações prévias). Nas últimas décadas, com o desenvolvimento da informática a antiga estatística Bayesiana tem sido “redescoberta” e atingido grande desenvolvimento e popularidade (Kinas & Andrade, 2017).

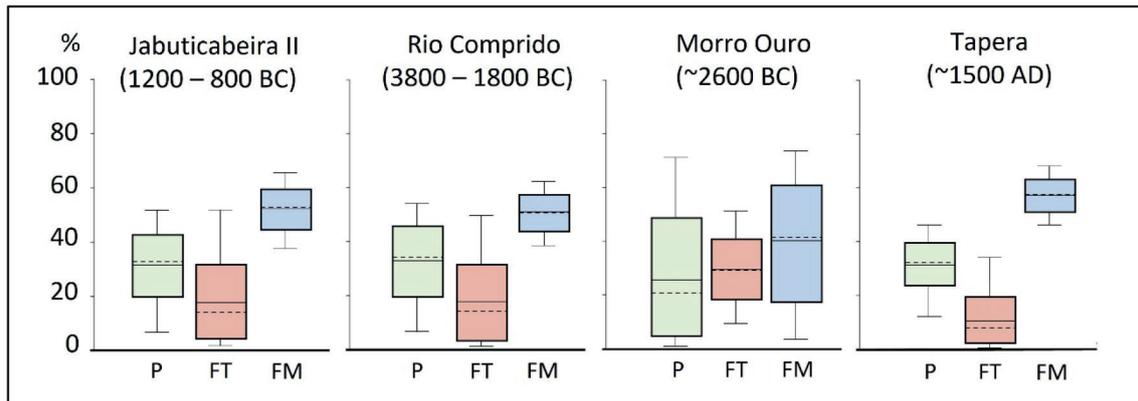


Figura 7. Contribuição média calórica de três tipos de alimentos (P: plantas, FT: fauna terrestre e FM: fauna marinha) em populações pré-históricas da costa sul do Brasil, calculada com FRUITS utilizando valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do colágeno (modificado de Pezo-Lanfranco et al., 2018a: Fig.5).

populações pré-históricas da Baía da Babitonga (SC), verificando que as fontes dominantes de energia da dieta eram principalmente as plantas (variando entre 43-48%, segundo o sítio), seguidas por proteínas e lipídios de origem marinho (29-44%) e mamíferos terrestres (7-18%), com uma discreta contribuição de peixes de água doce (2-4%), com considerável variabilidade entre sítios (Toso et al., 2021).

A dieta dos *cerritos* da Lagoa dos Patos mostra uma contribuição bem maior de plantas C_3 e C_4 na dieta (na faixa de 31% e 21%, respectivamente), e menor aporte calórico da proteína terrestre/água doce (22%) e marinha (10%: Chanca et al., 2021). Na costa norte, a dieta tinha predominância de proteína terrestre (25 a 35% das calorias), seguida por plantas C_3 (25 a 30%), C_4 e peixes de água doce (10 a 15%) com muita variabilidade intra e intergrupala (Colonese et al., 2020).

Os BSIMMs têm um grande potencial para estudar as questões relativas ao “quanto” e podem render informações muito esclarecedoras e úteis sobre a predominância de alguns recursos, porém, se precisam dados adequados para alimentar o modelo (*inputs*), como por exemplo valores adequados de potenciais fontes de alimento e fatores de discriminação, número de grupos de alimentos a serem incluídos no modelo, etc.

7. Alguns desafios e oportunidades na ecologia isotópica na costa do Brasil

7.1. Cadeias alimentares na arqueologia da costa do Brasil

O objetivo da reconstrução paleodietética é obter uma caracterização da dieta de um consumidor a partir dos seus valores isotópicos tissulares. Para tanto, é de crucial importância caracterizar também as possíveis fontes (produtores, presas) e sua faixa de variabilidade. Os valores isotópicos de flora e fauna são de crucial

interesse para o cálculo de fatores de discriminação isotópica que, por sua vez, podem influenciar grandemente as inferências sobre a gama de recursos consumidos. À distribuição dos valores isotópicos das espécies animais e vegetais de um determinado ecossistema se denomina “ecologia isotópica” (Fry, 2006), que abrange os termos *isoscape* e *food web* da literatura especializada.

Tradicionalmente, a reconstrução da “ecologia isotópica”, se estabelece qualitativamente a partir da observação de gráficos de dispersão dos valores $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ com auxílio de polígonos que expressam a variabilidade (média e desvio padrão) dos valores. Este procedimento permite inferir, em termos mais ou menos gerais, a posição trófica do indivíduo estudado em relação aos valores isotópicos dos potenciais itens da sua dieta, considerando fatores de discriminação tecido-dieta derivados de estudos ecológicos ou experimentos controlados (Figura 4a).

Atualmente, ferramentas estatísticas para cálculo de áreas de polígonos (*convex hulls*) ou análises de densidade (por exemplo, Kernel), geradas com algoritmos específicos como *Stable Isotope Bayesian Ellipses in R* (SIBER: Jackson et al., 2011) ou *Kernel isotopic niches in R* (rKIN: Albeke, 2017), permitem representações gráficas e estatísticas elaboradas da superposição de áreas de dois ou mais grupos no espaço isotópico (Figura 4b-d). Estas abordagens vêm sendo aplicadas em arqueologia para responder questões sobre superposição de dietas ou ecologia isotópica humana (Robinson, 2021).

A costa do Brasil tem um grande potencial para a reconstrução de *isoscapes* com fins arqueológicos. No entanto, considerando a rica biodiversidade dos ecossistemas neotropicais e marinhos, este registro é ainda modesto. A maior parte dos estudos se concentra no litoral sul e sudeste (Bastos et al., 2014, 2015; Colonese et al., 2014; Crouch, 2013; De Masi, 2001, 2009; Klökler,

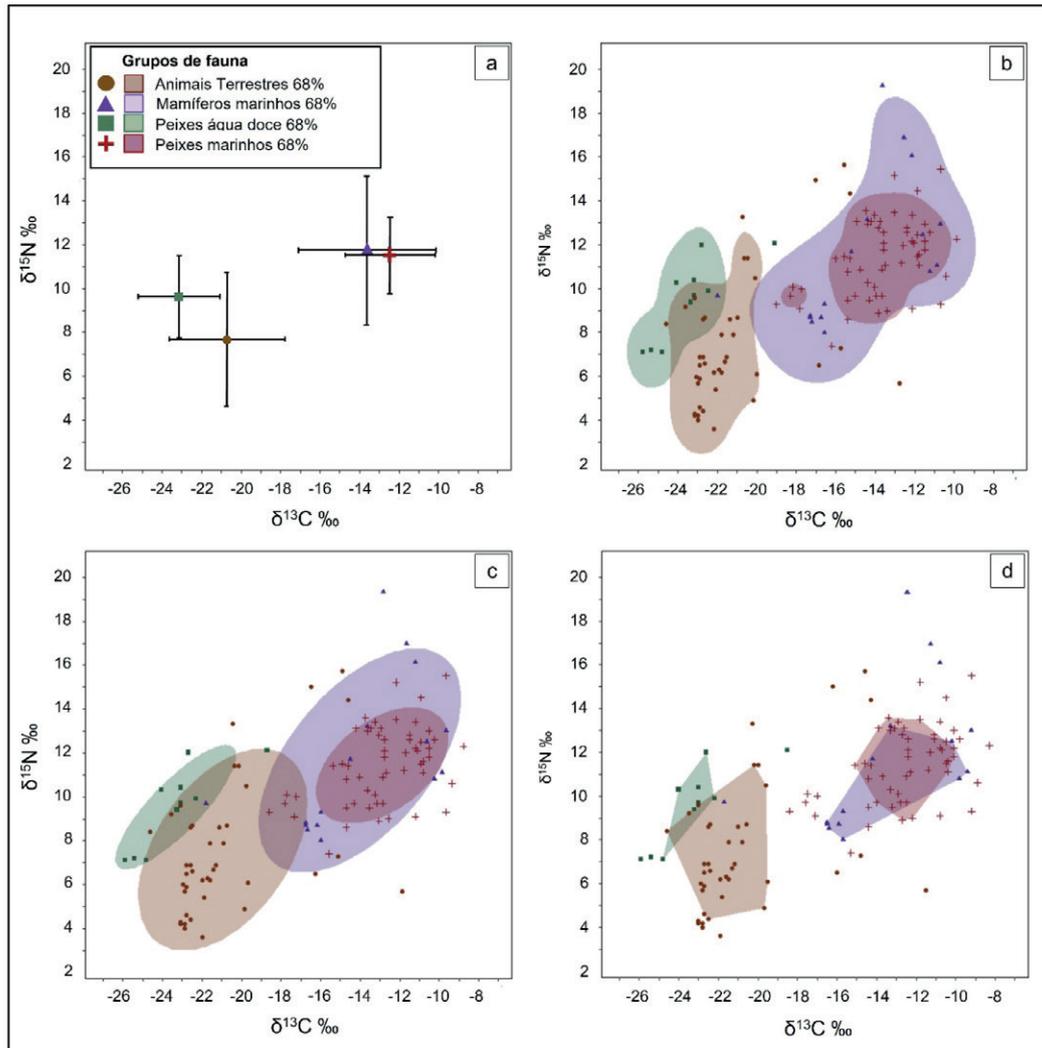


Figura 8. Formas de representar a distribuição de valores $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ a partir de dados de fauna da costa sudeste brasileira (com dados de Toso et al. 2021); a) média e desvio padrão de grupos de animais; b) áreas do nicho isotópico calculadas com análise de densidade de Kernel (*Kernel utilization density*); c) com o método de área elíptica padrão (*Standard Ellipse Area*); e d) com o método de polígono mínimo convexo (*Minimum Convex Polygon*). Todas as áreas foram calculadas com o algoritmo rKIN com um nível de contorno de 68% (1σ) (Albeke, 2017).

2008; Plens, 2010; Oppitz et al., 2018; Pezo-Lanfranco et al., 2018a; 2018b; Toso et al., 2021), enquanto no Norte e Nordeste o registro é ainda carente (Colonese et al., 2020; Hermenegildo et al., 2017; Roosevelt 1989, 2000).

Em ecologia marinha moderna, as análises isotópicas estão normalmente reforçadas por análises de conteúdos estomacais, que fornecem dados sobre presas recém consumidas, observações de hábitos alimentares e associações animais-plantas (Thomas et al., 2019). Análises semelhantes deveriam ser implementadas e coordenadas por arqueólogos em esforços conjuntos com ecólogos e biólogos, a fim de caracterizar e estabelecer linhas de base isotópicas e identificar interações tróficas de organismos de interesse arqueológicos. Estes últimos, por sinal, deveriam ser identificados com o auxílio de estudos faunísticos de contextos específicos, seja através de

revisão bibliográfica (Fossile et al., 2019) ou de estudos empíricos em laboratório. A necessidade de trabalhar em conjunto com zooarqueólogos também contribui a definir estratégias de amostragem mais adequadas para maximizar recursos financeiros.

A caracterização isotópica da fauna deve incluir os taxa mais frequentes dos inventários zooarqueológicos pois homólogos modernos não são sempre comparáveis devido a uma série de fatores locais (eutrofização dos ambientes aquáticos, variação na cobertura vegetal) e regionais. Na caracterização dos espécimes modernos deve ser considerado o impacto das altas emissões históricas de CO_2 , principalmente a partir do período industrial, conhecido como Efeito Suess⁴ e os valores

⁴ Se denomina "Efeito Suess" ou "*fossil fuel effect*" à mudança ocorrida na composição isotópica do CO_2 atmosférico como efeito da Revolução



devem ser corrigidos. É recomendável também amostrar carnívoros e predadores com o intuito de identificar interações tróficas particulares e estabelecer linhas de base isotópicas habitat-específicas com fines comparativos.

Na costa brasileira, dependendo da região, a amostragem deve incluir peixes de habitats marinhos de diferentes profundezas (neríticos, pelágicos ou bentônicos) e estuarinos, peixes de água doce, invertebrados marinhos e terrestres, quelônios marinhos e terrestres, répteis, anuros, aves marinhas, e mamíferos marinhos e mamíferos terrestres (de diferentes tamanhos e importância econômica), assim como insetos (as partes digestíveis), pois a entomofagia tem sido uma estratégia recorrente em algumas populações humanas e não deve ser descartada em nenhum contexto, muito menos na Amazônia ou Mata Atlântica (FAO, 2013).

A classificação habitat-específica permitiria responder questões mais detalhadas sobre a natureza da dieta das populações costeiras pré-históricas, como por exemplo, se consumiam uma dieta generalista ou especializada em determinadas espécies, a distância de pesca (próxima ou longe da costa), se era uma pesca planejada ou incidental, coletiva ou individual, a sazonalidade das espécies, a sustentabilidade da atividade econômica, acesso diferenciado entre comunidades, entre outras. Linhas de base habitat-específicas também podem ser de suma utilidade para interpretar a escala das atividades de pesca, coleta e/ou manejo de espécies marinhas, a tecnologia e organização do trabalho ao redor destas atividades, e a organização social como um todo. Não tem o mesmo significado determinar o consumo de moluscos que o de peixes pelágicos, que remetem à prática de coleta superficial e pesca em alto mar, respectivamente. Com tecnologia relativamente rudimentar, esta última precisaria de estratégias cooperativas e lideranças mais ou menos institucionalizadas para organizar os recursos humanos e a logística necessária (Moseley, 2005).

Embora os dados disponíveis de pescadores pré-históricos do sudeste do Brasil (Figuti, 1993; Klökler, 2008; Fossile et al., 2019) sugiram que a maioria das espécies de peixes de depósitos arqueológicos sejam de águas superficiais, provavelmente capturadas com redes, tapagens e cestarias, anzóis ou tecnologia e métodos relativamente simples, o registro de algumas espécies de alto mar e de água doce precisa ser especificamente documentado, pois têm sido reportadas diferenças nas preferências de espécies segundo a localização do sítio

(i.e., frente a estuários, mar aberto, canais, ou sistemas fluviais: Bandeira, 2004; Fossile et al., 2019). Aliás, peixes de água doce podem ter valores $\delta^{13}\text{C}$ extremamente baixos, comparáveis aos de plantas C_3 (Watson et al., 2013; Toso et al., 2021).

A análise isotópica de plantas arqueológicas é um dos grandes desafios, seja pela perda de material orgânico quanto pela menor representação das plantas na composição isotópica do nitrogênio e carbono no colágeno em relação a proteínas animais. Portanto, a diferença da fauna, abrem-se exceções para análises de plantas modernas, especialmente das espécies reportadas por estudos arqueobotânicos, que devem ser usados como referência para planejar a coleta de amostras. Estas espécies modernas devem ter seus valores isotópicos devidamente corrigidos para o Efeito Suess, como discutido anteriormente. Na costa sul do Brasil têm sido reportados amidos e fitólitos de plantas como batata doce (*Ipomoea batatas*), inhame (*Dioscorea* sp.), pinhão (*Araucaria angustifolia*), e milho (*Zea mays*), observados em cálculo dentário, além de macrovestígios de tubérculos, frutos e nozes de palmas (Wesolowski et al., 2010; Boyadjian et al., 2016; Scheel-Ybert & Boyadjian, 2020). Estas plantas precisam ser caracterizadas isotopicamente e incluídas nos modelos dietéticos particulares de cada região. A presença de vestígios de uma planta no registro não significa, por si só, um alto consumo ou dependência, e sua importância dietética deve ser corroborada com análises isotópicas.

Seria interessante examinar como a dieta e os perfis isotópicos das populações pré-históricas acompanharam as hipotéticas mudanças na flora e fauna decorrentes de mudanças climáticas e/ou oscilações do nível do mar (Scheel-Ybert et al., 2009). Neste sentido, plantas de restinga, ambiente considerado chave no desenvolvimento das sociedades da costa brasileira, merecem especial atenção (Scheel-Ybert & Boyadjian, 2020). Também deve ser considerado o teórico incremento nos valores $\delta^{15}\text{N}$ em locais onde se praticava cultivo de corte e queima (Grogan et al., 2000). Valores de carbono de algas marinhas têm mostrado potencial de mimetizar a contribuição de plantas C_4 (como o milho) na dieta e devem ser consideradas nas interpretações (DeSantis et al., 2017).

7.2. Análise das relações humano-fauna

Dentro da análise da fauna, também deveríamos dar especial atenção aos problemas da domesticação, manejo e comensalismo de espécies animais terrestres. Por exemplo, os cachorros, podem ter assinaturas isotópicas semelhantes às humanas em contextos em que se alimentam de restos de refeições domésticas (Guiry, 2013). No sul do Brasil, valores isotópicos de um

Industrial e a queima de combustíveis fosseis que fez com que o valor $\delta^{13}\text{C}$ do CO_2 atmosférico mudasse de -6.5‰ antes do século XIX para -8.4‰ na atualidade (Keeling et al., 2017). Os valores $\delta^{13}\text{C}$ se corrigem por adição de $+1.7\text{‰}$ a $+2\text{‰}$ (Hellevang & Aagaard, 2015).

cachorro proveniente da região de Laguna dos Patos (RS) mostraram uma dieta diferente da maioria de humanos, mas com uma alta contribuição de plantas C_4 , possivelmente milho (Chanca et al., 2021). Este cenário deveria ser testado para animais potencialmente manejáveis como pacas, antas, agutis e macacos, que são comuns no registro arqueológico da costa brasileira. No sambaqui Morro do Ouro (SC), um par de quatis (*Nasua* sp.) datados ~4500 BP, apresentaram valores $\delta^{13}C$ e $\delta^{15}N$ compatíveis com consumo de proteína marinha, diferente à dieta habitual da espécie. Se foram animais consumidores de peixes, animais de estimação alimentados com restos de comida humana, manejados para alimentação ou comensais, é ainda uma incógnita (Toso et al., 2021).

No entanto, este estudo demonstra que no litoral brasileiro, o potencial das análises isotópicas sobre animais “silvestres” vai além da caracterização da dieta humana. Pode-se dizer que este estudo inaugura uma linha de pesquisa nova na arqueologia costeira desta região, onde abre-se um potencial para dialogar com questões contemporâneas como conservação ambiental. Por exemplo, podemos questionar como as sociedades pré-coloniais diretamente ou indiretamente modificaram a abundância, distribuição, capacidade competitiva de espécies sinantrópicas antes da chegada dos europeus. Imediatamente, o registro arqueológico recebe um valor ecológico adicional.

7.3. Dieta e status social

A dieta é também uma expressão de status social e poder. Os sistemas hierárquicos das sociedades humanas podem ser identificados através da análise de estruturas funerárias e é amplamente discutido se as diferenças sociais pré-históricas (de status ou de classe) estavam refletidas em um acesso diferenciado aos recursos (White, 2005). Sabe-se que grupos pré-históricos da costa brasileira tinham práticas funerárias diferenciadas, algumas bastante elaboradas (p.e., *sambaquis*, Tupinambá, Guarani: Fish et al., 2000; Gaspar et al., 2007; Cristante, 2018), mas a correlação entre conteúdo e complexidade do contexto/práticas funerárias, hierarquização intracomunitária e indicadores isotópicos de dieta nunca tem sido testada. Por exemplo, será que a prática da pesca conferia maior status a alguns indivíduos?

Por outro lado, diferenças de gênero no acesso a determinados itens da dieta são recorrentes em populações costeiras brasileiras. Os indivíduos masculinos apresentam valores mais altos de nitrogênio compatíveis com o consumo de proteína de maior nível trófico, enquanto indivíduos femininos mostram uma dieta mais vegetariana (mais plantas C_3). Não está claro

se estas mulheres eram estrangeiras ou simplesmente tinham outras preferências dietéticas (Crouch, 2013; Colonese et al., 2014; Bastos et al., 2015; Pezo-Lanfranco et al., 2018a).

Um promissor campo de pesquisa é o estudo de diferenças de status entre indivíduos de comunidades históricas coloniais, sabidamente hierarquizadas. O conhecimento sobre a dieta da sociedade colonial brasileira deriva de narrativas historiográficas agropastoris e a contribuição de outros sistemas de subsistência é altamente subestimada. A contribuição de alguns grupos alimentares para o surgimento dos primeiros centros urbanos, o impacto das prescrições culturais ou religiosas na dieta (*i.e.*, jejum, tabus) nas sociedades pré-históricas e históricas nunca têm sido estudadas com isótopos estáveis.

Pouco sabemos sobre as minúcias da relação entre dieta e economia em tempos históricos e menos ainda sobre o grau de ruptura dos sistemas econômicos pré-coloniais após o contato. Uma possibilidade de pesquisa nestas populações seria avaliar o impacto da introdução de novas plantas e mamíferos terrestres domesticados nas dietas dos indígenas, tanto aqueles que foram aculturados e integrados à sociedade colonial, como aqueles confinados em *reduções de índios*. O mesmo pode ser avaliado em populações sujeitas ao sistema escravocrata (Bastos et al., 2014). Estas transições dietéticas posteriores ao contato poderiam e deveriam ser contrastadas com dados bioarqueológicos de saúde e atividade para mensurar seus efeitos biológicos.

7.4. Dietas infantis

Os valores isotópicos de carbono e, especialmente, de nitrogênio do colágeno, podem ser usados para reconstruir hábitos de amamentação e dietas infantis. Os infantes mostram valores $\delta^{15}N$ 2–3‰ mais altos que os da sua mãe ou nutriz durante o período de lactação exclusiva. Estes valores diminuem gradualmente à medida que alimentos sólidos vão substituindo o leite materno, até equiparar os valores adultos no final do processo de desmame (para uma síntese sobre este tema vide Tsutaya & Yoneda, 2015). Lactentes exclusivos têm valores $\delta^{13}C$ ~1‰ maiores que os de suas mães, e variações acima de 1‰ são indicativas da introdução da dieta suplementar (Fuller et al., 2006). As variações do $\delta^{13}C$ remetem às fontes (C_3 ou C_4) da dieta infantil.

Há basicamente duas formas de executar um estudo sobre hábitos de desmame e dietas infantis: 1) estudo populacional seccional-cruzado, onde se avaliam valores isotópicos de colágeno ósseo de um número representativo de indivíduos subadultos de todas as idades, que são comparados com os valores dos adultos



femininos, que representam a possível dieta materna (Tsutaya & Yoneda, 2013); e 2) cortes sequenciais de dentina, onde um dente (permanente ou decíduo) pode ser descalcificado totalmente e o colágeno obtido, preservando ainda a forma da dentina, é seccionado horizontalmente para obter valores isotópicos de cada segmento com uma resolução temporal variável, segundo o dente e o número de cortes. Um primeiro molar permanente, por exemplo, pode fornecer 10 segmentos com uma resolução temporal de ~6 meses (Henderson et al., 2014). Uma sofisticação deste método, usando agulhas de biopsia permite a amostragem de até 20 microamostras (1 mm de diâmetro), eliminado o problema da superposição de camadas de dentina, que não se acumulam horizontalmente (Czermak et al., 2020). A idade do desmame é estabelecida quando os valores isotópicos alcançam um valor estável semelhante ao valor dos adultos da comunidade (Figura 9).

consumo de plantas C_3 e menos proteína em meninas, e valores maiores de $\delta^{15}N$ e $\delta^{13}C$ entre os 6 meses e 2.5 anos em meninos, o que poderia ter a ver com vieses de investimento parental ou diferenças adscritas a gênero no consumo de proteína (Pezo-Lanfranco et al., 2018b).

Num estudo derivado do anterior foram avaliados os possíveis efeitos do desmame e introdução das dietas sólidas infantis nas perspectivas de sobrevivência dos indivíduos (Pezo-Lanfranco et al., 2020), verificando-se uma relação entre desmame, estresse metabólico precoce e morte infantil, possivelmente decorrente do potencial infeccioso de alimentos marinhos mal processados.

Trabalhos deste tipo mostram o grande potencial dos isótopos estáveis, em conjunção com dados paleopatológicos, para testar teorias evolucionistas-desenvolvimentistas nas populações da costa do Brasil, e fornecem uma base de comparação para futuros

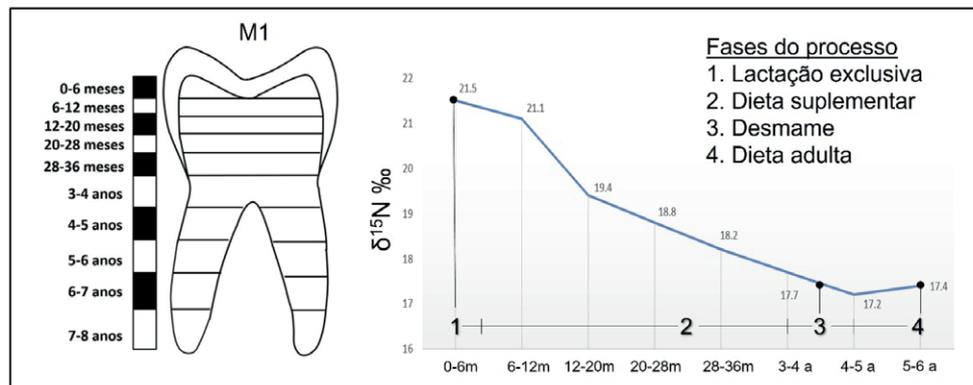


Figura 9. Princípio dos estudos de desmame com cortes sequenciais de dentina (baseado em Henderson et al., 2014).

Apenas dois estudos têm fornecido dados sobre desmame e dietas infantis para a costa do Brasil, ambos em populações do sul. O primeiro deles calculou uma idade de desmame final entre 2-3 anos (média de 2.4 anos) para os infantes do sambaqui Jabuticabeira II (SC) e testou várias hipóteses sobre investimento parental e diferenças de gênero nas dietas infantis (Pezo-Lanfranco et al., 2018b). O segundo, um estudo mais geral, utilizou análise sequencial de dentina em três dentes adultos recuperados de *cerritos* da região de Lagoa dos Patos (RS), mas apenas um dente permitiu uma aproximação à idade de desmame: entre 2-4 anos (Chanca et al., 2021, Fig. 4).

Ao menos para os assentamentos costeiros do sul do Brasil, as dietas sólidas dos bebês eram muito variadas, mas basicamente consistiam em proteína e lipídios de origem marinha e plantas C_3 e C_4 em proporções relativamente baixas (~15-25%). Após o desmame as crianças consumiam virtualmente a mesma dieta dos adultos, mas observou-se uma tendência para um maior

trabalhos. Dentes e ossos de indivíduos subadultos de cemitérios de diferentes épocas, especialmente de períodos históricos marcados por epidemias ou fome, podem oferecer informações sem precedentes sobre a relação entre dieta, estresse e mortalidade em distintos contextos sociais. Este tipo de estudo poderia ser aplicado com especial interesse em grupos sociais desfavorecidos ou escravizados, para avaliar o impacto destas condições no desenvolvimento infantil, nas estratégias de mitigação utilizadas pelas mães, etc.

8. Reflexões finais

Neste trabalho, temos delineado *grosso modo* os métodos, problemas e possíveis aplicações futuras dos estudos isotópicos na arqueologia brasileira. As análises isotópicas são uma ferramenta robusta de crescente aplicação em arqueologia na América do Sul. Porém, o Brasil está um pouco atrás nessa tendência e ainda estamos longe de alcançar o nível das grandes

tradições acadêmicas de aplicação de isótopos da Europa ou América do Norte, principalmente pela falta de laboratórios especializados, equipamentos de última geração e formação recursos humanos, tão dependentes de decisões institucionais. Aumentar o treinamento, investir em infraestrutura laboratorial, além de fortalecer as colaborações internacionais é o caminho a percorrer. A criação de uma “rede isotópica”, nacional ou internacional, poderia facilitar o desenvolvimento da área.

Os métodos isotópicos, por seu grande potencial no estudo da dieta, uma dimensão neurálgica para entender a sociedade como um todo, estão chamados a enriquecer futuros debates teórico-metodológicos da arqueologia no Brasil. Porém, não devemos esquecer que todas as técnicas de reconstrução paleodietética são importantes e, para uma correta interpretação de dados, é aconselhável integrar informações de todas elas.

Finalmente, muitas vezes as respostas da arqueologia estão além das leituras estritamente arqueológicas. Subsídios de outras disciplinas envolvidas no estudo da dieta como nutrição, biologia, medicina e, especialmente, ecologia, podem iluminar nossas interpretações.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo 2017/17580-0) e o Projeto *ERC Consolidator TRADITION*, que recebe fundos do Conselho de Pesquisa Europeu (*European Research Council - ERC*) sob o programa *Horizon* de pesquisa e inovação da União Europeia 2021 N°101062179. O trabalho contribui com o Programa “María de Maeztu” para Unidades de Excelência do Ministério de Ciência e Inovação da Espanha (CEX2019-000940- M).

9. Referências

Albeke, S. E. (2017). *rKIN:(kernel) isotope niche estimation*. R package version 0.1.

Ambrose, S. H. (1991). Effects of diet, climate and physiology on nitrogen isotope abundances in terrestrial foodwebs. *Journal of Archaeological Science*, 18(3), 293-317.

Ambrose, S. H. (2000). Controlled diet and climate experiments on nitrogen isotope ratios of rats. En S.H. Ambrose & M.A. Katzenberg (Eds.) *Biogeochemical Approaches to Paleodietary Analysis* (pp. 243-259). New York: Kluwer Academic Publishers.

Ambrose, S. H. & Norr, L. (1993). Experimental evidence for the relationship of the carbon stable isotope

ratios of whole diet and dietary protein to those of bone collagen and carbonate. In J.B. Lambert & G. Grupe (Eds.) *Prehistoric human bone: archaeology at the molecular level* (pp. 1-38). Berlin: Springer-Verlag.

Bandeira, D. (2004). *Ceramistas pre-coloniais da Baía da Babitonga, SC: arqueologia e etnicidade*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.

Bandeira, A. M. (2011). O povoamento da América visto a partir dos sambaquis do litoral equatorial amazônico do Brasil. *FUMDHAMentos*, 7, 430-468.

Bastos, M. Q. R. (2014). *Dos Sambaquis do sul do Brasil à diáspora africana: Estudos de geoquímica isotópica de séries esqueléticas humanas escavadas de sítios arqueológicos brasileiros*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília.

Bastos, M. Q. R., Mendonça de Souza, S.F., Santos, Roberto V., Lima, B.A.F., Santos, Ricardo V. & Rodrigues-Carvalho, C. (2011). Human mobility on the Brazilian coast: analysis of strontium isotopes in archaeological human remains from the sambaqui of Forte Marechal Luz. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 83(2), 731-743.

Bastos, M. Q. R., Lessa, A., Rodrigues-Carvalho, C., Tykot, R. H. & Santos, R. V. (2014). Análise de carbono e nitrogênio: a dieta antes e após a presença de cerâmica no sítio Forte Marechal Luz. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, 24, 137-151.

Bastos, M. Q. R., Santos, R. V., Tykot, R. H., Mendonça de Souza, S. F., Rodrigues-Carvalho, C. & Lessa, A. (2015). Isotopic evidence regarding migration at the archaeological site of Praia da Tapera: New data to an old matter. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 4, 588-595.

Bocherens, H. & Drucker, D. (2003). Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. *International Journal of Osteoarchaeology*, 13, 46-53.

Boyadjian, C. H. C., Eggers, S., Reinhard, K. J. & Scheel-Ybert, R. (2016). Dieta no sambaqui Jabuticabeira-II (SC): Consumo de plantas revelado por microvestígios provenientes de cálculo dentário. *Cadernos do LEPAARQ (UFPEL)*, 13, 131-161.

Chanca, I., Borges C. & Colonese A. C. (2021). Food and diet of the pre-Columbian mound builders of the Patos Lagoon region in southern Brazil with stable isotope analysis. *Journal of Archaeological Science*, 133, 105439.

Chisholm, B. S. (1989). Variation in diet reconstructions based on stable carbon isotopic evidence. In Price T.D. (Ed.) *The Chemistry of Prehistoric Human Bone* (pp. 10-37). Cambridge: Cambridge University Press.

Casey, M. M. & Post, D. M. (2011). The Problem of Isotopic Baseline: Reconstructing the Diet and Trophic



- Position of Fossil Animals. *Earth Science Reviews*, 106, 131-148.
- Cerling, T. E., Manthi, F. K., Mbuu, E. N., Leakey, L. N. & Leakey, M. G., et al. (2013). Stable isotope based diet reconstructions of Turkana Basin hominins. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 110(26), 10501-10506.
- Choy, K., Smith, C. I., Fuller, B. T., Richards, M. P. (2010). Investigation of amino acid $\delta^{13}\text{C}$ signatures in bone collagen to reconstruct human palaeodiets using liquid chromatography–isotope ratio mass spectrometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 6093–6111.
- Cohen, M. N. & Crane-Cramer, G. M. (Eds.) (2007). *Ancient health: Skeletal indicators of agricultural and economic intensification*. Gainesville: University Press of Florida.
- Colonese, A. C., Collins, M., Lucquin, A., Eustace, M., Hancock, Y., et al. (2014). Long-term resilience of late holocene coastal subsistence system in Southeastern South America. *PLoS ONE*, 9, e93854.
- Colonese, A. C., Winter, R., Brandi, R., Fossile, T. & Fernandes, R. et al. (2020). Stable isotope evidence for dietary diversification in the preColumbian Amazon. *Scientific Reports*, 10, e16560.
- Corr, L. T., Sealy, J. C., Horton, M. C. & Evershed, R. P. (2005). A novel marine indicator utilising compound-specific bone collagen amino acid $\delta^{13}\text{C}$ values of ancient humans. *Journal of Archaeological Science*, 32, 321-330.
- Cristante, M. A. P. (2018). Arqueologia das Práticas Mortuárias de Grupos Tupinambá e Guarani. *Clio Arqueológica* 33(2), 184-245.
- Crouch, M. S. P. (2013). *Testing the Subsistence Model for the Adoption of Ceramic Technology Among Coastal Sambaqui Foragers of Southern Brazil*. Doctoral dissertation. Texas A & M University.
- Czermak, A., Fernández-Crespo, T., Ditchfield, P. W. & Julia Lee-Thorp. (2020). A guide for an anatomically sensitive dentine microsampling and age-alignment approach for human teeth isotopic sequences. *American Journal of Physical Anthropology*, 173(4), 776-783.
- DeBlasis, P., Kneip, A., Scheel-Ybert, R., Giannini, P. & Gaspar, M. (2007). Sambaquis e Paisagem: Dinâmica Natural e Arqueologia Regional no Litoral Sul do Brasil. *Arqueologia Sudamericana Arqueologia Sul-americana*, 3(1), 29-61.
- DeMasi, M. A. N. (2001). *Pescadores coletores da costa Sul do Brasil*. Pesquisas, Série Antropologia 57 (pp. 1-136). São Leopoldo RS: Instituto Anchieta de Pesquisas.
- DeNiro, M. J. (1985). Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to paleodietary reconstruction. *Nature*, 317, 806-809.
- DeNiro, M. J. & Epstein, S. (1978). Influence of diet on distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42, 495-506.
- DeSantis, L. R. G., Dillehay, T., Goodbred Jr., S. L. & Feranec, R. S. (2017). Dietary ecology, stable isotope and dental microwear texture analysis. In T. Dillehay (ed.) *Where the land meets the sea: fourteen millennia of human history at Huaca Prieta, Peru*. Appendix 6. Austin: University of Texas Press.
- Eerkens, J. W., Berget, A. G. & Bartelink, E. J. (2011). Estimating weaning and early childhood diet from serial micro-samples of dentin collagen. *Journal of Archaeological Science*, 38, 3101-3111.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). *Edible Insects: a solution for food and feed security*. Rome: United Nations.
- Fernandes, R., Nadeau, M. J. & Grootes, P. M. (2012). Macronutrient-based model for dietary carbon routing in bone collagen and bioapatite. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 4, 291-301.
- Fernandes, R., Millard, A. R., Brabec, M., Nadeau M. J. & Grootes P. (2014). Food Reconstruction Using Isotopic Transferred Signals (FRUITS): A Bayesian Model for Diet Reconstruction. *PLoS ONE*, 9(2), e87436.
- Fernandes, R., Grootes P., Nadeau M. J. & Nehlich O. (2015). Quantitative Diet Reconstruction of a Neolithic Population Using a Bayesian Mixing Model (FRUITS): The Case Study of Ostorf (Germany). *American Journal of Physical Anthropology*, 158, 325-340.
- Fernandes, R. (2016). *FRUITS Manual*. Second edition. Disponível em Internet: [https:// sourceforge.net/ projects/fruits/](https://sourceforge.net/projects/fruits/)
- Figuti, L. (1993). O homem pré-histórico, o molusco e os sambaquis: considerações sobre a subsistência dos povos sambaquieiros. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, 3, 67-80.
- Fish, S. K., DeBlasis, P. A. D., Gaspar, M. D. & Fish, P. R. (2000). Eventos Incrementais na Construção de Sambaquis, Litoral Sul do Estado de Santa Catarina. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, 10, 69-87.
- Flandrin, J. L. & Montanari, M. (Eds.) *História da Alimentação*. São Paulo: Estação Liberdade.
- Fogel, M. L., Tuross, N. & Owsley, D.W. (1989). Nitrogen isotope traces of human lactation in modern and archeological populations. *Carnegie Institution Yearbook 1988*, 111-117.
- Fossile, T., Ferreira, J., Bandeira D. R., Figuti, L., Dias-da-Silva, S., Hausmann, N., Robson, H. K., Orton, D., Colonese, A. C. (2019). Pre-Columbian fisheries catch reconstruction for a subtropical estuary in South America. *Fish and Fisheries*, 20 (6), 1124-1137.
- France, C. A. M., Sugiyama, N. & Aguayo, E. (2020).

- Establishing a preservation index for bone, dentin, and enamel bioapatite mineral using ATR-FTIR. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 33, e102551.
- Froehle, A. W., Kellner, C. M. & Schoeninger, M. J. (2012). Multivariate carbon and nitrogen stable isotope model for the reconstruction of prehistoric human diet. *American Journal of Physical Anthropology*, 147, 852-869.
- Fry, B. (2006) *Stable isotope ecology*. New York: Springer Science and Business Media LLC.
- Fuller, B. T., Richards, M. P. & Mays, S. A. (2003). Stable carbon and nitrogen isotope variations in tooth dentine serial sections from Wharram Percy. *Journal of Archaeological Science*, 30, 1673-1684.
- Fuller, B. T., Fuller, J. L., Harris, D. A. & Hedges, R. E. M. (2006). Detection of breastfeeding and weaning in modern human infants with carbon and nitrogen stable isotope ratios. *American Journal of Physical Anthropology*, 129, 279-293.
- Gaspar, M. D. (2014). Sambaquis shell mounds. In Smith, C. (ed.) *Encyclopedia of Global Archaeology* (pp. 6449-6454). New York: Springer.
- Gaspar, M. D., Buarque, A., Cordeiro, J. & Escórcio, E. (2007). Tratamento dos Mortos entre os Sambaquieiros, Tupinambá e Goitacá que ocuparam a Região dos Lagos, Estado do Rio de Janeiro. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, 17, 169-189.
- Grogan, P., Burns, T. D., & Chapin III, F. S. (2000). Fire effects on ecosystem nitrogen cycling in a Californian bishop pine forest. *Oecologia*, 122 (4), 537-544.
- Guiry, E. J. (2013). A canine surrogacy approach to human paleodietary bone chemistry: past development and future directions. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 5, 275-286.
- Hayden, B. (2009). The proof is in the pudding. Feasting and the origins of domestication. In Cohen M.N. (Ed). *Rethinking the origins of agriculture*. *Current Anthropology*, 50 (5), 597-601.
- Hedges, R. E. M., Clement, J. G., Thomas, D. L. & O'Connell, T. C. (2007). Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: Modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *American Journal of Physical Anthropology*, 133, 808-816.
- Hedges, R. E. M. & Reynard, L. M. (2007). Nitrogen isotopes and the trophic level of humans in archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 34(8), 1240-1251.
- Hellevang, H. & Aagaard, P. (2015). Constraints on natural global atmospheric CO₂ fluxes from 1860 to 2010 using a simplified explicit forward model. *Science Reports*, 5, e17352.
- Henderson, R. C., Lee-Thorp, J. & Loe, L. (2014). Early Life Histories of the London Poor Using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ Stable Isotope Incremental Dentine Sampling. *American Journal of Physical Anthropology*, 154: 585-593.
- Hermenegildo, T., O'Connell, T. C., Guapindaia, V. L. C. & Neves, E. G. (2017). New evidence for subsistence strategies of late pre-colonial societies of the mouth of the Amazon based on carbon and nitrogen isotopic data. *Quaternary International*, 448, 139-149.
- Honch, N. V., McCullagh, J. S. O., Hedges, R. E. M. (2012). Variation of bone collagen amino acid $\delta^{13}\text{C}$ values in archaeological humans and fauna with different dietary regimes: developing frameworks of dietary discrimination. *American Journal of Physical Anthropology*, 148, 495-511.
- Jackson, A. L., Inger, R., Parnell, A. C. & Bearhop, S. (2011). Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER—Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. *Journal of Animal Ecology*, 80(3), 595-602.
- Jim, S., Jones, V., Ambrose, S. & Evershed, R. P. (2006). Quantifying dietary macronutrient sources of carbon for bone collagen biosynthesis using natural abundance stable carbon isotope analysis. *British Journal of Nutrition*, 95, 1055-1062.
- Keeling, R. F., Graven, H. D., Welp, L. R., Resplandaya, L. Bi, J., Piper, S. C., Sun, Y., Bollenbacher, A. & Meijer, H. A. J. (2017). Atmospheric evidence for a global secular increase in carbon isotopic discrimination of land photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 114 (39), 10361-10366.
- Kellner, C. & Schoeninger, M. J. (2007). A simple carbon isotope model for reconstructing prehistoric human diet. *American Journal of Physical Anthropology*, 133, 1112-1127.
- Kellner, C. & Schoeninger, M. J. (2008). Wari's imperial influence on local Nasca diet: the stable isotope evidence. *Journal of Anthropological Archaeology*, 27, 226-243.
- Kinas, P. G. & Andrade, H. A. (2017). *Introdução à análise Bayesiana (com R)*. São Paulo: Consultor editorial.
- Klöckler, D. (2008). *Food for Body and Soul: Mortuary Ritual in Shell Mounds (Laguna - Brazil)*. Ph.D. Dissertation. Tucson: University of Arizona.
- Knudson, K. J. (2009). Oxygen isotope analysis in a land of environmental extremes: the complexities of isotopic work in the Andes. *International Journal of Osteoarchaeology*, 19, 171-191.
- Kohn, M. J. Carbon isotope compositions of terrestrial C₃ plants as indicators of (paleo)ecology and (paleo) climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 107 (46), 19691-19695.
- Kujit, I. (2009) What do we really know about food storage, surplus, and feasting in preagricultural communities? In Cohen M.N. (Ed). *Rethinking the origins of agriculture*. *Current Anthropology*, 50 (5), 641-644.



- Lamb, A. L., Evans, J. E., Buckley, R. & Appleby, J. (2014). Multi-isotope analysis demonstrates significant lifestyle changes in King Richard III. *Journal of Archaeological Science*, 50, 559-565.
- Lévi-Strauss, C. (1968). *Lo crudo y lo cocido*. Mitológicas, volumen I. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- Lyman, R. L. (1994). *Vertebrate Taphonomy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lyman, R. L. (2008). *Quantitative Paleozoology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Martínez del Rio, C., Wolf, N., Carleton, S. A. & Gannes, L. Z. (2009). Isotopic ecology ten years after a call for more laboratory experiments. *Biological Reviews*, 84(1), 91-111.
- Milheira, R. G. & Gianotti Garcia, C. (2018). The earthen mounds (cerritos) of southern Brazil and Uruguay. In Smith C. (Ed.) *Encyclopedia of Global Archaeology* (pp. 1-9). Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51726-1_3025-1
- Minagawa, M. & Wada, E. (1984). Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1135-1140.
- Moseley, M. E. (1975). *The maritime foundations of Andean Civilization*. Menlo Park, California: Cummings Publishing Company.
- Moseley, M. E. (2005). *The maritime foundations of Andean civilization: An evolving hypothesis*. In <http://www.hallofmaat.com/modules.php?name=Articles&file=article&sid=85>
- Naito, Y. I., Honch, N. V., Chikaraishi, Y., Ohkouchi, N. & Yoneda, M. (2010). Quantitative Evaluation of Marine Protein Contribution in Ancient Diets Based on Nitrogen Isotope Ratios of Individual Amino Acids in Bone Collagen: An Investigation at the Kitakogane Jomon Site. *American Journal of Physical Anthropology*, 143(1), 31-40.
- Nanci, A. (2011). *Ten Cate histologia oral*. São Paulo: Mosby, Elsevier.
- O'Connell, T. C., Hedges, R. E., Healey, M. A. & Simpson, A. H. R. W. (2001). Isotopic Comparison of Hair, Nail and Bone: Modern Analyses. *Journal of Archaeological Science*, 28(11), 1247-1255.
- O'Connell, T. C., Kneale, C. J., Tasevska, N. & Kuhnle, G. G. C. (2012). The Diet-Body Offset in Human Nitrogen Isotopic Values: A Controlled Dietary Study. *American Journal of Physical Anthropology*, 149, 426-434.
- O'Leary, M. H. (1988). Carbon isotopes in photosynthesis. *Bioscience*, 36, 328-335.
- Oka, R. & Kusimba, C. M. (2008). The archaeology of trading systems, Part 1: towards a New trade synthesis. *Journal of Archaeological Research*, 16, 339-395.
- Okumura, M. M. M. (2008). *Diversidade morfológica craniana, micro-evolução e ocupação pré-histórica da costa brasileira*. Tese de Doutorado. Instituto de Biociências. Universidade de São Paulo.
- Oppitz, G., Bastos, M. Q. R., Zanenga Scherer, L., Lessa, A., Martins, V., Camargo, P. & DeBlasis, P. (2018). Pensando sobre mobilidade, dieta e mudança social: análises isotópicas no sítio Armação do Sul, Florianópolis/SC. *Cadernos do LEPAARQ (UFPEL)*, 15, 237-266.
- Panarello, H. O., Tessone, A., Killian Galván, V. A., Samec, C. T. & Kochi, S. (2021). 35 años de análisis de Isótopos Estables en la Arqueología Argentina: Conceptos, fundamentos, metodología y aplicaciones. *Cuadernos del Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano*, 30 (1), 1-41.
- Parnell, A. C., Inger, R., Bearhop, S. & Jackson, A. L. (2010). Source Partitioning Using Stable Isotopes: Coping with Too Much Variation. *PLoS ONE*, 5(3), e9672.
- Pearsall, D. M. (2015). *Paleoethnobotany: A Handbook of Procedures*. 3rd edition. San Diego: Academic Press.
- Pezo-Lanfranco, L., Eggers, S., Petronilho, C., Toso, A., da Rocha Bandeira, D., Von Tersch, M., dos Santos, A. M. P., da Costa, B. R., Meyer, R. & Colonese, A. C., (2018a). Middle holocene plant cultivation on the atlantic forest coast of Brazil? *Royal Society Open Science*, 5, e180432.
- Pezo-Lanfranco, L., DeBlasis, P. & Eggers, S. (2018b). Weaning process and subadult diets in a monumental Brazilian shellmound. *Journal of Archaeological Science Reports*, 22, 452-469.
- Pezo-Lanfranco, L., Filippini, J., Di Giusto, M., Petronilho, C., Wesolowski, V., DeBlasis, P. & Eggers, S. (2020). Child development, physiological stress and survival expectancy in prehistoric Fisher-hunter-gatherers from the Jabuticabeira II shell mound, South Coast of Brazil. *PLoS ONE*, 15, e0229684.
- Phillips, D. L. (2012). Converting isotope values to diet composition: the use of Mixing Models. *Journal of Mammalogy*, 93(2), 342-352.
- Piperno, D. R. (2011). The origins of plant cultivation and domestication in the new world tropics: Patterns, process, and new developments. In *The Origins of Agriculture: New Data, New Ideas*. *Current Anthropology*, 52 (S4), S453-S470.
- Price, T. D., & Burton, J. H. (2011). *An introduction to archaeological chemistry*. New York: Springer.
- Pugliese, F. A., Zimpel, C. A. & Neves, E. G. (2018). What do Amazonian Shellmounds tell us about the long-term indigenous history of South America. In Smith, C. (Ed.), *Encyclopedia of Global Archaeology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51726-1_3030-2
- Richards, M. P., Harvati, K., Grimes, V., Smith, C., Smith, T., Hublin, J. J., Karkanas, P. & Panagopoulou, E. (2008).

- Strontium isotope evidence of Neanderthal mobility at the site of Lakonis, Greece using laser-ablation PIMMS. *Journal of Archaeological Science*, 35, 1251-1256.
- Roosevelt, A. C. (1989). Resource management in Amazonia before the conquest: Beyond ethnographic projection. *Advances in Economic Botany* 7, 30-62.
- Roosevelt, A. C. (2000). The Lower Amazon: A Dynamic Human Habitat. In Lentz, D. L. (Ed.) *Imperfect Balance: Landscape Transformations in the Precolumbian Americas*. pp.455-491. New York: Columbia University Press.
- Scheel-Ybert, R., Afonso, M. C., Barbosa-Guimarães, M., Gaspar, M. D. & Ybert, J. P. (2009). Considerações sobre o papel dos sambaquis como indicadores do nível do mar. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 1 (1), 3-9.
- Scheel-Ybert, R. & Boyadjian, C. (2020). Gardens on the coast: considerations on food production by Brazilian shellmound builders. *Journal of Anthropological Archaeology*, 60, e101211.
- Schoeninger, M. J. (2010). Diet reconstruction and ecology using stable isotope ratios. Em: Larsen CS. (ed). *A companion to biological anthropology* (pp. 445-464). Blackwell Companions to Anthropology. Oxford: Willey-Blackwell.
- Schoeninger, M. J. & DeNiro, M. J. (1984). Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 625-639.
- Sealy, J. C., van der Merwe, N. J., Lee-Thorp, J. A. & Lanham, J. L. (1987). Nitrogen isotopic ecology in Southern Africa. Implications for environmental and dietary tracing. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(10), 2707-2717.
- Short, A. D. & Klein, A. H. F. (eds.) (2016). *Brazilian Beach Systems*. Coastal Research Library, Springer.
- Smith, B. N. & Epstein, S. (1971). Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiology*, 47, 380-384.
- Szpak, P. (2014). Complexities of nitrogen isotope biogeochemistry in plantsoil systems: implications for the study of ancient agricultural and animal management practices. *Frontiers in Plant Science*, 5, e288. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00288>
- Szpak, P., Metcalfe, J. Z. & Macdonald R. A. (2017). Best Practices for Calibrating and Reporting Stable Isotope Measurements in Archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 13, 609-616.
- Thomas, S. M., Kainz, M. J., Amundsen, P-A., Hayden, B., Taipale, S. J. & Kahilainen, K. K. (2019). Resource polymorphism in European whitefish: Analysis of fatty acid profiles provides more detailed evidence than traditional methods alone. *PLoS ONE*, 14(8), e0221338.
- Toso, A., Hallingstad, E., McGrath, K., Fossile, T., Conlan, C., et al. (2021). Fishing intensification as response to Late Holocene socio-ecological instability in southeastern South America. *Scientific Reports* 11, e23506. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02888-7>
- Tsutaya, T. & Yoneda, M. (2013). Quantitative reconstruction of weaning ages in archaeological human populations using bone collagen nitrogen isotope ratios and approximate Bayesian computation. *PLoS ONE*, 8 (8), e72327.
- Tsutaya, T. & Yoneda, M. (2015). Reconstructions of Breastfeeding and Weaning Practices using Stable Isotope and Trace Element Analyses: A Review. *Yearbook of Physical Anthropology*, 156, 2-21.
- Wagner, G., Hilbert, K., Bandeira, D., Tenório, M. C. & Okumura, M. M. M. (2011). Sambaquis (shell mounds) of the Brazilian coast. *Quaternary International*, 239, 51-60.
- Watson, L. C., Stewart, D. J. & Teece, M. A. (2013). Trophic ecology of Arapaima in Guyana: giant omnivores in Neotropical floodplains. *Neotropical Ichthyology*, 11(2), 341-349.
- Wesolowski, V., Mendonça de Souza, S. M. F, Reinhard, K. J. & Ceccantini, G. (2010). Evaluating microfossil content of dental calculus from Brazilian sambaquis. *Journal of Archaeological Science*, 37, 1326-1338.
- White, C. D. (2005). Gendered food behaviour among the Maya Time, place, status and ritual. *Journal of Social Archaeology*, 5(3), 356-382.
- Yesner, D. R. (1980). Maritime hunter-gatherers: Ecology and prehistory. *Current Anthropology*, 21(6), 727-750.
- Zhao, Y., Yang, Y-B., Guo, Y., Ren, G-Y. & Zhang, F-C. (2021). Stable carbon isotope composition of bone hydroxylapatite: significance in paleodietary analysis, *Palaeoworld* <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2021.02.004>