



RECONSTRUCCIÓN DE LA  
DISTRIBUCIÓN DE ANCHOVETA,  
SARDINA Y MERLUZA FRENTE A LA  
COSTA CENTRAL DE PERÚ DURANTE  
LA TERMINACIÓN 1 (18-13 KYRS BP)

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR

JOSÉ AUGUSTO SOLÍS BENITES

LIMA – PERÚ

2022



**ASESOR**

Dr. Dimitri Gutiérrez

**CO ASESOR**

Dr. Renato Salvattecí

**JURADO DE TESIS**

DR. MATTHIEU CARRÉ

PRESIDENTE

DR. BRUNO TURQ

VOCAL

DRA. DIANA OCHOA

SECRETARIA

### **Agradecimientos y fuentes de financiamientos**

La realización y culminación de esta tesis fue posible gracias los apoyos del proyecto Clima, Paleoambientes y Biodiversidad en Sistemas Marinos y acuáticos Continentales, MAGNET-CONCYTEC y a sus miembros del grupo (Dr. Matheiu, Jorge, Alexander, Diana, Juan y Rodolfo), al Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD, siglas en francés), Proyecto PALEOPECES y PALEOTRACES.

Mi entero agradecimiento a Dr. Renato Salvattecí, por haber sido el director real de esta tesis por su tiempo invertido en guiarme y por sus revisiones minuciosas en hacer este trabajo; y al Dr. Dimitri Gutiérrez por su apoyo con sugerencias precisas y críticas.

Además, agradezco la gran ayuda del Dr. Bruno Turcq y del Dr. Pedro Tapia; gracias a ustedes aprendí los aspectos básicos de estratigrafía y geología del Cuaternario.

Agradezco también al MSc. Arturo Campusano en compartir sus conocimientos aprendidos sobre trabajo de microfósiles en sedimentos marinos y a los miembros del Laboratorio de Geología Marina-IMARPE (Ing. Federico, Juana, MSc. Ernesto y Dra. Úrsula), Dr. Pepe Espinoza del Laboratorio de Ecología Trófica-IMARPE y al MSc. Dennis Romero del Laboratorio de Bentos Marino- IMARPE.

Una mención especial para Marco Yseki, por ser partner de esta tesis sin importar la distancia.

Este trabajo se lo dedico a: “Los que estuvieron, los que están y los que estarán a mi lado”. Disculpen por si no los menciono a todos.

# RECONSTRUCCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ANCHOVETA, SARDINA Y MERLUZA FRENTE A LA COSTA CENTRAL DE PERÚ DURANTE LA TERMINACIÓN 1 (18-13 KYRS BP)

## INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
2	<a href="https://cybertesis.unmsm.edu.pe">cybertesis.unmsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="https://repositorio.udec.cl">repositorio.udec.cl</a> Fuente de Internet	<1%
4	<a href="https://repositorio.upch.edu.pe">repositorio.upch.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="https://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1%
6	Submitted to Universidad Peruana Cayetano Heredia Trabajo del estudiante	<1%
7	<a href="http://www.imarpe.pe">www.imarpe.pe</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="http://www.scribd.com">www.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1%

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN

ABSTRACT

I. Introducción .....	1
II. Planteamiento de la Investigación .....	5
2.1 Planteamiento del Problema .....	5
2.2 Marco Teórico .....	7
2.2.1 Factores que modularon el clima en el periodo isotópico marino 2 .	7
2.2.2 Condiciones generales océano-atmósfera en el borde oriental del Pacífico durante MIS 2.....	10
2.2.3 Desnitrificación de las aguas durante Terminación 1 .....	13
2.2.4 Distribución latitudinal actual de los principales peces marinos representados en los testigos frente a Perú.....	15
2.2.4.1 Anchoveta ( <i>Engraulis ringens</i> ) .....	15
2.2.4.2 Sardina ( <i>Sardinops sagax</i> ) .....	17
2.2.4.3 Merluza ( <i>Merluccius gayi</i> ).....	18
2.2.4.4 Caballa ( <i>Scomber japonicus</i> ).....	20
2.2.4.5 Jurel ( <i>Trachurus Murphyi</i> ).....	21
2.2.4.6 Peces mesopelágicos.....	23
2.2.5 Preservación de restos de peces en sedimentos marinos frente el Perú .....	25
2.2.6 Estudios realizados con restos de peces frente al Perú durante la T1 . .....	28

2.2.7	Estudios realizados con restos de peces en el Perú desde 2 Kyr BP a 1960 A.D .....	34
2.2.8	Estudios realizados con desembarques pesqueros en el Perú durante los últimos 70 años.....	35
2.3	Justificación del estudio.....	36
2.4	Objetivo .....	38
2.4.1	Objetivo general .....	38
2.4.2	Objetivo específico.....	38
III.	Metodología.....	39
3.1	Hipótesis .....	39
3.1.1	Diseño del estudio .....	40
3.1.2	Población de estudio .....	40
3.1.3	Muestra.....	40
3.2	Operacionalización de las variables.....	42
3.2.1	Variables respuesta.....	42
3.2.2	Variables explicativas .....	43
3.3	Procedimiento y técnicas .....	43
3.3.1	Estratigrafía del Testigo M772-005-3.....	44
3.3.1.1	Descripción del testigo.....	44
3.3.1.2	Densidad Aparente Seca .....	45
3.3.2	Índice de Preservación de sedimentos laminados .....	46
3.3.2.1	Cronología .....	47
3.3.2.2	Tasa de Acumulación de masa.....	47
3.3.2.3	Composición de restos de peces .....	47



3.4	Índices de preservación de los restos de peces .....	48
3.4.1	Índice de integridad para las escamas .....	48
3.4.2	Integridad de vértebras .....	49
3.4.3	Integridad de espinas.....	50
3.4.4	Integridad de otros huesos.....	50
3.4.5	Índice de libre de bio-erosión para restos de peces.....	51
3.4.6	Razón escamas entre huesos .....	51
3.4.7	Índice compuesto de escamas de peces (ICP).....	51
3.4.8	Flujos de escamas y restos óseos .....	52
3.5	Plan de Análisis .....	53
IV.	Resultados .....	57
4.1	Estratigrafía del testigo M772-005-3.....	57
4.1.1	Descripción del Testigo.....	57
4.1.2	Densidad Aparente Seca (DBD) .....	58
4.1.3	Índice de Preservación de sedimentos laminados (IPSL) .....	59
4.1.4	Cronología.....	59
4.1.5	Tasa de Acumulación de masa (W) y tasa de sedimentación (S) ...	60
4.2	Observaciones de restos óseos de peces en el testigo M772-005-3.....	64
4.3	Composición de restos de peces en el Testigo M772-005-3 .....	65
4.3.1	Composición de los restos ictiológicos.....	65
4.3.2	Registros de restos de peces.....	66
4.3.3	Proporciones de restos completos a fragmentos .....	74
4.4	Índices de preservación de los restos de peces en el Testigo M772-005-3 ..	76
4.4.1	Índices de integridad de restos peces .....	76

4.4.2	Índices de libre de bio-erosión de restos de peces .....	76
4.4.3	Razón de escamas a vertebras .....	77
4.4.4	Índice compuesto de preservación de las escamas (ICP).....	77
4.5	Análisis temporal de la abundancia y los flujos de restos peces en el testigo M772-005-3. ....	79
4.5.1	Flujos de restos de peces desde la Terminación 1 hasta el Holoceno Tardío .....	79
4.5.2	Asociaciones de los flujos de especies de peces por periodo de tiempo.....	81
4.6	Relación de la desnitrificación sobre los restos de peces frente a Callao.....	83
4.7	Relación de la productividad sobre los restos de peces frente a Callao .....	88
4.8	Relación de la TSM sobre los restos de peces frente a Callao durante T1 ...	90
V.	Discusión .....	91
5.1	Rol de la oxigenación en la preservación de restos de peces frente a Callao, Chimbote y Pisco.....	93
5.2	Asociación de las series de tiempo de los restos de peces con las variables biogeoquímicas frente a Callao .....	99
5.3	Abundancias y flujos de restos de peces agrupados por periodo de tiempo frente Callao.....	103
5.4	Abundancias relativas de los principales peces frente a Perú durante la T1 y el Holoceno tardío.....	109
5.5	Cambios en los flujos de restos de peces frente a Perú durante T1 .....	112
5.6	Rol de las variables biogeoquímicas y de la posición espacial sobre las poblaciones de peces frente a Perú durante T1.....	117

VI. Conclusiones.....	135
VII. Recomendaciones .....	137
VIII. Referencias Bibliográficas .....	138
IX. Anexos	

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. La distribución vertical de las principales especies comerciales de necton en el ecosistema de surgencia de la costa peruana .....	15
Figura 2. Esquema de la Distribución de las unidades poblaciones de pesca de Anchoqueta y Sardina. ....	17
Figura 3. Distribución de la población de Merluza según su concentración en Junio 1996 y en Junio 1997. ....	19
Figura 4. Variaciones anuales medias de la distribución de oxígeno disuelto (ml/L). entre los 50 a 180 m. de profundidad, durante los años de 1980 a 2006... ..	20
Figura 5. Distribución de Caballa frente al Perú.....	21
Figura 6. Extensión y abundancia de Jurel.....	22
Figura 7. El esquema representa las corrientes, contracorrientes. ....	24
Figura 8. Comparación de los flujos de escamas e índices de alteración física (IAF) de escamas con los indicadores geoquímicos versus la edad.....	30
Figura 9. Comparación de flujos de escamas y vértebras de anchoqueta con indicadores paleoambientales y índices de preservación de escamas y restos óseos.....	32
Figura 10. Zona de estudio.....	41
Figura 11. Tabla de los Índices de Preservación de sedimentos laminados (IPSL) además incluye ejemplos de seis grados. ....	46
Figura 12. Esquema de vértebras según la posición en la columna vertebral de un pez óseo. ....	50
Figura 13. Esquema de la descripción estratigráfica del testigo M772-005-3.....	58
Figura 14. Modelo de edad basado en masa acumulada y edad de cada testigo... ..	61

Figura 15. Estratigrafía del testigo M772-005-3 versus la profundidad .....	63
Figura 16. Fotos de restos de peces encontradas en M772-005-3.....	64
Figura 17. Abundancia relativa de restos de peces (número de restos $\times$ g <sup>-1</sup> ) en el testigo M772-005-3 versus la profundidad.....	69
Figura 18. Abundancia relativa de escamas (# $\times$ g <sup>-1</sup> ) por especies o grupos taxonómicos versus la profundidad .....	71
Figura 19. Abundancias relativas de Vertebras (# $\times$ g <sup>-1</sup> ) versus la profundidad.....	73
Figura 20. Razón de restos de peces entre sus respectivos fragmentos versus profundidad.....	75
Figura 21. Los principales índices de preservación versus profundidad en el testigo M772-005-3. ....	78
Figura 22. Diagrama circular de los flujos de escamas en porcentaje (%) por cada periodo de tiempo. ....	82
Figura 23. Comparación de las abundancias de restos de peces con las condiciones ambientales. ....	86
Figura 24. Comparación de los flujos de restos de peces con las condiciones ambientales. ....	87
Figura 25. Comparación de la preservación de los restos de peces con las condicionales oxigenación y preservación de sedimentos laminados. ...	95
Figura 26. Índices de preservacion de sedimentos laminados frente Chimbote (A) denominado como Índice de bioturbación por Campusano (2013) y frente a Callao (B) denominado “IPSL” en el presente trabajo durante T1.....	96
Figura 27. Análisis de componentes principales de los indicadores biogeoquímicos, índices de preservación y flujos de restos de peces. ....	99

Figura 28. Esquema de correlaciones de los dos factores .....	100
Figura 29. Serie de tiempo de los tres principales componentes principales y las variables que representan durante T1 .....	102
Figura 30. Promedio y desviación estándar de las abundancias e índices de preservación de restos de peces agrupadas por periodos de tiempo frente a Callao .....	105
Figura 31. Promedio y su desviación de los flujos e índices de preservación de restos de peces agrupadas por periodos de tiempo frente a Callao.....	107
Figura 32. Series de tiempo indicadores biogeoquímicos versus restos de peces frente a la costa central del Perú.....	116
Figura 33. Análisis de componentes principales de los indicadores biogeoquímicos, índices de preservación y flujos de restos de peces. ....	117
Figura 34. Esquema de correlaciones de los dos factores.....	119
Figura 35. Agrupamientos de los indicadores biogeoquímicos, índices de preservación y flujos de restos de peces.....	120
Figura 36. Desnitrificación ( $\delta^{15}\text{N}$ ‰) en la columna de agua frente a la costa central del Perú durante 17.5-13 Kyr BP.....	122
Figura 37. Relación de las tendencias de las abundancias de restos versus variables biogeoquímicas en ACR y HS1. ....	125
Figura 38. Modelo generalizado aditivo para los flujos de vértebras de Anchoveta versus las variables biogeoquímicas en los tres testigos durante ACR y HS .....	129

Figura 39. Modelo generalizado aditivo para los flujos de escamas de Merluza versus las variables biogeoquímicas en los tres testigos durante ACR y HS .....	130
Figura 40. Esquema resumen de las poblaciones de peces bajo las condiciones de productividad y oxigenación frente a la costa central del Perú. ....	132

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de testigos comentados frente a la costa del Perú.....	12
Tabla 2. Testigos utilizados con información sobre el lugar de extracción , ubicación geográfica, tamaño del testigo, profundidad de extracción, cruce de investigación, año de colecta y distancia de la costa estimada de las isoclinas de profundidad actuales.....	42
Tabla 3. Grado de integridad de escamas: Escala Semicuantitativa .....	49
Tabla 4. Grado de integridad de vertebras: Escala Semicuantitativa.....	49
Tabla 5. Escala del índice de libre de bioerosión.....	51
Tabla 6. Cronología de las edades sin calibrar y calibradas versus profundidad en el testigo M772-005-3. ....	60
Tabla 7. Conteos totales de restos de peces en el testigo M772-005-3.....	65
Tabla 8. Conteos totales de escamas por especie o grupos taxonómicos.....	66
Tabla 9. Comparación de los flujos de restos mediante las pruebas Kruskal-Wallis y Dunn( $p < 0.05$ ) del testigo M772-005-3. ....	80
Tabla 10. Comparación de los flujos de restos de peces dentro de los periodos del ACR y HS1 entre los tres testigos. ....	106
Tabla 11. Abundancia relativa de escamas (%) por especie o grupo taxonómico en los registros de trabajos previos frente a Chimbote durante T1 al Holoceno (Campusano, 2013) y frente Callao.....	110
Tabla 12. Correlación de Spearman de las abundancias y razones de restos de peces versus $\delta^{15}\text{N}$ , flujos de COT y Si/Ti durante T1. ....	126



## RESUMEN

Los peces del sistema de la Corriente de Humboldt exhiben contracciones o expansiones en su distribución en respuesta a la intensidad del afloramiento costero y a la deficiencia de oxígeno a diferentes escalas de tiempo. El objetivo de esta tesis fue reconstruir la respuesta en la abundancia y la distribución espacial de los principales recursos pesqueros (anchoveta, merluza y otros) a cambios oceanográficos (temperatura, concentración de oxígeno y productividad) durante la Terminación 1 (T1, 17.5-11.5 Kyr BP) frente a la costa del Perú. Se analizaron restos de peces en sedimentos laminados extraídos en un testigo colectado frente a Callao (M772-005-3; 12.09°S, 79.52°W), que fueron comparados con indicadores de productividad, concentración de oxígeno y temperatura del mar así como con otros registros de restos de peces frente a Chimbote (09.30°S, 79.52°W) y Pisco (14.29°S, 76.76°W).

Los flujos de huesos excluyendo espinas, vértebras de anchoveta, escamas de merluza mostraron una correlación directa con la profundidad donde se ubicó el testigo. Esta observación en conjunto con otros resultados paleo-oceanográficos, indicaron que las fluctuaciones en la población de anchoveta y otras grandes poblaciones de peces frente a Perú estuvieron moduladas por el ascenso del nivel mar durante T1 a escala de miles de años.

Durante T1, la productividad de peces fue menor frente a Callao que frente a Chimbote y a Pisco. Los cambios en la abundancia de las poblaciones de merluza estuvieron asociados a la concentración de oxígeno y a la temperatura superficial del mar, exhibiendo un gradiente latitudinal durante la T1, similar al período cálido actual.

En tanto, los peces oceánicos (sardina, jurel y caballa) alcanzaron su máxima abundancia cerca de la costa de Callao en la fase tardía del T1 y tampoco mostraron una relación con el grado de oxigenación, como se esperaría en base a los datos observacionales de las últimas décadas.

**PALABRAS CLAVES**

PEQUEÑOS PELÁGICOS, PECES OCEÁNICOS, VÉRTEBRAS, ESCAMAS, PALEOCEANOLOGÍA, TERMINACIÓN 1, RESTOS DE PECES.

## **ABSTRACT**

Fish populations of the Humboldt Current System exhibit contractions or expansions in their distribution in response to the intensity of the coastal upwelling and oxygen deficiency at different time scales. However, the future impact of global warming on fish populations is uncertain. The objective of the present research is to reconstruct the responses in abundance and spatial distribution of the current main fishery resources (anchovy, hake and others) off Peru to oceanographic changes (temperature, deoxygenation and productivity) during Termination 1 (T1, 17.5-11.5 Kyr BP). Fish remains were analyzed in laminated sediments extracted off Callao (M772-005-3;12.09°S,79.52°W). The palaeoceanographic record obtained off Callao were first compared with proxies of productivity, oxygenation and sea surface temperature and then with similar records obtained off Pisco (14.29°S,76.76°W) and Chimbote (09.30°S,79.52°W).

The results showed that anchovy vertebrae and bones fluxes were correlated with the depth where the core was retrieved. This suggests that sea level increase is the main factor that controls abundance of fish off Peru during T1. The fish productivity was lower off Callao than off Chimbote or Pisco during T1. Hake fluxes exhibited a latitudinal gradient during T1, with greater fluxes off Chimbote and lower fluxes off Pisco. On the other hand, the abundance of oceanic fish (sardines, horse mackerel and mackerel) was greater off Callao than Chimbote y Pisco during the last part of T1. However, oceanic fishes did not show a significant relationship with oxygenation, as it would be expected based on observations from the last decades.

**KEY WORDS**

SMALL PELAGIC FISHES, OCEANIC FISHES, ANCHOVY, PACIFIC HAKE,  
PALEOCEANOGRAPHY, TERMINATION 1, FISH DEBRI

## I. Introducción

El mar peruano se caracteriza por la presencia de aguas cálidas y aguas frías que interaccionan en un sistema de corrientes, contracorrientes superficiales y subsuperficiales, cuya dinámica contribuye a la alta productividad biológica de la región (Morón, 2000). En el Sistema de la Corriente de Humboldt (HCS- Humboldt Current System) debido al esfuerzo de los vientos, generado por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (Chaigneau et al., 2013), se produce la surgencia costera que se caracteriza por el transporte de aguas subsuperficiales, frías y ricas en nutrientes hacia la superficie.

La surgencia de aguas subsuperficiales en el HCS causa que la temperatura media en la región sea unos 8°C más fría que la de otras regiones costeras del océano a la misma latitud (Rohli & Vega, 2012). Las aguas subsuperficiales ricas en nutrientes favorecen la alta producción primaria en el sistema (Bakun, et al., 2010). Además, el HCS produce más peces por unidad de área que otras regiones en los océanos del mundo, representando el 8% de los desembarques mundiales con menos del 0.1 % de la superficie del océano (Chavéz et al., 2008). Históricamente, las especies pelágicas con mayor presencia en las pesquerías han sido anchoveta (*Engraulis ringens*), sardina (*Sardinops sagax*), jurel (*Trachurus murphy*) y caballa (*Scomber japonicus*). Dentro de las especies demersales la más representativa es la merluza (*Merluccius gayi peruanus*) (Instituto del Mar del Perú, 2013, 2014).

Una característica importante del HCS es la presencia somera de una Zona de Concentración Mínima de Oxígeno Disuelto (ZMO, 0 a 0.5 mL×L<sup>-1</sup>). La baja concentración de oxígeno en la ZMO está principalmente asociada a la lenta circulación que limita su ventilación, la mezcla con otras masas de aguas más ricas

en oxígeno y el consumo de materia orgánica proveniente de la producción primaria (Helly & Levin, 2004). La ZMO es una barrera para la distribución de algunos seres vivos, especialmente del neoton, causando una compresión del hábitat desde la ZMO hacia la superficie (Chavez et al., 2008).

Las poblaciones de peces son sensibles a las variaciones ambientales a diferentes escalas de tiempo (interanual, decenal, secular y milenaria). El mayor forzante interanual es “El Niño Oscilación del Sur” (“El Niño–Southern Oscillation”, ENSO siglas en inglés), el cual puede provocar un aumento en la temperatura superficial del mar (TSM) hasta en 8°C, reducción de la productividad por la profundización de la termoclina, cambios en la trofodinámica del ecosistema y cambios en la distribución espacial de peces (Lehodey et al., 2006). Las variaciones ambientales también afectan la distribución espacial de los organismos (migración vertical, horizontal y búsqueda de refugio contra los depredadores) y la red trófica alterando la relación depredador-presa y el ciclo de reproducción (Fréon et al., 2005).

La variabilidad pasada de las poblaciones de peces puede inferirse a partir de los registros de restos óseos de peces en los sedimentos marinos, tales como escamas y huesos (Soutar & Isaacs, 1969). La preservación de escamas y restos óseos en los sedimentos está en función de las condiciones de reducción-oxidación y la tasa de sedimentación, y si la degradación puede ser cuantificada, el registro de escamas o de huesos puede ser usado como indicador del tamaño de las poblaciones de peces en el pasado (Soutar, 1967; Soutar & Isaacs, 1974; Baumgartner et al., 1992; Field et al., 2009; Salvattecí et al., 2012; Campusano, 2015).

Algunos autores han sostenido que las poblaciones de anchoveta y sardina varían con la oscilación interdecenal del Pacífico (Pacific Decadal Oscillation, “PDO” por

sus siglas en inglés), en base a la información histórica de las fluctuaciones de los desembarques de la pesca industrial (Chavez et al., 2003). No obstante, los registros sedimentarios de restos de peces que abarcan los últimos cientos de años no muestran evidencia de una sincronía entre el PDO y las fluctuaciones de anchoveta y sardina (Valdes et al, 2008; Gutiérrez et al., 2009; Salvattecí et al., 2018). En todo caso, los mecanismos por los cuales la variabilidad de las condiciones oceanográficas se traduce en cambios poblacionales a escalas multidecenales aún no han sido propiamente establecidos.

En el contexto actual del cambio climático, se espera una expansión de las ZMOs y un incremento en la TSM. Estos procesos también ocurrieron en el periodo entre el último máximo glacial (LGM, Last Glacial Maximum 19-23 Kyr BP; es decir 19-23 miles de años antes del presente) y el Holoceno (11.7 Kyr BP), también conocido como la Terminación 1 (T1, 19-11.5 kyr BP). Este periodo es considerado clave para explorar los mecanismos que modulan las variaciones climáticas en los ecosistemas a nivel global y regional (Jaccard, et al., 2014; Bova et al., 2015; Moffitt et al., 2015; Nürnberg et al., 2015; Salvattecí et al., 2016; Sikes et al., 2016; Doering et al., 2016).

Estudios realizados frente a la costa peruana durante la T1 han evidenciado la dominancia del flujo de escamas de anchoveta sobre otras especies y una relación positiva de dicho flujo con proxies de productividad primaria. Además los registros indican una relación positiva entre las escamas de anchoveta y las de merluza que se interpreta como una relación trófica presa-depredador (De Vries & Schrader, 1981; De Vries & Percy, 1982; Campusano, 2013; Salvattecí, 2013, 2019a).

Asimismo, dentro del T1 se distinguen periodos caracterizados por cambios en la oxigenación de la columna de agua, en la productividad y en la preservación de restos de peces (Campusano, 2013;Salvatteci, et al., 2019a).

En esta tesis, se busca conocer cómo varió la distribución espacial de los peces más representativos frente a la costa del Perú durante la T1 a escalas temporales de cientos a miles de años. Para ello, analizamos restos de peces en sedimentos laminados extraídos en un testigo colectado frente a Callao durante el crucero Meteor 77/2 (M772-005-3), que fueron usados como indicadores de fluctuaciones de las poblaciones de peces. Estos registros de restos de peces son comparados con indicadores de productividad, concentración de oxígeno y temperatura del mar del mismo testigo y de otros ubicados frente a Chimbote y a Pisco, estudiados por otros autores.

Se postula que los cambios en la productividad y en la oxigenación en la columna de agua están asociados a cambios en la abundancia y en la distribución latitudinal de los principales peces frente a la costa central del Perú a escala de miles de años durante la Terminación 1.

Con esta investigación, buscamos contribuir a la elaboración de escenarios de los impactos futuros del cambio climático sobre la abundancia y distribución espacial de los principales recursos pesqueros del mar peruano.



## II. Planteamiento de la Investigación

### 2.1 Planteamiento del Problema

La respuesta de las principales poblaciones de peces del mar peruano al cambio climático es incierta. Esto se debe en parte a que no se esperan cambios significativos en la intensidad de los vientos del afloramiento en las próximas décadas, en tanto que subsisten grandes diferencias en los escenarios de la productividad y oxigenación futuras para la región ( Echevin et al., 2020; Chamorro et al., 2021). Sin embargo, en las últimas décadas se ha observado una tendencia de enfriamiento costero (Gutiérrez et al., 2011), así como una oxiclina más somera (Bertrand et al., 2010).

A escala global, en los últimos 50 años, datos instrumentales indican una expansión de las ZMOs (Stramma et al., 2019) y la tendencia futura de los océanos, según los modelos climáticos, es a una mayor desoxigenación. Se estima que los océanos perderían  $125 \text{ Tmol.año}^{-1}$  de oxígeno para el 2100 (Schmidtko et al., 2017), afectando la biogeoquímica de los océanos y a la biología y ecología de los organismos marinos (Stramma et al., 2008; 2010; Deutsch et al., 2015). En el caso del necton, la desoxigenación ocasiona un aumento del gasto energético, la contracción espacial del hábitat para las especies menos tolerantes a condiciones de bajo oxígeno y el aumento de la vulnerabilidad de las especies comerciales a la pesquería (Stramma et al., 2010; Bertrand et al., 2011;). En el HCS, además existen evidencias que las fluctuaciones de anchoveta, sardina, merluza y jurel han estado asociadas a la oxigenación en las capas subsuperficiales a escalas temporales y espaciales, así como a cambios en la intensidad del afloramiento costero (Wosnitza-Mendo et al., 2009; Bertrand et al., 2011, 2016).

Durante la Terminación 1 la ZMO se intensificó en el Pacífico Sudeste (Moffitt et al., 2015; Salvattecí et al., 2016). Frente a Pisco (14°S), durante este período se estimó la ausencia de peces oceánicos y relativamente alta abundancia de anchoveta (Salvattecí et al., 2019). Sin embargo, se desconocen los cambios que ocurrieron en la distribución espacial a mayor escala de las principales poblaciones de peces pelágicos y demersales.

Por ello, en esta tesis, la pregunta central se enfoca en la variabilidad espacial a escala de miles de años: **¿Cuál fue la respuesta en abundancia y distribución latitudinal de los principales peces comerciales frente a Perú debido a los cambios oceanográficos durante la Terminación 1?**

Si entendemos el efecto de la desoxigenación y la productividad en la distribución de los peces en el pasado podríamos conocer la respuesta de los principales peces en el futuro.

## **2.2 Marco Teórico**

Varios mecanismos se han propuesto para explicar las fluctuaciones decadales de anchoveta y sardina. Las fluctuaciones de anchoveta y sardina han sido relacionadas con regímenes climáticos en el océano Pacífico basados en temperaturas (Chavéz et al., 2003). También se ha propuesto que la disponibilidad de alimento y restricciones físicas como la surgencia se combinan creando distintas ventanas ambientales óptimas para cada especie (Cury & Roy, 1989). Pero un rol determinante de la estructura de los ecosistemas pelágicos está relacionado con mayor robustez con el oxígeno como regulador fundamental de las poblaciones de peces en el HCS (Bertrand et al., 2011). Otro factor sería la forma de alimentación. Si el pez es filtrador o selectivo al capturar su presa, depende de la disponibilidad de alimento que satisfaga la necesidades energéticas, para lo cual el tamaño de la presa debe ser un tercio del tamaño del depredador (Bertrand et al., 2011).

### **2.2.1 Factores que modularon el clima en el periodo isotópico**

#### **marino 2**

Arrhenius (1952), enumeró periodos esenciales definidos por el punto medio entre los periodos máximos y mínimos de temperatura, basado en la razón corregida de las concentración de los isotopos estables de oxígeno ( $^{18}\text{O}$  y  $^{16}\text{O}$ ) contenida en el carbonato de calcio dentro de la concha de foraminíferos (Emiliani, 1955); y actualmente conocidos como Periodos Isotópicos Marinos (MIS o OIS-“Marine Isotope Stage” o “Oxygen Isotope Stage”). Los MIS están marcados por una abrupta transición entre un periodo máximo glacial a otro máximo interglacial llamándose “Terminaciones” y para el Hemisferio Sur (HS) ocurrieron siete terminaciones durante los últimos 700 Kyrs con una periodicidad aproximada a 100

Kyrs (Broecker, 1984). Esto es generado por la interacción de ciclos orbitales (oblicuidad, excentricidad y precesión) que modulan el patrón de insolación controlando la expansión y retroceso de los volúmenes glaciares para ambos hemisferios (Raymo, 1997).

El MIS 2 abarcó entre 24-11.5 Kyrs BP (Martinson et al., 1987), comprende el Último Máximo Glaciar (LGM, 24-18 Kyrs BP) (Zech et al., 2009) y la Terminación 1 (T1, 17.5-11.5 Kyrs BP) (Stern & Lisiecki, 2014). Durante el LGM los casquetes polares alcanzaron su mayor extensión comparado con los últimos 110 mil años y la temperatura media global fue de 3 a 4°C menor a la actual (Jaccard, et al., 2014). La Terminación 1 incluyó el Estadio Heinrich 1 (HS1, Heinrich Stadial 1, 17.5–14.5 Kyrs BP), el Bølling/Allerød (B/A, 14.5-12.9 Kyrs BP) para el hemisferio norte (HN), el Antarctic Cold Reversal (ACR, 14.5-12.9 Kyrs BP) para el hemisferio sur (HS) y el Younger Dryas (YD, 12.8-11.5 Kyrs BP) (Denton et al, 2010).

Durante la T1 se registraron cambios abruptos, gatillados por el aumento de la insolación, la reducción de los casquetes polares y otros factores, como cambios en la concentración de gases de efecto invernadero acoplados a las variaciones de la intensidad de la circulación termohalina del Atlántico Norte que favorecieron positivamente el proceso de desglaciación de manera local o a nivel global (Clark et al., 2012).

Los cambios en los océanos y en la atmosfera no se dieron de forma uniforme en todo el planeta durante la T1. La insolación estacional junto al efecto combinado de la excentricidad, precesión y oblicuidad pueden generar señales opuestos entre

ambos hemisferios a miles de años hasta de 2000 años, el cual se denomina “Bipolar seesaw” (Stocker, 2003; Lamy et al., 2007; Clark et al., 2012).

El proceso de la última desglaciación a nivel global puede ser explicado de dos formas (Denton et al., 2010). El primero es debido al efecto del “Bipolar seesaw”, que debilitó la intensidad de la circulación termohalina del Atlántico Norte durante el HS1 y el YD, reduciendo el transporte de calor a través del océano hacia el norte, calentando de esa forma el HS (Denton et al., 2010). Además, la reducción de la energía calorífica por el debilitamiento de circulación termohalina en el Atlántico Norte durante el HS1 favoreció en menor medida la formación de masas de aguas de fondo del Océano Austral que poseen mayor energía calorífica, resultando en un calentamiento del Océano Austral y la Antártida (Broecker, 1998; Denton et al., 2010). Un segundo mecanismo complementario es el desplazamiento hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y de los vientos del oeste en el HS por el aumento de la extensión del hielo marino en el invierno del Atlántico Norte (Anderson, et al., 2009; Denton, et al., 2010). Estos cambios en la distribución del calor asociados al contraste continente-océanos en las zona tropicales modularon la intensidad del viento costero y de la surgencia de aguas frías (Peters & Richter, 2014).

Durante la T1 (19-11.5 Kyr BP) el calentamiento global de las superficies de los océanos alcanzó unos 2 °C. Este calentamiento produjo una disminución de la solubilidad del oxígeno (Jaccard & Galbraith, 2012). La T1 fue semejante en magnitud al periodo actual de calentamiento global generado por el hombre en menos de 200 años, en cambio durante la T1 los cambios se observaron a una escala de miles de años (Jaccard & Galbraith, 2012).

El HS1 fue un periodo frío para el HN, debido al desprendimiento-derretimiento de icebergs en el Atlántico Norte y del colapso de la circulación termohalina. Esto fue debido a veranos cálidos asociados por la precesión de los equinoccios determinado por una mayor insolación que dio como consecuencia inviernos fríos (Heinrich, 1988). Se conoce sobre estos eventos debido al registro de sedimentos de origen glaciar en el fondo marino del Atlántico Norte cuya periodicidad media es de  $11000 \pm 1000$  años (Heinrich, 1988).

### **2.2.2 Condiciones generales océano-atmósfera en el borde oriental del Pacífico durante MIS 2**

Durante el LGM, frente al archipiélago de Galápagos la TSM promedio estuvo entre  $\sim 21.2^{\circ}\text{C}$  y  $\sim 24.1^{\circ}\text{C}$ , estimada a partir del ratio Mg/Ca de las testas de foraminíferos planctónicos y en base a la insaturación de alquenonas de las membranas de microalgas, respectivamente (Koutavas, 2002; Koutavas & Joanides, 2012).

Frente de la bahía de Guayaquil (M77/2-059-1, Tabla 1), la TSM estimada a partir del ratio Mg/Ca fue similar a lo observado frente a Galápagos, sin embargo la TSM, estimada por alquenonas, fue menor a lo registrado frente a Galápagos (Nürnberg et al., 2015).

La TSM estimada por Mg/Ca en los foraminíferos registra principalmente la temperatura en invierno, mientras que la TSM estimada por las alquenonas ( $U_k$ ) registra principalmente temperaturas durante la primavera debido al contraste ecológico estacional que manifiestan estos organismos (Leduc et al., 2010).

La menor TSM en la zona del Pacífico tropical durante el LGM puede ser explicada por el relajamiento de la gradiente tropical y un desplazamiento hacia al norte de la

ZCIT asemejándose a las condiciones durante La Niña (Koutavas, 2002; Koutavas & Joanides, 2012).

Frente a Perú, las reconstrucciones de la TSM a partir de alquenonas muestran que durante el LGM (20-18 Kyr BP) la temperatura promedio fue de 18.6° C frente a Callao. Por otro lado la máxima TSM en los últimos 20 mil años fue de 23°C que ocurrió durante el Holoceno tardío (4-3 Kyr BP) (Rein et al., 2005; Salvattecí et al., 2019b). En los últimos 50 años la TSM promedio frente a Pisco fue 20.5°C estimada a partir de las alquenonas (Gutiérrez, et al., 2011).

Durante el HS1 ocurrió un rápido aumento de 3°C de la TSM entre los 9 y 17°S, según diferentes registros (Salvattecí, et al., 2019b). Además hubo una profundización de la termoclina en el Pacífico Tropical Oriental entre los 2-4°S (Nürnberg et al., 2015). Frente a Callao (12°S) luego de 16.5 Kyr BP se observó un incremento de la TSM, de las tasas de sedimentación y del flujo litogénico. El aumento de la temperatura frente a Callao (~20-22.5°C) fue muy similar en magnitud a los periodos más cálidos del Holoceno (Rein et al., 2005).

El ACR fue un periodo frío en el hemisferio sur durante el cual la TSM promedio frente a Callao (~12°S) disminuyó entre 1 y 2 °C, en comparación al HS1. La TSM promedio durante el ACR fue de ~20 °C, muy similar al Holoceno medio (MH:~8-4 Kyr BP) (Rein et al., 2005; Salvattecí et al., 2019).

La disminución de la TSM durante el ACR frente a Perú fue el resultado de la advección de aguas provenientes del Océano Antártico (Salvattecí et al., 2019b). Frente a Pisco (~15°S) la disminución de temperatura fue de ~4°C mientras que frente a Chimbote (~9°S) la disminución fue ~3°C (Salvattecí et al., 2019b).

Además, esta señal es acorde con otros trabajos en el Océano Antártico y frente a las Isla de la Galápagos (Rein et al., 2005; Salvattecí et al., 2019b). En cambio frente a Tumbes (~3°S), se estima un incremento de la TSM en ~2°C y que las condiciones de la salinidad eran muy semejantes a las del Holoceno (Nürnberg et al., 2015).

Durante el YD, la TSM frente a Callao varió entre 21-22.5 °C, siendo entre 1.5° a 2°C más caliente en comparación con la temperatura media del LGM (Salvattecí et al., 2019b). Adicionalmente frente a Tumbes (~3°S) se registró un abrupto calentamiento de 2°C en 12.5 Kyrs BP (Nürnberg et al., 2015).

Tabla 1. Datos de testigos mencionados frente a la costa del Perú.

<b>Nombre</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Largo (m)</b>	<b>Referencia</b>
M772-059-1	03° 51' S	81° 19' W	997	13.59	Nürnberg et al., 2015
M772-029-3	09°17' S	79°37' W	433	13.53	Mollier-Vogel, 2012
SO147-106KL	12°03' S	77°40' W	184	20	Rein, Bert, et al., 2004; Rein & Sirocko, 2002
M772-003-2	15°06' S	75°41' W	271	14.97	Doering, Ehlert, et al., 2016



### 2.2.3 Desnitrificación de las aguas durante Terminación 1

Las condiciones oceanográficas y climáticas durante la T1 modularon la oxigenación en los océanos debido a cambios de la solubilidad del oxígeno, consumo de oxígeno por parte de los organismos acuáticos, materia orgánica exportada hacia al fondo y la circulación oceánica (Jaccard & Galbraith, 2012).

En las ZMO, la desnitrificación (Gruber, 1997) y Anammox (Lam et al., 2009) son procesos muy relevantes para ciclo del nitrógeno en ambientes marinos. El Anammox es el proceso de oxidación anaeróbica de los iones amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) por nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) produciendo  $\text{N}_2$  (Mulder et al., 1995). La desnitrificación ocurre cuando la concentración de  $\text{O}_2$  es menor a  $5 \mu\text{M}$  y es generada por las bacterias heterótrofas/facultativas que usan los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) como aceptor de electrones para la respiración produciendo  $\text{NO}_2^-$  y finalmente  $\text{N}_2$  (Altabet, 2006).

Como consecuencia, el nitrato disuelto se enriquece del isótopo pesado  $^{15}\text{N}$ , el cual es absorbido por el fitoplancton durante su crecimiento. Cuando el fitoplancton muere favorece en aumentar  $^{15}\text{N}$  en la materia orgánica particulada y finalmente este es enterado en los sedimentos marinos (Altabet, 2006). En buenas condiciones de preservación de los sedimentos garantiza que la señal  $^{15}\text{N}$  este inalterable (Mollier-Vogel et al., 2012).

Por ello, para estimar la intensidad del proceso de desnitrificación en condiciones de baja oxigenación en la columna de agua, se suele usar el enriquecimiento del isótopo más estable del nitrógeno  $^{15}\text{N}$  en la materia orgánica sedimentaria (Owens, 1988).

En los sedimentos marinos frente a Perú (8 a  $17^\circ\text{S}$ ) extraídos recientemente, la disminución de oxígeno ( $<5 \mu\text{mol} \times \text{L}^{-1}$ ) asociada al proceso de desnitrificación

refleja la disminución de nitratos disueltos que se refleja por el aumento de  $\delta^{15}\text{N}$  entre 6 a 20‰ (Mollier-Vogel et al., 2012).

Los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  al sur de latitud ( $8^\circ\text{S}$ ), reflejan principalmente la señal isotópica de materia orgánica excluyendo la señal del nitrógeno inorgánico, amonio y otros derivados nitrogenados de origen terrestre (Mollier-Vogel et al., 2012).

Con el fin de evaluar los niveles de oxigenación en el pasado, además del  $\delta^{15}\text{N}$  en la materia orgánica sedimentaria, se utilizan también otros indicadores como la presencia de laminaciones, las comunidades de foraminíferos bentónicos y los metales redox-sensitivos (Jaccard et al., 2014).

Frente a Perú, en base a múltiples registros de  $\delta^{15}\text{N}$  en testigos colectados a profundidades mayores de 500 metros de profundidad, se observó un aumento de la desnitrificación entre 17-13 Kyr BP (Moffitt et al., 2015). Esto posiblemente se debió a una menor oxigenación de las aguas intermedias favoreciendo las condiciones de severa hipoxia ( $< 0.2 \text{ mL} \times \text{L}^{-1}$ ) (Moffitt et al., 2015).

## 2.2.4 Distribución latitudinal actual de los principales peces marinos representados en los testigos frente a Perú

Grandes poblaciones de organismos, algunas de ellas sometidas a la pesca, componen el necton. En Perú estas poblaciones históricamente han sido dominadas por especies pelágicas de afloramiento como anchoveta y sardina (Tarazona et al., 2003). En la Figura 1 se muestra la distribución latitudinal de las especies más abundantes frente a Perú.

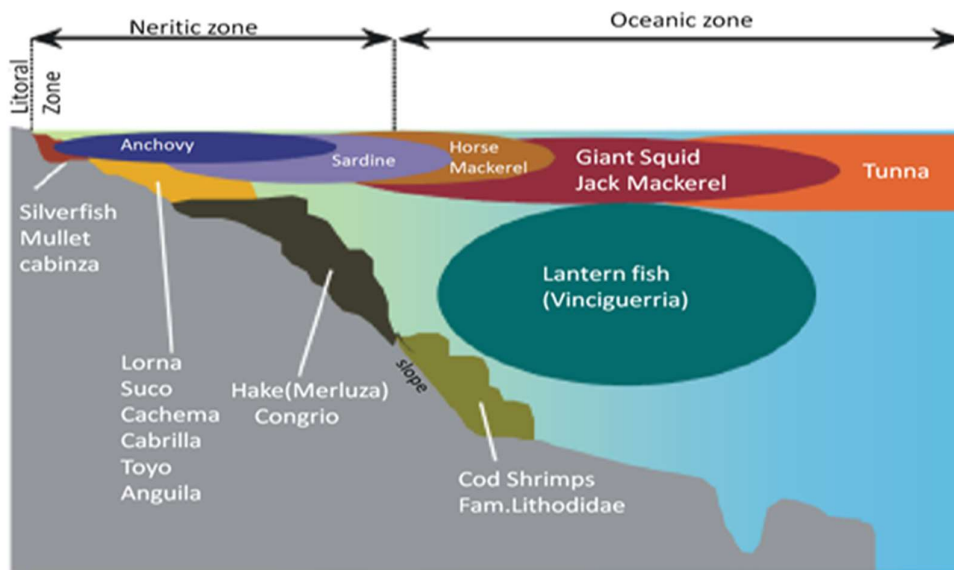


Figura 1. La distribución vertical de las principales especies comerciales de necton en el ecosistema de surgencia de la costa peruana (Tarazona et al., 2003), donde se observa la distribución vertical de los principales recursos pesqueros frente a las costas del Perú

### 2.2.4.1 Anchoveta (*Engraulis ringens*)

Es una especie pelágica nerítica muy representativa del sistema de afloramiento de Humboldt. La anchoveta frente a Perú se distribuye usualmente desde el 8°S hasta 18°S durante “Años Neutros”, pero en años con eventos “Niños” puede contraerse su distribución generalmente hasta ~15°S (Swartzman et al., 2008). La anchoveta tiene una relación con las aguas costeras frías (ACF) del afloramiento, con TSM

entre 13-19°C y salinidad entre 34.8-35.0 psu y también puede estar asociada con aguas de mezcla entre las aguas subtropicales Superficiales (ASS,  $S > 35,1$ ) y las ACF. con un intervalo de TSM de 13.5 - 25°C y 35.05-35.10 psu de salinidad (Swartzman et al., 2008).

La anchoveta fue dominante en los desembarques hasta inicios de los setentas (Alheit & Niquen, 2004) y se recuperó desde inicios de los noventas (Gutiérrez et al., 2007). La especie es sensible a la variabilidad ENSO, particularmente a los eventos El Niño extremos, como ocurrió en los años 1982-83 y 1997-98 (Chavéz et al., 2003) (fig. 2). Durante El Niño 1997-98, la anchoveta se desplazó al sur, se aproximó más a la costa, su distribución vertical tendió a ser más profunda y los individuos de tallas juveniles desaparecieron (fig. 10C) (Ñiquen et al., 1999; Ñiquen & Bouchon, 2004).

Se ha postulado que la abundancia de anchoveta está inversamente correlacionada con la abundancia de oxígeno a diferentes escalas espaciales y temporales (Bertrand et al., 2011). La anchoveta tolera mejor que otros peces pelágicos las bajas concentraciones de oxígeno. Esto es consecuencia del menor consumo de oxígeno para su respiración por poseer un menor valor de la razón de su tamaño entre su masa, la tolerancia a los bajos valores de oxígeno favorece al acceso al macrozooplancton que vive más cerca de la costa y con altas concentraciones (Bertrand et al., 2011). Todo esto favorece que la anchoveta sea más eficiente como zooplanctófago visual (Bertrand et al., 2011).

### 2.2.4.2 *Sardina* (*Sardinops sagax*)

Esta especie pelágica es muy tolerante a la variación de temperatura entre 9 a 25 °C y es migratoria en condiciones cálidas en aguas neríticas ( Gutiérrez et al., 2007; Bertrand et al., 2011). La sardina muestra una mayor correlación con las ASS (Swartzman et al., 2008). Además, también muestra correlación con las aguas de mezcla AES-ASS, con rangos de TSM entre 14 a 19°C y de salinidad entre 34 a 35.05 psu. Su distribución (fig. 2) se ubica al sur de la línea ecuatorial pero su presencia es mayor al sur de ~8°S, pero en algunos periodos de tiempo la distribución de la biomasa de sardina no ha presentado relación con las masas de agua (Swartzman et al., 2008).

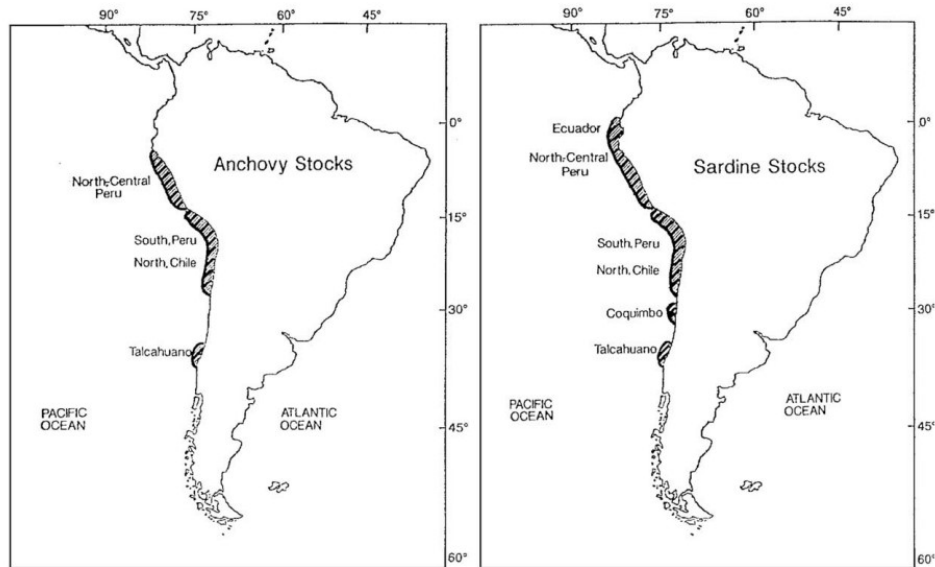


Figura 2. Esquema de la Distribución de las unidades poblaciones de pesca de Anchoveta (derecha) y Sardina (Izquierda)(Alheit & Niquen, 2004).

La sardina se ubica habitualmente desde Paita (5°S) hasta Chicama (7-8°S) y alejada de la costa a unos 30 km, pero en condiciones El Niño se acerca a la costa y puede desplazarse hasta los 17°S (Ñiquen & Bouchon, 2004). Durante los eventos

El Niño 1972-73, 1982-83 y 1997-98, la expandió su distribución y luego de finalizado los eventos se contrajo nuevamente (Ñiquen & Bouchon, 2004).

Durante El Niño 1997-98, se observó un aumento del reclutamiento de juveniles de sardina y un cambio en la dominancia de otras especies pelágicas (Ñiquen & Bouchon, 2004; Ñiquen et al., 1999). La sardina prefiere concentraciones de oxígeno disuelto mayores  $4.4 \text{ mL} \times \text{L}^{-1}$  (Bertrand et al., 2011). La sardina requiere un mayor consumo de oxígeno para su respiración por poseer una mayor masa en relación a su volumen (Bertrand et al., 2011).

Las sardinas y sus presas (pequeños zoopláctones) coexisten en zonas alejadas de la costa asociado a las aguas de mezclas costeras-subtropicales (Ayón et al., 2011). Además, cuando ambas habitan aguas oxigenadas favorecen que la sardina sea más eficiente como filtrador (Bertrand et al., 2011).

#### **2.2.4.3 Merluza (*Merluccius gayi*)**

La merluza peruana es la especie demersal más abundante y económicamente importante en la pesquería de arrastre de fondo de Perú (Wosnitza-Mendo et al., 2009). Esta especie se distribuye sobre la plataforma continental desde  $3^\circ$  a  $10^\circ\text{S}$  (Wosnitza-Mendo & Guevara, 2000; Guevara & Wosnitza-Mendo, 2009). Bajo condiciones normales, la merluza se distribuye en la plataforma y la parte superior del talud continental frente a la costa norte de Perú (Wosnitza-Mendo et al., 2009). La distribución vertical de la merluza es desde 20 hasta 500 metros, donde se presenta la extensión sur de la Corriente de Cromwell, caracterizada por una alta oxigenación (Pastor et al., 2018; Zuta & Urquiza, 1974). La distribución de la merluza está asociada además a las isotermas de  $14\text{-}16^\circ\text{C}$  que modulan la distribución vertical y horizontal de esta especie e incluso la talla media a escala

estacional (Wosnitza-Mendo et al., 2009; Vargas & Mendo, 2010). Esto se evidencia de manera clara en la expansión de su distribución latitudinal (fig.3).

Por otro lado, la merluza está asociada a concentraciones de oxígeno disuelto entre 0.5 a 2 mL×L<sup>-1</sup> en la capa subsuperficial; valores que suelen ampliar su distribución en los eventos El Niño (fig. 3) (Flores et al , 2009). Es así que en los eventos El Niño más intensos, la distribución de la merluza puede llegar hasta 18°S, debido a una mayor oxigenación de las aguas subsuperficiales (Espino et al., 1995; Wosnitza-Mendo et al., 2009). A escalas decadales se ha evidenciado periodos más favorables a la merluza en los 80s, cuando las aguas sub-superficiales de la HCS estuvieron más oxigenadas (fig. 4).

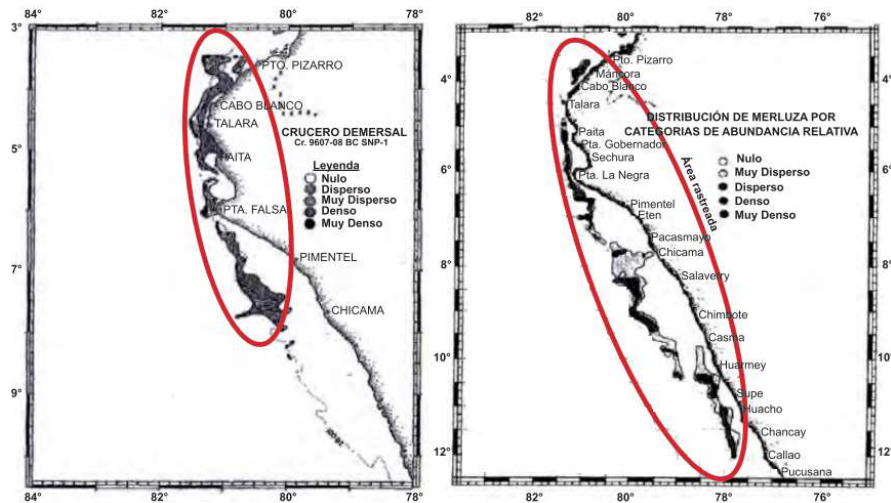


Figura 3. Distribución de la población de Merluza según su concentración en Junio 1996 (Izquierda) y en Junio 1997 (derecha) (Vargas & Mendo, 2010).

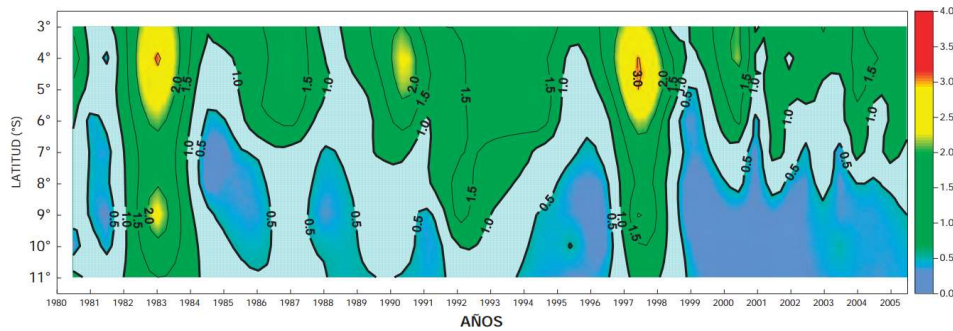


Figura 4. Variaciones anuales medias de la distribución de oxígeno disuelto (ml/L). entre los 50 a 180 m. de profundidad, durante los años de 1980 a 2006, en cual se ve el aumento de la oxigenación en los años Niños 82-83 ,97-98 y luego, una disminución de la oxigenación (Flores et al., 2009).

#### 2.2.4.4 Caballa (*Scomber japonicus*)

Es una especie de amplia distribución, vive en zonas neríticas y oceánicas, se le denomina especie transzonal (fig. 5). Habita las aguas templadas y cálidas de los océanos Atlántico, Indico, Pacífico y otros mares adyacentes. En Suroriente del Océano Pacífico, se extiende desde Panamá hasta la bahía de Darwin en Chile 45°S (Bouchon et al., 2018).

A nivel global la temperatura que tolera la caballa está entre 10° a 12°C y 23° a 27°C y con valores del oxígeno disuelto de 6 ml×L<sup>-1</sup> (Castro & Santana, 2000). Durante El Niño 1997-98 frente a Perú, la distribución de la caballa estuvo asociada a las ASS, con temperaturas entre 19° a 21°C y una concentración de oxígeno mayor a 5 mL×L<sup>-1</sup> (Sánchez et al., 2000).



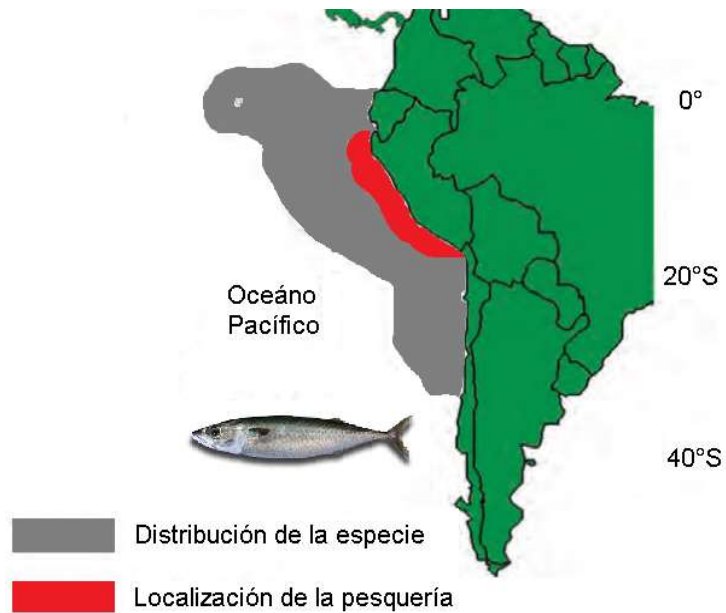


Figura 5. Distribución de Caballa frente al Perú, imagen modificada (Bouchon et al., 2018).

#### 2.2.4.5 Jurel (*Trachurus Murphyi*)

Es una especie transzonal, cubre desde el ecuador por el norte hasta la zona subtropical del Océano Pacífico Sur hasta 52°S; y desde las costas orientales de Sudamérica hasta Nueva Zelanda e Isla Tasmania, Australia (Bouchon et al., 2018).

Es una especie transzonal con conformación en “metapoblación” donde la zona frente a Chile central sería la fuente con mayor densidad (fig. 6) (Gerlotto et al., 2012). El jurel realiza migraciones durante su ciclo de vida y también estacionalmente delimitando áreas como: reclutamiento, desove y alimentación para los adultos (Arcos et al., 2001; Gerlotto et al., 2012).

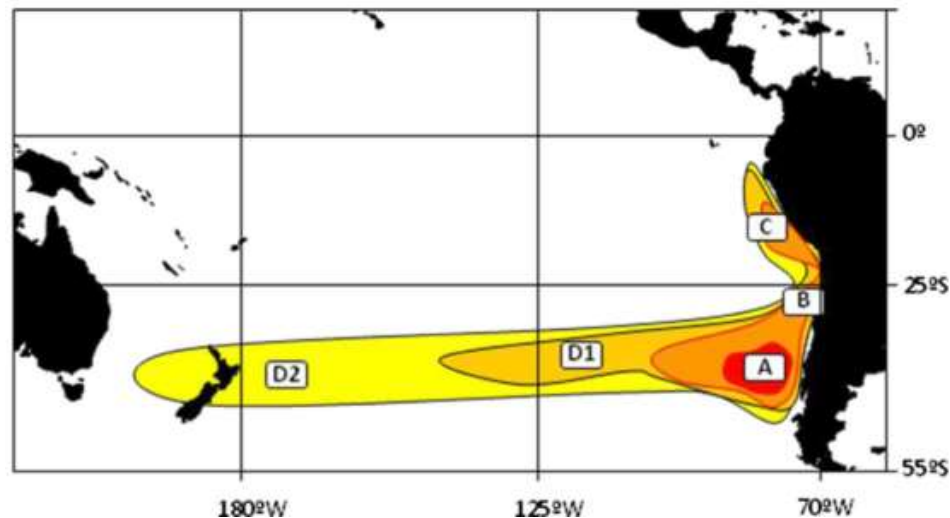


Figura 6. Extensión y abundancia de Jurel, zonas de color rojo es donde hay presencia en periodos de baja productividad y zonas de color amarillo donde la productividad es alta. A: “Central Pacific-Centre South Chilean stock”; B: “Northern Chilean stock”; C: “Peruvian stock”; D1 y D2: “Central South and Southwest Pacific Ocean stocks” (Gerlotto et al., 2012).

Frente a Perú, el jurel se encuentra en el frente oceánico de alta productividad formado por las ASS y las ACF, normalmente al sur del 6°S (Dioses, 2013). Sin embargo, hacia al norte el jurel se presenta frente a las costas del Ecuador (Aguilar, 1993). La distribución latitudinal del jurel está limitada por TSM desde 9 a 28°C, productividad mayor  $0.07 \text{ mg} \times \text{m}^{-3}$  de clorofila y oxígeno disuelto mayor  $2 \text{ mL} \times \text{L}^{-1}$  que se da muy cerca de la superficie y por encima de la oxiclina (Bertrand et al., 2011, 2016). Dada su preferencia por aguas oxigenadas, el jurel evita acercarse a las costas del Perú debido a que típicamente posee bajas concentraciones de oxígeno. Es así que la oxigenación es un factor fundamental que controla la distribución del jurel siendo similar a la sardina y opuesto a la anchoveta (Bertrand et al., 2011, 2016). La distribución latitudinal del jurel presenta una interrupción en su distribución de 19 a 22 °S, debido que la oxiclina es más somera limitando el potencial hábitat del jurel y dividiendo en dos partes la población, pero cuando

ocurre una profundización de la oxiclina provoca la unificación de la población (Bertrand et al., 2016).

#### **2.2.4.6 Peces mesopelágicos**

La comunidad de mesopelágicos está dominada por Phosichthyidae (*Vinciguerria lucetia*), mictófidos (e.g. *Diogenichthys laternatus*) y Bathylagidae (e.g. *Leuroglossus urotronus*). Los mictófidos son un grupo muy importante dentro de los mesopelágicos que se distribuyen en todos los océanos menos en el Ártico (Cornejo & Koppelman, 2006). Se reportan hasta 15 millones de toneladas de biomasa entre Perú y Chile, incluyendo todas las familias de especies mesopelágicas (Espino, 2014). *Triphoturus nigrescens* es un pez oceánico de amplio rango de distribución latitudinal en el océano Pacífico desde 35°N a 38°S (Evseenko, 2008). En general, los mesopelágicos están asociados a los frentes de surgencia, la influencia de la corriente de Cromwell, así como las corrientes ecuatoriales y subtropicales en el Sistema de Humboldt (fig. 7) (Cornejo & Koppelman, 2006).

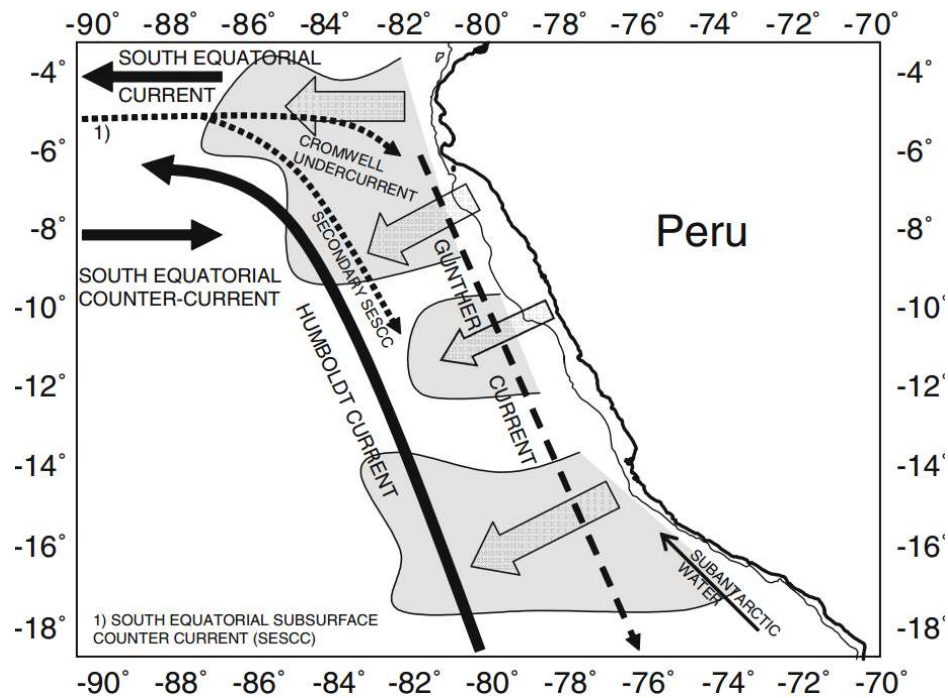


Figura 7. El esquema representa las corrientes, contracorrientes (línea punteada representa débil corriente y línea gruesa representa fuerte corriente), zonas de surgencia (flechas indica dirección) y los frentes de surgencia. (Línea punteada) de la área de estudio (Cornejo & Koppelman, 2006), la cual limita la distribución de los mictófidos y otros mesopelágicos oceánicos.

Según las prospecciones de Imarpe, *Vincigueria lucetia* se encuentra como fauna acompañante en la captura de los peces pelágicos como anchoveta, sardina y caballa, desde la costa hasta los 110 millas náuticas (nm) de la costa, pero a distancias entre 115 a 133 nm, se presenta como dominante (Salazar et al., 2000). Además, su distribución vertical es hasta los 50 metros en el día y hasta 280 metros durante la noche (Salazar et al., 2000).

### **2.2.5 Preservación de restos de peces en sedimentos marinos frente al Perú**

Los restos de peces acumulados en los sedimentos laminados proveen un registro histórico de la variabilidad de las poblaciones de peces (Baumgartner et al., 1992; Soutar & Isaacs, 1974).

Las escamas y los huesos de peces se depositan en los sedimentos siguiendo diferentes mecanismos, que se tienen que tomar en cuenta para analizar el registro de restos de peces. Algunos peces, como los pequeños peces pelágicos, pierden sus escamas naturalmente a lo largo de su vida, por otro lado, los restos óseos llegan principalmente al suelo marino luego de pasar por el tracto digestivo de otros animales (Field et al., 2009; Salvattecí et al., 2012).

Estos restos de peces luego de que llegan al suelo marino, se entierran y se acumulan en el fondo. Para que el registro de restos de peces se preserve y pueda ser usado para reconstruir la historia de las poblaciones de peces que habitaron la columna de agua de esa área es necesaria una baja concentración de oxígeno y una alta tasa de sedimentación (Field et al., 2009).

Uno de los principales problemas cuando se utilizan las escamas como indicadores de cambios en la abundancia de peces es la degradación de las escamas en los sedimentos promovido por el aumento de la oxigenación (Field et al., 2009; Salvattecí et al., 2012). Las escamas de peces están compuestas por una matriz orgánica de colágeno en 85-90% y el resto por hidroxiapatita  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ . En cambio las vértebras y los huesos están compuestos por hidroxiapatita aproximadamente en 60-65% y el resto por materia orgánica (Field et al., 2009; Fink, 2016).

Sobre las escamas que están en un proceso de alteración se evidencia una coloración amarillenta, un aumento de la opacidad y una disminución de su espesor (Salvatteci et al., 2012), haciendo más difícil el trabajo de reconocimiento. El indicador más confiable para reconstruir cambios en las poblaciones de peces a escalas mileniales son las vértebras. Esto se debe a que las vértebras no se degradan tan fácilmente como las escamas, cuando la preservación no sea la óptima (Salvatteci, 2013).

Para la evaluación de la preservación de las escamas y restos óseos se utilizan diferentes índices (Salvatteci et al. 2012). Entre ellos se encuentran: 1) índice de integridad de las escamas (número de escamas completas o fragmentadas según la especie), 2) área libre de bioerosión creados por organismos, 3) razón entre la cantidad de fragmentos de escamas y las escamas totales, 4) razón de escamas y vertebras (cuanto mayor es esta razón mejor es la preservación de las escamas) y 5) índice compuesto de preservación que se calcula a partir de los índices anteriormente expuestos. Los índices de preservación de restos de peces pueden ser comparados con indicadores de oxigenación, productividad y metales redox sensitivos para distinguir periodos de tiempo donde es más favorable la preservación de escamas y restos óseos.

La preservación de escamas y restos óseos, inferida a partir de restos de peces en sedimentos recientes, no es uniforme latitudinalmente desde Paita hasta Pisco (Campusano, 2015). Basado en múltiples testigos cortos Campusano (2015) construyó series de tiempo de razones escamas/vertebras para los últimos ~200 años. Los cocientes de escamas/vertebras, en la zona central (Callao, Ancón y Supe) son mayores que en la zona sur (Pisco) y que en la zona norte (Chimbote y Paita) que presenta valores muy bajos (Campusano, 2015). Se destaca que en la zona norte

hay un mayor número de vértebras y menor número de escamas debido a la intensa energía hidrodinámica que favorece a la deposición de vertebras y a una mayor degradación de escamas (Campusano, 2015). Entre los mecanismos usados para explicar estos cambios los más importantes son la composición del sedimento y la frecuencia de exposición a la oxigenación de fondo (Campusano, 2015).

## **2.2.6 Estudios realizados con restos de peces frente al Perú durante**

### **la T1**

El primer estudio de restos de peces en sedimentos marinos frente a Perú (De Vries & Pearcy, 1982) se realizó en sedimentos colectados frente a Huacho ( $11^{\circ} 15' S$   $77^{\circ} 57'$ ; y frente a Pisco ( $13^{\circ} 37' S$ ,  $76^{\circ} 50' W$ ). En este estudio se encontraron una gran abundancia de escamas de anchoveta (79.4 %) y merluza (15.9 %), y en menor proporción, escamas de otros peces como sardina (1.5%), mictófidós (0.9 %) y otros. La similitud de tendencias en las abundancias de escamas de anchoveta y merluza frente a Callao podría explicarse como una relación depredador-presa. Sin embargo en el periodo de 14-11 Kyr BP se registraron dos picos de mayor aumento de flujos de escamas: una mayor magnitud de los flujos de escamas de merluza y otras escamas coincidiendo con una menor magnitud de escamas de anchoveta en 13.8 Kyr BP (De Vries & Pearcy, 1982). Luego sigue una disminución de flujos de escamas de merluza y otros peces que a su vez coincide con el aumento de los flujos de escamas de anchoveta en 12.5 Kyr BP. Esta observación fue interpretada como periodos donde las asociaciones de peces de masa de aguas frías fueron más productivos versus periodos caracterizados por la mezcla de peces de aguas cálidas y frías donde se evidenció una menor productividad (De Vries & Pearcy, 1982).

El testigo colectado frente a Pisco abarcó parte del Pleistoceno, incluyendo la glaciación y el periodo interglaciario (De Vries & Pearcy, 1982). En este testigo se encontraron una gran abundancia de anchoveta y una menor abundancia de escamas de merluza y de otras especies desde aproximadamente 15-12.5 Kyr BP. La buena preservación de las abundancias de escamas de peces y diatomeas de agua frías indicarían una buena productividad durante la T1. El debilitamiento de ZCIT o



fortalecimiento de la contracorriente costera parece explicar el aumento de especies asociadas a masas de aguas cálidas como son sardina, agujilla y merluza (De Vries & Percy, 1982; De Vries & Schrader, 1981).

Frente a las costas de Chimbote, Campusano (2013), estudio la posible relación entre la abundancia de escamas de merluza y los indicadores de desoxigenación en un testigo (M77/2-029-3) que abarca desde  $17.5 \pm 0.6$  hasta  $10.7 \pm 0.7$  Kyrs BP. En la fig. 8 se observan los flujos de escamas, índice de preservación de escamas de merluza, indicadores de desoxigenación y ópalo biogénico desde 18-10 Kyrs BP en el testigo M77/2-029-3 (Campusano 2013). Los altos valores de  $\delta^{15}\text{N}$  están asociados a una mayor preservación y mayores flujos de escamas de peces durante HS1 debido a una mayor desoxigenación (18-14.5 Kyrs BP). Campusano (2013) observó una relación positiva entre el  $\delta^{15}\text{N}$  y el índice de bioturbación con las escamas de merluza únicamente durante el HS1. Además se encontró que hubo un probable desplazamiento de las poblaciones de merluza de norte a sur asociada a la intensificación de la oxigenación subsuperficial desde  $\sim 12.2$  hasta 11.8 Kyrs BP (Campusano, 2013).

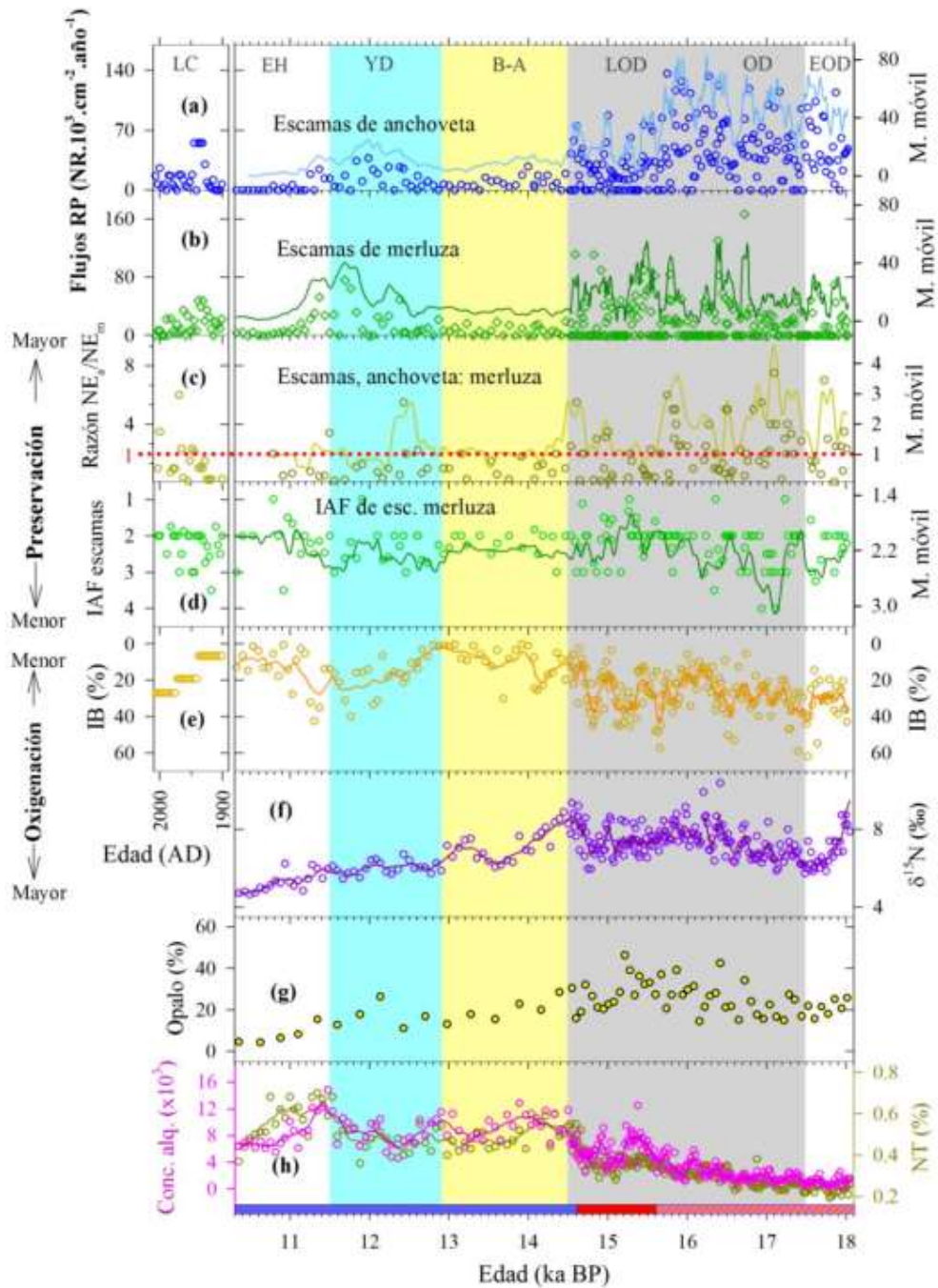


Figura 8. Comparación de los flujos de escamas e índices de alteración física (IAF) de escamas con los indicadores geoquímicos versus la edad (Kyr BP) en los testigos M772-029 y CD0701. (a) Flujos de escamas de anchoveta; (b) Flujos de escamas de merluza ;(c) Cocientes escamas de anchoveta ;(d) Cociente de escamas de merluza ;(d) IAF de escamas de merluza ;(e) Índice de bioturbación (IB, %) (f); δ<sup>15</sup>N ;(g) Contenido de ópalo biogénico (%) (Campusano, 2013).

Frente a Pisco, múltiples registros de restos de peces fueron comparados con índices de producción y oxigenación para determinar el efecto de la desoxigenación y productividad sobre las poblaciones de peces, y el efecto de las condiciones redox sobre la preservación de escamas (Salvatteci et al., 2019a). En la Fig. 9 se muestran los indicadores de la variabilidad de la población de anchoveta, preservación de escamas y vertebras de anchoveta, preservación de la materia orgánica, condiciones redox y desoxigenación en los tres testigos que abarcan los últimos 25 Kyr BP (Salvatteci et al., 2019a). Los resultados muestran que los flujos de escamas de anchoveta y otras especies son mayores en el periodo ACR (14.5-14 Kyr BP) y HIS (14.7-17.5 Kyr BP) comparados con el LGM (19-23 Kyr BP, Salvatteci et al., 2019a). Durante el LGM se observa, una baja abundancia de escamas y una pobre preservación de escamas de anchoveta. Sin embargo durante 19-16 Kyr BP, se observa un aumento de los flujos de escamas y una buena preservación de las escamas de anchoveta asociado con un aumento de los  $\delta^{15}\text{N}$  valores cercanos al 12 % (Salvatteci et al., 2019a, Fig. 9). Finalmente, durante el ACR se observa una ligera disminución de la preservación de escamas según el índice de preservación, relacionado a un aumento de la oxigenación inferido por el índice de  $\text{Mo/Re} \times 10^3$  (Salvatteci et al., 2019a).

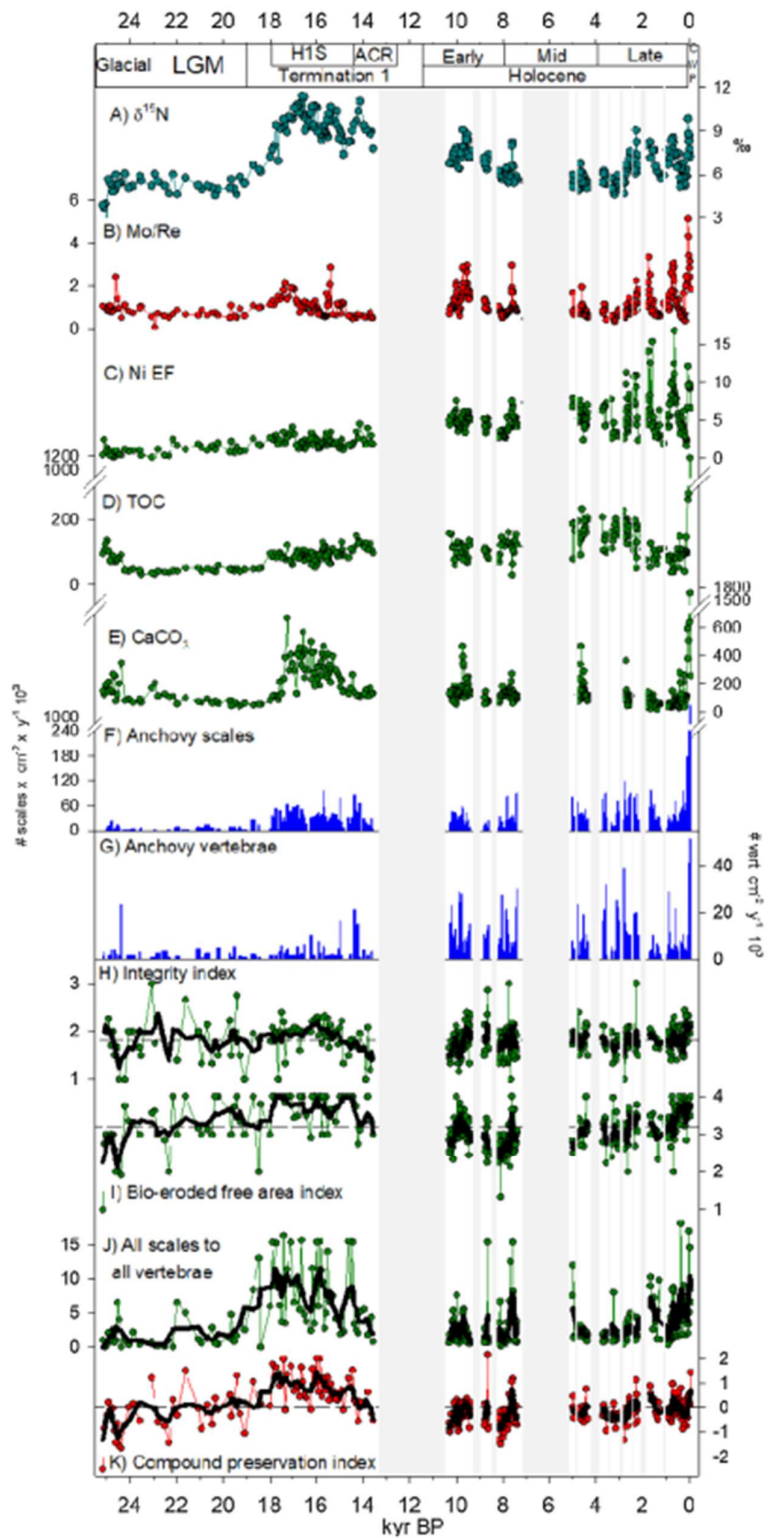


Figura 9. Comparación de flujos de escamas y vértebras de anchoveta con indicadores paleoambientales y índices de preservación de escamas y restos óseos. A)  $\delta^{15}\text{N}$  como indicador de

desoxigenación de la subsuperficie, B) Mo/Re como indicador de la condición Redox en los sedimentos marinos, C) Flujos de TOC, como indicador para la producción de exportación, D) Carbonato de calcio como indicador para la producción de exportación, E) Flujos de anchoveta, F) Flujos de vértebras de anchoveta, G) Índice de integridad. H) Índice de libre de bioerosión. H) Razón de escamas entre vértebras. K) Índice de compuesto de preservación. La línea negra gruesa en G, H, I y K representa una media móvil de cinco intervalos. Las áreas grises sombreadas indican muestras asociadas con depósitos homogéneos donde no se analizaron (Salvatteci et al., 2019).

Durante HS1, las abundancias y los índices de preservación de escamas en los testigos de Chimbote y Pisco muestran tendencias similares. Esto indicaría que este periodo presentó un aumento de la biomasa de anchoveta frente a la costa central del Perú. En el testigo de Pisco se observó el efecto combinado de buena preservación y aumento de flujos pero en Chimbote se debe principalmente a un aumento de los flujos de restos de peces (Campusano, 2013; Salvatteci, 2019a). Durante parte del ACR (14.5-13 Kyr BP) hubo un aumento de la oxigenación debido a la disminución de  $\delta^{15}\text{N}$  a  $\sim 8\%$  para Pisco y en Chimbote  $\sim 4\%$  por lo cual la preservación es baja para las escamas de todas las especies de peces (Campusano, 2013; Salvatteci, 2013). De manera adicional, durante la T1 los flujos de escamas de sardina, jurel y caballa frente a Pisco y Chimbote son menores que los flujos de escamas de anchoveta y merluza (Campusano, 2013; Salvatteci, et al., 2019). Esto revela que las condiciones durante la T1 fueron favorables para la anchoveta y merluza.

### **2.2.7 Estudios realizados con restos de peces en el Perú desde 2 Kyras BP a 1960 A.D**

En los últimos dos mil años, la productividad frente a Perú y la ZMO parecen estar asociadas a variaciones climáticas del Hemisferio Norte (HN) como la Anomalía Climática del Medioevo (MCA, Medieval Climatic Anomaly, durante los 800-1250 A.D) y la Pequeña Edad de Hielo (LIA, Little Ice Age; durante 1400-1820 A.D) (Sifeddine et al., 2008; Gutierrez et al., 2009; Salvattecí et al., 2014b).

Durante el LIA se registró frente a Pisco y Callao una disminución de la productividad, de las abundancias de peces, una mayor oxigenación en la columna de agua y en los sedimentos marinos, y un aumento del aporte terrígeno continental (Gutiérrez et al., 2009). Estos cambios probablemente se expliquen por el cambio de la circulación marina y de la posición de la IZCT hacia el sur (Gutiérrez et al., 2009; Sifeddine et al., 2008).

La abundancia de peces está asociada con estos cambios climáticos en el HS. Las escamas contadas e identificadas en sedimentos marinos colectados frente Callao y Pisco muestran tres periodos: a) 1700-1840, menores abundancias de escamas de anchoveta y del resto de especies asociados a menor producción exportada y mayor oxigenación. b) 1840-1910, un marcado aumento de la abundancia de escamas de sardina, jurel y caballa y disminución de las escamas de anchoveta además de una mayor oxigenación. c) 1920-1960, se observa una mayor abundancias de escamas de anchoveta y menor abundancias de escamas de sardinas debido a la intensificación de las surgencias y mayor productividad marina (Díaz-Ochoa et al., 2009; Gutiérrez et al., 2009; Salvattecí et al., 2012, 2017).

### **2.2.8 Estudios realizados con desembarques pesqueros en el Perú durante los últimos 70 años**

A escalas interanuales y decadales se observan grandes fluctuaciones en la biomasa de anchoveta y sardina evidenciados por los desembarques y también en los registros sedimentarios. Desde 1950-1970s hubo una gran abundancia de anchoveta hasta ~1972 cuando ocurrió el colapso de la pesquería de anchoveta (Bouchon et al., 2018). Luego hubo un periodo de gran abundancia de sardina (1975-1995). Entre 1986-1997 hay un traslape de 11 años entre ambas especies según los desembarques registrados frente a Perú.

El periodo desde 1999 a 2017, está marcado por ser posterior al evento el Niño 1997-98, se caracterizó por una gran disminución de las biomásas de los pelágicos (jurel, chamaco, sardina y samasa). La biomasa de anchoveta aumenta en relación a las otra especies debido al incremento de surgencia que favoreció la intensidad ZMO y su expansión (Bertrand et al., 2004; Gutiérrez et al., 2007; Bertrand et al., 2011; Gutiérrez, et al., 2011; Castillo et al., 2019). Un incremento del oxígeno disuelto en la columna de agua favorece la dominancia de especies pelágicas oceánicas (sardina, jurel y caballa) en desmedro de las especies pelágicas como anchoveta y otras especies asociadas (Bertrand et al., 2011; Alegre et al., 2015; Bertrand et al., 2016).

En los últimos veinte años, los desembarques de la pesquería industrial reportados por IMARPE del 2000 al 2020 (Anexo 3) muestra que anchoveta, merluza, jurel y caballa representa ~99% del total de especies de peces. Lo cual denota su gran importancia para la pesquería.

### **2.3 Justificación del estudio**

En esta tesis se busca encontrar evidencias de la variación en la distribución latitudinal de poblaciones de anchoveta, sardina y merluza frente a la costa central del Perú a escala de miles de años durante el MIS 2.

Dentro del MIS 2, la T1 se caracterizó por un aumento de la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico (Kiefer & Kienast, 2005) y por la desoxigenación de las aguas subsuperficiales debido a un calentamiento gradual (Jaccard et al., 2014). Frente a Pisco y Chimbote se ha estimado un aumento de la intensidad de la ZMO durante el HS1 y parte del ACR, en comparación con el LGM y gran parte del Holoceno, que favoreció la preservación de las abundancias de escamas y restos óseos de los peces (Campusano, 2013; Salvattecí, et al., 2019a).

El conteo de escamas y restos óseos del testigo extraído frente Callao que se presenta en esta tesis nos ayudará a conocer la distribución de peces en el pasado y reconstruir las expansiones y contracciones de las poblaciones de peces. Conocer la respuesta de la comunidad de peces a un aumento o reducción de la ZMO y cambios de la productividad primaria en el pasado nos ayudarán a entender el comportamiento de estas especies en un mundo más caliente.

La importancia de estudiar las escamas y restos óseos en los sedimentos marinos a grandes escalas de tiempo es de proveer un mayor entendimiento sobre la respuesta de las poblaciones de peces a una amplia variedad de condiciones climáticas (Finney et al., 2010).



Además, se podría contribuir a identificar los principales mecanismos de control climático-oceanográfico para poder ser usados en los modelos ecosistémicos con enfoques retrospectivos y/o predictivos. Finalmente, este conocimiento podría ayudar a mejorar la toma de decisiones en la ordenación pesquera si es que aquellas condiciones oceanográficas del pasado se repitieran en el presente o en un futuro cercano.

## **2.4 Objetivo**

### **2.4.1 Objetivo general**

Conocer la respuesta en la distribución latitudinal de los principales peces a cambios oceanográficos frente a la costa central del Perú durante la Terminación 1, a escala milenial.

### **2.4.2 Objetivo específico**

- Determinar la abundancia de escamas y vértebras de anchoveta, sardina, merluza, caballa, jurel y mictófidios frente a la costa central del Perú, en base a registros sedimentarios de la T1.
- Determinar a partir de múltiples índices de degradación los cambios en la preservación de escamas frente a la costa central del Perú en este período.
- Comparar los flujos de escamas y restos óseos de peces e índices de preservación con los indicadores biogeoquímicos de manera latitudinal en la costa central del Perú, durante la T1.

### **III. Metodología**

#### **3.1 Hipótesis**

Los cambios en la abundancia y en la distribución latitudinal de los principales peces frente a la costa central del Perú estuvieron asociados a la productividad y la oxigenación en la columna de agua a escala de miles de años durante la Terminación 1.

**H<sub>1</sub>:** El aumento de la abundancia de anchoveta está asociado a una menor oxigenación en la columna de agua y una mayor productividad.

**H<sub>2</sub>:** La distribución latitudinal de la merluza depende de una mayor oxigenación de la columna de agua.

**H<sub>3</sub>:** Una mayor oxigenación dentro de la columna de agua favorece una mayor abundancia de los peces oceánicos en comparación a la anchoveta.

### **3.1.1 Diseño del estudio**

Esta tesis se basa en un trabajo micropaleontológico de restos de peces que incluye la determinación taxonómica y cuantificación de escamas, vértebras y otros restos óseos como espinas desde 18 a 13 Kyr BP.

### **3.1.2 Población de estudio**

La población de estudio es el testigo de tipo piston core, M77/2-005-3, colectado en la zona superior del talud a 214 metros de profundidad por la expedición Meteor 77-2 durante 2008. En primer lugar, los registros de restos ictiológicos del testigo M77/2-005-3 se compararon con indicadores de la variabilidad ambiental obtenidos del mismo testigo. Luego se compararon con datos similares obtenidos en otros dos testigos sedimentarios: piston core, M772-029, colectado en la misma expedición antes mencionada frente Chimbote y otro testigo de tipo gravity core, G-14, este fue colectado por el crucero de exploración oceanográfica Galathea-3, a bordo del buque europeo BIC Vædderen durante 2007 en los cuales participó el Instituto del Mar del Perú (Tabla 2).

### **3.1.3 Muestra**

Se obtuvieron 140 muestras del testigo M772-005-3. El intervalo de muestreo fue una muestra cada 5 cm desde 35 hasta 703 cm. En el intervalo desde 134 a 157 cm se muestreó el testigo cada 1 cm debido a que el testigo presentó laminaciones bien definidas.

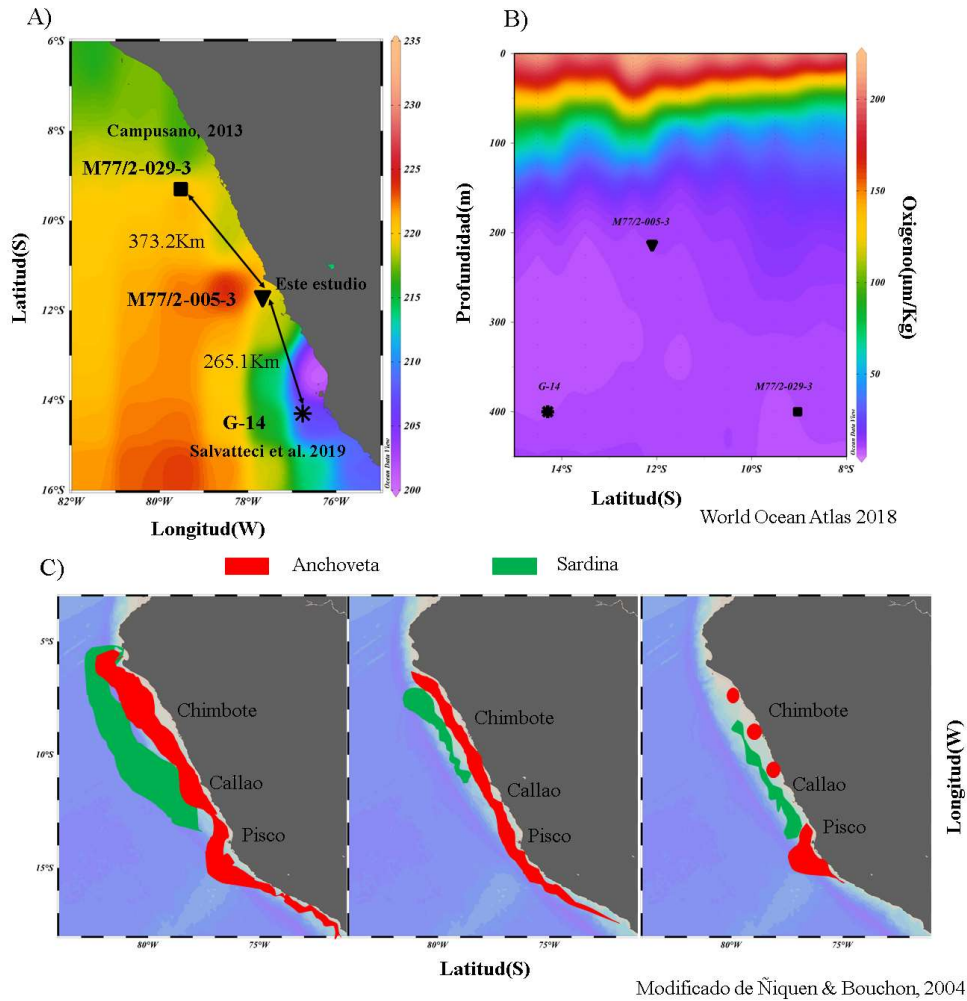


Figura 10. Zona de estudio: A) Promedio de la concentración de oxígeno disuelto ( $\mu\text{m}\times\text{Kg}^{-1}$ ) de los primeros 50 metros del Pacífico tropical desde 1955-2018 del Proyecto “World Ocean 2018” con ubicación de los testigos (fig. superior izquierda). B) Oxígeno disuelto en el Pacífico desde 8°- 17°S hasta los 450 metros de profundidad, datos basados en el mismo proyecto. (fig. superior derecha). C) Distribución de anchoveta (rojo) y sardina (verde) frente a Perú, izquierda: inicio del Niño 97-98, centro : durante Niño 97-98, y derecha: después del Niño 97-98 (Ñiquen & Bouchon, 2004).

Tabla 2. Testigos utilizados con información sobre el lugar de extracción , ubicación geográfica, tamaño del testigo, profundidad de extracción, crucero de investigación, año de colecta y distancia de la costa estimada de las isoclinas de profundidad actuales.

Nombre del testigo	Tipo de testigo	Lugar	Latitud	Longitud	Largo (m)	Profundidad (m)	Crucero de investigación	Año	Distancia de la costa (km)		
									CWP	ACR	HSI
M772-029	Pistón core	Chimbote	09.30°S	79.52°W	13.54	433	Meteor 77-2(IFM-GEOMAR)	2008	43.34	32.64	11.89
M772-005-3	Pistón core	Callao	12.09°S	77.67°W	7.07	214	Meteor 77-2(IFM-GEOMAR)	2008	19.47	17.88	13.76
G-14	Gravity core	Pisco	14.29°S	76.76°W	5.22	400	Galathea 3-IMARPE	2007	24.66	21.9	21.73

### 3.2 Operacionalización de las variables

#### 3.2.1 Variables respuesta

- **Densidad aparente seca:** variables cuantitativas continua ( $\text{g} \times \text{cm}^{-3}$ )
- **Índice de preservación de sedimentos laminados:** variable con una escala discreta como indicador de desoxigenación bajo condiciones de preservación de sedimentos laminados en el sedimento marino.
- **Desoxigenación en la columna de agua:**  $\delta^{15}\text{N}$  en partes mil (‰) variable continua sin unidades.
- **Productividad exportada:** Carbono total orgánico (%) sin unidades y Br/Ti
- **Productividad primaria de organismos productores de silicatos:** razón de Si/Ti (sin unidades).
- **Productividad de organismo productores de Carbonatos:**  $\text{CaCO}_3$  (%) sin unidades.

### 3.2.2 Variables explicativas

- **Temperatura superficial del mar en primavera a verano:** basado en Alquenonas (°C).

- **Abundancias de las poblaciones de Peces**

Abundancias de escamas, vértebras y otros restos de peces: normalizadas con el peso húmedo de la cada muestra (número de unidades  $\times g^{-1}$ ) y flujos de restos de peces (unidades  $\times cm^{-2} \times año^{-1}$ ).

- **Preservación de restos peces**

Índice de integridad de las escamas, Índice de libre de bioerosión de escamas, razón escamas entre vertebras y índice compuesto de preservación son variables continuas sin unidades.

### 3.3 Procedimiento y técnicas

En primer lugar, se colocó el testigo sobre una plataforma de madera acondicionada al tamaño del testigo y a su diámetro. Luego se procedió a cortar el testigo longitudinalmente en dos mitades usando una sierra y separándolos con una cuerda de nylon. El testigo fue descrito, fotografiado y radiografiado. Luego se procedió a la extracción de una canaleta de ancho de 1cm para poder estimar la densidad aparente seca del testigo a una resolución por cada centímetro. La masa restante de sedimento por sección fue destinada para realizar el análisis de restos de peces.

Se trato el sedimento en baño maría con agua destilada y 30 ml de solución al 35% de peróxido de hidrógeno y pirofosfato de sodio por aproximadamente 10 minutos (Salvatteci, 2008), luego se tamizo en húmedo con agua corriente usando dos tamices uno de 350  $\mu m$  y 63  $\mu m$ .

Durante el tamizado puede suceder la abrasión física, que puede aumentar el número de fragmentos de escamas debido a que son más frágiles que las vértebras (O'Connell & Tunnicliffe, 2001; Salvattecí, 2008; Salvattecí et al., 2012).

Posteriormente, el material retenido se colocó en un frasco plástico de 40 ml conteniendo una solución de etanol al 70%, para preservar las escamas, vértebras y restos óseos de peces. La fracción de 63  $\mu\text{m}$ , se filtró con la ayuda de un papel filtro Whatman No.1, se seca por una hora y se coloca en frascos para realizar los conteos de foraminíferos para trabajos futuros.

### **3.3.1 Estratigrafía del Testigo M772-005-3**

#### **3.3.1.1 Descripción del testigo**

La descripción del testigo se realizó tomando en cuenta: a) la litología observada en la radiografía, b) la bitácora realizada a bordo y c) la descripción posterior realizada en laboratorio de Geología marina de IMARPE. En la descripción hecha en IMARPE se usó como referencia el protocolo de descripciones visuales de los sedimentos marinos (Mazzullo, et al., 1988). Para la clasificación de los tipos de estructura sedimentaria se usó la escala propuesta para los sedimentos marinos colectados frente al Perú ( Kemp, 1990; Brodie & Kemp, 1994): a) sedimentos homogéneos carentes de laminaciones; b) laminación aislada, que consiste en una sola lámina de 2mm a 1cm de color olivo limitados por una banda de color pálido; c) láminas irregularmente espaciadas, que consiste en láminas agrupadas en un paquete espaciado por sedimentos homogéneo. Además, se incluyó una cuarta categoría que son las discordancias sean planas, angular, lenticular, contacto abrupto erosionado o gradual. Finalmente, el registro es esquematizado con ayuda del programa SedLog (Zervas et al., 2009).



### **3.3.1.2 Densidad Aparente Seca**

Para calcular la densidad aparente seca o “Dry Bulk Density” (DBD, siglas en inglés y en unidades  $\text{g.cm}^{-3}$ ), previamente se submuestreo cada centímetro desde 0 a 700 cm, extrayendo cubos de volumen  $1\text{cm}^3$  con la ayuda de una canaleta. Luego fueron pesados húmedos y después fueron secados en la estufa por dos días a  $50^\circ\text{C}$ . Posteriormente con estos datos se estimó el DBD dividiendo el peso seco entre el volumen de la muestra.

### 3.3.2 Índice de Preservación de sedimentos laminados

El índice de preservación de sedimentos laminados (IPSL) se estimó con la escala de seis grados (fig. 11) basado en la presencia hasta la ausencia de laminaciones en el sedimento por cada centímetro (Droser & Bottjer, 1986; Miller & Smail, 1997) para lo cual se trabajó con el programa Visilog 6.4.

#### Características

---

Grado 1. No perturbado, presencia de estructuras laminadas

Grado 2. Perturbación discreta (10%), presencia pobre de bioturbación por organismos

Grado 3. Laminaciones perturbadas (10 a 40%) presencia de excavaciones y aislados traslapes entre las estructuras aun visibles laminadas

Grado 4. Vestigios de estructuras laminadas (40 a 60%) excavaciones traslapadas no bien definidas

Grado 5. Laminaciones completamente perturbadas (60 a 80 %), pero todavía son con excavaciones en lugares discretos y la estructura no se mezcla

Grado 6. Total Homogenizado (100%)

---



Figura 11. Tabla de los Índices de Preservación de sedimentos laminados (IPSL) además incluye ejemplos de seis grados (Droser & Bottjer, 1986; Miller & Smail, 1997).

### **3.3.2.1 Cronología**

La determinación de las edades se estimó con la técnica de datación basado en el  $^{14}\text{C}$ . Se extrajeron 26 muestras en total. solo cuatros muestras fueron analizadas en el “Accelerator mass spectrometry” (AMS) en Leibniz Laboratory for Radiometric Dating and Stable Isotope Research, “Christian-Albrechts-Universität zu Kiel” (CAU), Alemania. Además, en la instalaciones del Laboratorio de Bondy, Francia se analizaron veintidós muestras (Tabla 5) donde la metodología incluyó el total de la materia orgánica “Bulk sediment” (Yseki., 2018). Las edades fueron calibradas con el programa CALIB 7.0.4 (Reimer et al., 2013; Stuiver & Reimer, 1993) utilizando un delta R de  $511 \pm 278$  años (Ortlieb et al., 2011).

### **3.3.2.2 Tasa de Acumulación de masa**

La tasa de acumulación de masa ( $W$ ,  $\text{g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ) es el producto de la tasa de sedimentación ( $\text{cm} \times \text{año}^{-1}$ ) y DBD ( $\text{g} \times \text{cm}^{-3}$ ). La tasa de acumulación de masa se utiliza para calcular los flujos de los respectivos indicadores (e.g. escamas de anchoveta). Cuando existe mucha variabilidad en los valores DBD es preferible estimar la tasa de acumulación basada en la masa acumulada.

### **3.3.2.3 Composición de restos de peces**

Los restos de peces (escamas, vértebras y otros huesos como espinas, mandíbulas y otros huesos) son identificados y cuantificados con la ayuda de un estereoscopio. Las escamas de anchoveta, sardina, jurel, caballa y merluza pudieron ser identificadas a nivel de especie mientras que las escamas de peces mesopelágicos se identificaron como un solo grupo. Para la identificación de escamas se utilizaron catálogos de peces publicados (Aquino Diaz, 1974; Patterson et al., 2002; Bräger & Moritz, 2016; Salvatteci et al., 2019a) y fotos de escamas de pescados actuales

que fueron extraídas en el laboratorio de Ciencias del Mar de Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH).

La cuantificación de las escamas se realizó de la siguiente manera: 1) se considera una escama como completa cuando posee el foco y ambos campos laterales de la escama, cuando posee el foco y un campo lateral, cuando posee el foco y una porción del campo lateral, o cuando posee un foco sin márgenes; 2) se considera una escama “mitad” cuando: posee una la mitad del foco con o sin márgenes, 3) los fragmentos de escamas son los restos de escamas que no entran en las descripciones detalladas más arriba (Salvatteci et al., 2012).

Los restos óseos se cuantificaron como vértebras, espinas, mandíbulas y otros huesos. Las vértebras se identificaron por especie para la anchoveta, otras vertebras clasificados por tipos desde 1 al 13 y como no identificadas (Salvatteci et al., 2019a). Las vértebras se contabilizaron como completas, mitades y fragmentos. Las espinas, mandíbulas y otros huesos se contabilizaron como completas o fragmentos.

### **3.4 Índices de preservación de los restos de peces**

#### **3.4.1 Índice de integridad para las escamas**

Existen tres categorías para clasificar la integridad de escamas y restos óseos (Savatteci et al., 2012). A las escamas que presentan solo la mitad o el foco completo (y los márgenes de las escamas son ausentes) se les asignó el valor de uno. A las escamas que presentan el foco y de manera parcial los márgenes laterales se le asigna el valor de dos. Finalmente, cuando las escamas poseen el foco y en su totalidad los márgenes se les asigna el valor de tres (Tabla 3). El índice de integridad de escamas para cada muestra se calcula promediando los valores de integridad para cada escama en cada muestra. Altos valores indican una mejor preservación.

Tabla 3. Grado de integridad de escamas: Escala Semicuantitativa

<b>Grado de integridad de escama</b>	<b>Valor asignado</b>
Fragmento	-
Solo foco	1
Escama incompleta	2
Escama completa	3

### 3.4.2 Integridad de vértebras

Las vértebras de peces halladas en el testigo se clasificaron en cuatro grupos (Tabla 4). Si las vértebras poseen la totalidad del cuerpo de la vértebra y puede tener aun sus procesos, se les denomina completa y se les asigna el valor de tres. Si la vértebra posee casi la totalidad cuerpo, pero carece de procesos y de manera parcial una cara articular anterior o posterior, pero mantiene más de la mitad del canal central de la vértebra, se le denomina incompleta y se le asigna el valor de dos. Si la vértebra posee la mitad del cuerpo de la vértebra y del canal central se le denomina mitad de vertebra y se le asigna el valor de uno. El índice de integridad de vértebras para cada muestra se calcula promediando los valores de integridad para cada vértebra en cada muestra. Altos valores indican una mejor preservación (Anexo 6). Por último, si la vértebra posee menos de la mitad del cuerpo, canal central y carece de ambas caras de la articulación de la vértebra, se le denomina fragmento de vértebra (fig. 12 y Tabla 4).

Tabla 4. Grado de integridad de vertebras: Escala Semicuantitativa

<b>Grado de integridad de vértebra</b>	<b>Valor asignado</b>
Fragmento de Vértebra	-
Mitad de vértebra	1
Vértebra incompleta	2
Vértebra completa	3

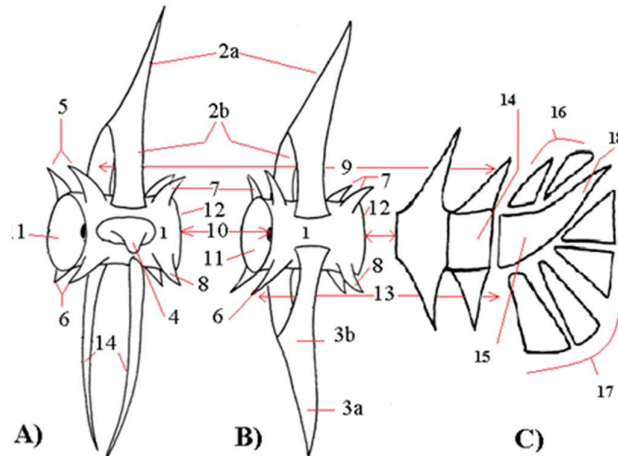


Figura 12. Esquema de vértebras según la posición en la columna vertebral de un pez óseo: A) Vertebra precaudal; B) Vertebral caudal y C) Vertebra postcaudal. Las partes principales de las vértebras: 1) Cuerpo Principal; 2) Arco Neural Superior (A. Proceso Espinoso Superior B. Neurapófisis); 3) Arco Hemal Superior (A. Proceso Espinoso Inferior B. Hemapófisis); 4) Proceso Transversal (Parapofisis o Basapofisis); 5) Prezigapófisis Superior; 6) Prezigapófisis Inferior; 7) Postzigapófisis Superior; 8) Postzigapófisis Inferior; 9) Canal Neural; 10) Canal Central; 11) Cara Articular Anterior; 12) Cara Articular Posterior; 13) Canal Hemal; 14) Costillas Pleurales; 15) Penúltima vertebra; 16) Epuralia; 17) Hipuralia; 18) Urostilo (Modificado de Lepiksaar, 1994).

### 3.4.3 Integridad de espinas

Para las espinas se procedió a contabilizar como espina completa cuando esta posee los dos extremos aciculares. A las espinas que no estaban completas se les consideró como fragmentos de espina.

### 3.4.4 Integridad de otros huesos

Los restos de huesos que se pueden reconocer como mandíbulas, cráneo, branquioespinas, opérculos o partes de aletas se les considero como completas pero las que fueron imposibles de determinar su tipo se le considero fragmentos de hueso que pueden pertenecer a fragmentos de muchos diferentes tipos de huesos de peces.

### 3.4.5 Índice de libre de bio-erosión para restos de peces

Se determinó a una escala de cuatro grados de acuerdo a la presencia de túneles sobre las superficies de la escama y otros restos óseos producidas por organismos que causan bioerosión. Estos organismos consumen la materia orgánica de las escamas y es evidente cuando se compara escamas de peces vivos y peces fósiles (Field et al., 2009; Tunnicliffe et al., 2001, Salvattecí et al., 2019a).

Las escamas que presentan una gran área de su superficie con túneles son más frágiles al momento de la manipulación (Salvattecí et al. 2012, 2019). Para calcular el índice de libre de bioerosión de restos se estimó usando media aritmética basado con la escala mostrada en la Tabla 5 (Salvattecí et al., 2012).

Tabla 5. Escala del índice de libre de bioerosión

<b>Grado de libre de bioerosión</b>	<b>Valor asignado</b>
Totalmente cubierto con bio- erosión	1
Cubierto con bio-erosión parcial	2
Cubierto con Bio-erosión leve	3
Totalmente libre de bio-erosión	4

### 3.4.6 Razón escamas entre huesos

La razón escamas entre huesos se determinó como el cociente del número escamas entre el número de vértebras y otros huesos excepto espinas por cada muestra analizada (Salvattecí et al., 2012; 2019a). Las escamas poseen mayor facilidad para la degradación debido a que poseen mayor área que volumen que las vértebras y son más susceptibles a la actividad de la degradación por organismos debido a que poseen mayor proporción de matriz proteica (Field et al., 2009). Por lo tanto, es necesario estimar este índice para comparar y/o analizar el efecto de la preservación de escamas y otros restos óseos.

### 3.4.7 Índice compuesto de escamas de peces (ICP)

Es el promedio aritmético de los índices normalizados de integridad de escamas, libre de bioerosión de vértebras y razón escamas entre otros huesos excepto de espinas para ver el grado de preservación de las escamas y otros restos óseos (Salvatteci et al., 2012; 2019a). El ICP fue usado solamente para presentar los resultados y discutir la preservación del testigo extraído frente Callao.

Debido a la ausencia del índice de integridad de escamas frente a Chimbote, se estimó otro valor de índice compuesto de restos de peces (IPRP) que es la media aritmética de la razón de escamas de peces entre huesos excluyendo espinas y la libre de bioerosión de vértebras con la finalidad de comparar la preservación en los testigos de Chimbote, Callao y Pisco.

#### **3.4.8 Flujos de escamas y restos óseos**

La abundancia de restos de peces (i.e. escamas, vértebras, espinas y otros huesos), en unidades de número de restos de peces  $\times g^{-1}$ , fueron multiplicadas por la tasa de acumulación (W) para convertir en flujos (unidades  $\times cm^{-2} \times año^{-1}$ ) y compararlos con otras variables cuantitativas como biológicas o físicas según la siguiente ecuación:

$$Flujos\ de\ restos(10^3 \times \# \text{ restos} \times cm^{-2} \times año^{-1}) = \frac{10^3 \times \# \text{ restos} \times \text{tasa de acumulación}(g \times cm^{-2} \times año^{-1})}{\text{peso de muestra}(g)}$$



### 3.5 Plan de Análisis

Primero, los valores extremos de los restos de peces fueron detectados y reemplazados por el promedio más tres veces la desviación estándar. Los valores extremos se originan por eventos estocásticos de pulso de alta abundancia de clupeidos (también otros peces) que puede generar sobreestimación de poblaciones de peces que no reflejaría cambios en la biomasa (O'Connell & Tunnicliffe, 2001; Savattecchi et al., 2012). Los datos se dividieron en cuatro grupos: LH, ACR, HS1 y LGM.

Para el caso de los indicadores biogeoquímicos cuya distribución presento valores extremos se aplicó una transformación logarítmica ( $\text{Log}_e+1$ ). Esta transformación solo fue usada en las pruebas estadísticas para los datos contabilizados en M722-005-3 con el fin de realizar la comparación.

Los datos se sometieron a un análisis multivariado exploratorio para clasificar y ordenar los datos con un análisis de componentes principales, análisis de grupos y Ordicluster (Borcard, et al., 2018). Primero se hizo el análisis de componentes principales para luego clasificar los datos utilizando el análisis de agrupamiento (Cluster analysis, en inglés). Se utilizó el método "Ward" basado en la distancia mínima euclidiana de la varianza de los datos. Finalmente, los resultados se muestran gráficamente mediante un gráfico de Ordicluster que integra el análisis de grupos y análisis de ordenamiento para poder diferenciar grupos como periodos (Borcard, et al., 2018).

Se tomó en cuenta las variables biogeoquímicas como indicadores de productividad, indicadores de desoxigenación y otras variables abióticas versus las variables bióticas como los indicadores de preservación de escamas y abundancia de peces.

Después, se agruparon los datos obtenidos de los conteos de restos peces y variables abióticas por periodos de tiempo dentro del MIS 2 para los datos obtenidos de los testigos extraídos frente Callao (datos propios) y de otros trabajos (Chimbote y Pisco).

Dentro de las variables adicionales se usaron los datos estimados para el nivel del mar promedio inferido por diferentes indicadores como son  $\delta^{18}\text{O}$  de la calcita de foraminíferos,  $\delta^{18}\text{O}$  excluyendo el efecto de la TSM,  $\delta^{18}\text{O}$  de la calcita de los corales (Spratt & Lisiecki, 2016). Por lo tanto, la profundidad del mar para cada y testigo (Chimbote, Callao y Pisco) fue calculada como la sustracción de la profundidad actual menos el nivel del mar promedio en metros.

Los indicadores obtenidos en el testigo M772-005-3 en otros estudios no se encuentran a la misma resolución temporal (e.g. alquenonas en Salvattecí et al., 2019b) en las que se realizó el conteo e identificación de restos de peces (esta tesis). Por lo tanto, se realizó una interpolación cúbica. Esta forma de interpolación no agrega valores extremos y respeta los valores de la media y de la varianza de cada variable. Este procedimiento se realizó para poder analizar estadísticamente las relaciones entre las variables abióticas y bióticas.

En trabajos previos, se evidenciaron relaciones entre las variables abióticas y bióticas en la misma escala de tiempo de esta tesis (Campusano, 2013; Salvattecí, et al., 2019). Se calculó la correlación de Spearman ( $p < 0.05$ ) entre las variables durante T1. La probabilidad fue corregida por el número múltiple de comparaciones por lo cual se dividió el nivel alfa ( $p < 0.005$ ) por el número de variables menos uno (Glantz, 2002). Luego, se realizaron pruebas no paramétricas de comparación múltiple de medias “Kruskal-Wallis” y prueba de Post-Hoc de Dunn, método

Bonferroni ( $p < 0.05$ ) para determinar periodos donde hubo mayores/menores flujos de restos de peces.

De manera adicional se examinó el efecto del número de muestras en cada periodo de tiempo. Por lo tanto, se usó el coeficiente de épsilon cuadrado ( $\epsilon^2$ ) derivado de la prueba Kruskal-Wallis (Fritz et al., 2012; Tomczak & Tomczak, 2014). El  $\epsilon^2$  se circunscribe en una escala de tres categorías. Si el valor es menor a 0.08 se interpreta que el efecto de la cantidad de muestras es mínimo. Si el valor de  $\epsilon^2$  es mayor a 0.08 y menor a 0.2 se interpreta que el efecto de la cantidad de muestras es moderado. Si el valor de  $\epsilon^2$  es mayor a 0.26 se interpreta que el efecto de la cantidad de muestras es fuerte (Fritz et al., 2012; Tomczak & Tomczak, 2014).

Para demostrar o refutar las hipótesis previamente planteado usamos los modelos aditivos generalizados (GAM). Los GAM que son modelos similares a los modelos lineales generalizados que considera las variables de respuesta ajustada a la familia de funciones exponenciales, pero en el caso de los GAM está asociado a una función de enlace suavizada de la variable predictor. Esto genera una gran flexibilidad para selección de un modelo pero genera el problema de la selección del modelo más optimo (Wood & Augustin, 2002).

Cuando se trabaja con multiples variables de entradas es necesario asignar una forma de reparametrización de la variables suavizadas (Wood, 2017). Esto puede ser de dos formas: la primera es la reparametrización necesaria para absorber las restricciones de la identificabilidad en la matriz de las variables de entradas suavizadas y la segunda es una reparametrización que ayuda a comprender los grados de libertad efectivos de cada variable suavizada (Wood, 2017).

Los modelos GAM no restringen el modelo de suavizado para cada variable, el primer tipo de suavizado simple donde se puede incluir el grado de suavidad que genera un modelo suavizado isotrópico (Wood, 2017). La otra opción son: el producto tensorial que son invariantes al cambio de escala lineal de las variables de entrada y pueden ser bastante eficientes desde el punto de vista computacional. Otra opción es el producto tensorial interacción se caracteriza por excluir el efecto principal (Wood, 2017).

Finalmente se usaron diversos programas para realizar esta tesis como Microsoft Office Word, Excel, Rstudio, ImageJ, Visilog, SedLog, Adobe Illustrator, Ocean data View y Sigmaplot 12.

## **IV. Resultados**

### **4.1 Estratigrafía del testigo M772-005-3**

#### **4.1.1 Descripción del Testigo**

El testigo M772-005-3 presenta laminaciones finas, laminaciones irregularmente espaciadas, laminaciones aisladas, sedimentos homogéneos y discordancias (fig. 13). De acuerdo con las observaciones en el laboratorio de Geología Marina (IMARPE) y la bitácora de la descripción a bordo del R/V Meteor77/2, los primeros 30 cm se caracterizan por presentar sedimentos homogéneos (en la fig. 13 no se muestra esta sección). La sección entre 30 a 88 cm presenta sedimentos con laminaciones finas a irregularmente espaciadas. Esta secuencia laminada es interrumpida a 88 cm por una secuencia de 10 cm caracterizada por un cambio abrupto de la litología y por la presencia de nódulos endurecidos. Luego de esta aparente discordancia, la secuencia sedimentaria entre 98 a 428 cm está caracterizada por sedimentos laminados finos intercalados con sedimentos con laminaciones irregularmente espaciadas. Sin embargo, en esta secuencia también se observaron sedimentos retrabajados (i.e. 421 a 428cm) y discordancias (i.e. 155 a 162, 329, 384 cm). Entre 155 a 162 cm en las imágenes radiográficas se aprecian tres aparentes láminas, pero estas fueron causadas por el secado del sedimento.

En la siguiente sección, desde 429 a 653 cm, se observa una menor cantidad de láminas que en la sección anterior y por ende se observa predominancia de laminaciones irregularmente espaciadas y láminas aisladas. Además, en esta sección se observaron nódulos endurecidos a lo largo de la sección (i.e. 517 a 521 cm, 536 a 539 cm, 594 a 597 cm y 602 cm). Finalmente, entre 653 y 703 cm se observó una mayor proporción de sedimentos con laminaciones aisladas y

sedimentos homogéneos con presencia de nódulos endurecidos (i.e. 700 a 702 cm y 703 a 713cm). La presencia de láminas en esta sección es muy baja. Se adjunta esquema y la descripción detallada del testigo en los anexos (fig. 13, Anexos 1 y Fig. 32).

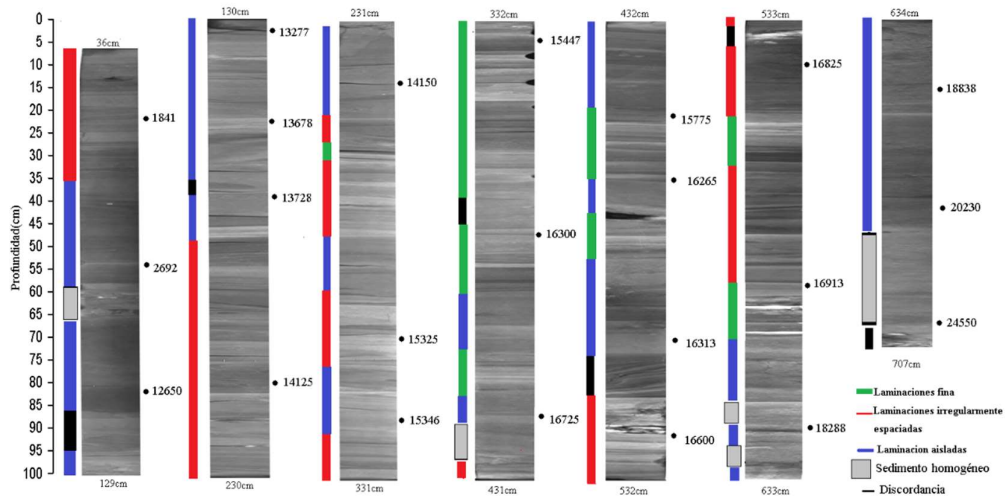


Figura 13. Esquema de la descripción estratigráfica del testigo M772-005-3. Los primeros 36 cm del testigo no fueron incluidos en la fotografía. Los números en la parte superior e inferior de cada sección representan la profundidad acumulada. Las edades calibradas se muestran al lado derecho de cada radiografía y al lado izquierdo se representa la litología simplificada con líneas verticales.

#### 4.1.2 Densidad Aparente Seca (DBD)

Los valores de la DBD en todo el testigo variaron entre  $0.097$  a  $1.225 \text{ g}\times\text{cm}^{-3}$ , con valores bajos en los primeros 93 cm y con valores altos después de 632 cm (fig. 14A). Se observan dos aparentes discontinuidades en base a cambios abruptos de la DBD en 94 cm y 632 cm (fig. 14A). Desde el tope hasta 94 cm, la DBD varió entre  $0.097$  a  $0.665 \text{ g}\times\text{cm}^{-3}$ ; con un promedio y desviación estándar de  $0.229\pm 0.097 \text{ g}\times\text{cm}^{-3}$ . Desde 95 a 632 cm la DBD varió entre  $0.233$  a  $1.080 \text{ g}\times\text{cm}^{-3}$  ( $0.481\pm 0.126 \text{ g}\times\text{cm}^{-3}$ ). Desde 633 a 707 cm la DBD varió entre  $0.581$  a  $1.225 \text{ g}\times\text{cm}^{-3}$  con un promedio y desviación estándar de  $1.006\pm 0.137 \text{ g}\times\text{cm}^{-3}$ .

### 4.1.3 Índice de Preservación de sedimentos laminados (IPSL)

El IPSL varió desde 1 hasta 6 a lo largo de testigo, pero la gran mayoría de datos (78%) se situaron entre 2.5 y 4.5. Solo el 6% de los datos de IPSL indican evidentes secuencias laminadas, mientras que el 16% de los datos indican secuencias claramente mezcladas. El promedio y desviación estándar del IPSL en todo el testigo fue  $3.76 \pm 0.87$ . Basados en los cambios de los valores promedio, se distinguen cuatro intervalos (fig. 14B).

Desde el tope hasta 93 cm ( $3.71 \pm 0.13$ ), desde 95 a 410 cm ( $3.24 \pm 0.76$ ), desde 410 a 626 cm ( $3.98 \pm 0.76$ ) y desde 626 a 707 cm ( $4.94 \pm 0.74$ ). Las dos primeras secciones se encuentran separadas por altos valores del IPSL (fig. 14B). La primera y tercera sección presenta valores similares. La segunda sección presenta los menores valores que representan una mayor presencia de sedimentos laminados. En cambio, la última sección presenta valores altos de IPSL que asocia a una mayor presencia de secuencias homogéneas o mezcladas.

### 4.1.4 Cronología

En base a la relación edad calibrada versus profundidad del testigo y las discordancias a 94 y 631 cm se identificaron tres secciones con diferentes tasas de sedimentación (fig. 14C). La primera sección va de los 30 hasta 93 cm, presentando una tasa de sedimentación de  $0.45 \text{ mm} \times \text{año}^{-1}$ ; este tramo pertenece a una parte del Holoceno tardío.

La segunda sección va de 95 hasta 631 cm y presenta la mayor tasa de sedimentación ( $1.14 \text{ mm} \times \text{año}^{-1}$ ); esta sección corresponde a gran parte de la Terminación 1. Finalmente, la tercera sección desde 634 a 700 cm, presenta la menor tasa de sedimentación ( $0.09 \text{ mm} \times \text{año}^{-1}$ ) y corresponde al LGM. Basado en los resultados

de este modelo se denota la ausencia del periodo YD en el registro (Tabla 6). Además, se denota la presencia de dos reversiones en las fechas (378 y 418 cm).

Tabla 6. Cronología de las edades sin calibrar y calibradas versus profundidad en el testigo M772-005-3, datos de  $^{14}\text{C}$  de (Yseki., 2018).

Profundidad (cm)	Edad sin calibrar		Delta r		Lugar Laboratorio	Rango de edad				Edad Calibrada	
	Edad (14C)	± (14C)	Edad (BP)	± (BP)		Mínimo (BP)	Máximo (BP)	σ		Probabilidad	
								Mínimo (BP)	Máximo (BP)	Mediana (BP)	Máxima (BP)
13	1902	20	367	40	Bondy	1025	1169	956	1225	1092	1092
52	2605	30	367	40	Bondy	1747	1928	1657	2030	1841	1841
84	3160	30	226	98	Bondy	2535	2836	2358	2950	2692	2692
113	11646	44	511	278	Kiel	12215	12958	11731	13265	12585	12650
134	12320	60	511	278	Bondy	12941	13569	12678	13885	13277	13277
153	12690	60	511	278	Bondy	13321	13985	12984	14615	13678	13678
169	12730	70	511	278	Bondy	13339	14047	13035	14745	13728	13728
210	13150	70	511	278	Bondy	13820	14814	13475	15267	14343	14125
244	13180	70	511	278	Bondy	13867	14862	13494	15303	14387	14150
303	13792	53	511	278	Kiel	14863	15878	14209	16174	15325	15325
319	13810	80	511	278	Bondy	14855	15938	14175	16249	15346	15346
349	13840	70	511	278	Bondy	14955	15982	14222	16270	15399	15399
378	13790	70	511	278	Bondy	14823	15886	14178	16202	15316	15316
385	13870	70	511	278	Bondy	15023	16022	14250	16315	15447	15447
403	14449	68	511	278	Kiel	15871	16788	15366	17209	16323	16300
418	13990	70	511	278	Bondy	15194	16120	14473	16579	15632	15725
452	14100	70	511	278	Bondy	15322	16235	14776	16797	15799	15775
469	14410	70	511	278	Bondy	15803	16729	15315	17158	16265	16265
503	14510	80	511	278	Bondy	15965	16904	15472	17368	16413	16313
522	14660	80	511	278	Bondy	16168	17084	15733	17534	16624	16600
542	14780	80	511	278	Bondy	16312	17229	15892	17659	16787	16825
590	14850	80	511	278	Bondy	16430	17348	16001	17754	16881	16913
623	15930	66	511	278	Kiel	17919	18592	17537	18878	18237	18288
647	16530	90	511	278	Bondy	18522	19273	18121	19651	18898	18838
672	17680	110	511	278	Bondy	19778	20651	19336	21131	20230	20230
700	21390	170	511	278	Bondy	24140	25205	23644	25666	24663	24663

#### 4.1.5 Tasa de Acumulación de masa (W) y tasa de sedimentación (S)

Los valores de la W fueron calculados haciendo uso de la edad calibrada (BP) y la masa acumulada, esta última se calculó del producto de DBD ( $\text{g}\times\text{cm}^{-3}$ ) por la profundidad (cm) del testigo. Para el testigo M77/2-005-3, se estimaron tres tasas de acumulación constante según la estratigrafía del testigo y en los datos de DBD; se observan cambios abruptos en la estratigrafía y DBD en 94 cm y 632 cm (fig. 14B y 15).



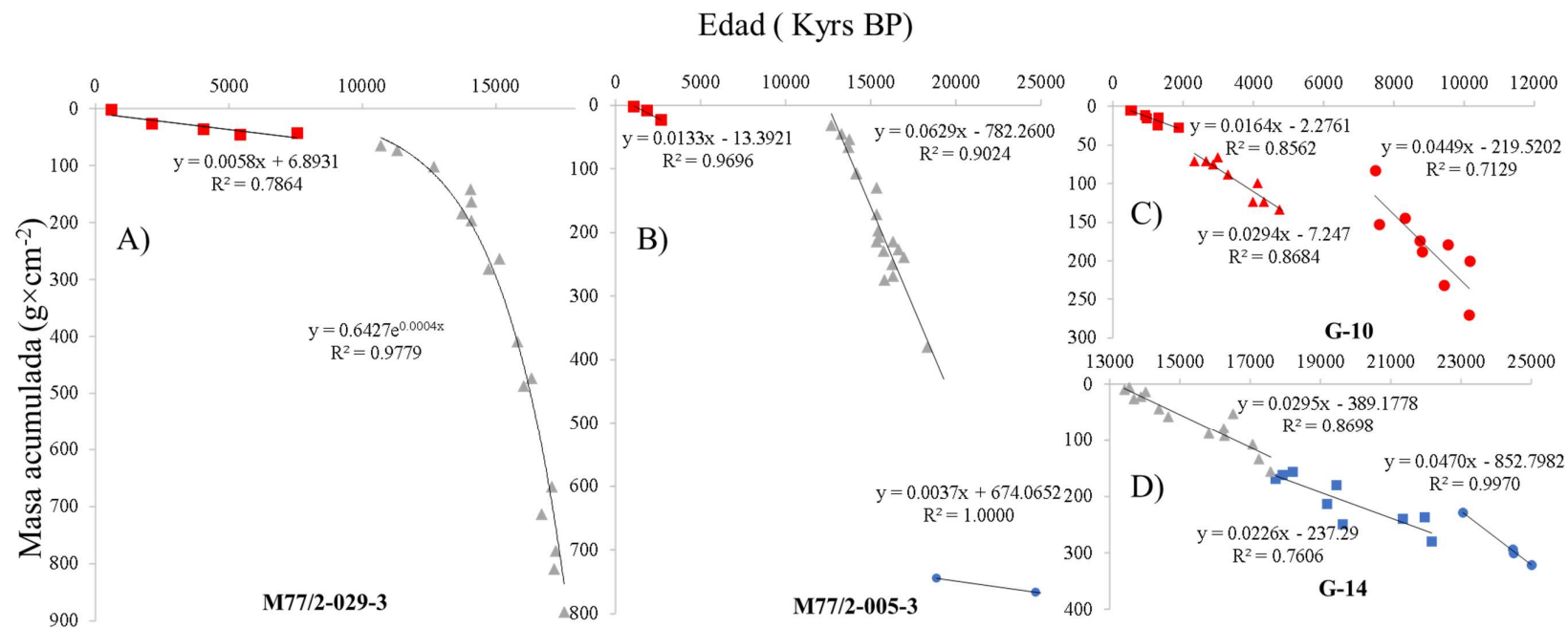


Figura 14. Modelo de edad basado en masa acumulada y edad de cada testigo: A) M77/2-029-3 (Campusano 2013), B) M77/2-005-3 (este estudio), C) G-10 y D) G-14 (Salvatteci, et al., 2019). Los colores de los puntos representan periodo de tiempo; rojo (Holoceno), gris (Terminación 1) y azul (El ultimo máximo glaciario). Las diferentes formas de los puntos representan el modelo de edad en cada testigo según su estratigrafía.

En el testigo M77/2-029, extraído frente a Chimbote, se evidencian dos secciones. La primera sección abarca parte del Holoceno (7 a 1 Kyr BP) y el valor de W (constante) estimado fue  $0.0058 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$  (fig. 14A). La segunda sección abarca el periodo de la Terminación 1 y el valor de W varió entre 0.0106 a  $0.2861 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$  ( $0.1066\pm 0.0672 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$ ).

En el testigo M77/2-005-3 extraído frente a Callao se caracterizó desde el tope hasta 94 cm como la sección “A” que pertenece al Holoceno tardío (2.8 a 1.4 Kyr BP). En esta sección, W fue determinado en  $0.0133 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$ . Desde 95 a 632 cm, la sección denominada “B” pertenece a la Terminación 1 (17 a 13 Kyr BP), con un valor de W estimado en  $0.0629 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$ . Desde 633 a 707 cm, la sección denominada “C” que pertenece al periodo Terminación 1 (24 a 18 Kyr BP), W fue determinado en  $0.0037 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$  (fig. 14B).

En el testigo G-10 de Pisco, W fue estimado en  $0.0164 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$  durante el Holoceno tardío (2 a 0.5 Kyr BP) (fig. 14C) y en el testigo G-14, W fue calculado en  $0.0295 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$  durante la Terminación 1 (17.5 a 13 Kyr BP) (fig. 14D). Para los períodos entre 22 a 17.5 y 25 a 22 Kyr BP W, W se estimó en 0.0226 y  $0.0470 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$ , respectivamente.

De lo reseñado previamente, durante el Holoceno, la tasa de acumulación fue más baja frente a Chimbote, tendiendo a aumentar hacia el sur. En cambio, durante la Terminación 1 la tasa de acumulación disminuyó de norte hacia al sur, registrando los mayores valores frente Chimbote (fig. 14).

Por otro lado, la tasa de sedimentación (S) frente a Callao fue calculada como la división de la tasa de acumulación entre el DBD, resultando valores S variables. En la sección A, S varió entre 0.0199 a 0.1376  $\text{cm}\times\text{año}^{-1}$  ( $0.0623\pm 0.0241 \text{ cm}\times\text{año}^{-1}$ ). En la sección B, S varió entre 0.0582 a 0.2697  $\text{cm}\times\text{año}^{-1}$  ( $0.1389\pm 0.0338 \text{ cm}\times\text{año}^{-1}$ ). En La sección C, S varió entre 0.0030 a 0.0045  $\text{cm}\times\text{año}^{-1}$  con ( $0.0036\pm 0.0004 \text{ cm}\times\text{año}^{-1}$ ). Por lo tanto, se destaca que la tasa de sedimentación frente Callao, los menores valores se registraron durante el LGM, luego los máximos valores fueron estimados durante T1.

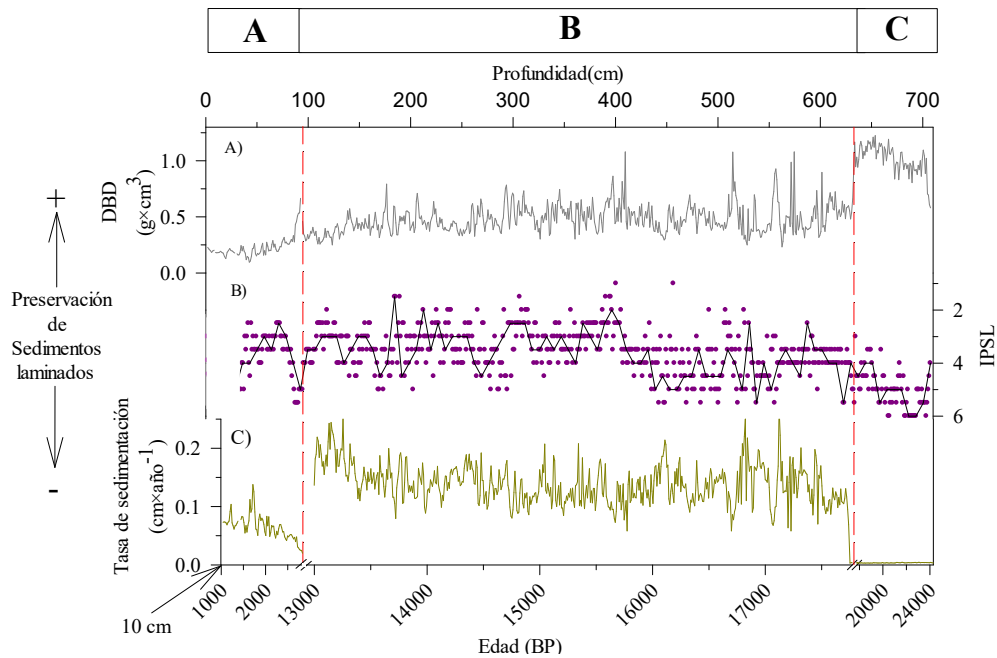


Figura 15. Estratigrafía del testigo M772-005-3 versus la profundidad (cm). a) Densidad aparente seca (DBD); b) Índice de preservación de sedimentos laminados (IPSL) con media móvil de color negro cada 5 valores; c) Tasa de sedimentación variable ( $\text{cm}\times\text{año}^{-1}$ ). Línea discontinua de color rojo ubica las discordancias más abruptas encontradas en el registro en 94 y 631 cm que delimitan las tres secciones. Además, los cuadrados de color rojo en el tercer panel son las dataciones realizadas en Kiel-Alemania y las demás dataciones son la realizadas en Bondy-Francia.

#### 4.2 Observaciones de restos óseos de peces en el testigo M772-005-3

La Figura 16 muestra los restos de peces más abundantes encontrados en el testigo M772-005-3, como por ejemplo escamas de anchoveta y merluza, y huesos. Durante el conteo e identificación de restos de peces se encontraron escamas que no pudieron ser identificadas las cuales presumiblemente provengan de peces de los grupos Scorpaeniformes, otros mesopelágicos, o peces bentónicos (Aquino Diaz, 1974; Patterson et al., 2002; Bräger et al., 2017; Salvatelli et al., 2019a).

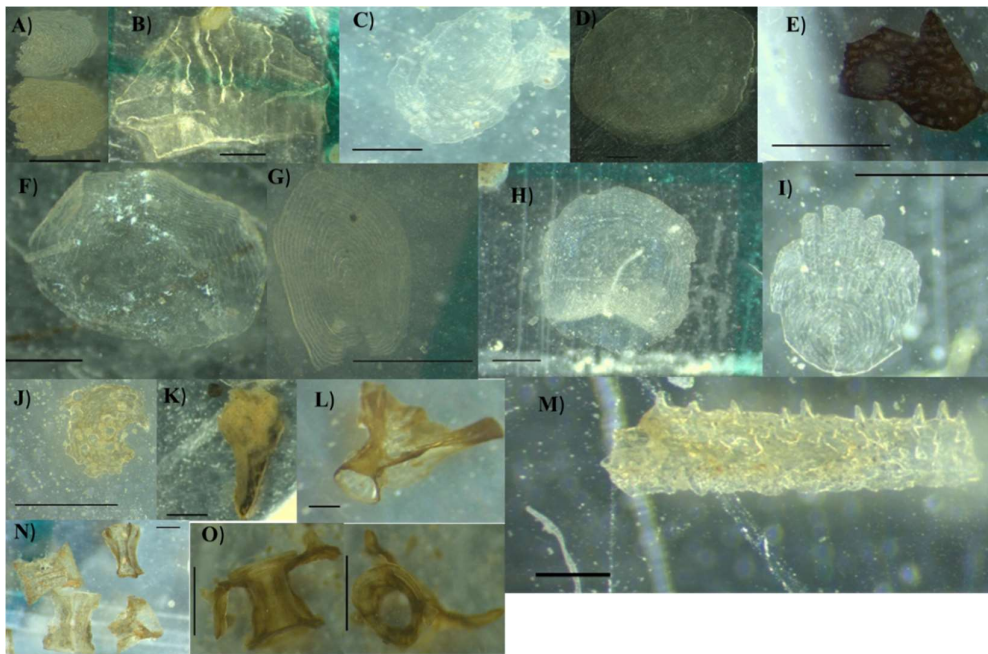


Figura 16. Fotos de restos de peces encontradas en M772-005-3 A) Merluza, B) Anchoveta, C) Caballa, D) Jurel, E) Fragmento de escama de sardina, F) *Scomberesox* sp, G) *Diaphus* sp, H) Escama no determinada, I) Escama probablemente perteneciente al orden Scorpaeniforme, J) Escama en proceso de degradación, K) Diente, L) Vértebra postcaudal, M) Mandíbula con dientes, N) Vértebra en proceso de degradación y O) Vértebra de Anchoveta. Barra horizontal representa 1mm.

### 4.3 Composición de restos de peces en el Testigo M772-005-3

#### 4.3.1 Composición de los restos ictiológicos

Se cuantificaron más de 10 mil restos de peces (Tabla 7) y dentro de ellos los fragmentos de escamas fueron los más abundantes (~65%). Los fragmentos de escamas fueron nueve veces más abundantes que las escamas completas. Los fragmentos de espinas fueron similares en cantidad que los fragmentos de otros huesos (~10%) y ambos fueron más que el doble de la suma de espinas completas con los otros huesos.

Otra comparación que se observa es que las vértebras enteras fueron 6 veces más abundantes que ‘otros huesos’. Además, no se encontraron otolitos de peces en el testigo.

Tabla 7. Conteos totales de restos de peces en el testigo M772-005-3.

<b>Tipos de restos de Peces</b>	<b>Numero de restos</b>	<b>%</b>
Escamas de todos los peces	609	6.04
Fragmentos de Escamas	6,519	64.73
Espinas	377	3.74
Fragmentos de espinas	988	9.81
Vértebras	408	4.05
Fragmentos de Vertebras	115	1.14
Otros huesos	63	0.63
Fragmentos de otros huesos	993	9.86
Total	10,071	100.00

La composición de escamas por especie (Tabla 8) revela una mayor abundancia relativa de escamas de anchoveta y merluza (~71%) y estas fueron más de tres veces que las escamas de los demás peces (~19%), como los peces oceánicos (sardina, caballa, jurel y agujilla) y los peces mesopelágicos. Las escamas de anchoveta (~42%) fueron casi siete veces más abundantes que los mesopelágicos (~6%). Asimismo, la abundancia de escamas de peces mesopelágicos fue similar a las

escamas de los peces transzonales (jurel y caballa). Del total de las escamas contadas, la abundancia de escamas peces no identificadas superó el 10% (Tabla 8).

Tabla 8. Conteos totales de escamas por especie o grupos taxonómicos.

<b>Especies / grupo taxonómico</b>	<b>Número de escamas</b>	<b>%</b>
Anchoveta	258	42.40
Sardina	6	0.99
Merluza	173	28.35
Jurel	25	4.03
Caballa	15	2.47
Agujilla	29	4.77
Peces Mesopelágicos	40	6.57
Especies no determinadas	64	10.44
Total	609	100.00

#### 4.3.2 Registros de restos de peces

Las relaciones entre las abundancias (número de restos  $\times g^{-1}$ ) de los diferentes restos de peces nos indica los modos de pérdida de los diferentes restos óseos y la preservación de los diferentes tipos de restos de peces (fig. 17). En general las correlaciones entre los diferentes tipos de restos óseos son mayores que las correlaciones entre los restos óseos y las escamas. Por ejemplo, la correlación entre las abundancias de todos los huesos con los flujos de espinas ( $r_s=0.87$ ,  $n=140$ ,  $p<0.002$ ) y la relación de las abundancias de todos los huesos con las abundancias de vértebras ( $r_s = 0.83$ ) fue mayor que la correlación entre las abundancias de todos los huesos y todas las escamas ( $r_s = 0.43$ ). Estas observaciones sugieren que los huesos y las escamas tienen una manera diferente de depositarse y de preservarse en los sedimentos (fig. 17).

Dentro de las abundancias de escamas de peces no se observaron fuertes correlaciones (Anexo 5). Las abundancias de escamas de anchoveta muestran la mayor correlación con las abundancias de escamas de merluza ( $r_s = 0.17$ ) pero la

correlación no es significativa. No se observa una correlación negativa entre las abundancias de anchoveta y las abundancias de escamas de peces oceánicos como se esperaría si en el HCS existieran alternancias entre anchoveta y peces oceánicos. La correlación más alta dentro del grupo de escamas de peces de diferentes especies fue entre las abundancias de escamas de peces mesopelágicos y las escamas no determinadas ( $r_s=0.38$ ). La gran parte de escamas no determinadas son pequeñas y probablemente muchas de ellas pertenezcan a peces mesopelágicos (Anexo 5).

Según lo previsto, la correlación entre la abundancia del total de vértebras fue mayor con la suma de todas las escamas que con las diferentes especies de manera individual (Anexo 5). Las correlaciones entre la abundancia de vértebras y todas las escamas ( $r_s=0.41$ ) o con los fragmentos de escamas ( $r_s=0.38$ ), fue mayor que con los flujos de escamas de anchoveta ( $r_s=0.23$ ) y con los flujos de escamas de merluza ( $r_s=0.28$ ). Esto sugiere que las escamas de anchoveta y merluza manifiesta una baja conexión con las vértebras a lo largo del testigo M77/2-005-3.

Las relaciones entre las espinas completas y los fragmentos de espinas parecen estar asociadas de diferentes formas a la talla del pez: pequeños (e.g anchoveta) y grandes (e.g. caballa) (Anexo 5). La correlación entre las abundancias de fragmentos de espinas y las abundancias de vértebras de anchoveta ( $r_s=0.09$ ) es menor que la correlación entre las abundancias de vértebras de anchoveta con las abundancias de espinas ( $r_s=0.24$ ). Sin embargo, las relaciones de las abundancias de fragmentos de espinas con las abundancias de escamas de peces oceánicos ( $r_s=0.33$ ) y las abundancias fragmentos de espinas con las abundancias de escamas de merluza ( $r_s=0.45$ ); sugieren que las espinas de peces más grandes se tienden a fragmentar más que espinas de anchoveta.

La distribución de los restos de peces en el registro es marcadamente no uniforme y se distinguen cuatro secciones de mayor a menor abundancia según los conteos realizados (fig. 17). En la primera sección denominada “A” desde 30 hasta 93cm, las abundancias de restos de peces presentan en general valores altos para escamas ( $0.48 \pm 0.40 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), fragmentos de escamas ( $3.23 \pm 5.06 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), vértebras completas ( $0.25 \pm 0.35 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), fragmentos de espinas ( $0.96 \pm 1.45 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), otros huesos ( $0.05 \pm 0.09 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ) y fragmentos de huesos ( $0.60 \pm 1.57 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ). En la segunda sección denominada “B1”, desde 95 hasta 132 cm, los conteos de restos de peces son menores que en la sección anterior, pero se distingue un ligero aumento en los fragmentos de escamas ( $3.50 \pm 3.20 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ). En la tercera sección, desde 133 hasta 632 cm denominado “B2”, se registran menores abundancias de todos los restos óseos. Con lo cual la sección B está compuesta por la unión de B1 y B2 acorde lo observado anteriormente (Fig.17).

En la cuarta sección denominado “C”, desde 633 a 703cm, se presentan diferentes tendencias según el tipo del resto. Se observa un aumento comparado con la segunda y tercera sección en las vértebras ( $0.24 \pm 0.1 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), fragmentos de vértebras ( $0.11 \pm 0.06 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), espinas ( $0.28 \pm 0.25 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), fragmentos de espinas ( $0.31 \pm 0.16 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ) y fragmentos de otros huesos ( $0.84 \pm 0.53 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ). En contraste también se observa una disminución de los fragmentos de escamas ( $1.86 \pm 1.10 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ) que esté probablemente asociado a una mala preservación de escamas y otros restos de peces (Fig.17).



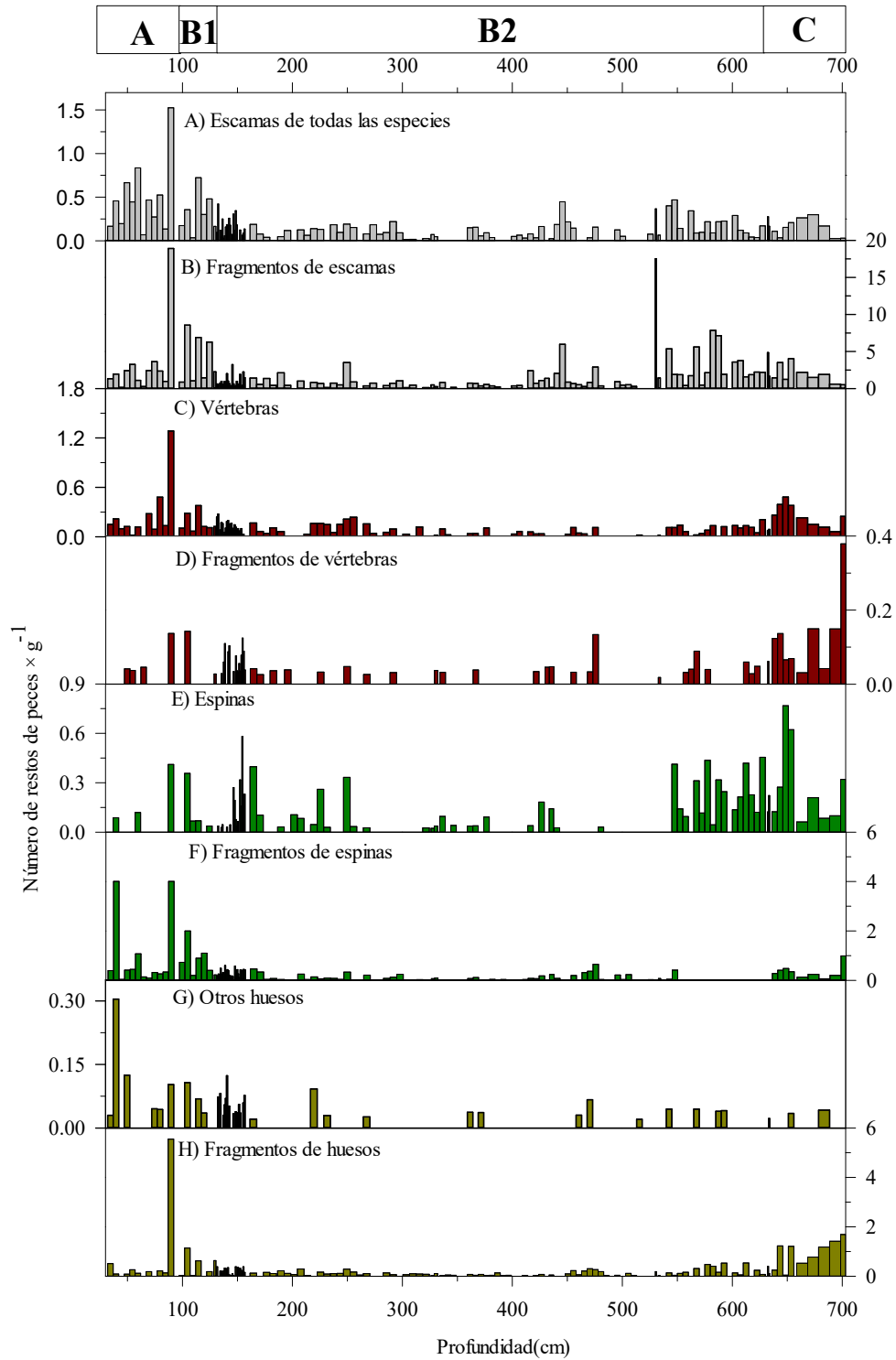


Figura 17. Abundancia relativa de restos de peces (número de restos $\times$ g<sup>-1</sup>) en el testigo M772-005-3 versus la profundidad (cm) A) Escamas; B) Fragmentos de Escamas; C) Vértebras; D) Fragmentos de vertebras E) Espinas; F) Fragmentos de Espinas; G) Otros huesos; H) Fragmentos de huesos.

Dentro de las escamas de especies identificadas, las abundancias de escamas muestran una gran variabilidad a lo largo del registro (Fig.18). En la sección A, se observan altas abundancias de escamas de anchoveta ( $0.25 \pm 0.19 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), merluza ( $0.17 \pm 0.22 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), peces oceánicos ( $0.03 \pm 0.03 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), mesopelágicos ( $0.01 \pm 0.002 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ) y escamas no determinadas ( $0.01 \pm 0.03 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ). En la sección B1, se observa una disminución, con respecto a la sección superior, en las abundancias de escamas de anchoveta ( $0.12 \pm 0.09 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), merluza ( $0.08 \pm 0.08 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ), peces de escamas no determinadas ( $0.01 \pm 0.03 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ). Además, se observa un ligero incremento en las abundancias de escamas de peces oceánicos ( $0.06 \pm 0.07 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ).

En la sección B2, se distingue una mayor disminución de las abundancias de escamas de casi todos los peces. Finalmente, en la última sección C, se observan bajas abundancias de todas las escamas, pero también se observa un aumento de las escamas de peces no determinadas ( $0.05 \pm 0.06 \text{ #} \times \text{g}^{-1}$ ).

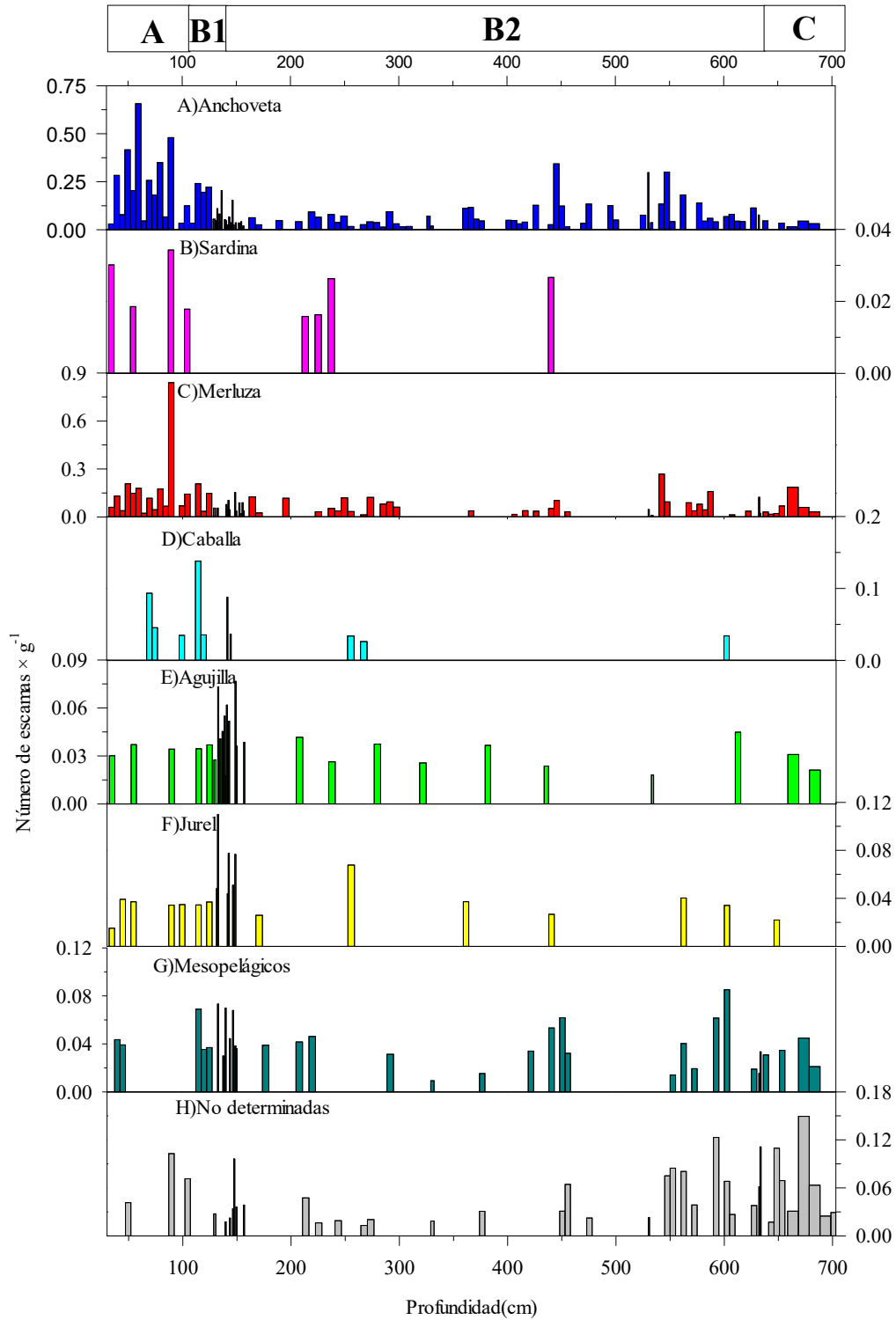


Figura 18. Abundancia relativa de escamas ( $\# \times g^{-1}$ ) por especies o grupos taxonómicos versus la profundidad (cm): A) Anchoveta; B) Merluza; C) Peces oceánicos (sardina, jurel y caballa); D) Peces mesopelágicos; E) escamas de peces no determinadas.

Con respecto a las vértebras de peces encontradas en el testigo (fig. 19), se observan altas abundancias en la sección superior y en la sección inferior del testigo. En la sección A, se observan altos valores de vértebras de anchoveta ( $0.06 \pm 0.06 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ), de las vértebras tipo 1 a 13 ( $0.17 \pm 0.27 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ) y de las vértebras no determinadas ( $0.03 \pm 0.05 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ). En la sección B1, se evidencia una disminución de todos los tipos de vértebras, anchoveta ( $0.05 \pm 0.04 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ), vertebras tipo 1 al 13 ( $0.10 \pm 0.12 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ) y otras vértebras no determinadas ( $0.002 \pm 0.002 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ). En la sección B2, también se observa una baja abundancia de todos los tipos de vértebras, anchoveta ( $0.002 \pm 0.03 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ), vértebras tipo 1 al 13 ( $0.03 \pm 0.04 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ) y otras vértebras no determinadas ( $0.01 \pm 0.002 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ). Finalmente, en la sección C, se observa un ligero aumento de todos los tipos de vértebras, anchoveta ( $0.04 \pm 0.04 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ), vertebras tipo 1 al 13 ( $0.11 \pm 0.12 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ) y otras vértebras no determinadas ( $0.09 \pm 0.05 \text{ \#} \times \text{g}^{-1}$ ).

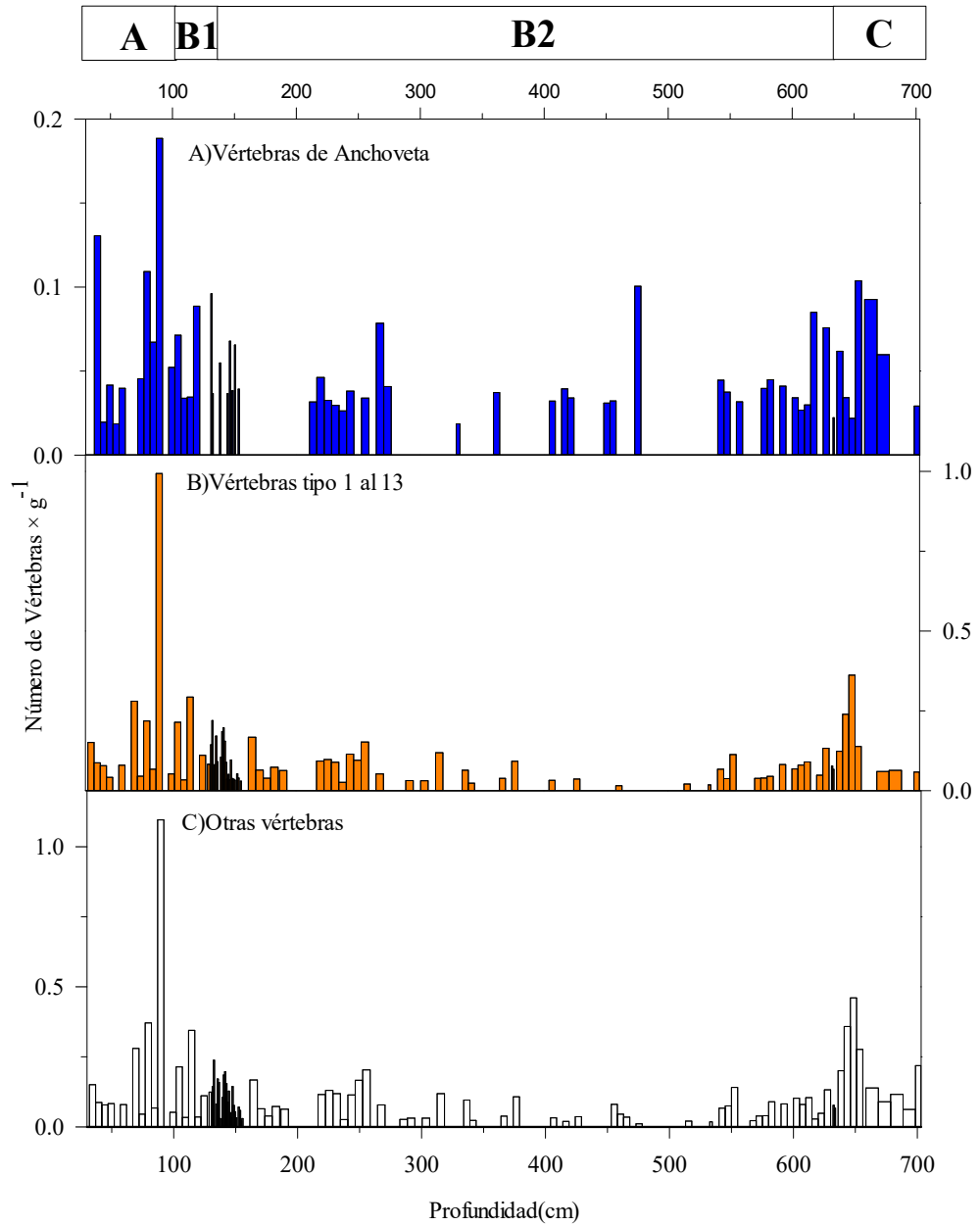


Figura 19. Abundancias relativas de Vertebras ( $\# \times \text{g}^{-1}$ ) versus la profundidad(cm): A) Anchoveta; B) Tipo 1 al 13 y C) Otras Vértebras.

### 4.3.3 Proporciones de restos completos a fragmentos

Las proporciones de restos enteros entre sus fragmentos muestran diferentes patrones a lo largo del testigo y no se observa patrones asociados a las secciones A, B1, B2 y C (fig. 20). La razón de todas las escamas enteras entre los fragmentos de escamas muestra altos valores en 45, 60, 145, 215, 280 y 525 cm; siendo el máximo en 215 cm (fig. 20A). La razón de todas las espinas entre los fragmentos de espinas muestra altos valores en 145, 155, 215, 220, 330, 350 y 375 cm, además también presenta un intervalo con valores altos entre 553-629 cm (fig. 20B). Finalmente, la razón de vertebras más otros huesos entre los fragmentos de huesos excluyendo espinas muestra altos valores en 120, 130, 141, 150, 220, 410 y 515cm donde el valor máximo es en 130 cm (fig. 20C). Finalmente, el patrón de las razones de los restos completos entre sus fragmentos (escamas, espinas y huesos sin incluir espinas) son diferentes. Por lo tanto se puede interpretar que cada resto posee un modo particular de preservación.

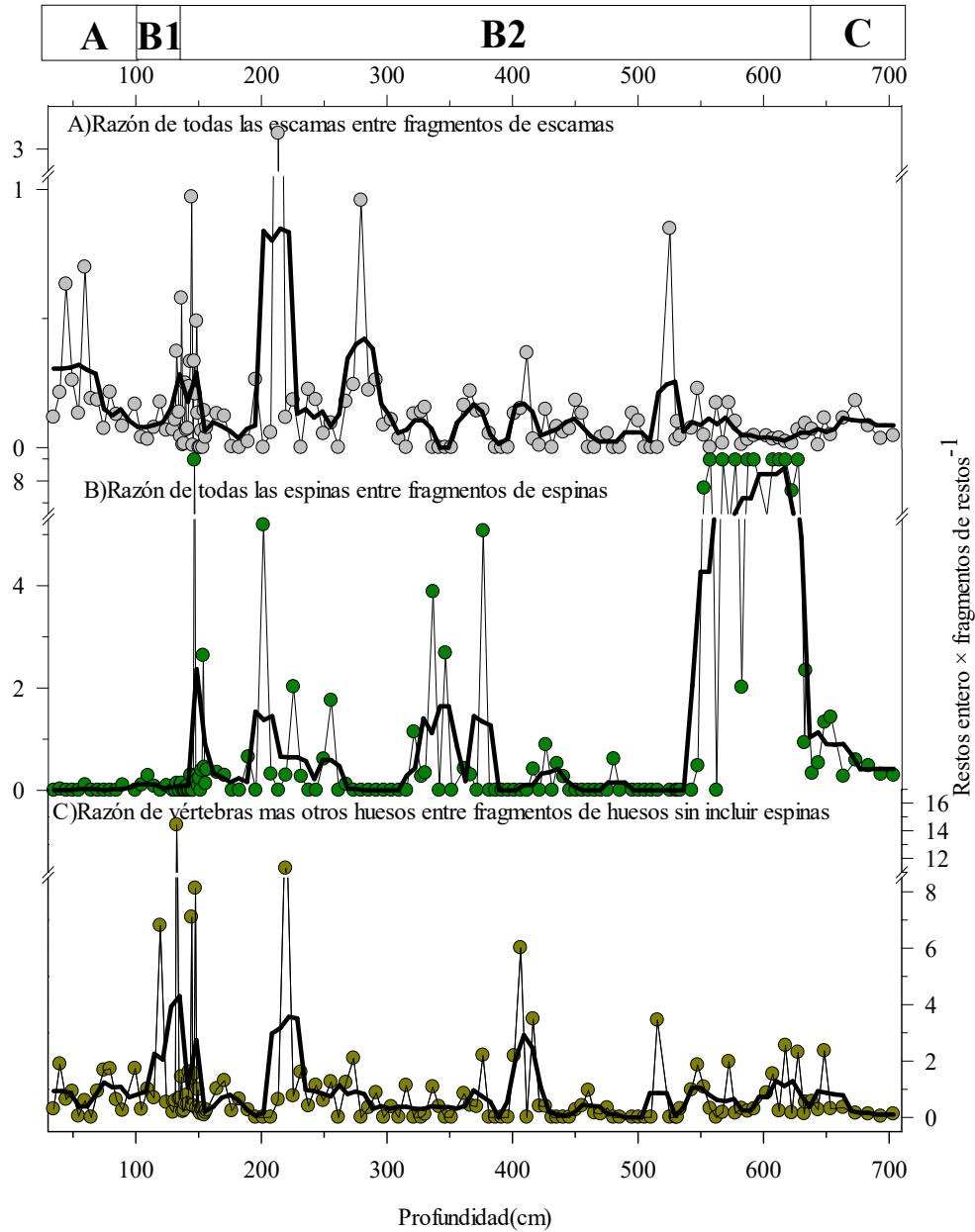


Figura 20. Razón de restos de peces entre sus respectivos fragmentos versus profundidad(cm): A) Razón de todas escamas entre los fragmentos de escamas, B) Razón del total de vertebras entre los fragmentos de vértebras, C) Razón de las espinas entre fragmentos de espinas y D) Razón de otros huesos entre fragmentos de huesos. Línea negra gruesa es la media móvil cada tres valores.

#### **4.4 Índices de preservación de los restos de peces en el Testigo M772-005-3**

##### **4.4.1 Índices de integridad de restos peces**

Los índices de integridad de las escamas y de las vértebras muestran grandes cambios a lo largo del testigo (fig. 22 y Anexos 17). El índice de integridad de todas las escamas (fig. 22A) muestra los valores más altos en la sección B1 de 94 a 132 cm ( $1.92 \pm 0.33$ ) comparados con las otras secciones A: 30-93 cm ( $1.75 \pm 0.24$ ), sección B2: 133-632 cm ( $1.62 \pm 0.40$ ) y la sección C: 633 – 703cm ( $1.35 \pm 0.46$ ). Por otro lado, el índice de integridad de vértebras muestra un patrón similar que la integridad de escamas, pero la desviación estándar es mayor (fig. 22B), probablemente debido a la menor abundancia de vértebras que de escamas. El índice de integridad de las vértebras muestra los valores más altos en la sección B1 ( $2.18 \pm 0.79$ ) y valores mínimos en la sección B2 (133 hasta 632cm;  $1.40 \pm 1.15$ ) comparados con las otras dos secciones: A ( $2.06 \pm 0.74$ ) y C ( $2.22 \pm 0.48$ ).

##### **4.4.2 Índices de libre de bio-erosión de restos de peces**

Los índices de libre de bio-erosión de las escamas, vértebras y espinas muestran grandes cambios a lo largo del testigo, pero no presentan patrones similares (fig. 22 y Anexos 18). El índice de libre de bioerosión de todas las escamas muestra los valores más altos en la sección B2 ( $3.19 \pm 0.44$ ) comparados con los otros: sección A ( $2.65 \pm 0.79$ ), sección B1 ( $2.91 \pm 0.41$ ) y sección C ( $2.73 \pm 0.31$ ). Por otro lado, el índice de libre de bio-erosión de las vértebras muestra los valores más altos en la sección B1 ( $2.81 \pm 0.89$ ) y en la sección inferior (133-632cm;  $1.52 \pm 1.19$ ) comparados con las otras dos: sección A ( $2.15 \pm 0.7$ ) y sección C ( $1.68 \pm 0.47$ ).



El índice de libre de bio-erosión de espinas muestra los valores más altos en la sección C ( $2.43 \pm 0.29$ ) y sección B2 ( $2.41 \pm 1.52$ ) comparando con las otras: sección A ( $2.00 \pm 0.47$ ) y sección B1 ( $2.28 \pm 0.55$ ). Finalmente, se observa que índices de libre de bio-erosión de escamas posee menor variabilidad que índice de libre de bio-erosión de vertebras y espinas.

#### **4.4.3 Razón de escamas a vertebras**

La razón de escamas a la suma de vértebras y otros huesos no muestra una gran variabilidad como la observada con los otros índices (fig. 22 y Anexos 19). Esta razón es relativamente baja en los primeros ~420 cm, luego entre ~430 y 560 cm se observan cuatro intervalos con altos valores. Finalmente, de ~570 cm hasta la base del testigo los valores son bajos nuevamente.

#### **4.4.4 Índice compuesto de preservación de las escamas (ICP)**

Según el ICP, en la figura 21G, la preservación de restos de peces muestra altos valores en 44, 124, 156, 416, 542 y 562 cm, y bajos valores en 85, 90, 150, 153, 182, 231, 341, 557, 643 y 693 cm. En las secciones A, B1 y B2 no se observa una tendencia clara hacia un aumento o disminución. Sin embargo, en la sección C manifiesta una tendencia a una disminución de la preservación en la mayoría de indicadores (fig. 21).

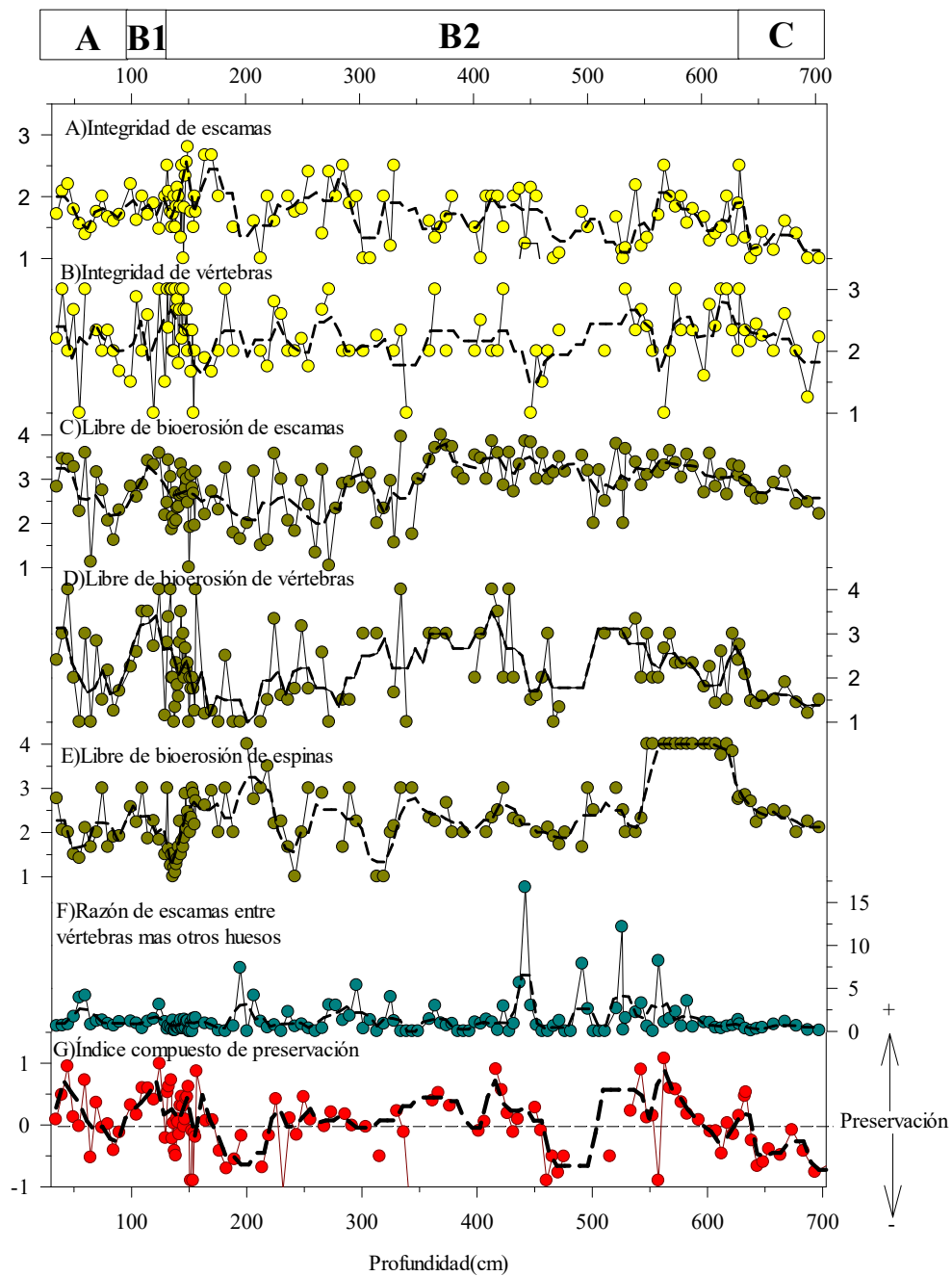


Figura 21. Los principales índices de preservación versus profundidad en el testigo M772-005-3. A) Integridad de todas escamas, B) Integridad de todas vértebras, C) Libre de bioerosión de todas las escamas, D) Libre de bioerosión de vertebras, E) Libre de bioerosión de espinas, F) Razón de escamas entre vertebras más otros huesos y G) Índice compuesto de preservación.

#### **4.5 Análisis temporal de la abundancia y los flujos de restos peces en el testigo M772-005-3.**

##### **4.5.1 Flujos de restos de peces desde la Terminación 1 hasta el**

##### **Holoceno Tardío**

Los flujos de restos de peces mostraron diferentes respuestas en la ventana de tiempo que abarca el testigo M772-005-3. Los flujos de huesos sin espinas durante el ACR fueron significativamente más altos que durante el HS1 (Tabla 9;  $p < 0.05$ ). Los flujos de escamas de anchoveta muestran que durante el LGM fueron significativamente menores en comparación con el LH según las pruebas de Kruskal-Wallis y Dunn (Tabla 9 y 10,  $p < 0.05$ ). Sin embargo, no existen diferencias significativas en los flujos de vértebras de anchoveta entre el LGM, ACR, HS1 y el LH (Tabla 9). Esto se debe a que en general no se encontró gran abundancia en número de estos restos y por la alta presencia de ceros.

Los flujos de escamas de merluza fluctuaron mostrando un patrón diferente a lo observado en anchoveta durante la T1. Se detectaron diferencias significativas en los flujos de merluza, siendo mayores durante ACR que en HS1 y estos a su vez fueron menores a los observado en el Holoceno tardío (Tabla 10,  $p < 0.05$ ).

Según las pruebas de Kruskal-Wallis y Dunn (Tabla 9), los flujos de escamas de anchoveta y merluza entre los dos periodos del T1 se mantuvieron en valores similares para cada especie. Por lo tanto, los cambios climáticos durante la T1 no produjeron grandes cambios sobre las poblaciones de peces frente a Callao.

Tabla 9. Comparación de los flujos de restos mediante las pruebas Kruskal-Wallis y Dunn( $p < 0.05$ ) del testigo M772-005-3. Valor promedio del efecto del tamaño de muestra en los restos de peces es  $\epsilon^2 = 0.1$ , se infiere un efecto moderado de la cantidad de muestras. Valores significativos en negrita y subrayados.

Prueba Kruskal-Wallis				Prueba Dunn						
Indicador	Periodo	LH	ACR	HS1	Escamas de Anchoveta			Vértebras de Anchoveta		
Escamas de Anchoveta	ACR	0.52			Comparaciones	p adj	Z	Comparaciones	p adj	Z
	HS1	0.47	0.66		ACR = HS1	1.00	0.50	ACR = HS1	0.36	1.55
	LGM	<u>0.00</u>	0.08	0.30	ACR = LGM	0.07	2.28	ACR = LGM	1.00	0.02
Vértebras de Anchoveta	ACR	1.00			HS1 = LGM	0.11	2.08	HS1 = LGM	1.00	-0.69
	HS1	0.43	0.55		ACR = LH	0.67	-1.21	ACR = LH	1.00	-0.77
	LGM	0.48	1.00	0.97	HS1 = LH	0.38	-1.53	HS1 = LH	0.27	-1.70
Escamas de Merluza	ACR	1.00			<u>LGM &lt; LH</u>	<b>0.02</b>	<b>-2.74</b>	LGM = LH	1.00	-0.54
	HS1	<b>0.01</b>	0.10		Escamas de Merluza			Escamas de Peces oceánicos		
	LGM	<u>0.01</u>	1.00	1.00	Comparaciones	p adj	Z	Comparaciones	p adj	Z
Merluza entre Anchoveta	ACR	1.00			<u>ACR &gt; HS1</u>	<b>0.05</b>	<b>2.39</b>	ACR > HS1	<b>0.00</b>	<b>4.13</b>
	HS1	<u>0.01</u>	0.07		ACR = LGM	1.00	0.80	ACR = LGM	0.84	1.08
	LGM	0.06	1.00	1.00	HS1 = LGM	1.00	-0.30	HS1 = LGM	1.00	-0.81
Escamas de Peces Oceánicos	ACR	0.69			ACR = LH	0.47	-1.42	ACR = LH	1.00	0.80
	HS1	0.14	<u>0.00</u>		<u>HS1 &lt; LH</u>	<b>0.01</b>	<b>-2.85</b>	HS1 = LH	0.33	-1.60
	LGM	0.69	0.69	0.62	LGM = LH	0.31	-1.63	LGM = LH	1.00	-0.38
Oceánicos entre Anchoveta	ACR	0.78			Huesos sin espinas					
	HS1	0.11	<b>0.00</b>		Comparaciones	p adj	Z			
	LGM	0.78	0.78	0.62	<u>ACR &gt; HS1</u>	<b>0.00</b>	<b>5.36</b>			
Huesos sin espinas	ACR	0.04			<u>ACR &gt; LGM</u>	<b>0.00</b>	<b>3.47</b>			
	HS1	0.78	<u>0.00</u>		HS1 = LGM	0.89	1.04			
	LGM	0.09	<u>0.00</u>	0.78	<u>ACR &gt; LH</u>	<b>0.05</b>	<b>2.36</b>			
					HS1 = LH	1.00	-0.73			
LGM = LH	0.53	-1.35								

#### **4.5.2 Asociaciones de los flujos de especies de peces por periodo de tiempo**

Dentro de las especies de peces encontradas en el testigo M772-005-3, la anchoveta fue la especie más abundante excepto durante el LGM (fig. 22). La anchoveta representó el ~43% durante el ACR, el ~48%, durante el LH y el ~60% durante el HS1. De forma opuesta la cantidad de escamas de peces no determinados fue mayor durante LGM (~33%). Otra especie importante fue la merluza que mostró una mayor abundancia durante LH (~40%), ACR (~37%) y LGM (~38%) y una relativa baja abundancia durante el HS1 (~25%).

Otro grupo representado es el de peces mesopelágicos. Las escamas de este grupo fueron más abundantes durante el LGM (~10%) que en los otros periodos (<2%). Esta observación indica que las condiciones fueron favorables para los peces mesopelágicos durante el LGM.

Las especies oceánicas como la sardina, caballa, agujilla y jurel exhibieron valores mayores en ACR (~12%) y menores valores en HS1(~3%). De otro lado las escamas de especies no determinadas alcanzaron valores mínimos durante el Holoceno tardío (~3%), lo cual indica que la composición de la comunidad de peces fue muy diferente entre estos dos periodos de tiempo.

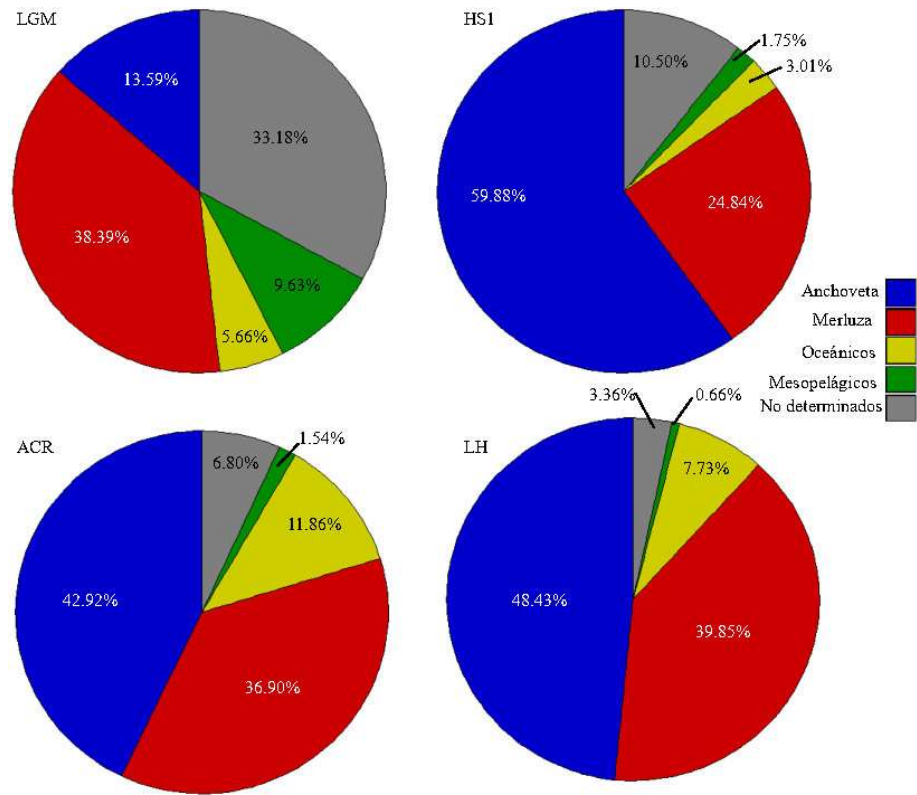


Figura 22. Diagrama circular de los flujos de escamas en porcentaje (%) por cada periodo de tiempo (LGM: Máximo glacial, HS1: Estadio Heinrich, ACR: Periodo reversión antártico, LH: Holoceno tardío). Cada color representa una especie o grupo acorde lo mostrado en la leyenda.

### 4.5.3 Relación de la desnitrificación sobre los restos de peces frente a

#### Callao

El efecto de la desoxigenación, inferida a través del  $\delta^{15}\text{N}$  de la materia orgánica sedimentaria, sobre las abundancias de escamas y huesos sin espinas, no es claro en el testigo M77/2-005-3 (Figs. 23 A, H y G). Las abundancias de las escamas por especie en general no guardan relación con  $\delta^{15}\text{N}$  (Anexo 5). Sin embargo, las abundancias de escamas de merluza sí manifiestan una relación negativa significativa ( $r_s=-0.27$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ). Esto sugiere un efecto positivo de la oxigenación de la columna de agua sobre las poblaciones de merluza durante T1 y parte del Holoceno tardío. Por otro lado, las abundancias de vértebras de anchoveta y fragmentos de espinas muestran también una relación negativa con  $\delta^{15}\text{N}$ . n

El  $\delta^{15}\text{N}$  no muestra una relación significativa con los flujos de todas las escamas ( $r_s=0.08$ ,  $p=0.31$  n.s,  $n=140$ ), aunque con los flujos de huesos sin espinas sí muestra una relación positiva significativa ( $r_s=0.30$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ). Esto sugiere que los flujos de huesos sin espinas se conservaron mejor dentro de los sedimentos que estuvieron asociados a desoxigenación en la columna de agua. Pero esta señal no se encontró con otros restos más frágiles (e.g escamas) (Anexo 4).

Por otro lado, el  $\delta^{15}\text{N}$  no presenta una relación significativa ni con los flujos de escamas de anchoveta ( $r_s=0.01$ ,  $p=0.92$  n.s,  $n=140$ ) ni con flujos de vértebras de anchoveta ( $r_s=-0.14$ ,  $p=0.09$  n.s,  $n=140$ ). Además, el  $\delta^{15}\text{N}$  no muestra una correlación significativa con los flujos de escamas de merluza ( $r_s=-0.08$ ,  $p=0.31$  n.s,  $n=140$ ), ni con los de los peces oceánicos ( $r_s=0.21$ ,  $p=0.01$  n.s,  $n=140$ ) y tampoco con los de los peces mesopelágicos ( $r_s=-0.00$ ,  $p=0.99$  n.s,  $n=140$ ). Para el caso de

las abundancias de restos de peces, el  $\delta^{15}\text{N}$  solo presento una correlación negativa y significativa con las abundancias de escamas de merluza ( $r_s=-0.27$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ). Lo cual hace inferir que la desoxigenación no tuvo relevancia sobre las poblaciones de peces frente a Callao excepto para las poblaciones de merluza. Además las diferencias de las relaciones de correlaciones de  $\delta^{15}\text{N}$  con las abundancias y los flujos revela varias incertidumbres: problemas en la estimación de la tasa de acumulación, pérdida de la señal de los restos debido a resuspensión, posterior traslado de los restos y erosión física evidenciado retrabajos sobre las vértebras más antigua, mala preservación.

La baja relación de  $\delta^{15}\text{N}$  con los flujos y abundancias de restos de peces probablemente se debe a la baja preservación y la cantidad de muestras colectadas de las variables biogeoquímicas (72) que no refleja la amplitud de la variabilidad de  $\delta^{15}\text{N}$ . Debido a que las muestras de los restos de peces (140 muestras) solo coinciden con 18 muestras de los indicadores de oxigenación y productividad (Yseki, 2018). Por lo tanto, se decidió utilizar datos interpolados para los datos  $\delta^{15}\text{N}$ , COT, sílice biogénica y carbonatos.

Por otro lado, el IPSL como indicador de presencia de sedimentos laminados asociados a ambientes anóxicos presenta una relación negativa con los flujos y abundancias de escamas no determinadas ( $r_s=-0.25$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ;  $r_s=-0.31$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ). Probablemente los restos que muestran relación negativa con IPSL representen especies de peces (e.g mesopelágicos) que estén asociados a ambientes con una mayor oxigenación (Anexo 4 y 5).



Cabe mencionar que las abundancias de escamas de anchoveta muestran una relación positiva pero no significativa con el IPSL ( $r_s=0.12$ ,  $p=0.40$  n.s,  $n=140$ ) que sugiere que las escamas de anchoveta estuvieron ligeramente afectadas por procesos de preservación en los sedimentos marinos (Anexo 4).

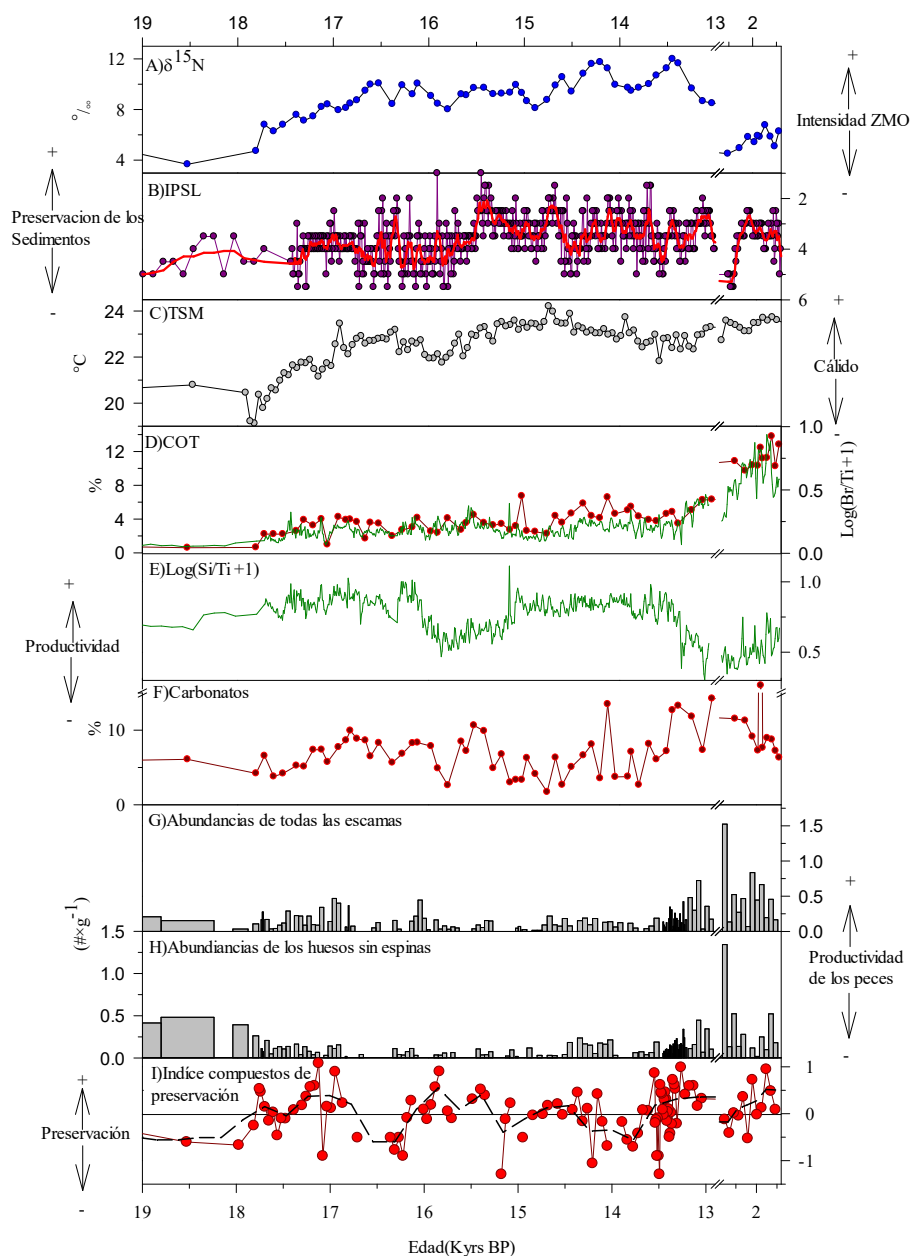


Figura 23. Comparación de las abundancias de restos de peces con las condiciones ambientales A)  $\delta^{15}\text{N}$ (‰), B)IPSL, C)TSM( $^{\circ}\text{C}$ ), D)COT(% color marrón) y Br/Ti (color verde), E) Si/Ti (color verde), F)CaCo<sub>3</sub>(%, color marrón), G)Abundancias de Escamas de todos los peces ( $\#\times\text{g}^{-1}$ ), H)Abundancias de los Huesos sin las espinas ( $\#\times\text{g}^{-1}$ ) y I) Índice compuesto de preservación de restos de peces . Línea negra discontinua en el panel “I” es la media móvil cada cinco datos. los datos de Si/Ti y Br/Ti proceden de XRF (Dr. Phillippe Martinez, comunicación personal), además los datos de COT y carbonatos del trabajo Yseki (2018).

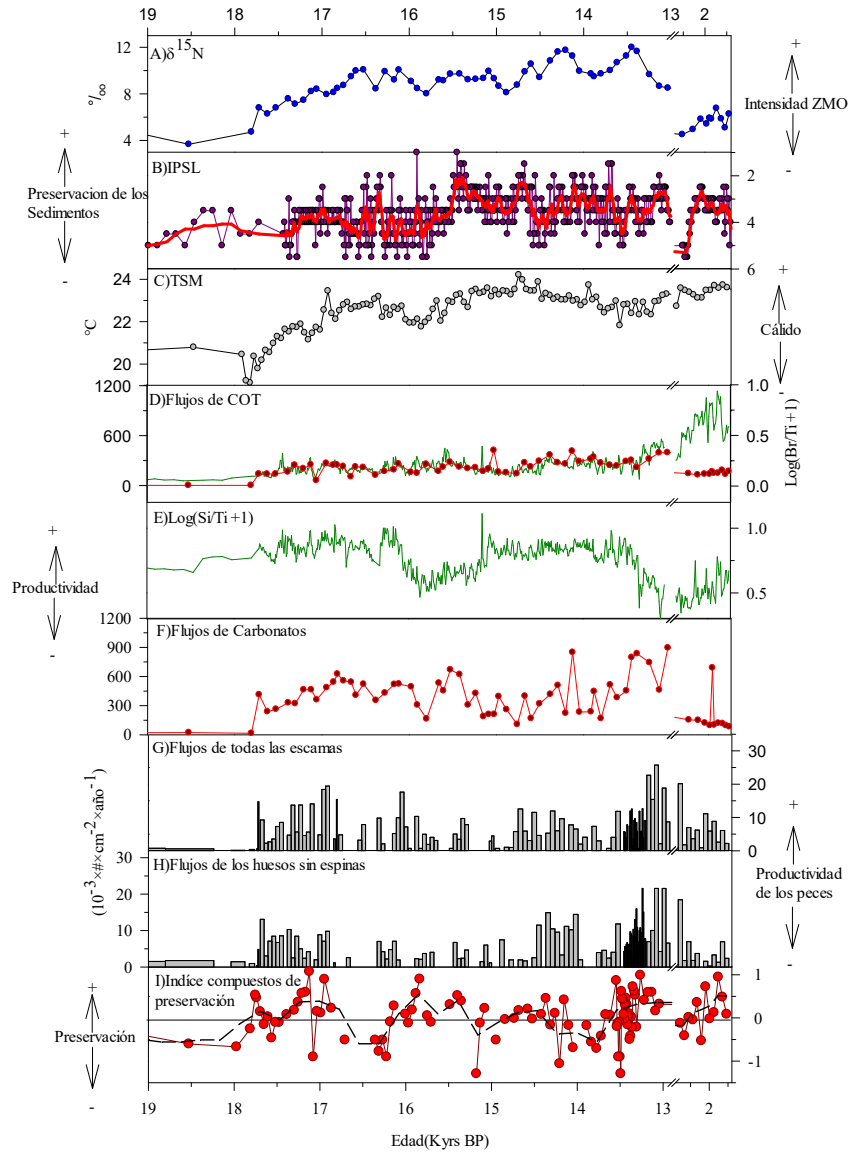


Figura 24. Comparación de los flujos de restos de peces con las condiciones ambientales A)  $\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$ , B) IPSL, C) TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), D) COT (color marrón,  $10^{-3}\times\text{‰}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$ ), y Br/Ti (color verde), E) Si/Ti (color verde), F)  $\text{CaCO}_3$  (color marrón,  $10^{-3}\times\text{‰}\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$ ), G) Flujos de Escamas de todos los peces ( $10^{-3}\times\#\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$ ), H) Abundancias de los Huesos sin las espinas ( $10^{-3}\times\#\times\text{cm}^{-2}\times\text{año}^{-1}$ ) y I) Índice compuesto de preservación de restos de peces. Línea negra discontinua en el panel “I” es la media móvil cada cinco datos. los datos de Si/Ti y Br/Ti proceden de XRF (Dr. Phillippe Martinez, comunicación personal), además los datos de TOC y carbonatos del trabajo Yseki (2018).

#### 4.6 Relación de la productividad sobre los restos de peces frente a Callao

En primero lugar se comparó los datos obtenidos a través de fluorescencia de rayos X (XRF) (Dr. Phillippe Martinez, comunicación personal) con el COT, y carbonatos (Yseki, 2018). Los indicadores de productividad exportada como son COT (%) y razón de Br/Ti poseen una relación positiva fuerte ( $r_s=0.85$ ,  $p<0.01$ ,  $n=72$ ). Sin embargo, cuando el COT es convertido a flujos, la correlación baja pero aun manifiesta una correlación positiva ( $r_s= 0.42$ ,  $p<0.01$ ,  $n=72$ ).

Por otro lado, el Si/Ti , en escala logarítmica, evidencia una tendencia negativa no significativa con las abundancias de todos los huesos ( $r_s=-0.19$ ,  $p=0.03$  n.s,  $n=140$ ), vértebras ( $r_s=-0.25$ ,  $p=0.003$  n.s,  $n=140$ ) y huesos sin espinas ( $r_s=-0.21$ ,  $p=0.01$  n.s,  $n=140$ ). El Si/Ti no muestran una relación significativa con las abundancias de escamas de anchoveta, merluza, peces oceánicos y mesopelágicos.

Los indicadores de productividad exportada (COT y Br/Ti), en escala logarítmica, muestran una relación positiva y significativa con algunas abundancias de restos de peces. El COT(%) presenta relación positiva con las abundancias de todas las escamas ( $r_s=0.35$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ), con las abundancias de escamas de anchoveta ( $r_s=0.44$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ), merluza ( $r_s=0.32$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ) y las escamas de peces oceánicos que son sardina, jurel, caballa y agujilla ( $r_s=0.26$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ). En el mismo sentido,  $\log(\text{Br/Ti})$  también presenta correlación positiva significativa con las abundancias relativa de todas las escamas ( $r_s=0.36$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ), anchoveta ( $r_s=0.50$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ), merluza ( $r_s=0.27$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ) y las escamas de peces oceánicos ( $r_s=0.30$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ).

Lo expuesto en este subcapítulo indica que la productividad pelágica integrada exportada está asociada a las abundancias de restos peces, pero esta relación también estaría asociada a la preservación de restos de peces debido a que hay una consistente correlación positiva del ICP con la razón de Br/Ti ( $r_s=0.39$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ). Además, los peces inferidos por la abundancia de restos de peces no estarían asociada a la productividad primaria frente Callao.

#### **4.7 Relación de la TSM sobre los restos de peces frente a Callao durante T1**

La temperatura superficial del mar, inferida a partir del índice de saturación de las alquenonas (Salvatteci, et al, 2019a), muestra una relación negativa con los flujos y abundancias de restos de peces (fig. 23C y 24C). La TSM muestra una relación negativa con las abundancias de escamas no determinadas ( $r_s=-0.30$ ,  $p<0.002$ ), abundancias de espinas ( $r_s=-0.33$ ,  $p<0.002$ ) y flujos de espinas ( $r_s=-0.29$ ,  $p<0.002$ ). Acorde a esto los flujos de espinas y escamas no determinadas de peces disminuyeron cuando la TSM aumentó durante la T1.

Estas correlaciones sugieren que los peces no determinados, representados por sus escamas y espinas, estuvieron favorecidos por las condiciones frías durante el LGM. Finalmente, la TSM no presenta una relación significativa con los otros flujos ni con las abundancias de restos de peces en el testigo M772-005-3 (Anexos 10 y 11).

## V. Discusión

De acuerdo con la estratigrafía del testigo y al modelo de edad (Fig.14), el LGM no está bien representado en el testigo M772-005-3 debido a la presencia de discontinuidades. Por lo tanto, la discusión de la tesis se enfoca en dos periodos de tiempo: la Terminación 1 (19-13 Kyr BP) y una parte del Holoceno tardío (2.9-1.5 Kyr BP). Además, estos resultados fueron discutidos con registros frente a Callao y Pisco durante la LIA y el período cálido actual (CWP).

Los flujos de restos de peces en el testigo M772-005-3 son comparados con variables biogeoquímicas del mismo testigo como:  $\delta^{15}\text{N}$ , COT, TSM inferida por alquenonas (Yseki, 2018) e indicadores de productividad inferidos por metales traza, y obtenidos a través de XRF como son sílice, bromo y titanio (Dr. Phillippe Martinez, comunicación personal). Además, se incluyó el IPSL como indicador de preservación en los testigos de Chimbote y Pisco, con la escala invertida para facilitar la discusión.

Examinamos cinco ideas:

- La primera es el rol de la oxigenación inferida por  $\delta^{15}\text{N}$  y presencia de laminaciones en la preservación de restos de peces frente Callao y compararlo con lo reportado frente Chimbote y Pisco.
- La segunda idea es relacionar las variables biogeoquímicas con las fluctuaciones de las poblaciones de peces registradas en el testigo M772-005-3 de Callao. Por lo tanto, se hizo el análisis multivariado de las series de tiempo de los restos de peces con las variables biogeoquímicas del testigo. Posteriormente, este análisis fue comparado con los resultados obtenidos frente a Pisco (Salvatteci et al., 2019a).

- La tercera idea es comparar las abundancias, abundancias relativas y flujos de restos de peces durante los periodos de tiempo (LGM, HS1, ACR, LH, LIA y CWP) determinados en el testigo M772-005-3 frente a Callao y luego con registros obtenidos frente a Pisco y Chimbote.
- La cuarta idea es comparar los flujos de peces con variables biogeoquímicas en los testigos extraídos frente a Callao, con las de testigos frente a Chimbote (M77/2-029-3) y a Pisco (G-14) reportados por Campusano (2013) y Salvattecchi et al. (2019a), respectivamente, y en relación a otros factores geográficos o paleoclimáticos. Con este fin se integraron los datos de las variables biogeoquímicas y los flujos de restos peces que son estimados de igual forma en tres testigos con datos regionales como son la latitud, la profundidad del mar (Spratt & Lisiecki, 2016) y la insolación (Laskar et al., 2004) durante T1.
- Finalmente, la quinta idea es examinar la relación entre la oxigenación inferida en base a  $\delta^{15}\text{N}$  (Chimbote, Callao y Pisco) sobre la distribución de las poblaciones de peces (anchoveta, merluza y peces oceánicos) frente a la costa central del Perú (Chimbote, Callao y Pisco).



### **5.1 Rol de la oxigenación en la preservación de restos de peces frente a Callao, Chimbote y Pisco.**

La pobre relación entre los índices de preservación de restos de peces en el testigo M77/2-005-3 sugiere que los índices de preservación capturan de manera parcial la señal de preservación de restos de peces. el índice de libre de bioerosión de escamas tiene una relación positiva con el índice de libre de bioerosión de vértebras ( $r_s=0.65$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ), lo cual sugiere que los organismos que causan erosión sobre la superficie de los restos de peces afectaron de forma similar a escamas y vértebras. Por otro lado, el índice de libre de bioerosión de vértebras posee una relación positiva con el índice de integridad de vértebras ( $r_s=0.36$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ). Esta observación sugiere que las vértebras con signos de biodegradación son más propensas a fragmentarse. Finalmente, los otros índices de preservación no guardan relación significativa entre sí (Anexo 4 y 5).

Los registros de  $\delta^{15}\text{N}$  y el IPSL (fig. 25 A y B) del M772-005-3 presentan un patrón diferente a lo largo del T1. Desde 19 hasta 16 Kyr BP no muestran tendencias similares, pero desde 16 hasta 13 Kyr BP, covarían. Sin embargo, la correlación entre ambos es positiva pero no significativa ( $r_s=0.22$ ,  $p=0.008$  n.s.,  $n=140$ ; Anexo 4).

El efecto de la desoxigenación sobre la preservación de restos de peces en el testigo M77/2-005-3 no es claro (fig. 25). El  $\delta^{15}\text{N}$  muestra una relación positiva únicamente con el índice de integridad de escamas ( $r_s=0.30$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ). No obstante, el  $\delta^{15}\text{N}$  no muestra una relación con los otros indicadores de preservación de restos de peces en el M772-005-3.

El IPSL, como grado de oxigenación in situ, solo muestra relación positiva con un indicador de preservación de restos de peces, el índice de libre bioerosión de otros huesos, en el testigo M77/2-005-3 ( $r_s=0.28$ ,  $p<0.002$ ,  $n=140$ ). Por lo tanto, en los ambientes con baja oxigenación estimada por la presencia de laminaciones, hubo una mejor preservación de restos óseos de la cabeza (cráneos, mandíbulas y branquio-espinas), los cuales son de mayor tamaño que otros huesos como son vértebras y espinas (Anexo 4).

Una posible explicación de por qué la desoxigenación inferida por el  $\delta^{15}\text{N}$  y el IPSL no está completamente correlacionada entre sí o por qué no está relacionada con todos los índices de preservación de restos de peces en M772-005-3 puede deberse a otros factores que modifican los registros de  $\delta^{15}\text{N}$  y el IPSL.

Por un lado, los altos valores del IPSL ( $\sim 6$ ) pudieron haber sido generados por una mayor actividad de la fauna bentónica gatillada por eventos de oxigenación. Sin embargo otros procesos físicos como fuertes corrientes de fondos, turbiditas o sismicidad llamado “Slumps” (Martin & Sayles, 2003; Salvattecchi et al., 2014; Schimmelmann et al., 2016), no relacionados con la oxigenación, pueden mezclar las láminas produciendo altos valores del IPSL.

La nula relación entre preservación de restos de peces con la desoxigenación puede deberse a procesos no relacionados con la oxigenación (e.g cambios del nivel del mar). Durante 34-19 Kyr BP el nivel del mar global llegó a su mínimo valor entre 136 a 128 metros y durante inicio del holoceno ( $\sim 10$  Kyr BP) fue 25 metros por debajo del actual (Spratt & Lisiecki, 2016). Con estos datos se estimó el nivel del mar para cada testigo con la diferencia de la profundidad en cada testigo y variabilidad nivel del mar global estimada por Spratt & Lisiecki, 2016.

Por lo cual, el nivel del mar para el testigo M772-005-3 durante 19-10 Kyr BP varió entre ~84 a 176 metros y estuvo más expuesto a la dinámica de corrientes costeras, probablemente produciendo el deterioro o desaparición de la gran mayoría de restos de peces de los sedimentos marinos.

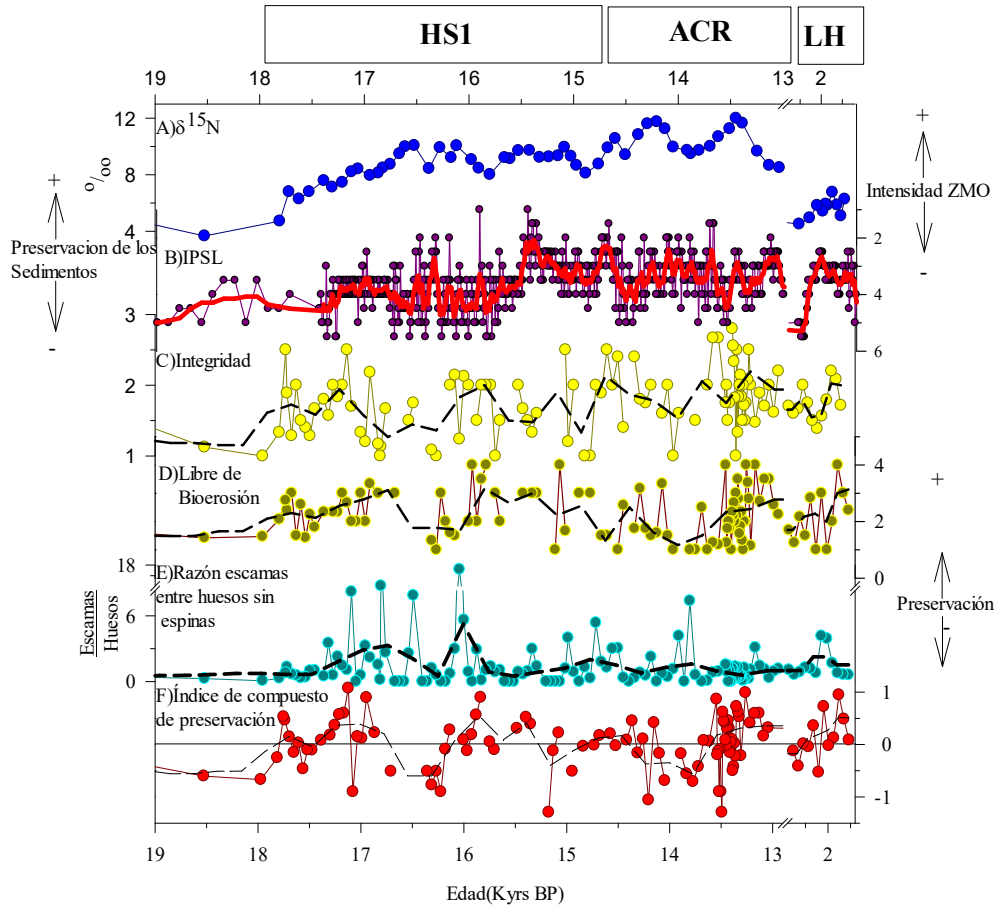


Figura 25. Comparación de la preservación de los restos de peces con las condicionales oxigenación y preservación de sedimentos laminados: A)  $\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$ , B) IPSL, C) Integridad de escamas, D) Libre de bioerosión de vértebras, E) Razón de todas las escamas entre todas vértebras, F) Índice compuesto de preservación de restos de peces. La línea roja continua en B y negra discontinua en los paneles C, D, E y F medias móviles cada tres valores.

En el testigo M77/2-005-3 se observó la presencia de agregados minerales, llamados maclas, presumiblemente de yeso que son abundantes en 17.5, 16.5, 15.8 y 14.5 Kyr BP (Anexo 1) que coincide en algunos casos con la presencia de

fosforita. Una posible explicación de la formación de fosforita se relaciona con el incremento de la intensidad de las corrientes y eventos esporádicos de oxigenación (Erdem et al., 2016). La idea anterior es apoyada también por la presencia de discontinuidades que sugieren eventos de erosión en el testigo M722-005-3.

En el testigo M772-029-3 colectado en Chimbote también se utilizó el IPSL como indicador de oxigenación (Campusano, 2013). El IPSL del M772-029 muestra una tendencia al aumento durante T1 (Campusano, 2013), indicando una mejor preservación de los sedimentos en el ACR (~14.5-12.8 Kyrs BP).

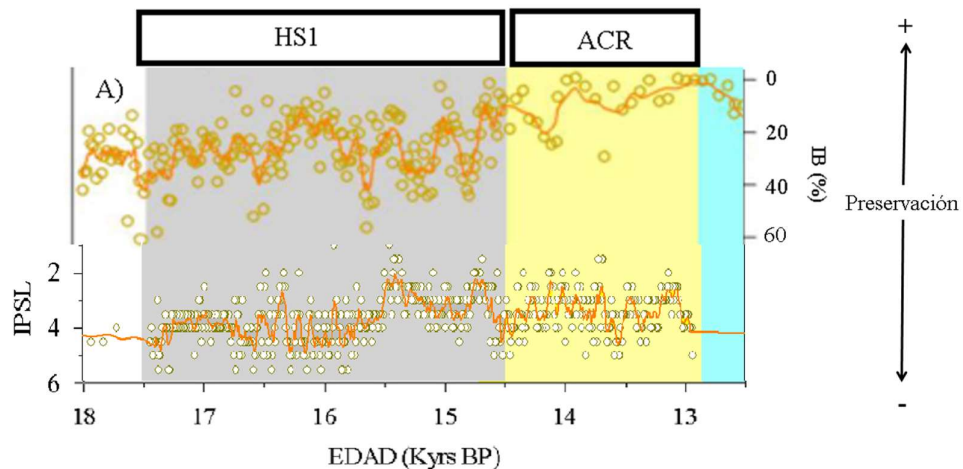


Figura 26. Índices de preservación de sedimentos laminados frente Chimbote (A) denominado como Índice de bioturbación por Campusano (2013) y frente a Callao (B) denominado “IPSL” en el presente trabajo durante T1 (IPSL está representados en ambos en eje invertido). Línea móvil en cada registro cada cinco valores. En términos prácticos el IB es lo mismo que el IPSL en diferentes escalas. En IB varía entre 0 al 100% y IPSL varía entre 1 al 6.0 (eje inverso).

La comparación del IPSL entre el testigo de Callao y el testigo de Chimbote muestra similitudes y diferencias (fig. 26). Mientras en Chimbote la mayor preservación ocurrió en el ACR, en Callao se registró un aumento y luego una estabilización entre la parte tardía del HS1 y el ACR.

Sin embargo, en ambos se presenta una tendencia a disminuir la preservación de los sedimentos laminados en ~13.7 Kyr BP. Esta disminución de la preservación de los sedimentos está asociada también a menores valores de  $\delta^{15}\text{N}$  y a una menor preservación de escamas inferida por el índice compuesto de preservación de escamas frente Callao durante ~13.7 Kyr BP (fig. 25 y 26), lo cual nos indicaría que en este periodo de tiempo ocurrió un evento de oxigenación frente a la costa del Perú.

Además, en el testigo M77-029, la razón de escamas totales entre vértebras muestra relación negativa y significativa con el índice de bioturbación ( $r_{\text{pearson}}=0.27$ ,  $p<0.000$ ,  $n=183$ ) (Campusano, 2013). Esto se interpreta que a un aumento del IB causaría una menor disolución de la relación escamas y vértebras. Una explicación para observación previamente descrita es que la preservación de las escamas inferida por la razón escamas a vértebras no guarda relación con las condiciones de preservación de los sedimentos laminados. Sin embargo, una explicación alternativa es que este indicador estuvo modulado por otros factores que produjeron retrabajo en los restos de peces. Esto es debido a que en los ambientes anóxicos frente a Perú también ocurren procesos de re-suspensión y resedimentación de sedimentos (Suess, 1981; Arthur et al., 1998; Böning et al., 2004).

Frente a Pisco se observa una relación positiva y significativa entre el  $\delta^{15}\text{N}$  con los tres índices de preservación de restos de peces en el testigo compuesto B-14, G-10 y G-14 que abarca los últimos 25 Kyr (Salvatteci et al., 2019a). El  $\delta^{15}\text{N}$  mostró relaciones positivas con el índice de integridad de escamas ( $r_s=0.24$ ,  $p<0.0002$ ,  $n=317$ ), índice de bio-erosión las vértebras ( $r_s=0.44$ ,  $p<0.0002$ ,  $n=317$ ) y razón de escamas entre vértebras de peces ( $r_s=0.55$ ,  $p<0.0002$ ,  $n=317$ ). Estas características

pueden ser debido a que el período de 25 mil años abarca etapas con altos contrastes de oxigenación.

Por otro lado, las profundidades de los tres testigos durante la desglaciación cambiaron considerablemente. La profundidad registrada varió entre ~84 a 176 metros frente Callao, frente a Chimbote entre ~307 a 399 metros y frente a Pisco entre ~274 a 366 metros, datos estimados con nivel mar global y profundidad de extracción de cada testigo (Spratt & Lisiecki., 2016). En la actualidad, la ZMO se ubica de manera vertical dentro de 200 a 500 metros de profundidad entre 8 a 11°S (Espinoza-Morriberón et al., 2019). Por lo tanto se puede asumir que el testigo M77/2-005-3 estuvo más expuesto a evento de oxigenación que los otros testigos. Además, esta región también estuvo más expuesta a transgresiones por el cambio del nivel del mar que produjo mucho retrabajo en los restos de peces en comparación con los otros dos registros frente Chimbote y Pisco.

## 5.2 Asociación de las series de tiempo de los restos de peces con las variables biogeoquímicas frente a Callao

Con el fin de explorar las relaciones entre las condiciones biogeoquímicas y los cambios en los flujos de restos de peces, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) en base a 14 variables (8 biogeoquímicas, 7 restos de peces y 1 preservación), utilizándose para el análisis 121 muestras que pertenecen a la Terminación 1. Solo se utilizaron los flujos de los restos estimados por tasa de acumulación constante y estos datos se asociaron con los valores de las variables biogeoquímicas interpoladas. Los dos primeros componentes principales representan el ~56% de la variabilidad de los datos (fig. 27).

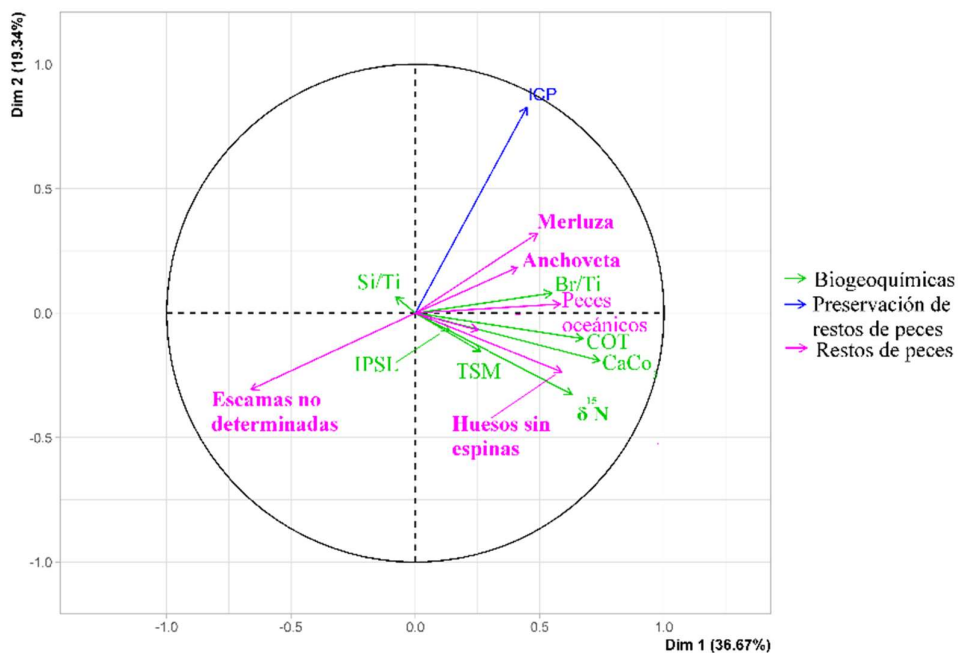


Figura 27. Análisis de componentes principales de los indicadores biogeoquímicos, índices de preservación y flujos de restos de peces.

El PC1 (36.66%) muestra de manera general unas mayores correlaciones con  $\delta^{15}\text{N}$ , flujos de COT, Br/Ti y  $\text{CaCO}_3$  (~0.44 a 0.74) y una moderada correlación con flujos de escamas de anchoveta, escamas de merluza, peces oceánicos y huesos

excluyendo espinas (~0.41 a 0.58) (fig.28a); sin embargo se observa una relación opuesta (-0.66) con los flujos de escamas de peces no determinados. Por lo tanto, se puede inferir que este componente representa la producción exportada y/o la productividad pelágica y de los peces en general excluyendo los peces no determinados, que podrían ser peces mesopelágicos.

El PC2 (19.33%) muestra una correlación mayor valor con el índice compuesto de preservación de restos de peces (0.82). Además, se observa una moderada correlación con los flujos de escamas de merluza (0.31),  $\delta^{15}\text{N}$  (-0.32) y flujos de peces no determinados (-0.30) (fig.28b). Por lo cual se puede interpretar que PC2 representa la preservación de los restos de peces.

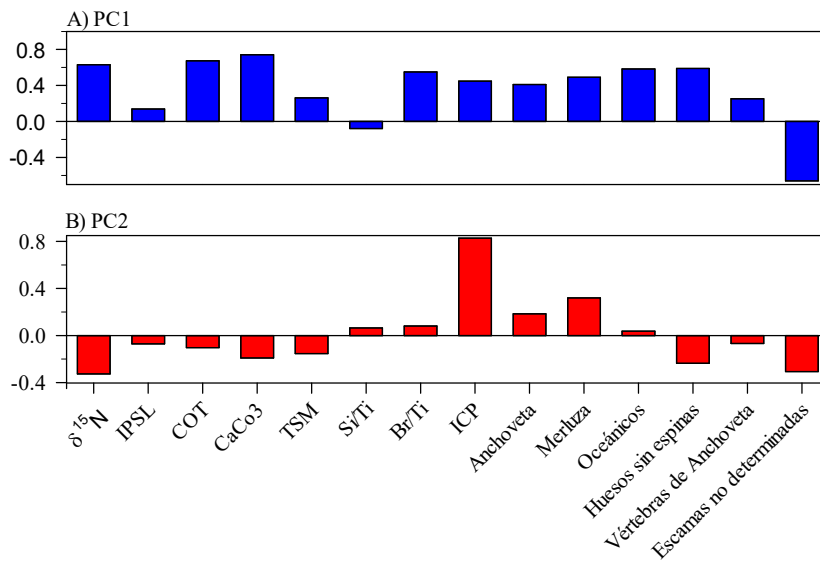


Figura 28. Esquema de correlaciones de los dos factores: A)PC 1 y B)PC 2 de los datos bióticos (flujos e índices de preservación de restos de peces) y datos abióticos ( $\delta^{15}\text{N}$ , IPSL, COT, Carbonatos, Temperatura inferida según alquenonas, Si/Ti y Br/Ti). Nombres de especies son las escamas de esa identificadas de esa especie.



El análisis de componentes principales entre los flujos de restos de peces y variables biogeoquímicas frente a Callao y Pisco presentan similares características. Ambos representan el entre el 50 al 60 % de la variabilidad de datos. El PC2 representa en general la preservación de los restos de peces para Pisco (Salvatteci, et al., 2019a) y para Callao (este estudio).

En la figura 29 se muestra la comparación de los dos componentes principales versus  $\delta^{15}\text{N}$ , ICP y flujos de huesos sin espinas. Se distingue que PC1 manifiesta un aumento desde 18 a 17.5 Kyrs BP, lo que fue seguido por un período sin una tendencia clara con baja variabilidad desde 17.5 a 15.5 Kyrs BP, precediendo una disminución desde 15.5 a 14.5 Kyrs BP. Luego la productividad aumenta y disminuye al compás de la desnitrificación desde 14.5 a 13.4 Kyrs BP. Por otro lado, el PC2 manifiesta seguir la misma variabilidad de la preservación de restos de peces desde 18 a 12.9 Kyrs BP (fig. 29).

El PC2 como indicador para preservación de restos de peces frente a Pisco manifiesta una tendencia decreciente desde 18 a 13 Kyrs BP (Salvatteci, et al., 2019a), mientras que el PC2 para el testigo de Callao no muestra una tendencia clara. Sin embargo, ambos testigos manifiestan una disminución puntual en ~14 a 13.5 Kyrs BP que posiblemente esté asociada a la disminución del  $\delta^{15}\text{N}$  frente a Pisco (Anexo 22) y Callao (fig. 29).

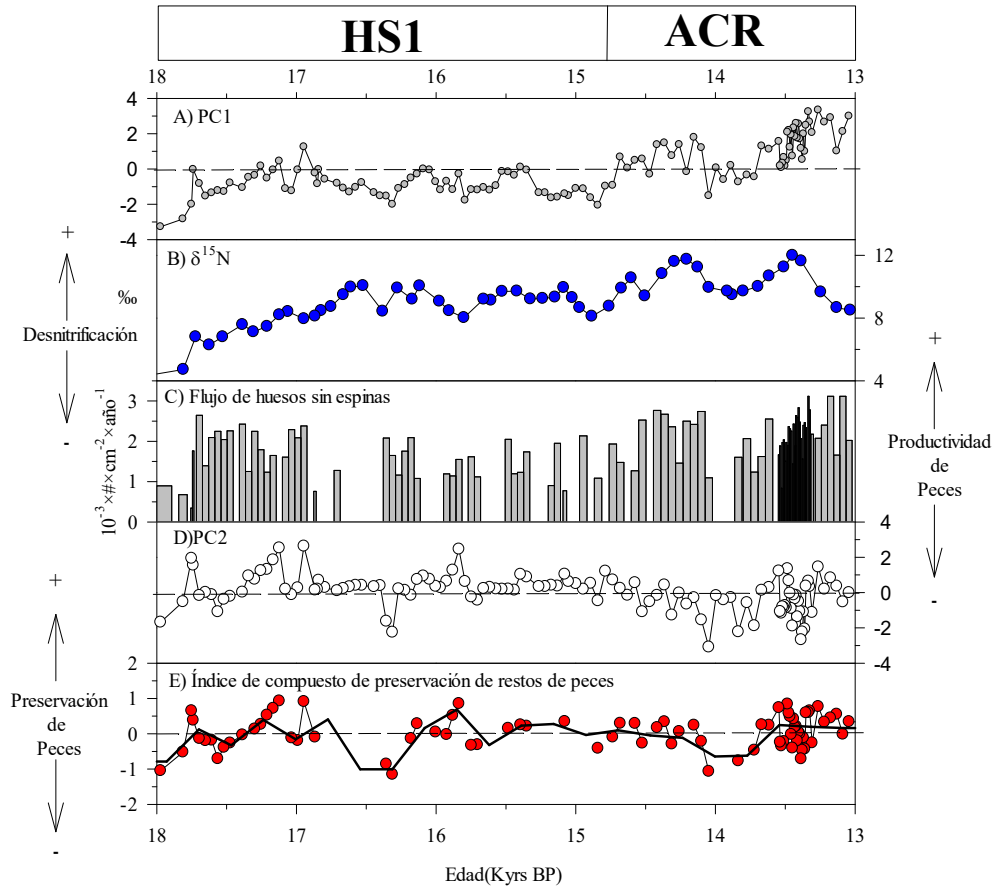


Figura 29. Serie de tiempo de los tres principales componentes principales y las variables que representan durante T1 frente a Callao. A) PC1, B)  $\delta^{15}\text{N}$ , C) Flujo de Huesos excluyendo espinas D) PC2, E) Índice compuesto de preservación de restos de peces y E) flujo de huesos sin espinas como indicador de productividad de peces. En el panel E, la línea continua de color negra engrosada representa la media móvil índice compuesto de escamas de restos de peces.

### **5.3 Abundancias y flujos de restos de peces agrupados por periodo de tiempo frente Callao**

Las abundancias, flujos, razones e índices de preservación de los diferentes restos de peces agrupados por periodos de tiempo se muestran en las Fig. 30 y 31. La columna izquierda son las abundancias/flujos de escamas (A hasta G), luego la columna central son las abundancias /flujos de los diferentes tipos de huesos (H hasta N) y por la columna derecha son razones de escamas de peces oceánicos entre anchoveta e índices de preservación (O hasta U).

En general las abundancias de restos de peces ( $\# \times g^{-1}$ ) (fig. 30) fueron mayores en el Holoceno tardío que durante el ACR, HS1 y LGM, aunque para algunos restos de peces como escamas de peces oceánicos, mesopelágicos, espinas y fragmentos de espinas no se observa dicho patrón. Las escamas de peces oceánicos ( $\# \times g^{-1}$ ) registraron menores valores ( $0.005 \pm 0.01$ ) durante el HS1. Los fragmentos de espinas ( $\# \times g^{-1}$ ) mostraron los mayores valores ( $0.96 \pm 1.45$ ) durante el Holoceno tardío.

Los flujos totales de escamas de peces ( $10^{-3} \times \# \times cm^{-2} \times año^{-1}$ ) (fig. 31) mostraron valores máximos en el Holoceno tardío ( $6.37 \pm 5.30$ ) y ACR ( $6.55 \pm 5.68$ ) y valores mínimos durante el LGM ( $0.61 \pm 0.39$ ). Durante HS1, los valores de los flujos de todas escamas ( $4.85 \pm 5.33$ ) fueron menores que en ACR pero mayores que LGM. El patrón anteriormente mencionado se repite de manera similar en los flujos acumulados de escamas de merluza, peces oceánicos, mesopelágicos y fragmentos de escamas. Sin embargo, los flujos acumulados de escamas de anchoveta y escamas no determinadas tendieron a ser similares en magnitud durante HS1, ACR y LH.

Dentro de los flujos de restos óseos, el flujo de huesos sin espinas ( $10^{-3} \times \# \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ) mostró valores menores en LGM ( $0.92 \pm 0.56$ ), luego presentó un aumento en HS1 ( $2.96 \pm 3.35$ ), que continuó en ACR ( $7.79 \pm 5.49$ ); en el Holoceno tardío se manifestó una disminución ( $4.05 \pm 5.07$ ). El patrón explicado anteriormente se manifestó de la misma manera también en vertebras de anchoveta, vertebras de tipos 1 al 13, vértebras no determinadas y otros huesos. Sin embargo, los flujos de espinas, fragmentos de espinas presentaron tendencias diferentes.

Los índices de preservación de restos de peces en general agrupados por periodos de tiempo, con excepción del índice de integridad de vértebras, mostraron valores menores en el LGM que durante HS1, ACR y el Holoceno tardío.

Finalmente, un resultado destacable fue el aumento de los flujos de peces oceánicos ( $10^{-3} \times \# \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ), como sardina, caballa, jurel y agujilla, durante el ACR ( $0.82 \pm 0.89$ ). Además, estos flujos fueron mínimos en el LGM ( $0.04 \pm 0.05$ ) en comparación con los periodos ACR y HS1.

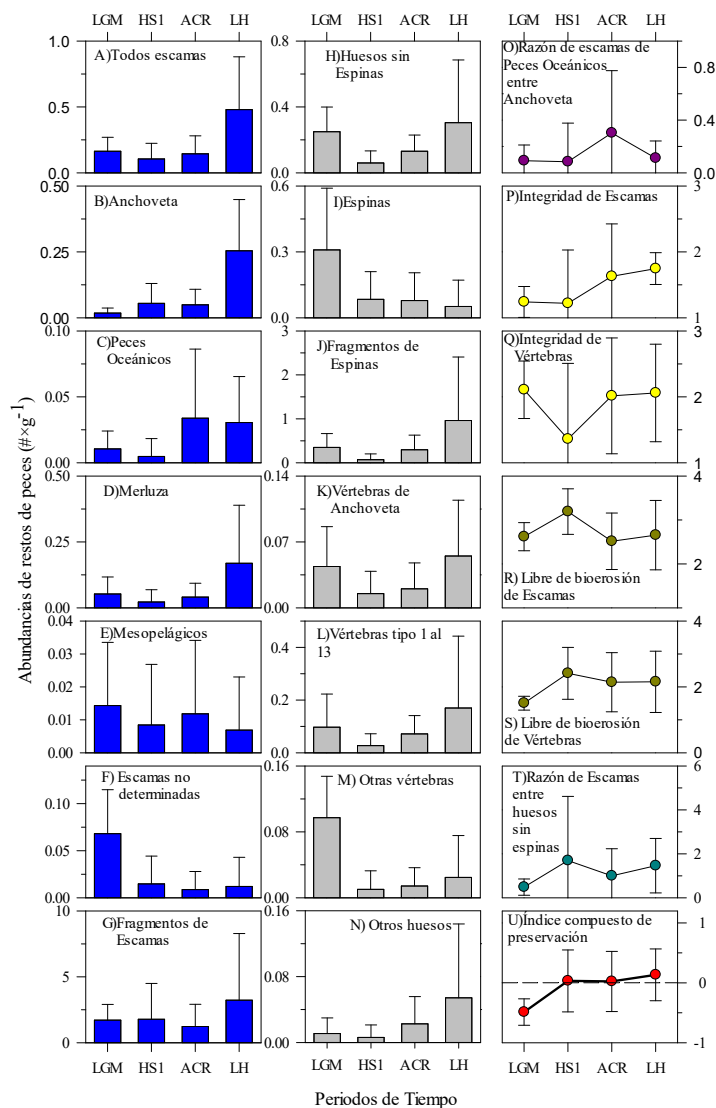


Figura 30. Promedio y desviación estándar de las abundancias e índices de preservación de restos de peces agrupadas por periodos de tiempo frente a Callao: A) Escamas de todas las especies, B) Escamas de anchoveta, C) Escamas de peces oceánicos, D) Escamas de merluza, E) Escamas de peces mesopelágicos, F) Escamas indeterminadas, G) Fragmentos de escamas, H) todos los huesos sin incluir las espinas, I) Espinas, J) Fragmentos de espinas, K) Vértebras de Anchoveta, L) Vértebras de los tipos 1 al 13, M) Otras Vértebras, N) Otros huesos, O) Razón escamas de peces Oceánicos entre escamas de Anchoveta, P) Integridad de todas escamas, Q) Integridad de Vértebras R) Libre de bioerosión de todas escamas, S) Libre de Bioerosión de vértebras, T) Razón de todas las escamas entre todas vértebras más otras huesos y U) Índice de preservación compuesto de todas las escamas.

Los flujos de escamas del resto de especies ( $10^{-3} \times \# \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ) desde el LGM al Holoceno (fig. 31) mostraron diferentes patrones temporales de variabilidad. Durante el LGM las escamas de especies no determinadas ( $0.25 \pm 0.17$ ) fueron las más abundantes, luego el flujo de las escamas de merluza ( $0.19 \pm 0.24$ ), anchoveta ( $0.07 \pm 0.07$ ) y la menor magnitud fue peces mesopelágicos ( $0.05 \pm 0.07$ ).

Durante el HS1, se observó un gran aumento de los flujos ( $10^{-3} \times \# \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ) de anchoveta ( $2.98 \pm 3.48$ ) y merluza ( $1.25 \pm 2.49$ ). Además, destacó la presencia de especies oceánicas como la sardina ( $0.01 \pm 0.08$ ), caballa ( $0.02 \pm 0.17$ ), agujilla ( $0.05 \pm 0.18$ ), jurel ( $0.05 \pm 0.20$ ) y peces mesopelágicos ( $0.16 \pm 0.30$ ), que tendieron a ser mayores en comparación con LGM (fig. 31).

Tabla 10. Comparación de los flujos de restos de peces dentro de los periodos del ACR y HS1 entre los tres testigos mediante la prueba Dunn ( $p < 0.05$ ), el valor del estadístico Z y p-valor con valores significativos. Tabla de la prueba Kruskal- Wallis múltiple (Anexo 8).

Escamas de Anchoveta			Vértebras de Anchoveta		
Comparaciones	p adj	Z	Comparaciones	p adj	Z
Chimbote ACR < Chimbote HS1	0.00	-5.9	Chimbote ACR > Callao ACR	0.00	4.65
Chimbote HS1 > Callao ACR	0.00	9.4	Chimbote HS1 > Callao ACR	0.01	4.11
Chimbote HS1 > Callao HS1	0.00	10.5	Chimbote ACR > Callao HS1	0.00	5.64
Callao ACR < Pisco ACR	0.00	-4.4	Chimbote HS1 > Callao HS1	0.00	5.44
Callao HS1 < Pisco ACR	0.00	-4.6	Escamas de Merluza		
Callao HS1 < Pisco ACR	0.00	-4.5	Comparaciones	p adj	Z
Callao ACR < Pisco HS1	0.00	-6.9	Chimbote HS1 > Callao HS1	0.00	4.82
Callao HS1 < Pisco HS1	0.00	-7.4	Chimbote ACR > Pisco HS1	0.02	3.98
Escamas de Peces oceánicos			Chimbote HS1 > Pisco HS1	0.00	4.77
Comparaciones	p adj	Z	Huesos sin espinas		
Chimbote ACR > Callao HS1	0.00	6.94	Comparaciones	p adj	Z
Chimbote HS1 > Callao HS1	0.00	9.15	Chimbote HS1 > Callao ACR	0.00	4.77
Callao ACR > Callao HS1	0.00	5.12	Chimbote ACR > Callao HS1	0.00	4.34
Callao HS1 < Pisco HS1	0.00	-5.77	Chimbote HS1 > Callao HS1	0.00	7.59
			Callao ACR < Pisco ACR	0.04	-3.77
			Callao HS1 < Pisco ACR	0.00	-4.99

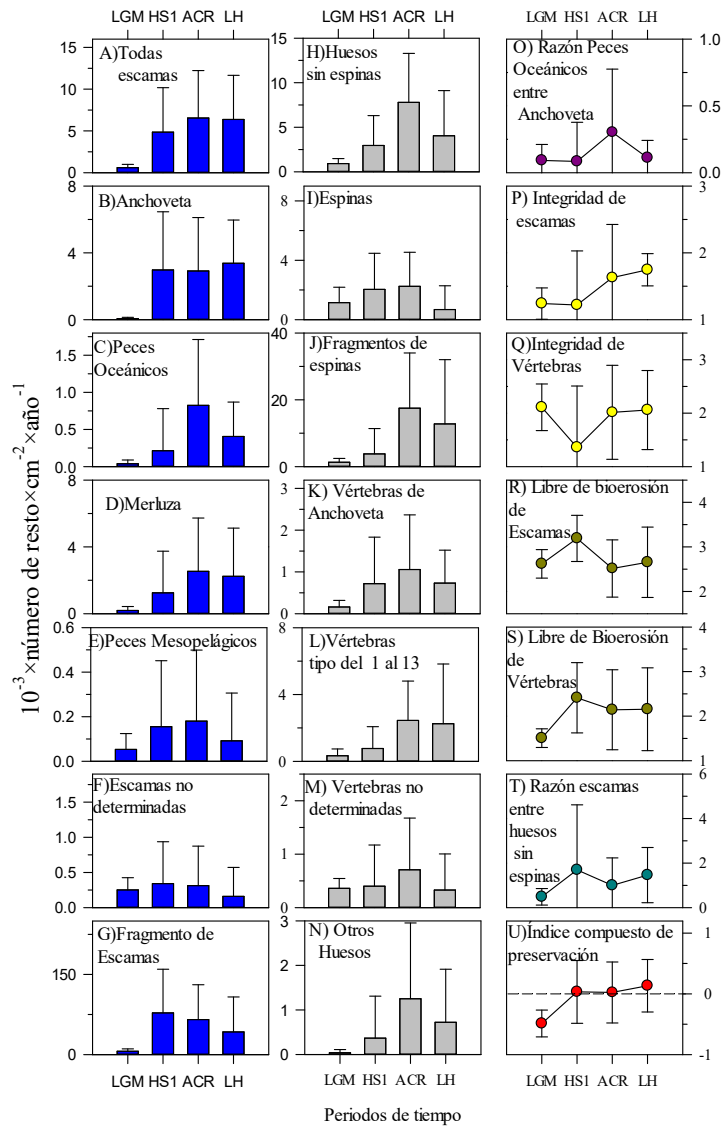


Figura 31. Promedio y su desviación de los flujos e índices de preservación de restos de peces agrupadas por periodos de tiempo frente a Callao: A) Escamas de todas las especies, B) Escamas de anchoqueta, C) Escamas de peces oceánicos, D) Escamas de merluza, E) Escamas de peces mesopelágicos, F) Escamas indeterminadas, G) Fragmento de escamas, H) todos los huesos sin incluir las espinas, I) Espinas, J) Fragmentos de espinas, K) Vértebras de Anchoqueta, L) Vértebras de los tipos 1 al 13, M) Otras Vértebras, N) Otros huesos, O) Razón escamas de peces Oceánicos entre escamas de Anchoqueta, P) Integridad de todas escamas, Q) Integridad de Vértebras R) Libre de bioerosión de todas escamas, S) Libre de bioerosión de vértebras, T) Razón de todas las escamas entre todas vértebras más otros huesos y U) Índice de preservación compuesto de todas las escamas.

Durante el ACR, los flujos ( $10^{-3} \times \# \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ) de anchoveta ( $2.92 \pm 3.19$ ) y peces meso pelágicos ( $0.18 \pm 0.32$ ) fueron similares a los flujos durante el HS1, pero los flujos de peces oceánicos fueron mayores que durante el HS1 (por ejemplo, los flujos de sardina ( $0.05 \pm 0.16$ ), agujilla ( $0.22 \pm 0.34$ ), jurel ( $0.17 \pm 0.33$ )). Solo los flujos de escamas de peces no determinados ( $0.31 \pm 0.56$ ) mostraron una tendencia a disminuir en ACR (fig. 31).

Durante el LH, los flujos ( $10^3 \times \# \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ) de escamas de anchoveta ( $3.38 \pm 2.59$ ) y sardina ( $0.09 \pm 0.17$ ) mostraron un ligero aumento en comparación al ACR. Sin embargo, los flujos de escamas de merluza ( $2.24 \pm 2.88$ ), caballa ( $0.15 \pm 0.38$ ), de jurel ( $0.14 \pm 0.22$ ) y de las escamas no determinadas ( $0.16 \pm 0.41$ ) exhibieron una disminución al compararlo con el ACR (fig. 31).

Comparando los flujos de restos de peces frente a Callao con los de frente a Chimbote y Pisco los primeros fueron significativamente menores (Tabla 10). Asimismo, los flujos de huesos sin espinas y vertebras de anchoveta muestran valores significativamente menores en Callao (HS1 y ACR) que los registrados frente a Chimbote y Pisco. Los flujos de escamas de merluza fueron mayores en magnitud frente a Chimbote que los registrados frente a Callao y Pisco durante HS1; también fueron mayores a los de Pisco durante ACR.



#### **5.4 Abundancias relativas de los principales peces frente a Perú durante la T1 y el Holoceno tardío**

En esta sección se comparan las abundancias relativas de peces en la costa central desde el LGM al Holoceno tardío (LH, 4-1 Kyr BP) y últimos 800 años (LIA y CWP). Un supuesto importante es que el efecto de la preservación es semejante entre todas las especies o grupos taxonómicos. En la Tabla 11 se comparan los porcentajes por especie o grupo taxonómico encontrados en esta tesis, con los reportados por otros autores.

La Tabla 11 indica que la anchoveta es el pez más representado en los registros extraídos frente a la costa central del Perú durante los últimos 19 mil años. Desde los periodos del LGM al CWP, las abundancias relativas de escamas de anchoveta fueron menores en Callao que lo reportado frente a Pisco para los mismos periodos de tiempo. Además, la abundancia relativa de escamas de anchoveta frente a Chimbote y Callao fueron similares en representación (%) durante el HS1 y ACR. Para Callao, la abundancia relativa de escamas de merluza y otros no determinados (incluye peces mesopelágicos) fueron en ambos casos más del doble de la abundancia relativa de escamas de anchoveta durante el LGM. Sin embargo, para Pisco, la abundancia relativa de escamas de merluza y otros no determinados (incluye peces mesopelágicos) fueron diez veces y cuatro veces menos que la abundancia relativa de escamas de anchoveta en el LGM (Tabla 11).

Durante el HS1, se observa que las abundancias relativas de los restos de peces por especie frente a Chimbote y Callao fueron muy similares entre sí. En Pisco la abundancia relativa de anchoveta aumenta en comparación al LGM y fue mayor que en los testigos de Callao y Chimbote (Tabla 11).

Tabla 11. Abundancia relativa de escamas (%) por especie o grupo taxonómico en los registros de trabajos previos frente a Chimbote durante T1 al Holoceno (Campusano, 2013), frente Callao durante los últimos 800 años (Gutiérrez et al., 2009), frente a Pisco en los últimos 25 mil años (Salvatteci, et al., 2019) y frente Callao durante LGM al T1 (este estudio). -:no hay registro, \*: solo se contabilizaron dos muestras.

<b>Lugar</b>	<b>Especie/Grupo</b>	<b>LGM</b>	<b>HS1</b>	<b>ACR</b>	<b>LH</b>	<b>LIA</b>	<b>CWP</b>
Chimbote	Anchoveta		63	46	0		34
	Merluza		29	47	100*		35
	Peces Oceánicos	-	3	2	0	-	12
	Mesopelágicos y otros		4	5	0		19
Callao	Anchoveta	14	60	43	48	45	61
	Merluza	38	25	37	40	31	25
	Peces Oceánicos	6	3	12	8	11	6
	Mesopelágicos y otros	42	12	9	4	7	4
Pisco	Anchoveta	74	89	92	88	86	91
	Merluza	7	1	3	2	9	2
	Peces Oceánicos	2	2	0	4	0	2
	Mesopelágicos y otros	17	8	5	6	4	5

Durante el ACR, las abundancias relativas de escamas de anchoveta y merluza en Callao y Chimbote también evidenciaron valores semejantes, a diferencia que frente a Pisco, pero en Callao se registró una mayor abundancia relativa de escamas de peces oceánicos como agujilla, jurel, caballa y sardina que en los otros dos testigos (Tabla 11).

Durante el LH, se observa que la abundancia relativa de escamas de anchoveta continuó siendo mayor en Pisco y luego en Callao. En el testigo de Chimbote solo se identificaron restos de peces en 2 muestras pertenecientes al LH en las cuales no se registraron escamas de anchoveta. De manera inversa las abundancias relativas de escamas de merluza fueron mayores en Chimbote, luego Callao y por último Pisco (Tabla 4).

En los últimos 800 años en el testigo C0329 (Díaz-Ochoa, et al., 2008) y B0413 ubicados a 12°S (Gutiérrez et al., 2009) y colectados a 179 y 184 metros de profundidad, respectivamente, así como en el testigo B0514 colectado frente a Pisco (Gutiérrez et al., 2009), la abundancia relativa de escamas de anchoveta es similar a la registrada en el LH en ambas localidades.

Durante la T1, LH y los últimos 800 años, tanto frente a Callao como frente a Pisco, la abundancia relativa de escamas de anchoveta fue mayor que durante el LGM, sugiriendo que las condiciones frías y poco productivas frente a Perú durante este período no fueron favorables para la anchoveta.

Según las abundancias relativas de los restos de peces frente Pisco, Callao y Pisco; se infieren algunas variaciones espaciales-temporales de las poblaciones de peces.

En el caso de la anchoveta durante los periodos HS1 al ACR, la abundancia relativa de escamas de anchoveta aumentó frente a Pisco y disminuyó frente a Callao y a Chimbote. Por lo cual se puede interpretar que posiblemente hubo mejores condiciones para la población de anchoveta hacia al sur para su desarrollo (Tabla 11).

Para el caso de la merluza durante el HS1 al ACR, la abundancia relativa de merluza aumentó, principalmente frente a Chimbote y a Callao, lo cual sugiere que la condiciones fueron más favorables para la expansión de la población de merluza frente a la costa central de Perú. Para el caso de los peces oceánicos se encuentra una tendencia también al aumento máximo durante ACR frente (Tabla 11). Esta último sugiere una aproximación de las aguas oceánicas hacia el litoral.

## 5.5 Cambios en los flujos de restos de peces frente a Perú durante T1

En la figura 35 se muestran las series de tiempo de los indicadores biogeoquímicos (desnitrificación y productividad) y de los flujos de algunos restos de peces de los tres testigos durante la T1. Los testigos M772-005-3, G14 y M772-029-3 no abarcan la misma línea de tiempo por lo cual solo se puede hacer la comparación entre 17.4-13.6 Kyrs BP.

En la comparación de varios trabajos realizados con restos de peces en diferentes EBUS en el Pacífico norte y sur, se encontró que el factor que modula mayormente las poblaciones de peces es la productividad exportada (Kavanagh & Galbraith, 2018). En los registros colectados frente a Pisco y a Chimbote los restos de peces (e.g flujos de huesos excluyendo espinas), estuvieron correlacionados con el flujo de COT.

Los resultados frente a Callao no muestran la relación previamente descrita. debido posiblemente al cálculo del flujo basado en una tasa de acumulación constante. Esto puede evidenciarse en la relación significativa y positiva de los flujos de restos de peces (anchoveta, merluza y peces oceánicos) con Br/Ti, indicador ampliamente aceptado como productividad orgánica costera (Agnihotri, et al., 2008).

Los flujos de COT en tres registros evidencian una marcada diferencia durante la T1. El COT manifiesta una tendencia a una disminución desde  $400 \text{ a } 200 \text{ } 10^{-3} \times \text{g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$  frente a Chimbote. Sin embargo, frente a Callao, el COT muestra un aumento desde  $50 \text{ a } 400 \text{ } 10^{-3} \times \text{g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ , luego frente a Pisco no se manifiesta una tendencia para los flujos de Pisco, que oscila entre  $100 \text{ a } 200 \text{ } 10^{-3} \times \text{g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ . Por lo cual productividad pelágica exportada para los tres registros no tuvo la misma tendencia durante T1.

El índice de preservación de restos de peces en los tres testigos fue estimado como el promedio del índice de libre de bioerosión de vértebras y razón de escamas entre huesos excluyendo escamas (IPRP). Este indicador muestra valores similares entre los tres testigos por lo cual se puede inferir que la variabilidad de flujos de restos de peces no estuvo afectada de manera relevante por la preservación comparando los tres sitios durante el T1 (fig. 32F).

Los flujos de escamas y huesos excluyendo espinas y de todas las escamas fueron menores en magnitud frente a Callao que frente a Chimbote y Pisco. Es así que los flujos de escamas y huesos excluyendo espinas frente a Chimbote fueron cien veces mayores a lo encontrado frente Callao. Además los flujos de escamas frente a Callao son veinticinco veces menores a lo registrado frente a Pisco (fig. 32D). Finalmente, los flujos de huesos excluyendo espinas frente a Callao fueron cincuenta veces menores a lo registrado frente a Pisco (fig. 32E).

De acuerdo a nuestros resultados y la comparación temporal con otros testigos colectados frente a la costa central, durante el LGM (23-19 Kyr BP) los flujos de TOC y los flujos de restos de peces fueron bajos (Salvatteci, et al., 2019). Esto último pudo deberse a un efecto combinado de una baja productividad y a una pobre preservación de los restos de peces (Salvatteci et al., 2019).

Entre los 19 y 17.5 Kyr BP, se observó un aumento abrupto de los flujos de restos de peces en los registros frente a Callao y a Pisco, que posiblemente fueron gatillados por la sinergia entre los aumentos de la productividad primaria e intensidad de la ZMO. Estos últimos pudieron deberse a la elevación del nivel mar, lo cual generó cambios en la línea de costa favoreciendo la migración hacia al sur

del núcleo de surgencia frente a la costa de Perú (Doering, et al., 2016; Salvattecí, et al., 2019a).

Actualmente, la productividad primaria superficial estimada experimentalmente frente a Chimbote y Pisco es similar en magnitud ( $\sim 200 \text{ mgC/m}^3/\text{d}$ ) (Calienes, 2014). Según estimados satelitales de la concentración superficial de clorofila “a”, los valores máximos de productividad a nivel latitudinal se encuentran a  $7\text{-}15^\circ\text{S}$ , con los mayores valores promedio en dos parches ( $8\text{-}9.5^\circ\text{S}$ :  $\sim 5 \text{ mg}\times\text{M}^{-3}$  y  $11\text{-}14^\circ\text{S}$ :  $\sim 7 \text{ mg}\times\text{M}^{-3}$ ) (Espinoza Morriberón, 2018). Por lo tanto, la distribución actual de la productividad no exhibe una variación latitudinal como el que exhibe la concentración de oxígeno en la capa superficial (Fig.10A).

Durante HS1 (17.5-15 Kyr BP), los flujos de huesos excluyendo espinas registraron un aumento respecto al LGM en los registros frente a Callao (M77/2-005-3) y a Pisco (G-14). Esto es consistente con un aumento de la productividad en este período frente a Callao (Rein et al., 2005). Sin embargo, al comparar con las tendencias observadas de los flujos de los huesos excluyendo espinas frente a Callao se distingue una clara disminución entre 17 a 16 Kyr BP (fig. 32M).

Luego, la transición del HS1 al ACR ( $\sim 15$  Kyr BP) se caracterizó por el aumento abrupto de los flujos de huesos excluyendo espinas en los registros frente a Pisco y Callao, mientras que frente a Chimbote los flujos disminuyeron en el ACR (fig.32 F, M y T).

Frente a Callao y Pisco, la productividad de peces inferida a partir de huesos excluyendo espinas exhibió variaciones en fase con los cambios oceanográficos y atmosféricos asociados a la circulación termohalina hacia  $\sim 16.5$  Kyr BP (Clark & Mix, 2002; Lambeck et al., 2014). Entre estos cambios oceanográficos pueden

mencionarse un aumento de la productividad frente a la costa de Chile (36-41°S), cambios en la masa de agua antártica intermedia, que se inició con la desnitrificación en ~17-15 Kyr BP (Muratli et al., 2010); además un abrupto enfriamiento de la temperatura frente a Pisco (M772-003-2) a ~16.2 Kyr BP y después en la parte norte de la costa central del Perú a ~15.5 Kyr BP y (Salvatteci, et al., 2019). Esta señal estuvo en sincronía con el clima de la Antártida a escala milenial desde 17-15 Kyr BP (Koutavas, 2018). Esto es debido que la señal climática de la Antártida afecta a las latitudes bajas debido a HCS llega a penetrar más al norte cerca de la línea ecuatorial (Koutavas, 2018).

Durante ACR (14.7-14.1 Kyr BP), en los registros frente Pisco y Callao se observó un aumento de los flujos de restos de peces que fue mayor a la registrada en el Holoceno tardío. Este aumento no estuvo afectado por la preservación (fig. 32 F, M y T) y ocurrió en paralelo con el aumento de  $\delta^{15}\text{N}$  (fig. 35 E, L y S) y. El aumento de la producción exportada ocurrió en simultáneo cuando la señal antártica se intensificó y favoreció el enfriamiento a ~14.5 Kyr BP, que alcanzó en 9°S unos 3 °C, en 12°S unos 2 °C y en 15°S unos 4 °C (Salvatteci, et al., 2019).

Finalmente, en el intervalo de 14-13.6 Kyr BP los flujos de huesos excluyendo las espinas y escamas totales de peces, al parecer estuvieron asociadas a la productividad exportada en los tres registros (fig. 32), aunque con tendencias distintas.

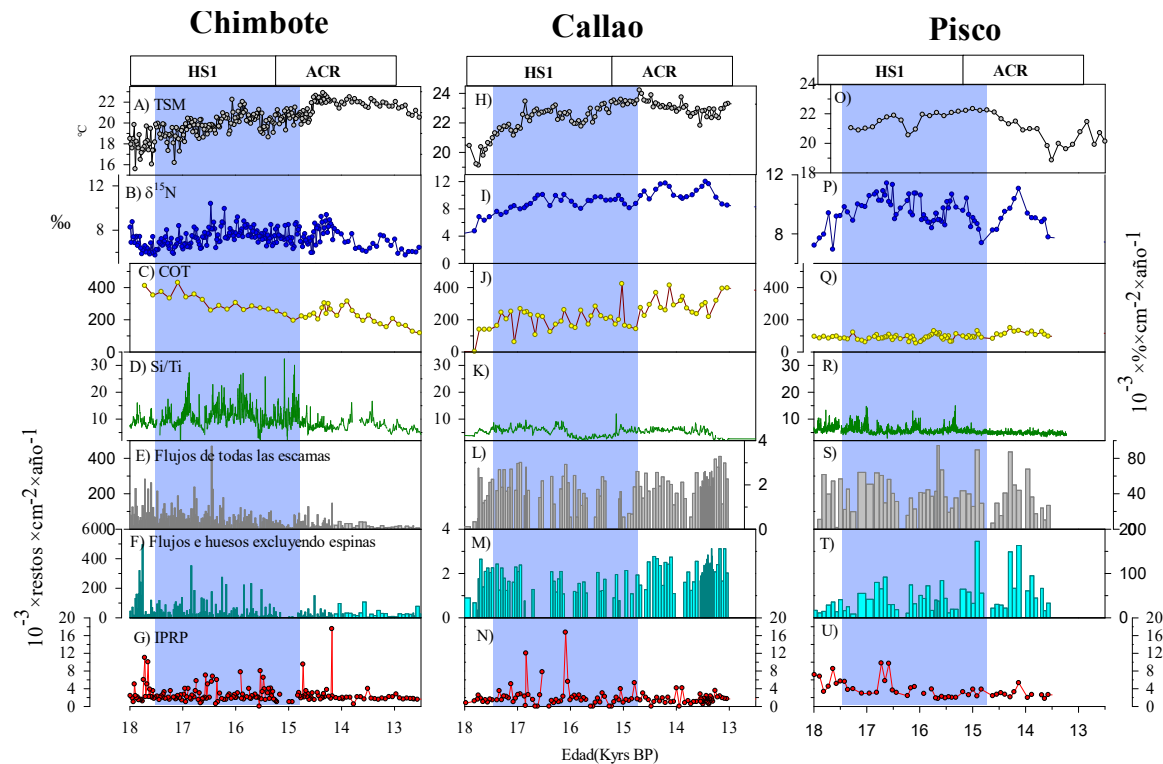


Figura 32. Series de tiempo indicadores biogeoquímicos versus restos de peces frente a la costa central del Perú: A,H,O) TSM; B,I,P)  $\delta^{15}\text{N}$  ‰; C,J,Q) Flujo de COT ( $10^{-3} \times \% \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ); D,K,R) Si/Ti; E,L,S) Flujos de todas escamas ( $10^{-3} \times \# \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ); F,M,T) Flujos de huesos sin incluir espinas ( $10^{-3} \times \# \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ) y G,N,U) Índice de preservación de restos de peces (IRPR). Datos obtenidos en los paneles H,I y J son del trabajo previo (Yseki, 2018). Datos obtenidos en los paneles C, J y Q (Dr. Phillippe Martinez, comunicación personal), Datos obtenidos en los paneles A,B y C es del trabajo previo (Mollier-Vogel, 2012) y Datos obtenidos en los paneles S, T y U es del trabajo previo (Salvatteci, et al,2019)



## 5.6 Rol de las variables biogeoquímicas y de la posición espacial sobre las poblaciones de peces frente a Perú durante T1.

Se realizó el análisis multivariado de los flujos de los restos (escamas de anchoveta, merluza, no determinadas y peces oceánicos; vertebras de anchoveta, hueso excluyendo espinas y índice compuesto de preservación) con los indicadores de posición (latitud, insolación y profundidad) y con los indicadores biogeoquímicos (flujos de COT, TSM,  $\delta^{15}\text{N}$  y Si/Ti) (fig. 33). Se seleccionaron de manera sistemática 26 datos de cada testigo (13 del ACR y 13 del HS1) para evitar el problema de sobrerepresentación de la señal de una zona sobre otra.

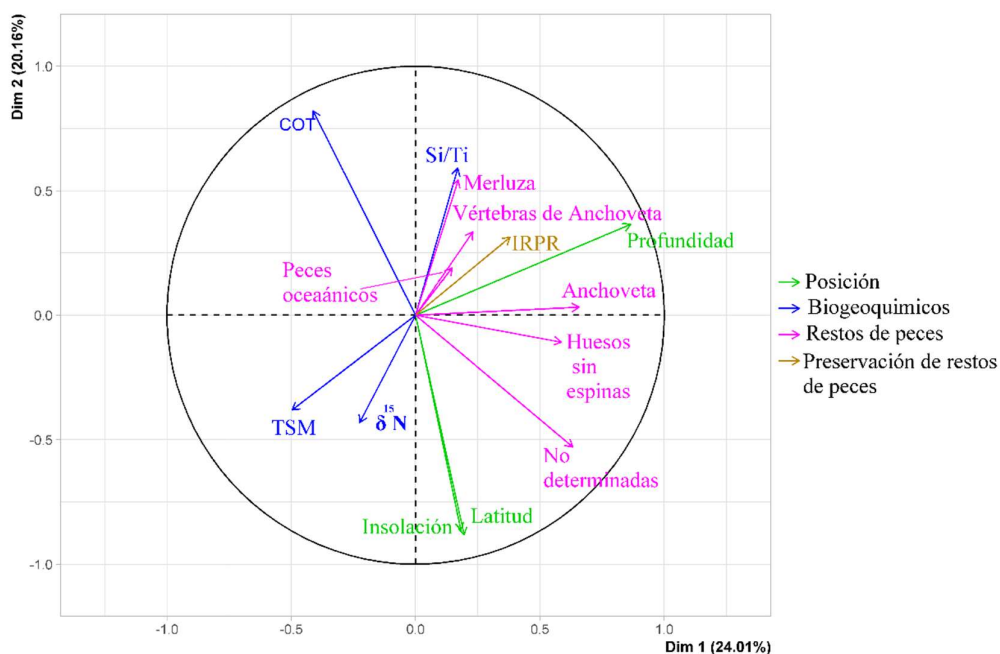


Figura 33. Análisis de componentes principales de los indicadores biogeoquímicos, índices de preservación y flujos de restos de peces.

El PC1 (24.01%) muestra una fuerte correlación positiva con la profundidad (0.82), así como correlaciones positivas débiles con la posición latitudinal, insolación y Si/Ti. Por otro lado, PC1 muestra correlación negativa con  $\delta^{15}\text{N}$  y TSM (-0.49 a -0.22), exhibiendo además correlaciones positivas con flujos de escamas de anchoveta, escamas de merluza, escamas de peces oceánicos y huesos excluyendo espinas (~0.58 a 0.63) (fig.34a). El cambio de la profundidad de cada testigo, causado por la elevación del nivel del mar durante la T1, está también relacionado con el cambio de la distancia de la costa. Entonces puede inferirse que el PC1 representa la distribución de las poblaciones de peces respecto a la distancia de la costa.

El PC2 (20.16%) muestra una correlación negativa con la posición latitudinal, la insolación y los flujos de escamas de no determinadas (-0.5 a -0.88). La correlación es positiva con COT, Si/Ti, flujos de escamas de merluza (0.54 a 0.82) (fig.34b). Por lo cual se puede interpretar que PC2 representa el efecto de las gradientes latitudinales de la productividad primaria y/o producción exportada y la distribución de la merluza.

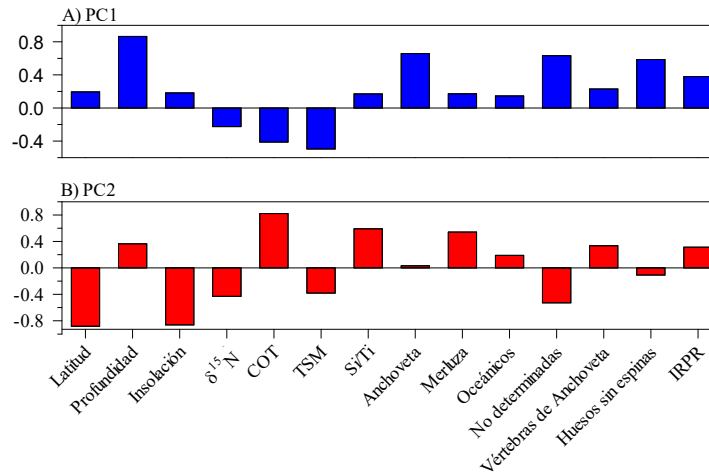


Figura 34. Esquema de correlaciones de los dos factores: A) PC1 y B)PC2 de los datos bióticos (flujos e índices de preservación de restos de peces), indicadores de posición (latitud, profundidad e insolación) e indicadores biogeoquímicos ( $\delta^{15}\text{N}$ , COT, TSM, Si/Ti).

En el análisis Ordicluster de los restos de peces, indicadores biogeoquímicos y posición espacial se observa que la variabilidad climática a escala regional afectó de menor manera que la señal local de cada registro (fig. 35).

Los datos analizados frente a Pisco y Chimbote, provenientes de la misma profundidad, sugieren una biomasa similar de las poblaciones de peces y ambos sugieren una producción de peces mayor a la registrada frente a Callao (fig. 35).

Por otro lado, los flujos de escamas de merluza exhiben un gradiente latitudinal con mayores valores frente a Chimbote, después frente a Callao y por último frente a Pisco (fig. 35). Según periodos de tiempo ACR y HS1, frente a Chimbote se manifestó una reducción de los flujos del HS1 al ACR. Sin embargo, frente a Callao y Pisco se registró un aumento de los flujos del HS1 hacia el ACR (fig. 32 F, M y T).

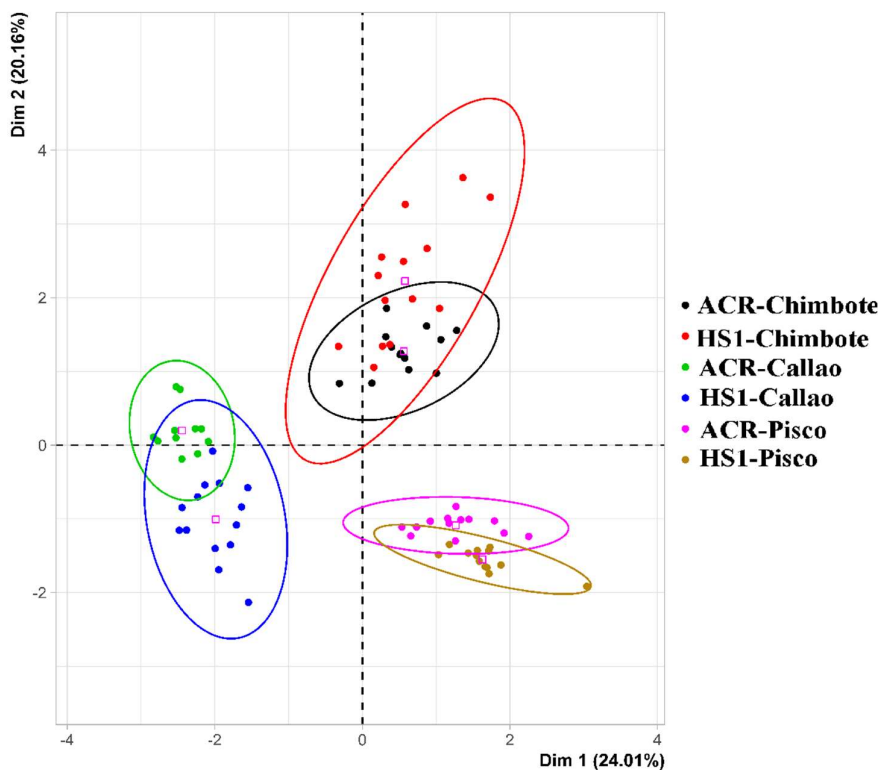


Figura 35. Agrupamientos de los indicadores biogeoquímicos, índices de preservación y flujos de restos de peces. Las elipses de color rojo (Chimbote-HS1), color negro (Chimbote-ACR), color azul (Callao-HS1), color verde (Callao-ACR), color mostaza (Pisco-HS1) y color morado (Pisco-ACR).

A continuación, para la reconstrucción de la biomasa relativa de todos los peces se utilizaron los flujos de huesos sin incluir las espinas, vértebras de anchoveta y escamas de merluza (Salvatteci, et al., 2012). Para estimar la abundancia relativa de los peces oceánicos en relación a la anchoveta se utilizó la razón de escamas de peces oceánicos entre escamas de anchoveta en los tres registros (Salvatteci et al., 2019a).

Los flujos de los restos de peces frente a Chimbote, Callao y Pisco durante ACR y HS1 (fig. 32) muestran una gradiente espacial similar con el Si/Ti. Sin embargo, no

se encuentra un patrón similar entre los diferentes restos de peces con  $\delta^{15}\text{N}$  o con los flujos de COT.

Los registros de  $\delta^{15}\text{N}$  en los tres testigos muestran una tendencia hacia un aumento de la desnitrificación en la columna de agua desde 17.5 a 16 Kyrs BP. Luego, la señal se comporta con tendencias diferentes hasta  $\sim 15$  Kyrs BP. Esto es debido a la presencia de una estabilización de  $\delta^{15}\text{N}$  para Chimbote, pero una tendencia a aumentar para Callao y Pisco (fig. 36).

Posteriormente, los registros de Pisco y Chimbote muestran una misma tendencia hacia una disminución de la desnitrificación a partir de  $\sim 14.6$  Kyrs BP que persiste hasta 13.5 Kyrs BP, que probablemente se deba a una señal regional de aporte de aguas más oxigenadas (e.g. aguas intermedias antárticas), asociada al desacoplamiento entre la desnitrificación de la columna de agua con respecto a las condiciones menos reductoras en el sedimento durante el ACR, que fue inferido frente a Pisco (Salvatteci, et al. 2016). Frente a Chimbote esto coincidió con el aumento del índice de bioturbación (Campusano, 2013), reforzando la idea de un evento de oxigenación a escala regional. En cambio, la desnitrificación frente a Callao se volvió más intensa, posiblemente debido a un aumento de la productividad local y/o respiración aeróbica asociado al aumento del nivel del mar en un área más somera que la de los testigos frente a Chimbote y Pisco (fig. 36).

El índice de compuesto de preservación de restos de peces y el registro de  $\delta^{15}\text{N}$  tuvieron una correlación positiva en el sur (Pisco), pero hacia el norte (Chimbote y Callaos) solo mostraron lapsos de tiempo de tendencia positiva con  $\delta^{15}\text{N}$  y también con los índices de preservación de sedimentos laminados en ambos testigos.

También se observó una baja correlación de  $\delta^{15}\text{N}$  con las otras variables biogeoquímicas que puede deberse a diversas posibles causas:

Al inicio del HS1 (~18 Kyr BP) un desplazamiento más hacia el norte de las aguas intermedias antárticas, ricas en oxígeno y bajas en nutrientes (Bostock et al., 2013), pudo haber alterado la señal de  $\delta^{15}\text{N}$ , demostrado por la disminución de aguas más viejas ( $\Delta^{14}\text{C}$ ) y razón isotópica del neodimio ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) de dientes de peces entre sedimentos (Basak et al., 2010; Marchitto et al., 2007; Salvattecchi et al., 2016). Luego durante el proceso de desglaciación en 17 Kyr BP se redujo el desplazamiento de las aguas intermedias favoreciendo a la desnitrificación para bajas latitudes (Muratli et al., 2010).

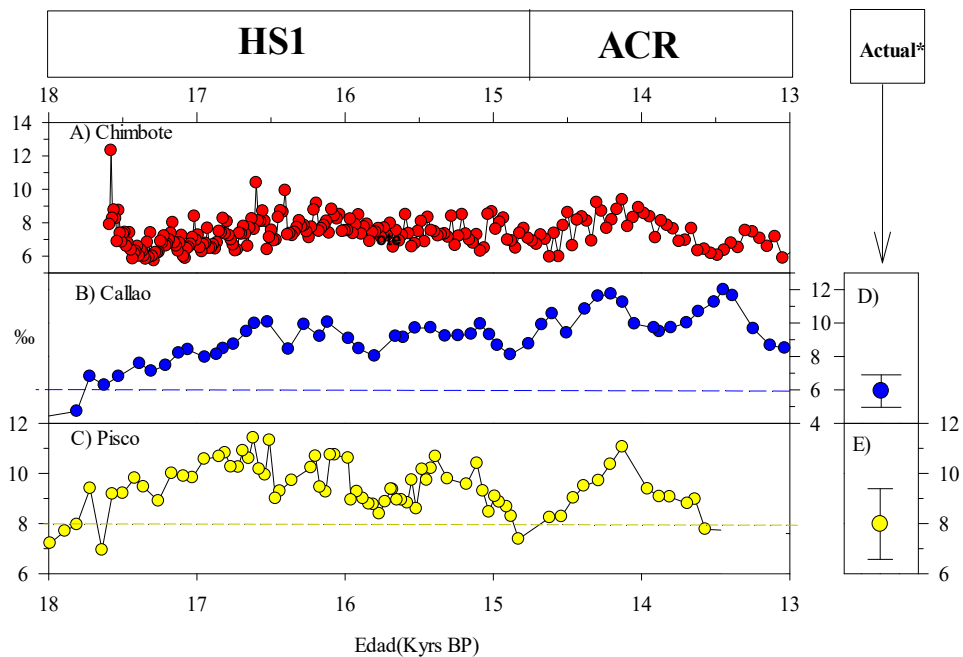


Figura 36. Desnitrificación ( $\delta^{15}\text{N}$  ‰) en la columna de agua frente a la costa central del Perú durante 17.5-13 Kyr BP: A) Chimbote (Mollier-Vogel, 2012), B) Callao (Yseki, 2018) y c) Pisco (Salvattecchi, et. al, 2019), D) y E) representa el promedio de  $\delta^{15}\text{N}$  en los últimos 170 años frente a Callao ( $5.93 \pm 0.97\%$ ;  $n=81$ ) y frente a Pisco ( $7.98 \pm 1.41\%$ ;  $n=81$ ), respectivamente (Gutiérrez et al., 2019; Cardich et al., 2019).

Por otro lado, los índices de preservación de los sedimentos laminados en Chimbote y en Callao (IPSL) como indicadores de desoxigenación evidencian similar comportamiento durante HS1 aparentemente por la coincidencia en algunos picos y valles entre 14.5-15.5 Kyr BP (fig. 25, 26 y 39). Esto se puede interpretar que frente a Callao y Chimbote, la oxigenación manifiesta una señal regional durante el HS1.

Cabe indicar que estos indicadores en Chimbote (IB) y Callao (IPSL) no muestran un patrón similar entre ambos durante el ACR. Probablemente la resolución temporal en la que se realizó el muestreo juegue un rol importante (fig. 26). El índice de bioturbación (IB) posee menos resolución (260 muestras en 13 metros) en el testigo M77/2-029 (Chimbote). En cambio, en el testigo M77/2-005-3 (Callao), el registro de IPSL se realizó a mayor resolución (708 muestras en 7.07 metros).

Otra posible causa es que el registro de preservación de sedimentos laminados en Chimbote construido por Campusano (2013) fue elaborado con referencia a una cronología basada una versión anterior de la curva de calibración mundial marina utilizada en el registro de Callao (Campusano, 2013) (fig. 26).

A continuación, para la reconstrucción de la biomasa relativa de todos los peces se utiliza los flujos de huesos sin incluir las espinas, vértebras de anchoveta y escamas de merluza (Salvatteci, et al., 2012). Para estimar la abundancia relativa de los peces oceánicos en relación a anchoveta se utiliza la razón de escamas de peces oceánicos entre escamas de anchoveta en los tres registros (Salvatteci et al., 2019a).

Los flujos de los restos de peces frente a Chimbote, Callao y Pisco durante ACR y HS1 (fig. 37 y fig. 14 en el trabajo de Salvatteci et al., 2019a) muestran una tendencia

espacial similar con la razón Si/Ti. Sin embargo, no se encuentra un patrón similar entre los diferentes restos de peces con  $\delta^{15}\text{N}$  o con los flujos de COT.

Los flujos de escamas de merluza acumulados por periodos de tiempo exponen una tendencia opuesta a la  $\delta^{15}\text{N}$  según la latitud (fig. 37F). Esta gradiente latitudinal de la oxigenación es una característica regional que aún está presente frente a las costas del Perú, reportado por varios trabajos (Fuenzalida et al., 2009; Helly & Levin, 2004; Montes et al., 2014).

Los flujos de huesos excluyendo espinas y los flujos de vertebras de anchoveta poseen similares tendencias en los tres registros (fig.37 E y H). Los mayores flujos de restos de peces para el caso de huesos excluyendo espinas y de flujos de vertebras de anchoveta fueron registradas en Chimbote durante el HS1. Además, los menores flujos de restos se registraron frente a Callao durante el HS1.

Para los casos Pisco y Chimbote, los flujos de huesos excluyendo espinas y los flujos de vertebras de anchoveta no difieren significativamente entre el HS1 y el ACR; y por otro lado fueron significativamente mayores a los flujos en Callao (fig.37 E y H). Por ello se puede interpretar que las biomásas de peces totales incluyendo a la anchoveta frente Callao fueron menores que las biomásas registradas en Pisco y Chimbote (fig. 37).



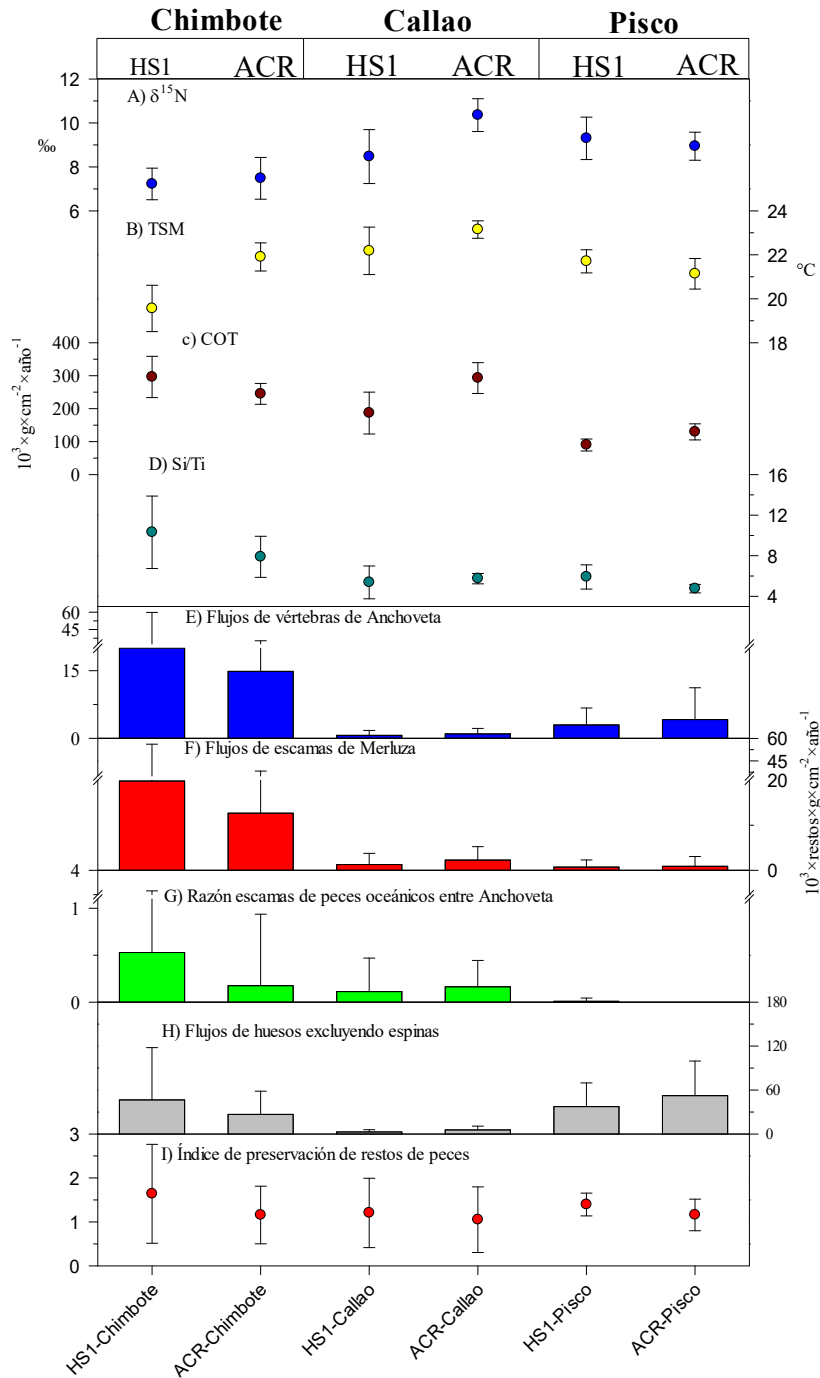


Figura 37. Relación de las tendencias de las abundancias de restos versus variables biogeoquímicas en ACR y HS1. A)  $\delta^{15}N$ , B) TSM, C) flujo de COT, D) Si/Ti, E) Flujo de vértebras de Anchoveta, F) Flujo de escamas de merluza, G) Razón de escamas de peces Oceánicos entre Anchoveta y H) Flujos de huesos excluyendo espina, I) Índice compuesto de preservación de resto de peces.

Tabla 12. Correlación de Spearman de las abundancias y razones de restos de peces versus  $\delta^{15}\text{N}$ , flujos de COT y Si/Ti durante T1 (p-value < 0.05).

Flujos o razón	$\delta^{15}\text{N}$			Flujo de COT			Si/Ti		
	Chimbote n=220	Callao n=89	Pisco n=50	Chimbote n=220	Callao n=89	Pisco n=50	Chimbote n=220	Callao n=89	Pisco n=50
Vértebras de Anchoqueta	-0.04	-0.16	<b>0.32</b>	<b>0.18</b>	-0.03	0.13	-0.10	-0.09	0.02
Escamas de merluza	0.07	-0.08	<b>-0.31</b>	0.08	0.13	0.09	0.04	0.05	0.07
Razón de escamas de peces oceanicos entre anchoqueta	0.00	0.11	0.09	-0.01	0.17	0.17	0.04	0.04	<b>0.25</b>
Huesos sin espinas	-0.08	-0.02	<b>0.46</b>	<b>0.31</b>	0.00	<b>0.48</b>	-0.06	0.05	-0.05
Preservación	0.07	-0.04	0.11	-0.05	0.16	<b>-0.29</b>	<b>0.16</b>	<b>0.18</b>	<b>0.28</b>

En la Tabla 12 se muestra la relación de las principales flujos y razones de restos de peces con los indicadores de desnitrificación, la producción exportada y la producción silíceo. La relación más resaltante se dio entre los huesos sin espinas con COT en Chimbote y Pisco, en donde las correlaciones fueron muy similares. Las altas correlaciones de la preservación de restos de peces con la razón Si/Ti pueden explicarse si altos flujos de restos de diatomeas favorecen el enterramiento y preservación de los restos de peces.

Debido a las bajas correlaciones entre los flujos de restos de peces versus las variables biogeoquímicas y las relaciones no lineales observadas en trabajos previos de los parámetros biogeoquímicos y los flujos de restos de peces (Campusano, 2013 y Salvattecchi, et al., 2019). Se utilizó la herramienta de los GAM para los flujos de vértebras de anchoqueta y escamas de anchoqueta. No se pudo realizar este mismo análisis para la razón de escamas de peces oceánicos entre escamas de anchoqueta por la abundancia de valores cero que restan robustez al análisis (fig. 37).

Debido a la distribución de los datos de flujos de vértebras de anchoqueta y escamas de merluza se ajustó a una distribución gamma inversa, la cual se estructuró de la siguiente forma:

el flujo de resto de peces sea vértebra de anchoveta o escamas de merluza  $\sim$  ti(IRPR) + s(Edad) + ti(Profundidad) + s(Latitud) + ti( $\delta^{15}\text{N}$ ) + ti(Si/Ti) + ti(COT) + ti(TSM) + ti(Insolación). Donde “s()” representa el modelo suavizado spline cubico y “ti” representa el producto tensorial de interacciones de la variable de entrada.

El GAM para los flujos de vértebras de anchoveta representa  $\sim$ 79% de la desviación de la varianza de los datos. Los flujos de vértebras de anchoveta muestran relación significativa con el IRPR, edad, profundidad, Si/Ti y TSM (Anexo 11). Sin embargo, no evidencian relación significativa con la  $\delta^{15}\text{N}$ , COT, latitud e insolación. Esto se puede interpretar como que la mayor abundancia de las poblaciones de anchoveta no tuvo relación con la desoxigenación ni manifiesta una distribución latitudinal pero sí estuvo asociada de manera positiva con la profundidad del testigo, como indicador de la distancia de la costa, varió con la elevación del nivel del mar. Asimismo se observa una relación negativa con la productividad silíceo (Si/Ti) y la TSM frente a la central del Perú durante T1 (fig. 38).

La relación negativa entre los flujos de vertebras de anchoveta y Si/Ti en el modelo GAM (fig. 38) se contradice con lo descrito previamente que evidencia una tendencia común entre los flujos de vertebras y Si/Ti promedio por periodo de tiempo (fig. 37). Esto puede deberse a la resolución temporal del análisis, la relación negativa en caso de modelo GAM refleje escalas temporales más finas donde es posible que ambos estuvieron en desfase, sin embargo cuando se realiza los análisis agrupados por periodo refleje la tendencia de las escalas más gruesa donde la tendencia es positiva.

También, se observa que la productividad exportada manifiesta una tendencia positiva en relación a los flujos de vértebras de anchoveta aunque esta no sea significativa.

Por otro lado, la TSM manifiesta una relación negativa con los flujos de vertebras de anchoveta donde la tendencia a la disminución es mayor entre 18 a 20°C. Esto nos indica una preferencia de las poblaciones de anchoveta por masas de agua más frías como en caso actual de las aguas costeras frías, caracterizados por una temperatura entre 14 a 19° y una salinidad de 34.8 a 35 psu (Swartzman et al., 2008). Además las poblaciones de anchoveta disminuyeron de manera constante desde 18 al 13 Kyr BP (fig. 38), posiblemente asociados a cambios oceanográficos sostenidos ocurridos durante T1.

Según lo expuesto previamente, se puede interpretar que las abundancias de las poblaciones de anchoveta fueron mayores a mayor profundidad o distancia a la costa asociado a las aguas costeras frías y favorecidas por la productividad silícea durante el T1 frente a la costa central del Perú.

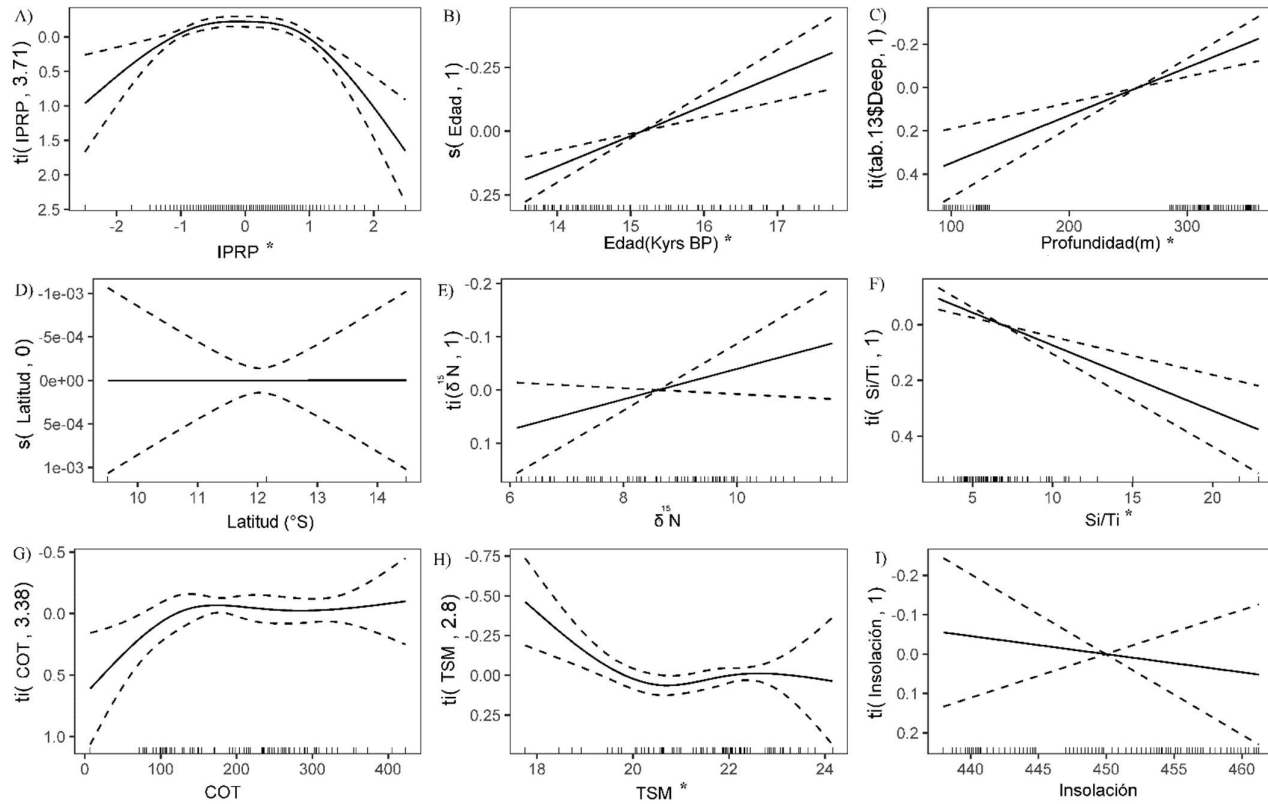


Figura 38. Modelo generalizado aditivo para los flujos de vértebras de Anchoveta versus las variables biogeoquímicas en los tres testigos durante ACR y HS1. A) Índice compuesto de preservación para los restos de peces (IPRP), B) Edad (Kyr BP), C) Profundidad (metros), D) Latitud ( $^{\circ}\text{S}$ ), E)  $\delta^{15}\text{N}$ , F) Si/Ti, G) COT, H) TSM, I) Insolación. Líneas cortas perpendicular al eje x en cada panel representa la presencia de dato utilizado en el modelo. \*: Variable con contribución significativa al modelo.

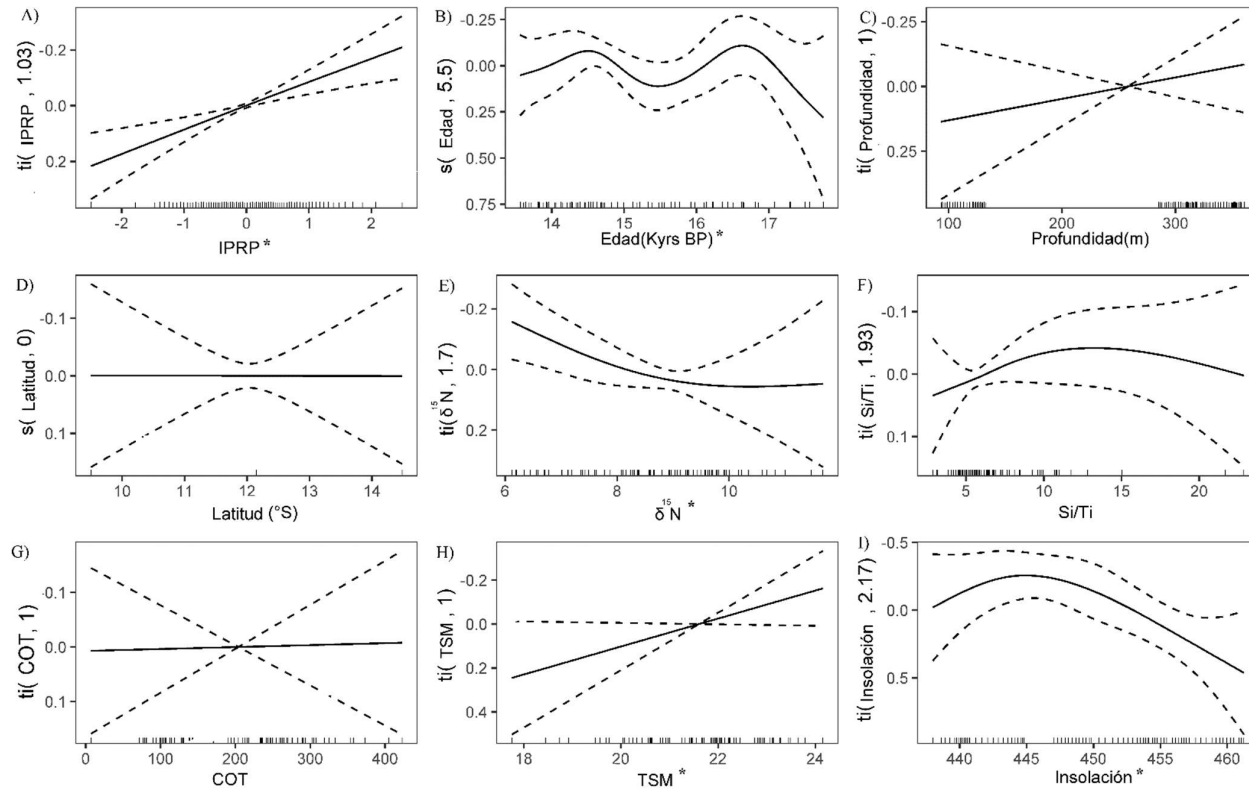


Figura 39. Modelo generalizado aditivo para los flujos de escamas de Merluza versus las variables biogeoquímicas en los tres testigos durante ACR y HS1 A) Índice compuesto de preservación para los restos de peces (IPRP), B) Edad (Kyr BP), C) Profundidad (metros), D) Latitud (°S), E)  $\delta^{15}\text{N}$ , F) Si/Ti, G) COT, H) TSM, I) Insolación. Líneas cortas perpendicular al eje x en cada panel representa la presencia de dato utilizado en el modelo. \*: Variable con contribución significativa al modelo.

El GAM para los flujos de escamas de merluza representa ~70.30% de la desviación de la varianza de los datos. Según la figura 42 los flujos de escamas de merluza evidencian relación significativa con la IRPR, edad,  $\delta^{15}\text{N}$ , TSM e insolación. Pero no demuestra relación con el COT, Si/Ti y con la posición latitudinal (Anexo 11). Esto puede interpretarse como que la mayor abundancia de las poblaciones de merluza estuvo modulada por la oxigenación, TSM e insolación frente a la costa central del Perú durante T1 (fig. 39). Por lo tanto, las poblaciones de merluza estuvieron moduladas por la oxigenación y TSM durante T1 (Anexo 11).

También se distingue que las abundancias de las poblaciones de merluza tendieron a aumentar desde 18 al 16.5 Kyrs BP. Después, se reporta otro aumento de las poblaciones de merluza en ~14.5 Kyrs BP causado por la disminución de  $\delta^{15}\text{N}$  (fig. 39).

En síntesis, los registros extraídos frente a la costa central del Perú sugieren que durante la desglaciación el incremento del nivel mar fue el principal factor que controló las poblaciones de los peces a escalas mileniales según los análisis previamente descritos (fig. 40).

Además, la oxigenación subsuperficial no juega un papel importante según los resultados frente a Callao y Chimbote para las poblaciones de anchoveta pero sí es importante para la distribución de las poblaciones de merluza.

La abundancia relativa de anchoveta frente Callao y Pisco durante la T1 fue menor en comparación a lo observado durante el CWP, relacionada a una menor producción exportada durante el T1 y una mayor, durante el CWP. Sin embargo, se evidencia una disminución de la dominancia de anchoveta frente a Chimbote comparando la T1 con el CWP (fig. 40)

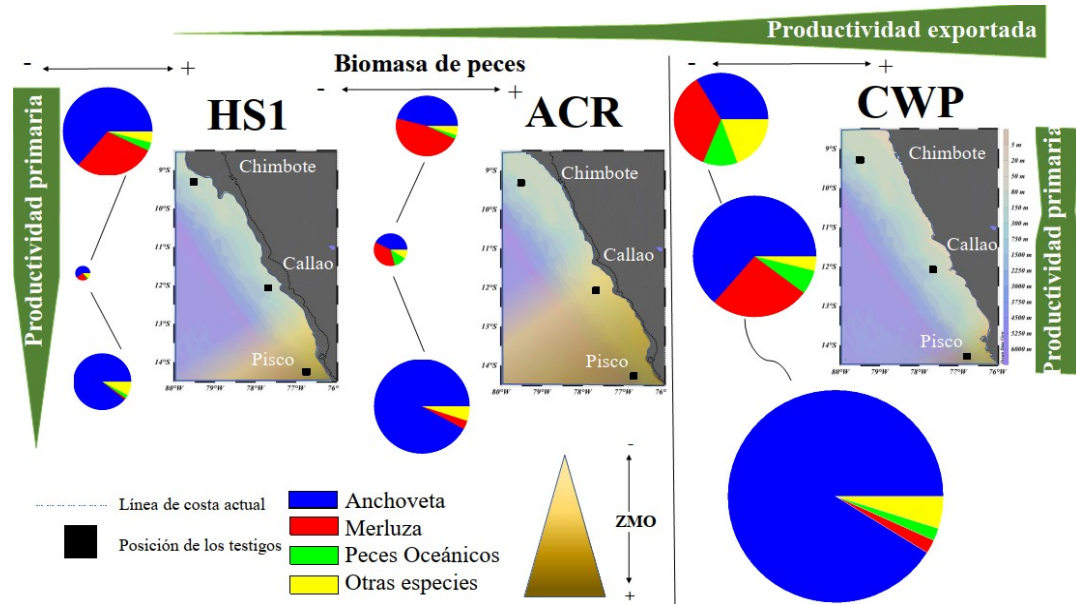


Figura 40. Esquema resumen de las poblaciones de peces bajo las condiciones de productividad y oxigenación frente a la costa central del Perú. El tamaño del gráfico circular en cada sitio representa la biomasa total de peces inferido por los flujos de restos de peces del presente trabajo (Gutiérrez, et al., 2009), (Campusano, 2013), (Salvatteci, et al, 2019<sup>a</sup>) basado de la tabla 4 y fig.39h. El indicador de productividad primaria latitudinal inferida por Si/Ti (Dr. Phillippe Martinez, comunicación personal) y clorofila A para CWP (Espinoza Morriberón, 2018). El indicador de productividad exportada desde T1 al CWP inferido por Ni EF (Salvatteci, et al, 2019<sup>a</sup>). El indicador que representa a la ZMO basado en  $\delta^{15}\text{N}$  con color amarillo claro a oscuro (Mollier-Vogel, 2012), (Yseki, 2018) y (Salvatteci, et al, 2019<sup>a</sup>).



Esta mayor magnitud de los flujos de restos peces frente a Chimbote que lo registrado en Callao y Pisco puede deberse a la ubicación de los testigos M77/2-029, M77/2-005-3 y G-14, los cuales estuvieron a ~12, 14 y 22 km de la línea de costa respectivamente durante HS1, pero con un talud continental mucho más costero frente a Chimbote y más bien más alejado frente a Callao (Anexo 5).

Esto habría propiciado una fertilización (e.g nitrógeno) originado por afloramiento y/o aporte fluvial, que favoreció el aumento de la productividad primaria (Checkley et al., 2017). Esto favoreció una mayor población de peces frente a Chimbote (fig. 40).

Los cambios de la línea de costa causados por el incremento de nivel del mar tuvieron otro papel al favorecer el afloramiento más intenso frente a Chimbote (9°S) y disminuyendo hacia sur. Esta idea es fundamentada por el aumento de la utilización de nutrientes ( $\delta^{30}\text{Si}$ ) y alta productividad por los flujos de sílice biogénica hacia el norte de la costa del Perú (Doering, et al.,2016). Este patrón se interpretó como que el núcleo de afloramiento costero se localizó entre 9 a 12°S durante T1. Posteriormente para el Holoceno el núcleo de afloramiento se habría desplazado hacia sur 15°S donde actualmente se encuentra (Doering, et al.,2016).

Un aspecto relevante a mencionar fue la dominancia de diatomeas asociada a afloramiento en 12°S durante T1 para el testigo 106-KL, el cual no siguió un patrón regional sino más bien local (Doering, et al.,2016). Posiblemente asociado al cambio de la forma de la línea de costa y una mayor turbulencia en una columna de agua somera (~60 metros) favoreció una alta productividad (Doering, et al.,2016).

Sin embargo, la ausencia de relación entre la productividad primaria (Si/Ti) y la biomasa de peces (flujos de huesos sin espinas) muestra que la productividad de diatomeas no sustentó la biomasa de peces frente a Callao para testigo M77/2-005-3.

La baja productividad de peces, especialmente anchoveta, y alta productividad de diatomeas ocurrieron en simultáneo frente a Callao durante T1. Un escenario de abruptos afloramientos locales seguido de prolongados períodos de relajamiento podría haber desfavorecido a la anchoveta y más bien favoreciendo a los peces oceánicos como jurel, caballa y sardina de manera local durante T1. En la actualidad la concentración de oxígeno frente a Callao es mayor que la observada en Chimbote y Pisco (fig. 10a), lo cual reforzaría la idea de un efecto local para este patrón.

El aumento de la productividad de las poblaciones de peces desde LGM hacia al CWP, está relacionado con el aumento de la productividad exportada (Salvatteci, et al., 2019<sup>a</sup>). Esta tendencia es muy marcada frente a Pisco y Callao (fig. 40), posiblemente asociada a la migración del núcleo de afloramiento hacia el sur (Doering, et al., 2016).

## VI. Conclusiones

- En cuanto a la hipótesis 1: “El aumento de la abundancia de anchoveta está asociada a una menor oxigenación en la columna de agua y una mayor productividad”, no hay evidencias que la apoyen, ya que solo se observa una relación positiva entre la menor oxigenación y las abundancias de las poblaciones de anchoveta frente a Pisco.
- La hipótesis 2: “La distribución latitudinal de la merluza depende de una mayor oxigenación en la columna de agua”. Se acepta esta hipótesis porque las poblaciones de merluza si manifiestan una relación con la oxigenación y la TSM que generan una gradiente latitudinal.
- La hipótesis 3: “Una mayor oxigenación dentro de la columna de agua favorece una mayor abundancia de los peces oceánicos en comparación a la anchoveta”. Esta última hipótesis no se puede rechazar o aceptar por la falta evidencias robustas. Sin embargo, las máximas abundancias relativas de los peces oceánicos han sido registradas para el ACR en Callao, y las mínimas frente a Pisco, coincidiendo con mayores valores de  $\delta^{15}\text{N}$  en ambos casos, lo que lleva a concluir que la oxigenación de la columna de agua no ha sido el factor de primer orden que controla la abundancia de peces oceánicos durante la Terminación 1.
- La productividad total de peces inferida por los flujos de huesos excluyendo espinas está asociada a la posición batimétrica del testigo que varía con el incremento del nivel del mar.

- La baja producción de peces en Callao durante T1 evidenciada en este estudio, pudo obedecer a un afloramiento local más débil que favoreció el ingreso de masas de aguas oceánicas asociado con el aumento de peces de jurel, caballa y sardina.
- La evolución temporal de la composición de los peces frente a la costa central del Perú mostró un aumento gradual de la dominancia de las poblaciones de anchoveta sobre otras especies frente a Pisco y Callao desde T1 al CWP. Pero frente a Chimbote la composición de los peces muestra una reducción de la dominancia de las poblaciones de Anchoveta que favoreció un aumento de poblaciones Merluza durante T1 al CWP, lo cual sugiere un desplazamiento al sur del núcleo de la anchoveta, asociado a la redistribución de los centros de surgencia, ya propuesto por otros autores.

## VII. Recomendaciones

- Estandarizar el efecto reservorio para las cuencas frente a Perú durante la T1 para mejorar la certeza de las cronologías, en particular cuando se trabaje con varios testigos del mismo periodo de tiempo.
- Se sugiere priorizar la extracción de testigos múltiples por la alta presencia de discontinuidades (Salvatteci et al., 2014), que además pertenezcan a una misma cuenca sedimentaria y en profundidades similares entre ~430-530 metros para evitar el efecto del incremento del nivel del mar que afecta la preservación de las laminaciones y la posición vertical de la ZMO.
- En futuros estudios, se sugiere aumentar el volumen de las muestras para el análisis de las abundancias y flujos de peces para mejorar la robustez de los datos en las ventanas de baja preservación.
- Se aconsejan revisar las condiciones de refrigeración del testigo después de la extracción. Debido que debido a que probablemente aparezca hongos que dañe los restos de organismos contenidos dentro de los sedimentos.
- Se sugiere que el uso de las razones de merluza entre anchoveta y peces oceánicos entre anchoveta es un buen indicador relativo de la abundancia de peces porque no depende de la tasa de acumulación, inclusive en condiciones de baja preservación de restos de peces. Por lo cual puede ser comparado con otros registros en diferentes resoluciones temporal

## VIII. Referencias Bibliográficas

- Agnihotri, R., Altabet, M. A., Herbert, T. D., & Tierney, J. E. (2008). Subdecadally resolved paleoceanography of the Peru margin during the last two millennia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(5).  
<https://doi.org/10.1029/2007GC001744>
- Aguilar, F. (1993). El recurso Jurel (*Trachurus murphyi*) en aguas ecuatorianas. *Boletín Científico y Técnico*, 12(2), 51–56.
- Alegre, A., Bertrand, A., Espino, M., Espinoza, P., Dioses, T., Ñiquen, M., Navarro, I., Simier, M., & Ménard, F. (2015). Diet diversity of jack and chub mackerels and ecosystem changes in the northern Humboldt Current system: A long-term study. *Progress in Oceanography*, 137, 299–313.  
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.07.010>
- Algeo, T. J., & Tribovillard, N. (2009). Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation. *Chemical Geology*, 268(3–4), 211–225.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.001>
- Alheit, J., & Niquen, M. (2004). Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. *Progress in Oceanography*, 60(2–4), 201–222.  
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2004.02.006>
- Altabet, M. A. (2006). Isotopic Tracers of the Marine Nitrogen Cycle : Present and Past. In J. K. Volkman (Ed.), *The Handbook of Environmental Chemistry: Vol. 2/N* (Issue 3, pp. 251–293). Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.
- Anderson, R. ., Ali, S., Bradtmiller, L. ., Nielsen, S. ., Fleisher, M. ., Anderson, B. ., & Burckle, L. H. (2009). Wind-driven upwelling in the Southern ocean and

the glacial rise in Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science Reports*, 323(5920), 1443–1448.  
<https://doi.org/DOI: 10.1126/science.1167441>

Aquino Diaz, U. B. (1974). *Estudio de los Aspectos Estructurales de las Escamas de Algunas de Nuestros Peces, Con Miras a su Aplicación Científica*. Universidad Nacional Federico Villareal.

Arcos, D. F., Cubillos, L. A., & Nuñez, S. P. (2001). The jack mackerel fishery and El Niño 1997–98 effects off Chile. *Progress in Oceanography*, 49, 597–617.

Arthur, M. A., Dean, W. E., & Laarkamp, K. (1998). Organic carbon accumulation and preservation in surface sediments on the Peru margin. *Chemical Geology*, 152(3–4), 273–286. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00120-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00120-X)

Ayón, P., Swartzman, G., Espinoza, P., & Bertrand, A. (2011). Long-term changes in zooplankton size distribution in the Peruvian Humboldt Current System: Conditions favouring sardine or anchovy. *Marine Ecology Progress Series*, 422, 211–222. <https://doi.org/10.3354/meps08918>

Bakun, A., Field, D. B., Redondo-Rodriguez, A., & Weeks, S. J. (2010). Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems. *Global Change Biology*, 16(4), 1213–1228. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x>

Barker, S., Diz, P., Vautravers, M. J., Pike, J., Knorr, G., Hall, I. R., & Broecker, W. S. (2009). Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation. *Nature*, 457(7233), 1097–1102. <https://doi.org/10.1038/nature07770>

Basak, C., Martin, E. E., Horikawa, K., & Marchitto, T. M. (2010). Southern Ocean source of <sup>14</sup>C-depleted carbon in the North Pacific Ocean during the last

deglaciation. *Nature Geoscience*, 3(11), 770–773.  
<https://doi.org/10.1038/ngeo987>

Baumgartner, T. R., Soutar, A., & Ferreira-Bartrina, V. (1992). Reconstruction of the history of pacific sardine and northern anchovy populations over the past two millennia from sediments of the santa barbara basin, california. *CalCOFI Rep.*, 33, 24–40.

Bertrand, A., Chaigneau, A., Peraltilla, S., Ledesma, J., Graco, M., Monetti, F., & Chavez, F. P. (2011). Oxygen: A fundamental property regulating pelagic ecosystem structure in the coastal southeastern tropical pacific. *PLoS ONE*, 6(12), 2–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029558>

Bertrand, A., Habasque, J., Hattab, T., Hintzen, N. T., Oliveros-Ramos, R., Gutiérrez, M., Demarcq, H., & Gerlotto, F. (2016). 3-D habitat suitability of jack mackerel *Trachurus murphyi* in the Southeastern Pacific, a comprehensive study. *Progress in Oceanography*, 146, 199–211.  
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.07.002>

Bertrand, A., Segura, M., Gutiérrez, M., & Vásquez, L. (2004). From small-scale habitat loopholes to decadal cycles: A habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru. *Fish and Fisheries*, 5(4), 296–316. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2679.2004.00165.x>

Böning, P., Brumsack, H. J., Böttcher, M. E., Schnetger, B., Kriete, C., Kallmeyer, J., & Borchers, S. L. (2004). Geochemistry of Peruvian near-surface sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(21), 4429–4451.  
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.04.027>

Bostock, H. C., Sutton, P. J., Williams, M. J. M., & Opdyke, B. N. (2013).



- Reviewing the circulation and mixing of Antarctic Intermediate Water in the South Pacific using evidence from geochemical tracers and Argo float trajectories. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 73, 84–98. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.11.007>
- Bouchon, M., Ñiquen C., M., Franco, M., & Titto, H. (2018). Estadística de la Pesquería en la Costa Peruana (1959-2015). *Inf. Instituto Del Mar Del Perú*, 45(4), 397–562.
- Bova, S. C., Herbert, T., Rosenthal, Y., Kalansky, J., Altabet, M. A., Chazen, C., Mojarro, A., & Zech, J. (2015). Links between eastern equatorial Pacific stratification and atmospheric CO<sub>2</sub> rise during the last deglaciation. *Paleoceanography RESEARCH*, 1–18. <https://doi.org/10.1002/2015PA002816>. Received
- Bräger, Z., & Moritz, T. (2016). A scale atlas for common Mediterranean teleost fishes. *Vertebrate Zoology*, 66(3), 275–386.
- Bräger, Z., Staszny, Á., Mertzen, M., Moritz, T., & Horváth, G. (2017). Fish scale identification: From individual to species-specific shape variability. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 47(4), 331–338. <https://doi.org/10.3750/AIEP/02245>
- Brodie, I., & Kemp, A. E. S. (1994). Variation in biogenic and detrital fluxes and formation of laminae in late Quaternary sediments from the Peruvian coastal upwelling zone. *Marine Geology*, 116(3–4), 385–398. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0025-3227(94)90053-1)
- Broecker, W. S. (1984). Terminations. In A. Berger, J. Imbrie, J. Hays, G. Kukla, & B. Saltzman (Eds.), *Milankovitch and climate-Understanding the Response to*

- Astronomical Forcing* (1st ed., Vol. 126, Issue Part 2, pp. 687–698). Springer Science+Business Media B.V. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(87\)90060-1](https://doi.org/10.1016/0034-6667(87)90060-1)
- Broecker, Wallace S. (1998). Paleoccean circulation during the last deglaciation: A bipolar seesaw? *Paleoceanography*, 13(2), 119–121. <https://doi.org/10.1029/97PA03707>
- Calienes, R. (2014). PRODUCCIÓN PRIMARIA EN EL AMBIENTE MARINO DEL PACÍFICO SUDESTE, PERU, 1960 – 2000. *Boletín Instituto Del Mar Del Perú*, 29(1), 1–308.
- Campusano, F. A. (2013). *Variabilidad mileneal de las poblaciones de peces inferidas a partir de escamas de peces y restos óseos en sedimentos laminados frente a Chimbote, desde la Última Deglaciación al inicio Holoceno*. Universidad Peruana Cayetano Heredia.
- Campusano, F. A. (2015). *Estado de Preservación de Restos Escamas y Esqueletos Óseos de peces en los Sedimentos marinos frente a Perú*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO.
- Cardich, J., Sifeddine, A., Salvattecchi, R., Romero, D., Briceño-Zuluaga, F., Graco, M., Anculle, T., Almeida, C., & Gutiérrez, D. (2019). Multidecadal Changes in Marine Subsurface Oxygenation Off Central Peru During the Last ca. 170 Years. *Frontiers in Marine Science*, 6(May), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00270>
- Castillo, R., Dalla Rosa, L., García Diaz, W., Madureira, L., Gutierrez, M., Vásquez, L., & Koppelman, R. (2019). Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017. *Fisheries Oceanography*, 28(4), 389–401. <https://doi.org/10.1111/fog.12419>

- Castro, J. J., & Santana, A. T. (2000). Synopsis of Biological Data on The Chub Marckerel (*Scomber japonicus* Houttuyn, 1782). In *FAO Fishery Synopsis* (Vol. 39, Issue 157). Food & Agriculture Organization of the United Nations.
- Chaigneau, A., Dominguez, N., Eldin, G., Vasquez, L., Flores, R., Grados, C., & Echevin, V. (2013). Near-coastal circulation in the Northern Humboldt Current System from shipboard ADCP data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *118*(10), 5251–5266. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20328>
- Chamorro, A., Echevin, V., Dutheil, C., Tam, J., Gutiérrez, D., & Colas, F. (2021). Projection of upwelling-favorable winds in the Peruvian upwelling system under the RCP8.5 scenario using a high-resolution regional model. *Climate Dynamics*, *0123456789*. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05689-w>
- Chavéz, F. P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P., & Csirke, J. (2008). The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, *79*(2–4), 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.012>
- Chavéz, F. P., Ryan, J., Lluch-Cota, S. E., & Niquen C, M. (2003). From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science Climate*, *299*(5604), 217–221. <https://doi.org/10.1126/science.1075880>
- Checkley, D. M., Asch, R. G., & Rykaczewski, R. R. (2017). Climate, Anchovy, and Sardine. *Annual Review of Marine Science*, *9*(1), 469–493. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-122414-033819>
- Clark, P., Shakun, J., Baker, P. A., Bartlein, P., Brewer, S., Brook, E., Carlson, A., Cheng, H., Kaufmann, D., Liu, Z., Marchitto, T., Mix, A., Morrill, C., Otto-Bliesner, B., Pahnke, K., Russell, J., Whitlock, C., Adkins, J., Blois, J., ...

- Williams, J. (2012). Global climate evolution during the last deglaciation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(19), 1134–1142. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116619109/-/DCSupplemental.www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1116619109>
- Clark, P. U., & Mix, A. C. (2002). Ice sheets and sea level of the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, *21*(1–3), 1–7. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00118-4)
- Cornejo, R., & Koppelman, R. (2006). Distribution patterns of mesopelagic fishes with special reference to *Vinciguerria lucetia* Garman 1899 (Phosichthyidae: Pisces) in the Humboldt Current Region off Peru. *Marine Biology*, *149*(6), 1519–1537. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0319-z>
- Cury, P., & Roy, C. (1989). Optimal Environmental Window and Pelagic fish Recruitment Success in Upwelling Areas. *Can. Js Fish. Aquae. Sci.*, *46*, 670–680.
- De Vries, T. J., & Percy, W. G. (1982). Fish debris in sediments of the upwelling zone off central Peru: a late Quaternary record. *Deep Sea Research*, *29*(1), 87–109. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(82\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0198-0149(82)90063-2)
- De Vries, T. J., & Schrader, H. (1981). Variation of upwelling/oceanic conditions during the latest Pleistocene through Holocene off the central Peruvian coast: A diatom record. *Marine Micropaleontology*, *6*(2), 157–167. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(81\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0377-8398(81)90003-7)
- Denton, G. H., Anderson, R. F., Toggweiler, J. R., Edwards, R. L., Schaefer, J. M., & Putnam, A. E. (2010). The Last Glacial Termination. *Science*, *328*, 1652–1656. <https://doi.org/10.1126/science.1184119>

- Deutsch, C., Ferrel, A., Seibel, B., Pörtner, H.-O., & Huey, R. B. (2015). Climate change tightens a metabolic constraint on marine habitats. *Research Reports*, 348(6239), 1132–1136. <https://doi.org/10.1126/science.aaa1605>
- Díaz-Ochoa, J. A., Lange, C. B., Pantoja, S., De Lange, G. J., Gutiérrez, D., Muñoz, P., & Salamanca, M. (2009). Fish scales in sediments from off Callao, central Peru. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16), 1113–1124. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.09.015>
- Dioses, T. (2013). Abundance and distribution patterns of Jack mackerel *Trachurus murphyi* in Peru. *Revista Peruana de Biología*, 20(20), 67–74.
- Doering, K., Ehlert, C., Grasse, P., Crosta, X., Fleury, S., Frank, M., & Schneider, R. (2016). Differences between mono-generic and mixed diatom silicon isotope compositions trace present and past nutrient utilisation off Peru. *GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA*, 177, 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.12.029>
- Doering, K., Erdem, Z., Ehlert, C., Fleury, S., Frank, M., & Schneider, R. (2016). Changes in diatom productivity and upwelling intensity off Peru since the Last Glacial Maximum: Response to basin-scale atmospheric and oceanic forcing. *Paleoceanography*, 31, 1–21. <https://doi.org/10.1002/2016PA002936>
- Droser, M., & Bottjer, D. (1986). A semiquantitative field classification of ichnofabric. *Journal of Sedimentary Research*, 558–559. <http://jsedres.sepmonline.org/content/56/4/558.short>
- Echevin, V., Gévaudan, M., Espinoza-Morriberón, D., Tam, J., Aumont, O., Gutierrez, D., & Colas, F. (2020). Physical and biogeochemical impacts of RCP8.5 scenario in the Peru upwelling system. *Biogeosciences*, 17(12), 3317–

3341. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3317-2020>

Emiliani, C. (1955). Pleistocene temperatures1. *The Journal of Geology*, 63(6), 538–578.

Erdem, Z., Schönfeld, J., Glock, N., Dengler, M., Mosch, T., Sommer, S., Elger, J., & Eisenhauer, A. (2016). Peruvian sediments as recorders of an evolving hiatus for the last 22 thousand years. *Quaternary Science Reviews*, 137, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.01.029>

Erdem, Z., Schönfeld, J., Rathburn, A. E., Pérez, M.-E., Cardich, J., & Glock, N. (2020). Bottom-water deoxygenation at the Peruvian margin during the last deglaciation recorded by benthic foraminifera. *Biogeosciences*, 17(12), 3165–3182. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3165-2020>

Espino, M., Castillo, R., & Fernandez, F. (1995). Biology and fisheries of Peruvian hake (*M gayi peruanus*). In J. Alheit & T. J. Pitcher (Eds.), *Hake: Biology, fisheries and markets Volumen 15 de Fish & Fisheries Series* (2012th ed., Vol. 15, pp. 339–363). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Gutierrez, D., Graco, M., Ledesma, J., & Quispe-Ccalluari, C. (2019). Oxygen Variability During ENSO in the Tropical South Eastern Pacific. *Frontiers in Marine Science*, 5(January). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00526>

Espinoza Morriberón, D. (2018). *Interannual and decadal variability of the primary productivity and oxygen Minimum Zone in the Peruvian Upwelling System*. Sorbonne Université l'Ecole.

Evseenko, S. A. (2008). On the morphology of the early life history stages of

- lanternfish genus *Triphoturus* (Myctophidae) and distribution of *T. oculum* larvae in southeastern waters of the Pacific Ocean. *Journal of Ichthyology*, 48(2), 162–176. <https://doi.org/10.1007/s11489-008-2003-2>
- Field, D. B., Baumgartner, T. R., Ferreira, V., Gutiérrez, D., & Lozano-montes, H. (2009). Variability from scales in marine sediments and other historical records. In D. Checkley, C. Roy, J. Alheit, & Y. Oozeki (Eds.), *Climate and Small Pelagic Fish* (pp. 45–63). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511596681.006>
- Fink, J. K. (2016). Marine Waterborne , and Water Resistant Polymers - Chemistry and Applications. In *Scrivener Publishing-Wiley*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Finney, B. P., Alheit, J., Emeis, K. C., Field, D. B., Gutiérrez, D., & Struck, U. (2010). Paleocological studies on variability in marine fish populations: A long-term perspective on the impacts of climatic change on marine ecosystems. *Journal of Marine Systems*, 79(3–4), 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.12.010>
- Flores, R., Tenorio, J., & Domínguez, N. (2009). Variation of the Cromwell Current Southern Extension off Peru between 3 and 14°S. *Boletín Del Instituto Del Mar Del Perú*, 24(1,2), 45–58.
- Fréon, P., Cury, P., Shannon, L., & Roy, C. (2005). Sustainable exploitation of small pelagic fish stocks challenged yby environmental and ecosystems changes: A review. *Bulletin of Marine Science*, 76(2), 385–462.
- Fritz, C. O., Morris, P. E., & Richler, J. J. (2012). Effect size estimates: Current use, calculations, and interpretation. *Journal of Experimental Psychology: General*,

141(1), 2–18. <https://doi.org/10.1037/a0024338>

Fuenzalida, R., Schneider, W., Garcés-Vargas, J., Bravo, L., & Lange, C. (2009).

Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16), 992–1003. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.11.001>

Gerlotto, F., Gutiérrez, M., & Bertrand, A. (2012). Insight on population structure of the Chilean jack mackerel ( *Trachurus murphyi* ). *Aquatic Living Resources*, 25(4), 341–355. <https://doi.org/10.1051/alr/2012036>

Graham, N. E., Ammann, C. M., Fleitmann, D., Cobb, K. M., & Luterbacher, J. (2011). Support for global climate reorganization during the “Medieval Climate Anomaly .” *Clim. Dynam.*, 37, 1217–1245. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0914-z>

Gruber, N. (1997). Global pattern of marine nitrogen fixation and denitrification. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(1), 235–266. <https://doi.org/10.1029/97GB00077>

Guevara-Carrasco, R., & Wosnitza-Mendo, C. (2009). Cambios en la productividad de la merluza peruana (*Merluccius gayi peruanus* Ginsburg). *Boletín Del Instituto Del Mar Del Perú Instituto Del Mar Del Peru*, 24(1–2), 15–20.

Gutiérrez, D., Sifeddine, A., Field, D. B., Ortlieb, L., Vargas, G., Chávez, F., Velazco, F., Ferreira, V., Tapia, P., Salvattecí, R., Boucher, H., Morales, M. C., Valdés, J., Reyss, J.-L., Campusano, A., Boussafir, M., Mandeng-Yogo, M., García, M., & Baumgartner, T. (2009). Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the Little Ice Age. *Biogeosciences Discussions*, 5(5), 3919–3943. <https://doi.org/10.5194/bgd-5->



3919-2008

- Gutiérrez, D., Sifeddine, A., Reyss, J. L., Vargas, G., Velazco, F., Salvattecí, R., Ferreira, V., Ortlieb, L., Field, D., Baumgartner, T. R., Boussafir, M., Boucher, H., Valdés, J., Marinovic, L., Soler, P., & Tapia, P. (2006). Anoxic sediments off Central Peru record interannual to multidecadal changes of climate and upwelling ecosystem during the last two centuries. *Advances in Geosciences*, 6, 119–125. <https://doi.org/10.5194/adgeo-6-119-2006>
- Gutiérrez, Dimitri, Bertrand, A., Wosnitza-mendo, C., Dewitte, B., Purca, S., Peña, C., Chaigneau, A., Graco, M., Echevin, V., Grados, C., & Guevara-Carrasco, R. (2011). Sensibilidad del sistema de afloramiento costero del Perú al cambio climático e implicancias ecológicas Sensitivity of the Peruvian upwelling system to climate change and ecological implications. *Revista Peruana Geo Atmosférica*, 26(3), 1–24.
- Gutiérrez, Dimitri, Bouloubassi, I., Sifeddine, A., Purca, S., Goubanova, K., Graco, M., Field, D., Méjanelle, L., Velazco, F., Lorre, A., Salvattecí, R., Quispe, D., Vargas, G., Dewitte, B., & Ortlieb, L. (2011). Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century. *Geophysical Research Letters*, 38(7), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2010GL046324>
- Gutiérrez, M., Swartzman, G., Bertrand, A., & Bertrand, S. (2007). Anchovy (*Engraulis ringens*) and sardine (*Sardinops sagax*) spatial dynamics and aggregation patterns in the Humboldt Current ecosystem, Peru, from 1983-2003. *Fisheries Oceanography*, 16(2), 155–168. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2006.00422.x>

- Heinrich, H. (1988). Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*, 29(2), 142–152. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(88\)90057-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90057-9)
- Helly, J. J., & Levin, L. A. (2004). Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(9), 1159–1168. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.03.009>
- Instituto Del Mar Del Perú. (2013). *Anuario Científico Tecnológico IMARPE 2013* (V. V. Milla & J. V. Diéguez (eds.); Vol. 13). Anu. cient. tecnol. IMARPE.
- Instituto Del Mar Del Perú. (2014). *Anuario Científico Tecnológico IMARPE 2014* (V. V. Milla & J. V. Diéguez (eds.); Vol. 14). Instituto del Mar del Perú.
- Jaccard, S., Galbraith, E., Frölicher, T. L. ., & Gruber, N. (2014). Ocean (de)oxygenation across the last deglaciation: Insights for the future. *Oceanography. The Oceanography Society.*, 27(1), 26–35. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2011.65>
- Jaccard, S. L., & Galbraith, E. D. (2012). Large climate-driven changes of oceanic oxygen concentrations during the last deglaciation. *Nature Geoscience*, 5(2), 151–156. <https://doi.org/10.1038/ngeo1352>
- Javier A. Díaz Ochoa. (2008). Preservación del registro de escamas de peces en sedimentos del margen continental Chile- Perú y su utilidad en reconstrucciones paleo-ecológicas [Universidad de Concepción]. In *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kavanagh, L., & Galbraith, E. (2018). Links between fish abundance and ocean

- biogeochemistry as recorded in marine sediments. *PLoS ONE*, 13(8), 1–22.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199420>
- Kemp, A. E. S. (1990). Sedimentary fabrics and variation in lamination style in Peru continental margin upwelling sediments. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* (Vol. 112, pp. 43–58).
- Kiefer, T., & Kienast, M. (2005). Patterns of deglacial warming in the Pacific Ocean: A review with emphasis on the time interval of Heinrich event 1. *Quaternary Science Reviews*, 24(7-9 SPEC. ISS.), 1063–1081.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.02.021>
- Koutavas, A. (2002). El Niño – Like Pattern in Ice Age Tropical Pacific Sea Surface Temperature. *Science Reports*, 226, 226–230.  
<https://doi.org/10.1126/science.1072376>
- Koutavas, A. (2018). Temperature correlations between the eastern equatorial Pacific and Antarctica over the past 230,000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 485, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.041>
- Koutavas, A., & Joanides, S. (2012). El Niño-Southern Oscillation extrema in the Holocene and Last Glacial Maximum. *Paleoceanography*, 27(4), 1–15.  
<https://doi.org/10.1029/2012PA002378>
- Lam, P., Lavik, G., Jensen, M. M., Schmid, J. van de V. M., Woebken, D., Gutiérrez, D., Amann, R., Jetten, M. S. M., & Kuypers, M. M. M. (2009). Revising the nitrogen cycle in the Peruvian oxygen minimum zone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(12), 4752–4757.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0812444106>
- Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y., & Sambridge, M. (2014). Sea level

and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(43), 15296–15303. <https://doi.org/10.1073/pnas.1411762111>

Lamy, F., Kaiser, J., Arz, H. W., Hebbeln, D., Ninnemann, U., Timm Oliver, Timmermann, A., & Toggweiler, J. R. (2007). Modulation of the bipolar seesaw in the Southeast Pacific during Termination 1. *Earth and Planetary Science Letters*, 259(2), 400–413. <https://doi.org/10.1029/2005PA001154>

Laskar, J., P. Robutel, Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A. C. M., & Levrard, B. (2004). Long-term solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428(1), 261–285. <https://doi.org/10.1017/S1743921307011404>

Leduc, G., Schneider, R., Kim, J. H., & Lohmann, G. (2010). Holocene and Eemian sea surface temperature trends as revealed by alkenone and Mg/Ca paleothermometry. *Quaternary Science Reviews*, 29(7–8), 989–1004. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.01.004>

Lehodey, P., Alheit, J., Barange, M., Baumgartner, T. R., Beaugrand, G., Drinkwater, K., Fromentin, J. M., Hare, S. R., Ottersen, G., Perry, R. I., Roy, C., van der Lingen, C. D., & Werner, F. (2006). Climate variability, fish, and fisheries. *Journal of Climate*, 19(20), 5009–5030. <https://doi.org/10.1175/JCLI3898.1>

Lepiksaar, J. (1994). *Introduction to osteology of fishes for paleozoologists*. 96.

Marchitto, T. M., Lehman, S. J., Ortiz, J. D., Flückiger, J., & Geen, A. van. (2007). Marine Radiocarbon Evidence for the Mechanism of Deglacial Atmospheric CO<sub>2</sub> Rise. *Science*, 316(5830), 1456–1459.

- Martin, W. R., & F. L. Sayles. (2003). Sediments Diagenesis, And sedimentary Rocks. In F. T. Macke (Ed.), *Elsevier B.V* (1 st editi, Vol. 7, pp. 37–65).  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., Imbrie, J., Moore, T. C., & Shackleton, N. J. (1987). Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high resolution 0 to 300 000 year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27(3994), 1–29. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(87\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(87)90046-9)
- Mazzullo, J., Gilbert Grahma, A., & Braunstein, C. (1988). Handbook for shipboard sedimentologists. In *Handbook for shipboard sedimentologists* (1st ed). Ocean Drilling Program. Technical Note 8.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2973/odp.tn.8.1988>
- Miller, M. F., & Smail, S. E. (1997). A semiquantitative field method for evaluating bioturbation on bedding planes. *Palaios*, 12(4), 391–396.  
<https://doi.org/10.2307/3515338>
- Moffitt, S. E., Moffitt, R. A., Sauthoff, W., Davis, C. V., Hewett, K., & Hill, T. M. (2015). Paleooceanographic insights on recent oxygen minimum zone expansion: Lessons for modern oceanography. *PLoS ONE*, 10(1), 1–39.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115246>
- Mollier-Vogel, E. (2012). *Peruvian Oxygen Minimum Zone dynamics during the last 18 000 years*. University of kiel.
- Mollier-Vogel, E., Ryabenko, E., Martinez, P., Wallace, D., Altabet, M. A., & Schneider, R. (2012). Nitrogen isotope gradients off Peru and Ecuador related to upwelling, productivity, nutrient uptake and oxygen deficiency. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 70, 14–25.

<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.06.003>

- Montes, I., Dewitte, B., Gutknecht, E., Paulmier, A., Dadou, I., Oschlies, A., & Garçon, V. (2014). High-resolution modeling of the Eastern Tropical Pacific oxygen minimum zone: Sensitivity to the tropical oceanic circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 8(119), 5515–5532. <https://doi.org/10.1002/2014JC009858>. Received
- Morón, O. (2000). Características del Ambiente Marino frente a la Costa Peruana. *Imarpe*, 19(1–2), 28.
- Mulder, A., van de Graaf, A. A., Robertson, L. A., & Kuenen, J. G. (1995). Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. *FEMS Microbiology Ecology*, 16(3), 177–183. [https://doi.org/10.1016/0168-6496\(94\)00081-7](https://doi.org/10.1016/0168-6496(94)00081-7)
- Muratli, J. M., Chase, Z., Mix, A. C., & McManus, J. (2010). Increased glacial-age ventilation of the Chilean margin by Antarctic Intermediate Water. *Nature Geoscience*, 3(1), 23–26. <https://doi.org/10.1038/ngeo715>
- Ñiquen, M., & Bouchon, M. (2004). Impact of El Niño events on pelagic fisheries in Peruvian waters. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6–9), 563–574. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.03.001>
- Ñiquen, M., Bouchon, M., Cahuin, S., & Valdez, J. (1999). Efectos del fenómeno “El Niño 1997-98” sobre los principales recursos pelágicos en la costa peruana. *Revista Peruana de Biología*, 6(3), 85–96.
- Nürnberg, D., Bösch, T., Doering, K., Mollier-Vogel, E., Raddatz, J., & Schneider, R. (2015). Sea surface and subsurface circulation dynamics off equatorial Peru during the last ~17 kyr. *Paleoceanography*, 30(7), 984–999.

<https://doi.org/10.1002/2014PA002706>

- O'Connell, J. M., & Tunnicliffe, V. (2001). The use of sedimentary fish remains for interpretation of long-term fish population fluctuations. *Elsevier Marine Geology*, 174(1–4), 19. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00149-3](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00149-3)
- Ortlieb, L., Vargas, G., & Saliège, J. F. (2011). Marine radiocarbon reservoir effect along the northern Chile-southern Peru coast (14–24°S) throughout the Holocene. *Quaternary Research*, 75(1), 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.07.018>
- Owens, N. J. . (1988). Natural Variations in  $^{15}\text{N}$  in the Marine Environment. In *Advances in Marine Biology* (Vol. 24, pp. 389–451). Academic Press Ltd. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2881\(08\)60077-2](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2881(08)60077-2).
- Pastor, R., Zavalaga, F., & Palacios, J. (2018). CARACTERIZACIÓN DE LA COMUNIDAD BENTODEMERSAL QUE COHABITA CON LA MERLUZA *Merluccius gayi peruanus* Ginsburg ENTRE LA FRONTERA NORTE DEL DOMINIO MARÍTIMO PERUANO Y HUARMEY 2015. *Informe Instituto Del Mar Del Peru*, 45(1), 104–121. <https://doi.org/ISSN0378-770>
- Patterson, R. T., Wright, C., Chang, A. S., Taylor, L. a, Lyons, P. D., Dallimore, A., & Kumar, A. (2002). Atlas of common squamatological (Fish scale) material in coastal British Columbia and an assessment of the utility of various scale types in paleofisheries reconstruction. *Paleontologica Electronica*, 4(1), 1–88.
- Peters, T., & Richter, M. (2014). The Atmospheric Circulation. In M. Köhl & L. Pancel (Eds.), *Tropical Forestry Handbook* (pp. 1–24). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1111/btp.12004>

- Raymo, M. E. (1997). The timing of major climate terminations. *Paleoceanography*, 12(4), 577–585. <https://doi.org/10.1029/97PA01169>
- Reimer, P., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Buck, C. E., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hafliðason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T. J., Hoffmann, D. L., Hogg, A. G., Hughen, K. A., ... Plicht, J. van der. (2013). IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1869–1887. [https://doi.org/10.2458/azu\\_js\\_rc.55.16947](https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947)
- Rein, B., Luckge, A., Reinhardt, L., Sirocko, F., Wolf, A., & Dullo, W. C. (2005). El Niño variability off Peru during the last 20,000 years. *Paleoceanography*, 20(4), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2004PA001099>
- Rein, B., Lückge, A., & Sirocko, F. (2004). A major Holocene ENSO anomaly during the Medieval period. *Geophysical Research Letters*, 31(17), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2004GL020161>
- Rein, B., & Sirocko, F. (2002). In-situ reflectance spectroscopy - Analysing techniques for high-resolution pigment logging in sediment cores. *International Journal of Earth Sciences*, 91(5), 950–954. <https://doi.org/10.1007/s00531-002-0264-0>
- Rein, Bert, Sirocko, F., Andreas, L., Lutz, R., Anja, W., & Wolf-Christian, D. (2004). Abrupt Change of El Niño Activity off Peru During Stage MIS 5e-d. *Developments in Quaternary Science*, 7(17), 305–321.
- Salazar, C. M., Chacón, G. P., & Vargas, R. F. (2000). DISTRIBUCION VERTICAL DE LA VINCIGUERRIA, ESTRATEGIAS DE PESCA Y



COMPORTAMIENTO DE LA RED DE ARRASTRE PELAGICA TIPO 124/1800. CRUCERO BIC JOSE OLAYA BALANDRA 9910. *Informe Instituto Del Mar Del Peru*, 156, 7–17.

Salvatteci, R., Gutiérrez, D., Field, D., Sifeddine, A., Ortlieb, L., Bouloubassi, I., Boussafir, M., Boucher, H., & Cetin, F. (2014). The response of the Peruvian Upwelling Ecosystem to centennial-scale global change during the last two millennia. *Climate of the Past*, 10(2), 715–731. <https://doi.org/10.5194/cp-10-715-2014>

Salvatteci, Renato. (2008). *Flujos y preservación de escamas y restos óseos de peces en la zona de mínimo de oxígeno frente a Pisco, Perú en los últimos 400 años*. Universidad de Baja California.

Salvatteci, Renato. (2013). *Multi-decadal to millennial scale variability in Oxygen Minimum Zone intensity, export production and pelagic fish abundances from marine laminated sediments off Pisco, Peru during the last 25 000 years*. Université Pierre et Marie Curie.

Salvatteci, Renato, Field, D. B., Baumgartner, T. R., Ferreira, V., & Gutiérrez, D. (2012). Evaluating fish scale preservation in sediment records from the oxygen minimum zone off Peru. *Paleobiology*, 38(1), 52–78. <https://doi.org/10.1666/10045.1>

Salvatteci, Renato, Field, D., Gutiérrez, D., Baumgartner, T., Ferreira, V., Ortlieb, L., Sifeddine, A., Grados, D., & Bertrand, A. (2017). Multifarious anchovy and sardine regimes in the Humboldt Current System during the last 150 years. *Global Change Biology*, April 2017, 1055–1068. <https://doi.org/10.1111/gcb.13991>

- Salvatteci, Renato, Field, D., Sifeddine, A., Ortlieb, L., Ferreira, V., Baumgartner, T. R., Caquineau, S., Velazco, F., Reyss, J. L., Sanchez-Cabeza, J. A., & Gutierrez, D. (2014). Cross-stratigraphies from a seismically active mud lens off Peru indicate horizontal extensions of laminae, missing sequences, and a need for multiple cores for high resolution records. *Marine Geology*, *357*, 72–89. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.07.008>
- Salvatteci, Renato, Gutierrez, D., Field, D., Sifeddine, A., Ortlieb, L., Caquineau, S., Baumgartner, T., Ferreira, V., & Bertrand, A. (2019). Fish debris in sediments from the last 25 kyr in the Humboldt Current reveal the role of productivity and oxygen on small pelagic fishes. *Progress in Oceanography*, *176*(August 2018), 102114. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.05.006>
- Salvatteci, Renato, Gutiérrez, D., Sifeddine, A., Ortlieb, L., Druffel, E., Boussafir, M., & Schneider, R. (2016). Centennial to millennial-scale changes in oxygenation and productivity in the Eastern Tropical South Pacific during the last 25,000 years. *Quaternary Science Reviews*, *131*, 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.10.044>
- Salvatteci, Renato, Schneider, R. R., Blanz, T., & Mollier-Vogel, E. (2019). Deglacial to Holocene Ocean Temperatures in the Humboldt Current System as Indicated by Alkenone Paleothermometry. *Geophysical Research Letters*, *46*(1), 281–292. <https://doi.org/10.1029/2018GL080634>
- Sánchez, G., Calienes, R., & Zuta, S. (2000). The 1997-98 El Niño and its effects on the coastal marine ecosystem off Peru. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, *41*, 62–86.
- Schimmelmann, A., Lange, C. B., Schieber, J., Francus, P., Ojala, A. E. K., &

- Zolitschka, B. (2016). Varves in marine sediments: A review. *Earth-Science Reviews*, 156, 215–246.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.04.009>
- Schmidtko, S., Stramma, L., & Visbeck, M. (2017). Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature*, 542(7641), 335–339.  
<https://doi.org/10.1038/nature21399>
- Sifeddine, A., Gutiérrez, D., Ortlieb, L., Boucher, H., Velazco, F., Field, D., Vargas, G., Boussafir, M., Salvattecí, R., Ferreira, V., García, M., Valdés, J., Caquineau, S., Mandeng Yogo, M., Cetin, F., Solis, J., Soler, P., & Baumgartner, T. R. (2008). Laminated sediments from the central Peruvian continental slope: A 500 year record of upwelling system productivity, terrestrial runoff and redox conditions. *Progress in Oceanography*, 79(2–4), 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.024>
- Sikes, E. L., Cook, M. S., & Guilderson, T. P. (2016). Reduced deep ocean ventilation in the Southern Pacific Ocean during the last glaciation persisted into the deglaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 438, 130–138.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.039>
- Soutar, A. (1967). The accumulation of fish debris in certain California coastal sediments. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Fisheries Investigations*, 11, 136–139.
- Soutar, A., & Isaacs, J. D. (1969). History of fish populations inferred from fish scales in Anaerobic sediments off California. *Calif.Mar.Res.Comm.CalCOFI*, 13(63–70), 8.
- Soutar, A., & Isaacs, J. D. (1974). Abundance of pelagic fish during the 19th and

- 20th centuries as recorded in anaerobic sediment off the Californias. *Fish. Bull. US*, 72(2), 257–273. <http://fishbull.noaa.gov/72-2/soutar.pdf>
- Spratt, R. M., & Lisiecki, L. E. (2016). A Late Pleistocene sea level stack. *Climate of the Past*, 12(4), 1079–1092. <https://doi.org/10.5194/cp-12-1079-2016>
- Stocker, T. F. (2003). A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. *Palaeogeography*, 18(4), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2003PA000920>
- Stramma, L., Johnson, G. C., Sprintall, J., & Mohrholz, V. (2008). Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science (New York, N.Y.)*, 320(5876), 655–658. <https://doi.org/10.1126/science.1153847>
- Stramma, L., Schmidtko, S., Bograd, S., Ono, T., Ross, T., Sasano, D., & Whitney, F. (2019). The influence of decadal oscillations on the oxygen and nutrient trends in the Pacific Ocean. *Biogeosciences Discussions*, March, 1–38. <https://doi.org/10.5194/bg-2019-91>
- Stramma, L., Schmidtko, S., Levin, L. A., & Johnson, G. C. (2010). Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(4), 587–595. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2010.01.005>
- Stuiver, M., & Reimer, P. J. (1993). EXTENDED 14C DATA BASE AND REVISED CALIB 3.014C AGE CALIBRATION PROGRAM. *Radiocarbon*, 35(1), 215–230. <https://doi.org/10.14210/bjast.v17.n2.pNB5-8>
- Suess, E. (1981). Phosphate regeneration from sediments of the Peru continental margin by dissolution of fish debris. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(4), 577–588. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(81\)90191-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(81)90191-5)
- Swartzman, G., Bertrand, A., Gutiérrez, M., Bertrand, S., & Vasquez, L. (2008).

- The relationship of anchovy and sardine to water masses in the Peruvian Humboldt Current System from 1983 to 2005. *Progress in Oceanography*, 79(2–4), 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.021>
- Tarazona, J., Gutiérrez, D., Paredes, C., & Indacochea, A. (2003). Overview and Challenges of Marine Biodiversity Research in Peru Una Revision Y Desafios Para La Investigacion En Biodiversidad Marina En Peru. *Gayana*, 67(2), 206–231.
- Tomczak, M., & Tomczak, E. (2014). The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. *Trends in Sport Sciences*, 1(21), 19–25. [http://www.wbc.poznan.pl/Content/325867/5\\_Trends\\_Vol21\\_2014\\_no1\\_20.pdf](http://www.wbc.poznan.pl/Content/325867/5_Trends_Vol21_2014_no1_20.pdf)
- Tribovillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., & Riboulleau, A. (2006). Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chemical Geology*, 232(1–2), 12–32. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012>
- Tunnicliffe, V., O’Connell, J. M., & McQuoid, M. R. (2001). A Holocene record of marine fish remains from the Northeastern Pacific. *Marine Geology*, 174(1–4), 197–210. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00150-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00150-X)
- Valdés, J., Sifeddine, A., Lallier-Verges, E., & Ortlieb, L. (2004). Petrographic and geochemical study of organic matter in surficial laminated sediments from an upwelling system (Mejillones del Sur Bay, Northern Chile). *Organic Geochemistry*, 35(7), 881–894. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2004.02.009>
- Vargas, N., & Mendo, J. (2010). Relación entre la Distribución espacial de la

- Merluza Peruana (*Merluccius Gayi peruanus* Ginsburg) y la Extensión Sur de la Corriente de Cromwell. *Informe Instituto Del Mar Del Perú*, 37(3–4), 85–94.
- Wood, S. N., & Augustin, N. H. (2002). GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling. *Ecological Modelling*, 157(2–3), 157–177. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00193-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00193-X)
- Wood S (2017). *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, 2 edition. Chapman and Hall/CRC.
- Wosnitza-Mendo, C., Ballón, M., Benites, C., & Guevara-Carrasco, R. (2009). Changes in the Peruvian hake distribution área: effect of fishery and El Niño event. *Boletín Instituto Del Mar Del Perú*, 24(1, 2), 11.
- Wosnitza-Mendo, C., & Guevara-Carrasco, R. (2000). Adaptive response of Peruvian Hake to overfishing. In *Naga, the ICLARM Quarterly* (Vol. 23, Issue 1, pp. 24–28). [http://www.worldfishcenter.org/Naga/na\\_2364.pdf](http://www.worldfishcenter.org/Naga/na_2364.pdf)
- Yseki Paucar Marco K. (2018). *Variabilidad del Flujo y Tipo de Transporte de Material Terrígeno hacia el Margen Continental en la Costa Central del Perú durante la Última Desglaciación (18-12 Ka Bp)*. Universidad Peruana Cayetano Heredia.
- Zech, R., Smith, J., & Kaplan, M. R. (2009). Chronologies of the Last Glacial Maximum and its Termination in the Andes (~10–55°S) Based on Surface Exposure Dating. In F. Vimeux, F. Sylvestre, & M. Khodri (Eds.), *Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions - From the Last Glacial Maximum to the Holocene* (Vol. 14, pp. 61–87). Springer

Science+Business Media B.V. 2009. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2672-9>

Zervas, D., Nichols, G. J., Hall, R., Smyth, H. R., Lüthje, C., & Murtagh, F. (2009).

SedLog: A shareware program for drawing graphic logs and log data manipulation. *Computers and Geosciences*, 35(10), 2151–2159. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.02.009>

Zuta, S., & Urquiza, W. (1974). Informe de los cruceros 7211 y 7212 del BAP

“UNAME” condiciones oceanográficas anormales frente al Perú en la primavera de 1972. *Informe Especial N°160*, 1–51.

<https://doi.org/http://biblioimarpe.imarpe.gob.pe/handle/123456789/1665>

## **IX. Anexos**

### **9.1 Descripción visual de la estratigrafía del testigo M772-005-3**

El testigo se dividió en 8 secciones hasta los 733 cm, los cuales se describen usando la descripción realizada a bordo, la radiografía y la observación en laboratorio.

Sección 1 (0-30cm); Se registra como primer Unidad IA (0-30cm) que posee un sedimento es una arcilla negra (5Y 2.5/1) con presencia de bandas de color gris olivo oscuro (5y 3/2). Esta sección no se utilizó debido a la perturbación después de la extracción del sedimento marino y posterior reducción de tamaño debido por estar expuesto a mucho tiempo de refrigeración por varios años su tamaño de la primera sección fue reducido a 24 cm de longitud.

Sección 2 (30-130 cm); En esta sección se encuentran dos unidades: continúa la Unidad IA (30-87 cm) posee láminas de color negro (2.5Y 2.5/1) desde 34 a 68 cm y la matriz está compuesto por arcilla negra (5Y 2.5/1). Además, hay presencia de una banda arcilla limosa de color olivo (5Y 4/4) en 71 cm luego desde 72- 87 cm presenta algunas bandas, pero el color predominante es negro (5Y 2.5/1) hasta el final.

La Unidad IB (88-94 cm) inicia con un contacto en (87-88cm), el sedimento es arcilla limosa con fina arena de color negra (5Y 2.5/1), se notó la presencia de un hueso de maxilar de un pez en 88 cm.

Unidad IIA (94-110cm) se inicia con contacto irregular fuertemente erosionado, es unidad formada es arcilla con limo de color olivo (5Y 3/2).



Unidad IIB (110-130 cm) inicia con un débil contacto y está compuesta por arcilla limosa de color olivo (5Y 4/3) con claras bandas por centímetro de ancho y con una banda clara desde 126-130 cm según radiografía (Rx).

Sección 3 (130- 230 cm); En esta sección continua la Unidad Iib, que está compuesta por arcilla limosa de a color olivo (5Y 4/3) presenta dos bandas ubicadas en 137-140 y 151.5-155 cm de color gris olivo oscuro (5Y 3/2). Más abajo? presenta una discordancia estratificada deformada de forma oblicua en 155-162 cm como puesta arcilla limosa de color amarillo (5Y 7/6) y se presenta más oscura según Rx. Luego se inicia Unidad III (163-229 cm) posee dos bandas ubicadas en 176-178 y 200-202cm además presenta laminación lenticular de arcilla limosa de color amarilla (5Y 7/6) en 166 cm seguido por una lámina en 167 cm donde se presenta un mineral endurecido de color oscuro que posiblemente sea fosforita. Al final de la sección posee dos paquetes de finas laminaciones en 216-217 cm y 223.5-229 cm, aunque el segundo paquete de laminaciones oblicuas.

Sección 4 (230-331 cm); presenta una Unidad IVA (230-290 cm) arcilla limosa de color olivo (5Y 4/4 hacia 4/3) y con bandas de color olivo que poseen finas laminaciones en 240,246-251, 258 cm. Entre 258-277 cm se presenta una banda con color olivo más claro que toda esta sección (5Y 5/4) seguido por una laminación en 289 cm.

Luego en la Unidad IVB (291-328cm) hay la presencia de una banda sin laminaciones desde 291 a 296 cm. Posteriormente hay tres bandas en 296-306, 311-

315 y 321-328 cm todos con presencia de laminaciones según Rx. Terminando en un contacto abrupto en 328 cm.

Sección 5 (331- 431 cm); presenta una Unidad dividida en 2 partes VA (331-383 cm) es dominado por arcilla limosa de color olivo (5Y 4/3) hasta 413 cm y con bandas finas de arcilla limosa con color olivo amarillenta (5Y 6/6) desde 331 - 421 cm. Presenta laminaciones en 336-337, 352 y una laminación lenticular en 363 cm. Luego sigue unas laminaciones 363-382, terminando en un fuerte contacto en 383. La siguiente parte de la unidad VB (384-421 cm), se inicia con tres bandas arcillo limosa de color pale amarilla (5Y 8/4) en 383 – 384 y 385-369 y 397 cm. Desde de 414 cm la coloración de la arcilla limosa cambia a un gris olivo oscuro (5Y 3/2). Luego se evidencia láminas oblicuas debidas a una masiva bioturbación entre 421-428 cm, empieza una nueva unidad VIA en 429-504 cm.

Sección 6 (431- 532 cm); Continúa la unidad VI (429-517 cm) que se caracteriza por ser arcillo limosa de color gris olivo oscuro (5Y 3/2) con bandas débilmente a finamente laminadas con color olivo (5Y 4/4) entre las láminas hasta 454 cm. Luego hay banda con finas laminaciones en 454 – 458cm. Además, hay presente endurecimientos en 473-475 y 491-492 cm que presumiblemente sea fosforita. Por último, hay entre 512-517 cm unas laminaciones oblicuas deformadas.

Luego continúa la Unidad VII (512-623cm) que se inicia en la sección 6 y casi abarca toda la sección 7.

Sección 7 (532-633 cm); La unidad VII se caracteriza por ser arcillo limosa de color olivo (5Y 3/2) predominante en toda la unidad (512-623cm) y además se observó

la presencia de tres endurecimientos de color gris olivo (5Y 6/4) en 512-517, 536-539 y 594.5-597cm presumiblemente sean fosforita. Presenta desde 545 – 550 cm finas laminaciones de color olivo (5Y 4/4). Se encontró la presencia de un fragmento de conchuela de un bivalvo cerca de un fuerte contacto en 623 cm. Luego sigue la última unidad VIII (623-703cm).

Sección 8 (633- 733 cm); La unidad VIII (623-703cm) es predominantemente arenoso arcilloso de color gris olivo oscuro (5Y 3/2) con fragmentos de conchuelas, además no es visible ninguna estratificación por lo tanto son muy homogéneas según Rx. Mientras más profundo se haga las observaciones, se encuentra que la arena es más fina hasta 703 cm.

Finalmente, en la parte más basal de esta sección hay la presencia de fosforita endurecida con fina arena en 713 cm, terminando con una estructura deformada contorneada doblada en 720 cm. Inicia otra Unidad IX (>720cm) que posee arcilla limosa de color amarillo olivo en escala de colores (5Y 6/6 a 5Y 3/2 luego a 5Y 4/3) con laminaciones hasta el final de esta sección 8.

M772-005-3								
Unidad	Profundidad(m)	Litológica	LIMESTONES			Estructura	Color	Notas
			Mud	Sand	Gravel			
		clay silt fine sand medium sand coarse sand gravel cobble bould						
IA	1						olivo oscuro (5y 3/2)	0-34cm, presencia de bandas
							laminas oscuras (2.5y 2.5/1) con matriz (5y 2.5/1)	34-68cm, arcilla limosa con laminaciones
IB							olivo oscuro(5y 2.5/1) color olivo (5y 4/4)	71-72cm, banda
IIA							olivo oscuro(5y 2.5/1) olivo (5y 3/2)	87-94cm, contacto fuertemente erosionado(HIATUS).
IIB							color olivo (5y 4/3)	110-124cm,arcilla limosa con claras bandas
							olivo (5y 4/3) olivo oscuro (5y 3/2) olivo (5y 4/3)	124-130cm, una banda clara desde 126-130 cm según Rx. 137-140cm,banda homogénea clara.
III	2						olivo oscuro (5y 3/2) amarillo (5y 7/6) amarillo (5y 7/6)	151.5-155cm, banda clara según Rx. 158-162cm, estratificada oblicua 166.5-167cm, laminación lenticular
							olivo claro (5y 3/2) olivo (5y 3/2)	178-184cm, sin laminaciones finas. 186-200cm,sin laminaciones finas.
IV/A							olivo claro (5y 3/2)	200-202cm,banda
							olivo (5y 4/3) olivo (5y 4/3)	216-217cm,laminaciones finas. 223.5-228cm, laminacion muy finas 228-229cm,laminacion oblicua
IV/B	3						olivo (5y 4/3) olivo (5y 4/3)	239-240cm, laminaciones finas. 246-251cm, laminaciones finas. 251-258cm, bandas sin laminaciones. 258-277cm, laminaciones claras según Rx.
							olivo (5y 4/3)	277-289cm, banda sin laminaciones
V/A							olivo claro (5y 5/4) olivo (5y 4/3)	306-311cm,laminaciones finas
							olivo (5y 4/3) olivo (5y 4/3) olivo (5y 4/3) olivo (5y 6/6) olivo (5y 4/3)	315-321cm,banda sublamnada 321-328cm, lamlnas y base contacto abrupto
V/B	4						olivo (5y 4/3) y bandas pale olivo (5y 6/6)	335-336cm, laminaciones muy finas
							olivo (5y 4/3) olivo (5y 4/3)	352-363cm, fina lamina 364-383cm, laminaciones
VI	5						amarillo (5y 8/4 ) olivo (5y 4/3)	383-384cm, contacto abrupto. 389-414cm, banda con laminaciones.
							olivo (5y 3/2) olivo(5y 3/2)	431-454cm, finas laminaciones
VII	6						olivo oscuro(5y 3/2) y interbandeadas olivo (5y 4/4)	458-472.5cm, presencia de laminaciones.
							olivo (5y 3/2) olivo (5y 3/2) pale olivo(5y 6/4)	491-492cm, probable fosforita.
VIII	7						pale(5y 6/4).	505-512cm, oblicuas deformadas. 512-517cm, endurecimiento 521-523cm, laminaciones finas
							pale olivo (5y 6/4) pale olivo(5y 6/4) olivo (5y 4/2) olivo(5y 3/2) pale olivo (5y 6/4) ( 5y 3/2) laminas (5y 4/4 )	594.5-597cm, posible fosforita. 602-603cm, posible fosforita.
IX							pale olivo(5y 6/4) pale olivo(5y 6/4)	624-633cm,banda con tacto parte superior 633-653cm, banda
							olivo oscuro (5y 3/2) olivo oscuro (5y 3/2)	653-703cm, arena arcillosa ausencia de estratificaciones y es muy homogéneo
							olivo oscuro (5y 3/2)	703-720cm, presencia probable fosforita.
							Color 5y 6/6 hacia 5y 3/2	720-723cm,deformación doblada

Anexo 1. Leyenda de la columna estratigráfica M772-005-3

**Lithologies**



Claystone



Sandstone



Siltstone



Mudstone

**Symbols**



Horizontal planar lamination



Load casts



Planar cross bedding



Nodules and concretions



Intense bioturbation



Bivalves



Swaley cross stratification



Moderate bioturbation



Herring-bone cross bedding



Hummocky cross stratification



Vertebrates



Shells

**Base Boundaries**

— Sharp

- - - Gradational

~ Erosion

## 9.2 Tablas

Anexo 2. Clasificación de las condiciones Redox en la columna de agua (Algeo & Tribovillard, 2009; Tribovillard et al., 2006).

<b>Tipo</b>	<b>Característica</b>
Óxicas	$>2 \text{ ml}\times\text{L}^{-1}$ de $\text{O}_2$
Subóxicas	$0.2- 2 \text{ ml}\times\text{L}^{-1}$ de $\text{O}_2$
Anóxicas sin sulfuros	$<0.2 \text{ ml}\times\text{L}^{-1}$ de $\text{O}_2$ , $0 \text{ ml}\times\text{L}^{-1}$ de $\text{H}_2\text{S}$
Euxínicas o anóxicas con sulfuros	$0 \text{ ml}\times\text{L}^{-1}$ de $\text{O}_2$ , $>0 \text{ ml}\times\text{L}^{-1}$ de $\text{H}_2\text{S}$

Anexo 3. Desembarques de las principales especies por nombre común en kilogramos (Kg) para los últimos años (IMARPE). \*: No hay desembarque por la flota de la pesquería industrial

Especie	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total	%
Anchoa	9,575,717	6,358,217	8,104,729	5,347,187	8,808,494	8,655,461	5,935,302	6,159,802	6,257,981	5,935,166	3,450,609	7,125,244	3,776,880	4,859,056	2,322,228	3,769,920	2,855,268	3,297,065	6,166,603	3,484,363	4,401,314	116,646,606	94.56
Caballa	73,263	176,202	32,698	94,384	62,255	52,895	102,322	62,387	92,989	110,579	20,467	46,945	26,781	58,297	73,844	49,964	165,396	112,862	68,556	49,652	98,685	1,631,424	1.32
Jurel	296,579	723,733	154,219	217,734	187,369	80,663	277,568	254,426	169,537	74,719	17,559	257,241	184,951	82,111	81,748	23,036	15,121	10,094	54,430	138,967	158,879	3,460,685	2.81
Sardina	3,868	137,098	6,022	5,914	4,080	308	-	7	8	6	26,752	3,520	0	0	0	647	2,918	652	235	444	17	192,496	0.16
Sardina	226,294	60,298	6,853	8,726	1,541	838	89	56	5	26	17	63	161	0	788	815	40	35	0	0	7	306,653	0.25
Merluza	83,361	125,065	46,251	7,665	38,651	30,600	29,441	31,634	34,929	47,161	41,108	37,646	33,147	54,522	63,940	56,286	72,404	79,613	75,539	60,528	31,360	1,080,851	0.88
Agujilla	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.049	0.003	0.003	0.005	0.000	0.001	0.038	0.140	0.000	4.327,990	2,750,940	7,079	0.01
Camorillo	*	22	139	233	678	4,059	4,946	4,500	1,180	2,873	5,301	2,475	1,872	867	532	1,423	1,423	617	347	*	*	33,487	0.03
Chamaco	*	16	39	54	36	50	43	48	27	24	28	23	20	16	18	22	18	6	2	*	*	491	0.00
<b>Total</b>																						<b>123,359,771</b>	<b>100</b>







Anexo 6. Relación entre los flujos de restos de peces y variables biogeoquímicas en el Testigo M772-005-3. Tabla de correlaciones de Spearman ( $p < 0.1$ ,  $n=18$ ), basado en los datos originales sin interpolar. El (\*) representa los flujos de las variables biogeoquímicas. Valores significativos en negrita y subrayado.

	Fragmentos de escamas	Escamas								
		Anchoveta	Merluza	Mesopelágicos	No determinadas	Todas escamas	Peces oceánicos			
$\delta^{15}N$	-0.12	-0.18	-0.36	-0.33	-0.35	-0.21	0.10			
IPSL	-0.33	<b><u>-0.44</u></b>	<b><u>-0.46</u></b>	-0.25	-0.18	<b><u>-0.50</u></b>	-0.36			
COT(*)	-0.21	-0.30	-0.18	-0.35	-0.25	-0.21	-0.16			
Sílica biogénica(*)	0.00	-0.22	-0.14	-0.04	0.00	-0.20	-0.38			
Caco <sub>3</sub> (*)	0.05	-0.26	-0.21	-0.10	-0.33	-0.21	0.16			
COT(%)	-0.09	0.33	0.12	-0.33	-0.33	0.30	0.07			
Sílica biogénica(%)	0.31	0.21	-0.05	0.10	0.09	0.18	-0.18			
Caco <sub>3</sub> (%)	-0.01	0.07	-0.11	-0.18	<b><u>-0.44</u></b>	0.00	<b><u>0.54</u></b>			
TSM(°C)	-0.28	-0.14	-0.01	<b><u>-0.53</u></b>	<b><u>-0.58</u></b>	-0.23	-0.17			
Si/Ti	<b><u>0.44</u></b>	0.19	0.09	<b><u>0.41</u></b>	<b><u>0.43</u></b>	0.34	-0.21			
Br/Ti	-0.27	0.11	0.04	<b><u>-0.41</u></b>	<b><u>-0.40</u></b>	0.02	-0.07			
	Vértebra	Espinas	Fragmentos de espinas	Otros huesos	Todos los huesos	Todos los huesos sin espinas	Fragmentos de Huesos	Vértebra de Anchoveta	Vértebra no determinadas	Vértebra que no son anchoveta
$\delta^{15}N$	0.34	-0.12	<b><u>0.42</u></b>	0.21	0.23	0.36	0.22	0.15	<b><u>0.40</u></b>	0.13
IPSL	-0.26	0.07	0.00	-0.25	-0.21	-0.27	0.00	-0.03	-0.11	-0.36
COT(*)	0.29	-0.02	0.36	0.15	0.20	0.30	0.29	0.15	0.17	0.07
Sílica biogénica(*)	-0.03	-0.04	-0.27	-0.05	-0.05	-0.03	0.15	-0.20	-0.25	-0.03
Caco <sub>3</sub> (*)	-0.10	-0.28	0.00	0.02	-0.16	-0.08	0.12	-0.06	-0.12	-0.19
COT(%)	0.16	-0.15	<b><u>0.53</u></b>	-0.06	0.06	0.12	-0.06	0.13	0.08	0.11
Sílica biogénica(%)	-0.18	-0.16	-0.23	-0.21	-0.20	-0.19	-0.07	-0.20	-0.38	-0.13
Caco <sub>3</sub> (%)	-0.37	<b><u>-0.56</u></b>	0.14	-0.22	<b><u>-0.43</u></b>	-0.36	-0.22	0.01	-0.19	<b><u>-0.40</u></b>
TSM(°C)	0.11	-0.04	<b><u>0.61</u></b>	0.11	0.04	0.13	0.17	-0.01	-0.06	-0.02
Si/Ti	0.25	0.05	-0.35	0.33	0.24	0.25	0.16	0.13	0.01	0.20
Br/Ti	-0.01	-0.19	0.30	-0.27	-0.10	-0.06	-0.09	-0.03	-0.12	0.03
	Integridad de escamas	Bioerosión de escamas	Escamas vértebras + otros huesos	Integridad de vértebras	Bioerosión de vértebras	Bioerosión de espinas	Bioerosión de otros huesos	Índice compuesto de reservación		
$\delta^{15}N$	0.31	-0.33	-0.36	-0.16	-0.41	-0.34	0.27	-0.09		
IPSL	-0.04	0.03	-0.29	-0.03	-0.20	0.15	0.14	-0.21		
COT(*)	0.17	-0.33	-0.16	-0.15	-0.40	-0.12	<b><u>0.59</u></b>	-0.35		
Sílica biogénica(*)	0.23	0.14	-0.05	-0.14	-0.19	0.24	0.25	-0.10		
Caco <sub>3</sub> (*)	0.41	0.23	-0.19	-0.01	0.02	<b><u>-0.45</u></b>	0.39	-0.02		
COT(%)	0.03	-0.05	0.30	-0.09	0.31	-0.07	-0.25	0.23		
Sílica biogénica(%)	0.03	0.26	0.30	-0.25	0.10	0.15	0.02	0.28		
Caco <sub>3</sub> (%)	0.15	0.39	0.10	0.29	0.41	<b><u>-0.69</u></b>	-0.04	0.35		
TSM(°C)	0.00	-0.21	-0.24	0.15	0.00	0.01	-0.34	-0.07		
Si/Ti	0.15	0.02	0.14	-0.43	-0.17	0.22	0.31	0.09		
Br/Ti	0.06	0.15	0.25	0.11	0.40	0.00	-0.41	0.14		

Anexo 7. Relación de las variables biogeoquímicas en el Testigo M772-005-3 (data del trabajo Yseki (2018) y Dr. Phillippe Martinez, comp. Personal). Tabla de correlaciones de Spearman ( $p < 0.01$ ,  $n=72$ ). El (\*) representa los flujos de las variables biogeoquímicas. Valores significativos en negrita y subrayado.

	Tasa acumulación	TSM (°C)	Insolacion	Profundidad	IPSL	$\delta^{15}N$	COT%
TSM (°C)	0.12						
Insolacion	<b><u>-0.38</u></b>	-0.10					
Profundidad	0.07	<b><u>0.80</u></b>	-0.11				
IPSL	<b><u>-0.40</u></b>	<b><u>-0.41</u></b>	0.19	<b><u>-0.48</u></b>			
$\delta^{15}N$	<b><u>0.75</u></b>	<b><u>0.30</u></b>	<b><u>-0.63</u></b>	0.27	<b><u>-0.33</u></b>		
COT%	0.07	<b><u>0.65</u></b>	0.03	<b><u>0.83</u></b>	<b><u>-0.37</u></b>	0.19	
Sílice biogénica%	<b><u>0.60</u></b>	0.26	-0.13	0.15	<b><u>-0.46</u></b>	<b><u>0.46</u></b>	0.22
Caco <sub>3</sub> %	0.09	0.17	0.17	<b><u>0.40</u></b>	-0.28	0.12	<b><u>0.50</u></b>
Flujo de COT	<b><u>0.67</u></b>	<b><u>0.32</u></b>	<b><u>-0.53</u></b>	<b><u>0.41</u></b>	<b><u>-0.39</u></b>	<b><u>0.72</u></b>	<b><u>0.59</u></b>
Flujo de Sílice biogénica	<b><u>0.77</u></b>	0.14	-0.27	0.03	<b><u>-0.43</u></b>	<b><u>0.59</u></b>	0.09
Flujo de Caco <sub>3</sub>	<b><u>0.70</u></b>	0.03	-0.25	0.13	<b><u>-0.34</u></b>	<b><u>0.60</u></b>	0.21
Si/Ti	<b><u>0.39</u></b>	-0.23	-0.15	<b><u>-0.41</u></b>	0.22	<b><u>0.34</u></b>	-0.22
Br/Ti	0.07	<b><u>0.50</u></b>	0.19	<b><u>0.71</u></b>	<b><u>-0.40</u></b>	0.11	<b><u>0.85</u></b>
	Sílice biogénica %	Caco <sub>3</sub> %	Flujo de COT	Flujo de Sílice biogénica	Flujo de Caco <sub>3</sub>	Si/Ti	
Caco <sub>3</sub> %	0.10						
Flujo de COT	<b><u>0.50</u></b>	0.26					
Flujo de Sílice biogénica	<b><u>0.95</u></b>	0.04	<b><u>0.57</u></b>				
Flujo de Caco <sub>3</sub>	<b><u>0.41</u></b>	<b><u>0.68</u></b>	<b><u>0.60</u></b>	<b><u>0.52</u></b>			
Si/Ti	0.28	-0.15	0.24	<b><u>0.38</u></b>	0.24		
Br/Ti	0.27	<b><u>0.59</u></b>	<b><u>0.42</u></b>	0.13	0.28	-0.23	

Anexo 8. Comparación de los flujos o razones de restos de peces dentro de los periodos del T1 y/o holoceno entre los tres testigos mediante la prueba Kruskal-Wallis múltiple ( $p < 0.05$ ). Valor en promedio de los restos de peces es  $\varepsilon^2 = 0.15$ , hay un efecto moderado de la cantidad de muestras.

Flujos/razón	Lugar	Periodos	Lugar				
			Chimbote		Callao		Pisco
			ACR	HS1	ACR	HS1	ACR
Escamas de Anchoqueta	Chimbote	HS1	<b>0.00</b>				
		ACR	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>			
	Callao	HS1	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	1.00		
		ACR	0.07	1.00	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	
Pisco	HS1	<b>0.00</b>	1.00	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	1.00	
	ACR						
Vértebras de Anchoqueta	Chimbote	HS1	1.00				
		ACR	<b>0.00</b>	1.00			
	Callao	HS1	<b>0.00</b>	0.09	1.00		
		ACR	1.00	1.00	1.00	1.00	
Pisco	HS1	0.45	1.00	0.68	<b>0.00</b>	1.00	
	ACR						
Escamas de Merluza	Chimbote	HS1	1.00				
		ACR	1.00	0.21			
	Callao	HS1	<b>0.04</b>	<b>0.00</b>	1.00		
		ACR	1.00	1.00	1.00	1.00	
Pisco	HS1	<b>0.02</b>	<b>0.00</b>	0.18	1.00	1.00	
	ACR						
Razón de Merluza entre Anchoqueta	Chimbote	HS1	1.00				
		ACR	1.00	1.00			
	Callao	HS1	0.42	0.63	0.97		
		ACR	1.00	1.00	1.00	1.00	
Pisco	HS1	<b>0.01</b>	<b>0.00</b>	<b>0.02</b>	1.00	1.00	
	ACR						
Escamas de Peces Oceánicos	Chimbote	HS1	1.00				
		ACR	1.00	1.00			
	Callao	HS1	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>		
		ACR	1.00	1.00	1.00	<b>0.00</b>	
Pisco	HS1	1.00	1.00	1.00	<b>0.00</b>	1.00	
	ACR						
Razón de Oceánicos entre Anchoqueta	Chimbote	HS1	1.00				
		ACR	1.00	1.00			
	Callao	HS1	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	0.84		
		ACR	1.00	1.00	1.00	<b>0.00</b>	
Pisco	HS1	1.00	1.00	1.00	<b>0.00</b>	1.00	
	ACR						
Huesos sin espinas	Chimbote	HS1	1.00				
		ACR	<b>0.01</b>	<b>0.00</b>			
	Callao	HS1	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>		
		ACR	0.19	1.00	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	
Pisco	HS1	0.10	1.00	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	1.00	
	ACR						

Anexo 9. Promedios, desviación estándar y coeficiente de variación (CV%) de flujos ( $10^{-3} \times \# \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ) y razones de restos de peces junto a variables biogeoquímicas y de posición de los tres registros agrupados por periodo de tiempos ACR yHS1.

Variables	Chimbote						Callao						Pisco						
	HS1			ACR			HS1			ACR			HS1			ACR			
	media	± sd	Cv%	media	± sd	Cv%	media	± sd	Cv%	media	± sd	Cv%	media	± sd	Cv%	media	± sd	Cv%	
Indicadores Biogeoquímicos	$\delta^{15}\text{N}$	7.22	± 0.72	9.96	7.48	± 0.95	12.69	8.47	± 1.23	14.48	10.36	± 0.75	7.23	9.30	± 0.96	10.36	8.94	± 0.64	7.12
	COT	296.18	± 62.63	21.15	244.81	± 31.66	12.93	186.62	± 63.54	34.05	292.66	± 46.71	15.96	89.77	± 18.11	20.18	129.54	± 24.48	18.89
	TSM	19.56	± 1.05	5.39	21.90	± 0.64	2.93	22.18	± 1.08	4.86	23.15	± 0.40	1.72	21.71	± 0.53	2.42	21.14	± 0.70	3.30
	Si/Ti	10.31	± 3.57	34.64	7.89	± 2.02	25.65	5.37	± 1.62	30.08	5.74	± 0.51	8.92	5.91	± 1.19	20.19	4.76	± 0.42	8.77
Flujos	Escama de Anchoveta	42.76	± 39.24	91.76	16.08	± 19.43	120.87	2.86	± 3.40	118.77	1.97	± 1.87	94.95	36.37	± 21.22	58.35	32.85	± 25.47	77.54
	Escama de Merluza	19.82	± 36.38	183.59	12.69	± 25.55	201.43	1.28	± 2.48	194.02	2.28	± 2.97	130.65	0.71	± 1.58	222.12	0.89	± 2.18	245.68
	Escama de Peces de peces Oceanicos	1.86	± 6.00	322.03	0.88	± 4.13	471.87	0.25	± 0.60	244.74	0.49	± 0.80	162.26	0.31	± 0.92	300.37	0.00	± 0.00	-
Razones	Escama de Peces no determinadas	2.93	± 13.73	469.05	1.02	± 2.31	226.98	0.63	± 1.15	183.89	0.38	± 0.52	137.41	41.70	± 24.56	58.90	37.04	± 25.56	69.01
	Vertebras de Anchoveta	20.93	± 38.90	185.90	14.86	± 20.37	137.10	0.66	± 1.08	164.85	0.98	± 1.20	122.36	2.97	± 3.76	126.46	4.15	± 7.05	169.73
	Huesos excluyendo espinas	46.56	± 71.35	153.24	26.79	± 31.65	118.11	2.83	± 3.10	109.35	5.62	± 5.09	90.49	37.41	± 32.33	86.42	52.36	± 47.29	90.31
Razones	Merluza/Anchoveta	2.85	± 8.20	287.69	3.15	± 8.43	267.42	0.35	± 0.85	242.82	0.90	± 1.67	186.83	0.04	± 0.13	335.37	0.04	± 0.08	224.51
	Oceanicos/Anchoveta	0.53	± 3.05	576.23	0.18	± 0.76	433.74	0.11	± 0.36	315.48	0.16	± 0.28	172.57	0.01	± 0.03	361.42	0.00	± 0.00	-
	Anchoveta/huesos sin espinas	0.27	± 0.36	133.14	0.38	± 0.36	95.59	0.12	± 0.20	174.38	0.14	± 0.22	154.80	0.09	± 0.09	104.95	0.05	± 0.06	117.88
	IRPR	1.64	± 1.13	68.61	1.16	± 0.66	56.65	1.20	± 0.79	65.56	1.05	± 0.75	71.01	1.40	± 0.26	18.56	1.16	± 0.36	31.02



Anexo 11. Tabla de los resultados de los modelos GAM (n=79).

Flujo de resto	Variables suavizadas	edf	Ref.df	F-value	p-value	R ajustado	desviación ajustada
Vértebra de	<b>IPRP</b>	3.71	3.95	9.45	<b><u>0.00</u></b>	<b>0.935</b>	<b>78.70%</b>
	<b>Edad</b>	1.00	1.00	18.01	<b><u>0.00</u></b>		
	<b>Profundidad</b>	1.00	1.00	18.56	<b><u>0.00</u></b>		
	Latitud	0.00	2.00	0.00	0.43		
	$\delta^{15}\text{N}$	1.00	1.00	2.70	0.11		
	<b>Si/Ti</b>	1.00	1.00	22.09	<b><u>0.00</u></b>		
Anchoveta	<b>COT</b>	3.38	3.77	2.37	0.18		
	<b>TSM</b>	2.80	3.27	4.24	<b><u>0.01</u></b>		
	<b>Insolación</b>	1.00	1.00	0.33	0.57		
Escama de	<b>IPRP</b>	1.03	1.06	13.95	<b><u>0.00</u></b>	<b>0.763</b>	<b>70.30%</b>
	<b>Edad</b>	5.50	6.59	2.08	<b><u>0.06</u></b>		
	<b>Profundidad</b>	1.00	1.00	0.80	0.38		
	Latitud	0.00	2.00	0.00	0.28		
	$\delta^{15}\text{N}$	1.70	2.09	3.75	<b><u>0.02</u></b>		
	<b>Si/Ti</b>	1.93	2.06	0.85	0.41		
Merluza	<b>COT</b>	1.00	1.00	0.01	0.93		
	<b>TSM</b>	1.00	1.00	3.47	<b><u>0.07</u></b>		
	<b>Insolación</b>	2.17	2.61	2.87	<b><u>0.03</u></b>		

### 9.3 Figuras

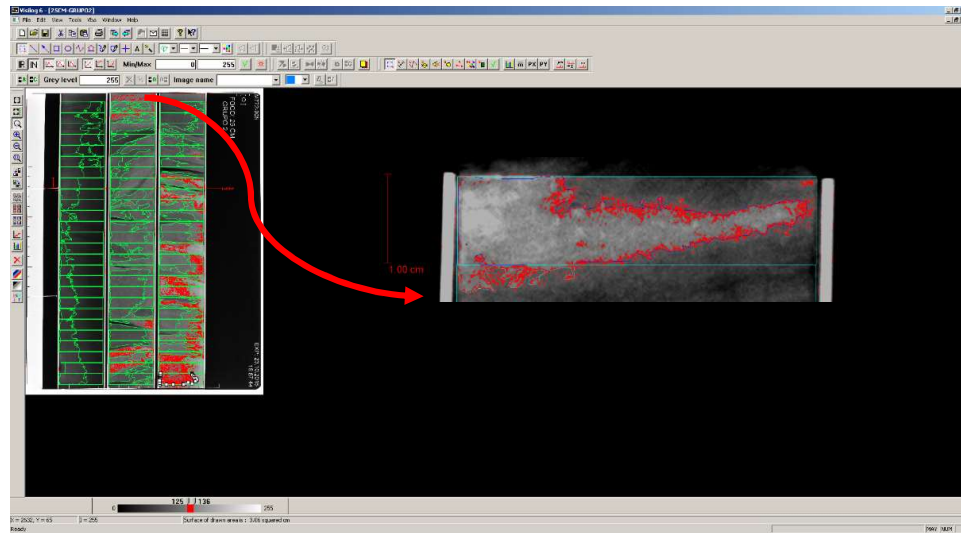
Anexo 12. Imagen del procedimiento de la extracción de las submuestras del testigo M772-005-3 en el Laboratorio de Geología Marina-IMARPE.



Anexo 13. Imagen luego de la extracción de las submuestras cada cinco centímetros del testigo M772-005-3, se colocó pedazos de Tecnopor envueltos en plástico en los huecos dejados luego del submuestreo.

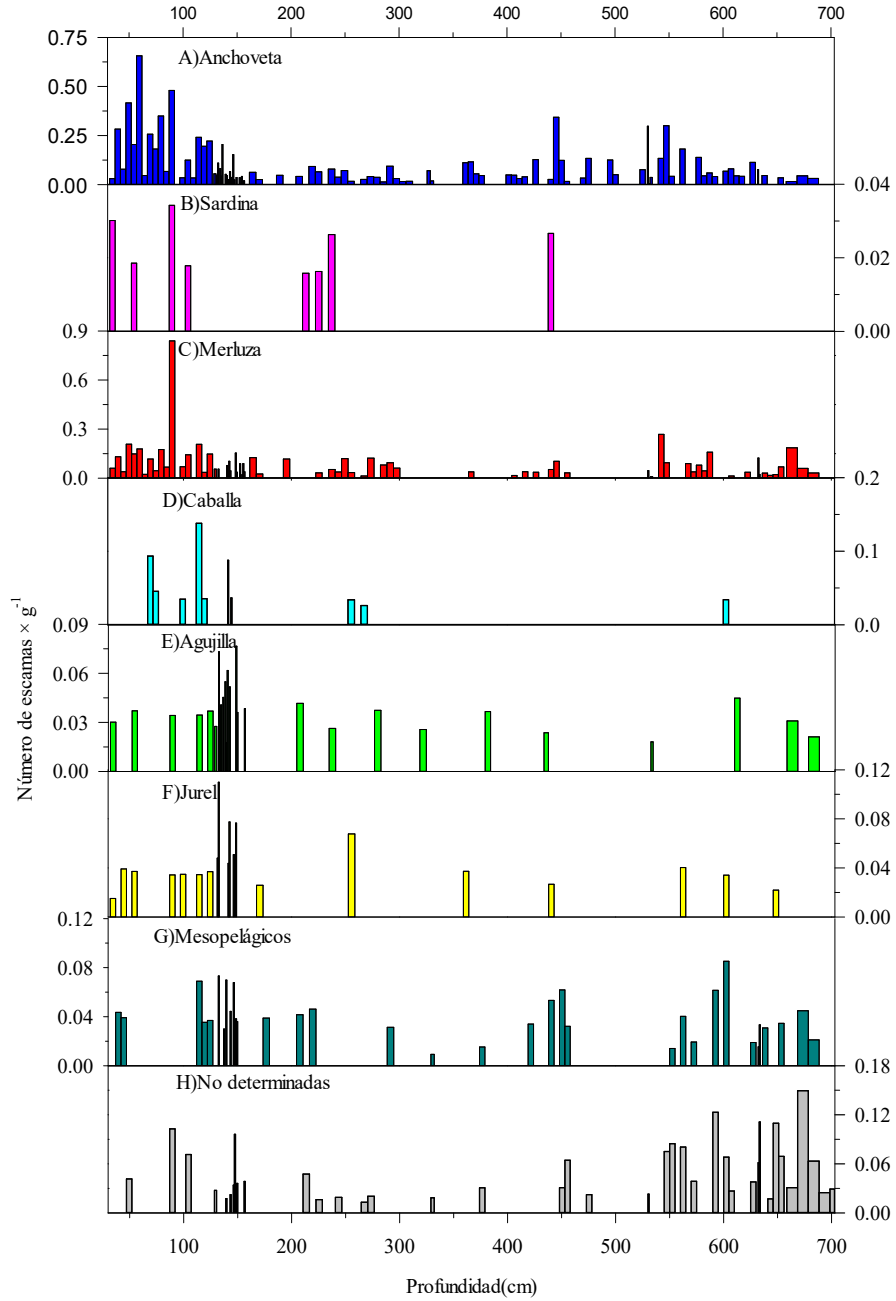


Anexo 14. Esquema del procedimiento para medir el área de sedimentos con/sin laminaciones con ayuda del programa Visilog 6.0. Se calcularon las áreas por rectángulos de espesor por centímetro (rectángulo celeste) y línea de color rojo son los sedimentos que no presentan laminaciones o por defecto que si presentan laminaciones





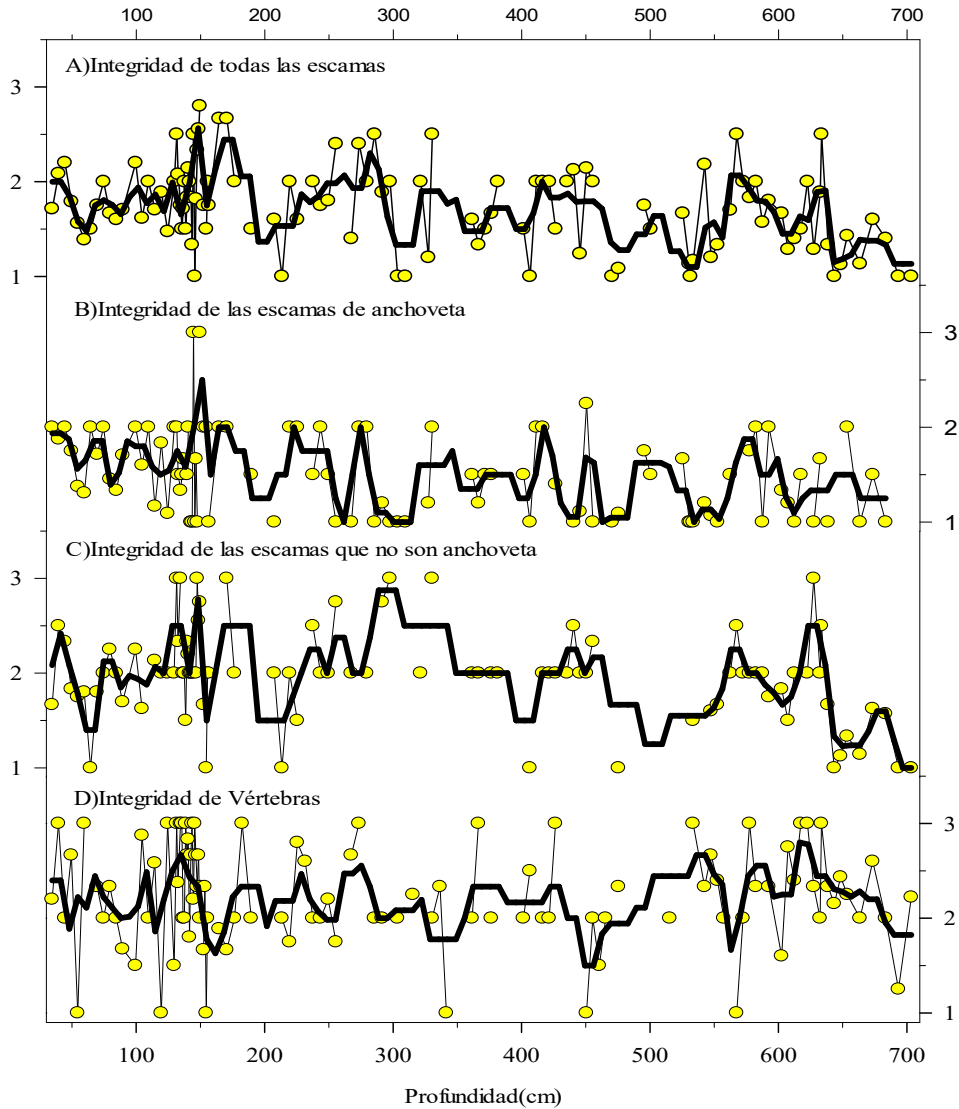
Anexo 15. Esquema de la distribución de las abundancias de las escamas por especie encontradas en el registro M772-005-3.



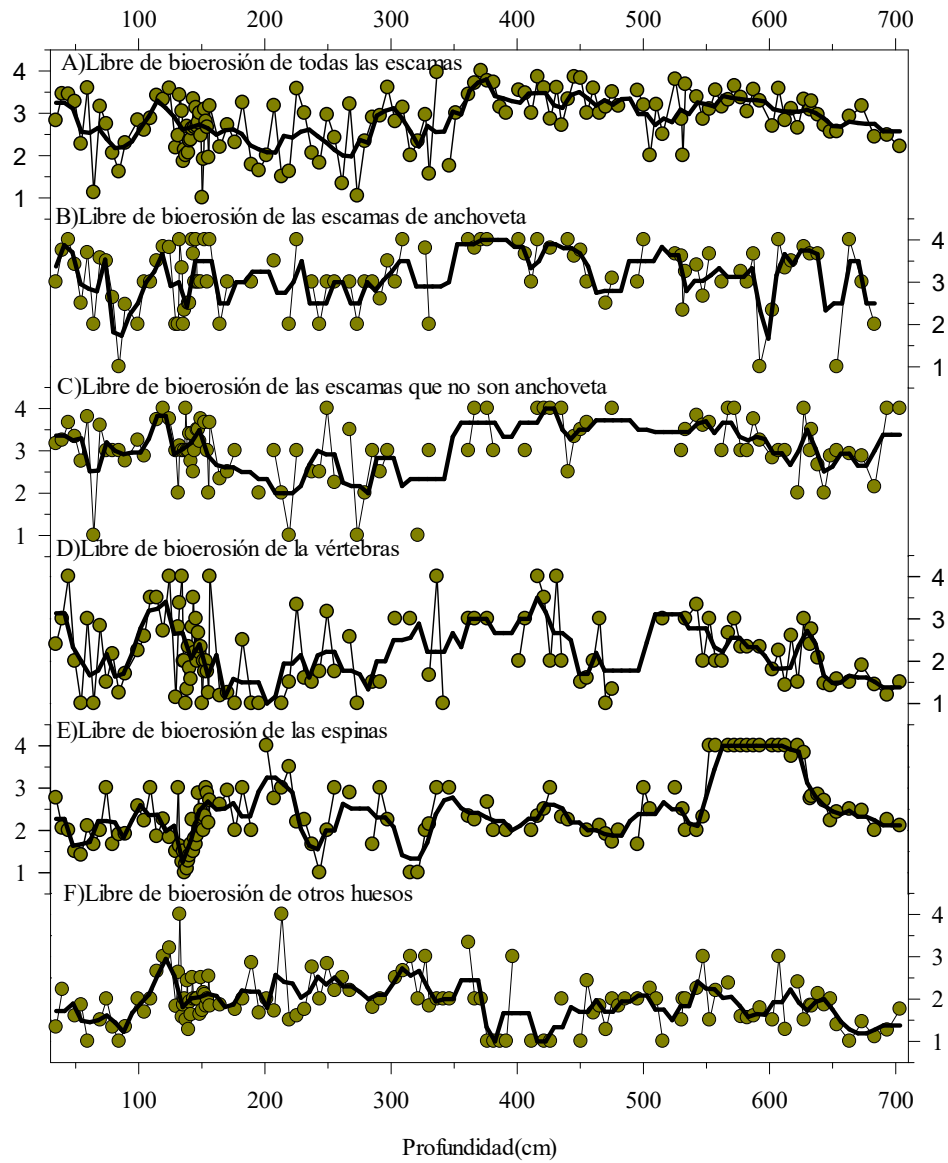
Anexo 16. Esquema de los índices de integridad de los diferentes restos en el testigo M772-005-3.A)

Todas las escamas, B)Escamas de Anchoqueta, C)Escamas que no pertenecen a Anchoqueta,

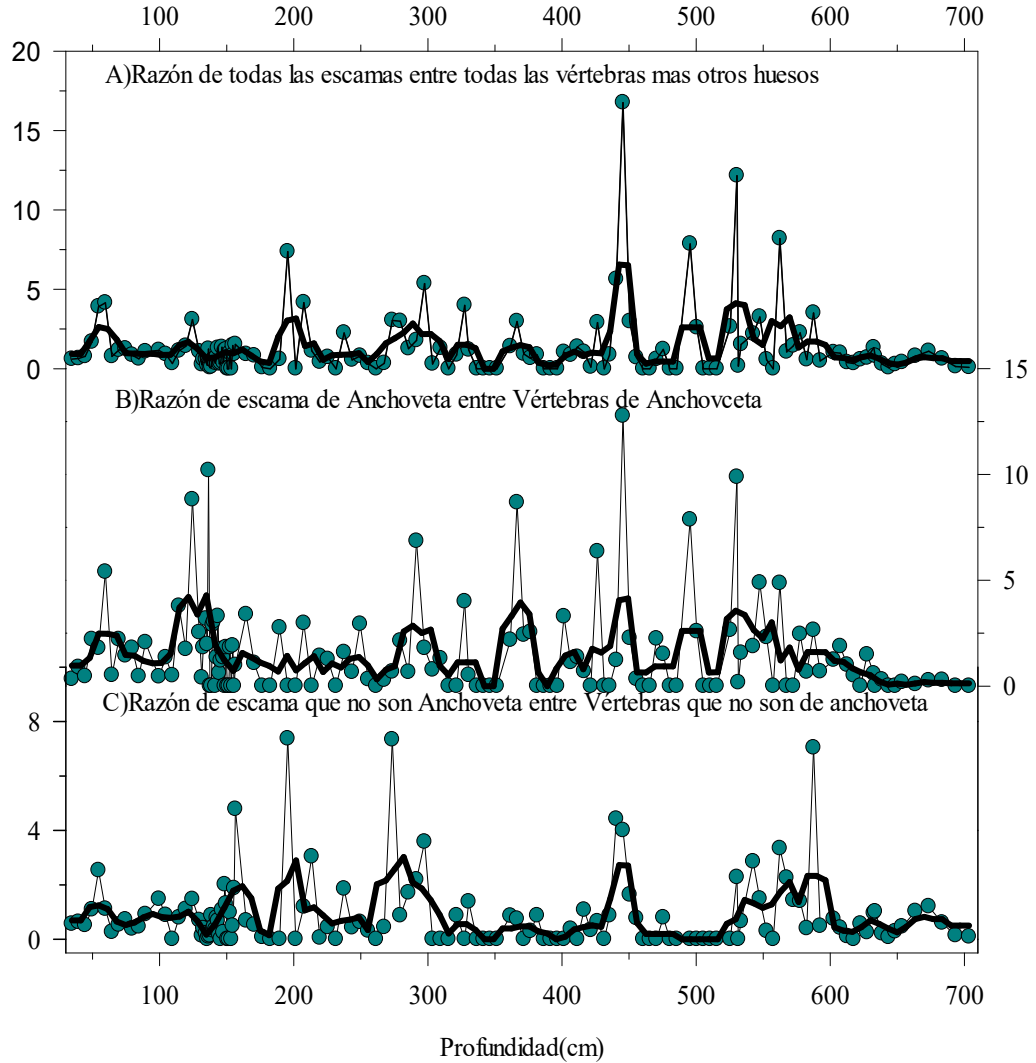
D)Integridad de Vértebras. Línea negra gruesa representa es la tendencia de la media móvil cada tres valores.



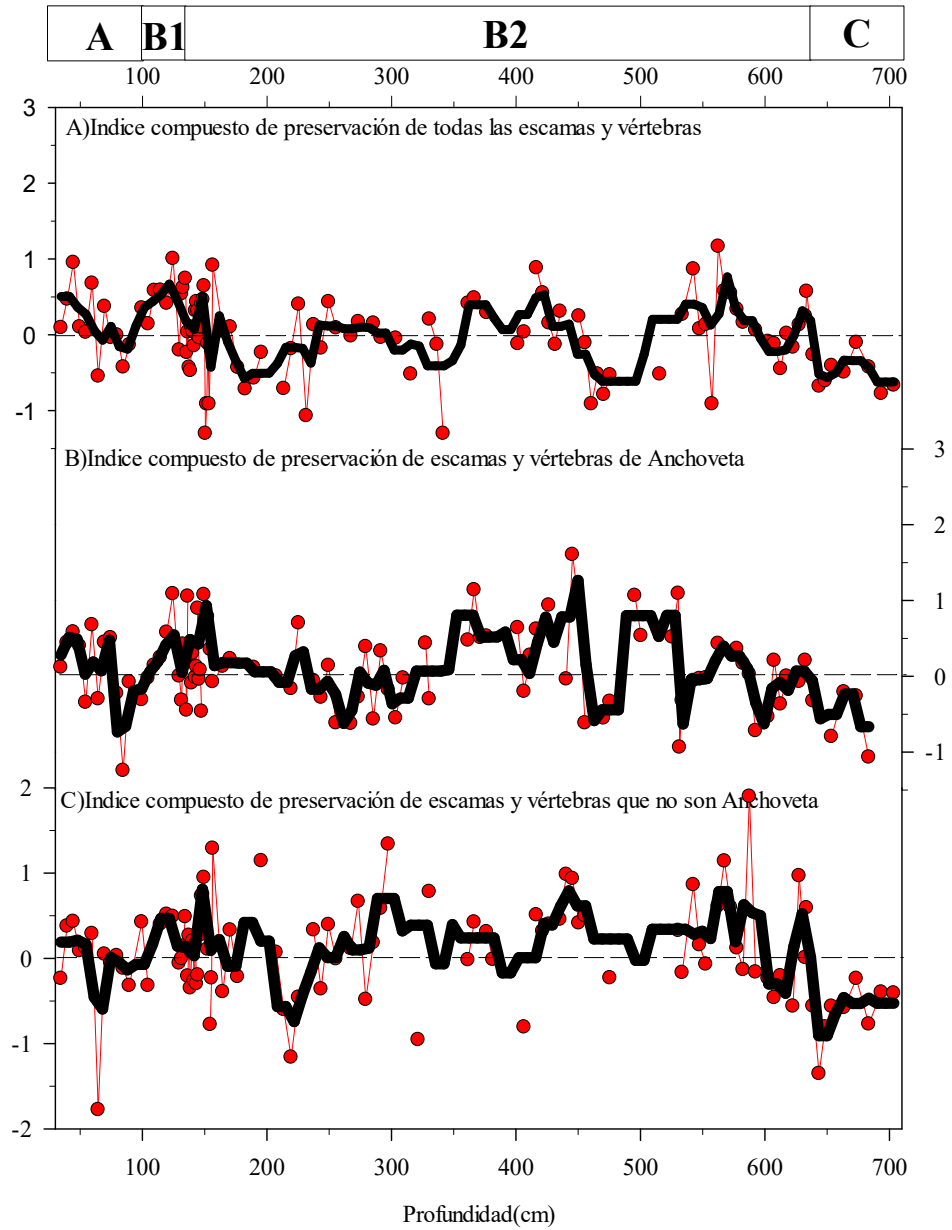
Anexo 17. Esquema de los índices de Libre de bioerosión de los diferentes restos en el testigo M772-005-3 A) Todas las escamas, B) Escamas de Anchoqueta, C) Escamas que no pertenecen a Anchoqueta, D) Vértabras, E) Espinas y F) Otros huesos. Línea negra gruesa representa es la tendencia de la media móvil cada tres valores.



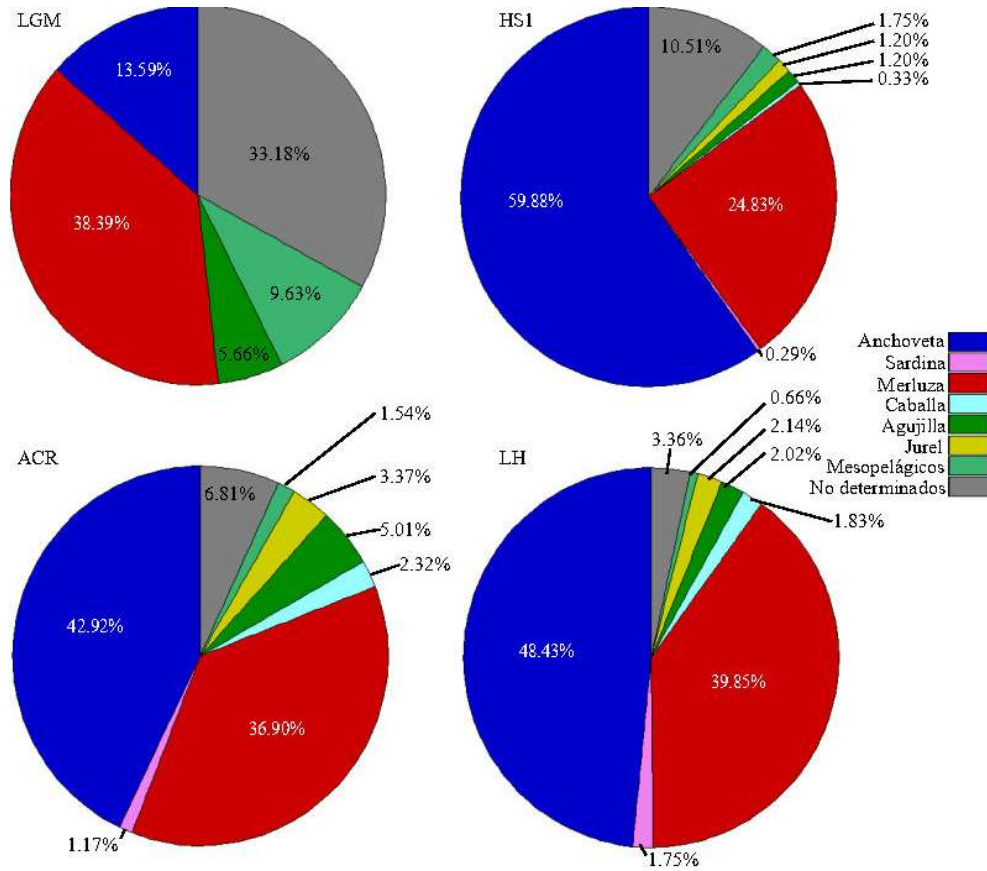
Anexo 18. Esquema de las razones de escamas entre vertebras de los diferentes tipos de restos en el testigo M772-005-3. A) Todas las escamas entre todas vertebras más otros huesos ,B)Escamas de Anchoveta entre las vértebras de anchoveta y C)Escamas que no pertenecen a Anchoveta entre vertebras que no pertenecen anchoveta. Línea negra gruesa representa es la tendencia de la media móvil cada tres valores.



Anexo 19. Esquema de los índices compuestos de preservación de diferentes tipos de escama en el testigo M772-005-3. A) Todas las escamas entre todas, B) Escamas de Anchoveta y C) Escamas que no pertenecen a Anchoveta. Línea negra gruesa representa es la tendencia de la media móvil cada tres valores.



Anexo 20. Diagrama circular de los flujos de escamas en porcentaje (%) por cada periodo de tiempo (LGM: Máximo glaciario, HS1: Estadio Heinrich, ACR: Periodo reversión antártico, LH: Holoceno tardío. Cada color representa una especie acorde lo mostrado en la leyenda.



Anexo 21. Serie de tiempo de los flujos de escamas por peces ( $10^{-3} \times \# \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ ) durante T1, LGM y LH. A) Anchoqueta, B) Merluza, C) Peces Oceánicos, D) Peces Mesopelágicos, E) No determinados y F) Índice de compuesto de preservación de todas escamas. Línea negra gruesa es la media móvil cada tres valores. Franja celeste representa HS1. GP: Periodo glaciario, HS1: Heinrich Stadial 1, ACR: Antarctic Cold Reversal y LH: Holoceno Tardío.

