



UNIVERSIDAD PERUANA  
**CAYETANO HEREDIA**

“EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES  
PALEOCEANOGRÁFICAS DESDE EL  
MIOCENO TARDÍO HASTA EL  
PLEISTOCENO TEMPRANO EN LA  
CUENCA PISCO, PERÚ”

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR

RENZO KLEBER GONZALES LIZANA

LIMA - PERÚ

2023



**ASESOR**

Dr. Matthieu Carré

## **JURADO DE TESIS**

Dr. Rodolfo Martin Salas Gismondi  
PRESIDENTE

Dr. José Enrique Macharé Ordoñez  
VOCAL

Dr. Franco Renato Salvattecí Merino  
SECRETARIO

## **DEDICATORIA**

A mis padres Romilde y Maria,  
por todo el amor y la paciencia que me tienen.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por los grandes retos que me pone en el camino y la fortaleza que me da para poder sobrellevarlos.

A mis queridos padres, por todo el apoyo y cariño que me dan en cada uno de los pasos que doy, sin importar cuales sean.

Mi especial agradecimiento al Dr. Matthieu Carré, por su apoyo incondicional, su paciencia y compromiso, por compartir sus valiosos conocimientos y su vasta experiencia para lograr culminar este lindo proyecto de investigación.

Un agradecimiento especial a la Dra. Diana Ochoa, por su colaboración, paciencia y apoyo en cada paso de este gran proyecto.

A mis hermanos Isabel, Edder y Cynthia por su ayuda todos estos años y por darme a mis lindos sobrinos Daniela, Adriano, Fátima, Kei y Rafaella.

A todos los profesores de la Maestría en Ciencias del Mar de la Universidad Peruana Cayetano Heredia, quienes ayudaron a formarme en este campo maravilloso de la ciencia.

Un agradecimiento especial al Dr. Dimitri Gutierrez por su apoyo a lo largo de estos años de estudio y por su apoyo en la gestión de los proyectos de investigación en esta área de la ciencia.

Al Dr. Rodolfo Salas por proveer material de su colección del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por tomarse el tiempo de revisar esta tesis, aportar sus comentarios y valiosos conocimientos para mejorar este trabajo.

Al Dr. José Macharé y al Dr. Renato Salvattecí por aceptar ser miembros del jurado calificador de esta tesis, por sus comentarios, observaciones y aportes para mejorar este proyecto de investigación.

A Mario Urbina por su ayuda en la recolección de muestras en campo para este proyecto.

A todos los compañeros de la Maestría en Ciencias del Mar, con los cuales compartí muchos momentos especiales durante clases y fuera de ellas, ustedes saben quiénes son.

## **FUENTE DE FINANCIAMIENTO**

El presente trabajo fue financiado por el Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA) – CONCYTEC en el marco de la convocatoria Proyecto Investigación Básica, 2018-01 [Contrato N°105-2018-Fondecyt] y por el Programa de Incorporación de Investigadores Proyecto N°034-2019-Fondecyt-BM.

<b>DECLARACIÓN DE AUTOR</b>				
<b>FECHA</b>	<b>27</b>	<b>MARZO</b>	<b>2023</b>	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES DEL EGRESADO</b>	<b>GONZALES LIZANA RENZO KLEBER</b>			
<b>PROGRAMA DE POSGRADO</b>	<b>MAESTRÍA EN CIENCIAS DEL MAR</b>			
<b>AÑO DE INICIO DE LOS ESTUDIOS</b>	<b>2019</b>			
<b>TÍTULO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DE GRADO</b>	<b>“EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES PALEOCEANOGRÁFICAS DESDE EL MIOCENO TARDÍO HASTA EL PLEISTOCENO TEMPRANO EN LA CUENCA PISCO, PERÚ”</b>			
<b>MODALIDAD (marcar)</b>	<b>Tesis</b>	<b>X</b>	<b>Sustentación temática</b>	
<b>Declaración del Autor</b>				
La presente Tesis es un Trabajo de Investigación de Grado original y no es el resultado de un trabajo en colaboración con otros, excepto cuando así está citado explícitamente en el texto. No ha sido ni enviado ni sometido a evaluación para la obtención de otro grado o diploma que no sea el presente.				
<b>Teléfono de contacto (fijo / móvil)</b>	<b>2763529/ 994393841</b>			
<b>E-mail</b>	<b>renzo.gonzales@upch.pe</b>			

Firma del egresado

DNI 71419041

# EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES PALEOCEANOGRÁFICAS DESDE EL MIOCENO TARDÍO HASTA EL PLEISTOCENO TEMPRANO EN LA CUENCA PISCO, PERÚ

## INFORME DE ORIGINALIDAD



## FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Peruana Cayetano Heredia Trabajo del estudiante	8%
2	dokumen.pub Fuente de Internet	<1%
3	cpps.dyndns.info Fuente de Internet	<1%
4	www.vliz.be Fuente de Internet	<1%
5	pacmedy.lsce.ipsl.fr Fuente de Internet	<1%
6	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
7	Beth K. Scaffidi, Tiffany A. Tung, Kelly J. Knudson. "Seasonality or short-term mobility among trophy head victims and villagers?: Understanding late-life dietary change in the	<1%

## TABLA DE CONTENIDOS

### RESUMEN

### ABSTRACT

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Marco Teórico .....	2
1.1.1. Características oceanográficas del Pacífico Este frente a la costa peruana .....	2
1.1.2. El ENSO .....	5
1.1.3. Condiciones climáticas y oceanográficas globales desde el Mioceno Tardío al Pleistoceno Temprano (10-1 Ma) .....	9
1.1.4. Características de la Cuenca Pisco Este.....	13
1.1.5. La Formación Pisco .....	14
1.1.6. Conchas de moluscos fósiles: archivos paleoclimáticos de alta resolución .....	16
1.1.7. Análisis Isotópicos .....	17
1.1.7.1 Isótopos estables de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) .....	17
1.1.7.2 Isótopos estables de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ).....	18
1.1.7.3 Isótopos de estroncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) .....	19
1.2. Planteamiento de la Investigación .....	19
1.2.1. Planteamiento del problema.....	19
1.3. Justificación del estudio .....	21
<b>II. HIPÓTESIS</b> .....	<b>23</b>
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	<b>24</b>
3.1. Objetivo general .....	24
3.1.1. Objetivos específicos .....	24
<b>IV. METODOLOGÍA</b> .....	<b>25</b>
4.1. Sitio de estudio .....	25

4.2.	Material de estudio .....	29
4.2.1.	Conchas de moluscos fósiles para la reconstrucción paleoclimática en alta resolución.....	32
4.2.2.	Dientes de tiburón y conchas fósiles para la datación geológica y comparación de las condiciones oceanográficas .....	33
4.2.3.	Agua de ríos del sur del Perú .....	34
4.3.	Diseño de estudio .....	35
4.3.1.	Tipo de estudio.....	35
4.3.2.	Población .....	35
4.3.3.	Muestra .....	36
4.4.	Operacionalización de las variables .....	37
4.5.	Procedimientos y técnicas .....	37
4.5.1.	Diagénesis.....	37
4.5.1.1	Análisis de difracción de rayos X (XRD).....	38
4.5.1.2	Análisis de imágenes de microscopio electrónico (SEM) .....	39
4.5.2.	Análisis Isotópicos.....	39
4.5.2.1	Análisis isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución para la estimación de la variabilidad climática estacional .....	39
4.5.2.2	Análisis isotópicos del estroncio.....	44
4.5.3.	Modelo de mezcla de aportes de estroncio de origen continental y marino .....	47
4.5.4.	Análisis estadístico .....	48
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
5.1.	Diagénesis .....	49
5.1.1.	Análisis de difracción de rayos x (XRD).....	49

5.1.2.	Análisis de imágenes de microscopio electrónico (SEM) .....	51
5.2.	Análisis isotópicos.....	55
5.2.1.	Datación .....	55
5.2.2.	Comparación entre las características oceanográficas de la Cuenca Pisco y el océano abierto .....	56
5.2.3.	Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en conchas fósiles .....	59
5.2.4.	Isótopos estables de oxígeno y carbono en alta resolución .....	62
<b>VI.</b>	<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>70</b>
6.1.	Diagénesis .....	70
6.2.	Señales isotópicas del estroncio en la Cuenca Pisco y el océano abierto	71
6.3.	Estacionalidad del $\delta^{18}\text{O}$ en el Mioceno Tardío (5.65-5.45 Ma) .....	75
6.3.1.	Origen del agua dulce en la costa peruana durante el Mioceno Tardío (5.65-5.45 Ma) .....	76
6.3.2.	Tendencia oceanográfica desde el Mioceno Tardío hasta el Pleistoceno .....	80
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>83</b>
<b>VIII.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>85</b>
<b>IX.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>86</b>
<b>X.</b>	<b>ANEXOS</b>	

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Valores promedios de temperatura en °C (panel de la izquierda) salinidad (panel central) y anomalía de densidad en  $\text{kg m}^{-3}$  (panel de la derecha) para el verano (Ene-Mar, en el panel superior) y para el invierno austral (Jul-Set, panel inferior). Los intervalos de contorno son de 1°C para la temperatura, 0.1 para la salinidad y 0.2  $\text{kg m}^{-3}$  para la densidad. Extraído de (Grados et al., 2018). ..... 4

**Figura 2.** Representación esquemática de las condiciones La Niña, Normal y El Niño en el Pacífico Tropical. Las flechas indican el sentido direccional de la circulación en la atmosfera y en el océano. Extraído de (McPhaden et al., 2021). 6

**Figura 3.** Representación gráfica del ICEN desde el año 2000. Los eventos en rojo de +0.5°C son considerados El Niño, mientras que los eventos en azul -0.5°C son considerados

LaNiña.

Fuente:

[http://www.imarpe.gob.pe/ftp/enso/imagenes/ATSM\\_mm\\_ICEN.png](http://www.imarpe.gob.pe/ftp/enso/imagenes/ATSM_mm_ICEN.png)..... 7

**Figura 4.** Evolución de las anomalías de TSM y precipitación durante los 4 eventos extremos El Niño. Anomalías mensuales promedio. La línea negra indica para precipitación el contorno cero y para temperatura la línea blanca indica la isoterma de 2°C. figura extraída de (Sanabria et al., 2018). ..... 8

**Figura 5.** Sitios de donde se extrajeron los núcleos de sedimentos los estudios de (Rickaby & Halloran, 2005) y (Wara et al., 2005), superpuesto en un mapa climatológico de TSM media en Pacífico tropical. Extraído de (Wara et al., 2005). ..... 11

**Figura 6.** Evolución global histórica de los últimos 10 millones de años de isótopos de oxígeno y temperatura global. Modificado de (Zachos et al., 2001), (Hansen et al., 2013) y CO<sub>2</sub> para los últimos 5 millones de años (Seki et al., 2010)..... 12

<b>Figura 7.</b> Distribución de unidades geomorfológicas de la cuenca Pisco. La cuenca Pisco Oeste se encuentra aún sumergida y es separada por la Cordillera de La Costa de la parte Este. Extraído de (Leon et al., 2008) con base en (Macharé, 1987)....	13
<b>Figura 8.</b> A) Mapa de ubicación del proyecto. B) Ubicación geopolítica de la zona de estudio. C) Ubicación de las 9 localidades que representan diferentes edades geológicas.....	25
<b>Figura 9.</b> Recolección de muestras de agua río para análisis isotópicos.....	35
<b>Figura 10.</b> Esquema del diseño de investigación del presente proyecto. Etapas para determinar la conectividad entre la cuenca Pisco y el mar abierto y la estacionalidad de $\delta^{18}\text{O}$ en conchas fósiles. ....	36
<b>Figura 11.</b> Concha fósil de la especie <i>Anadara Chilensis</i> . Muestra SAC-20-8-4.40	
<b>Figura 12.</b> Procedimiento de preparación de la muestra para análisis isotópico en alta resolución. A) Limpieza de la concha utilizando herramientas manuales, B) inclusión de la concha en resina epóxica, C) corte longitudinal de 1 mm de espesor utilizando disco de diamantina, D) pulido de la sección de corte utilizando lijas de diferente grosor de grano, E) escaneo de la sección de la concha utilizando un microscopio óptico binocular.....	41
<b>Figura 13.</b> A) Identificación de líneas de crecimiento para el micromuestreo en alta resolución. B) Proceso de micromuestro que realicé usando Micromill en UPCH. C) Sección de concha micromuestreada, se observan los surcos de micromuestreo realizados Muestra de especie <i>Anadara Chilensis</i> SAC 20-7.8-R3.....	43
<b>Figura 14.</b> Diente de tiburón ( <i>Carcharodon sp</i> ) utilizado para análisis de isótopos de estroncio. Muestra: MUSM-4665. Barra de Escala de 1 cm.....	45

<b>Figura 15.</b> Relación de la edad geológica de fósiles marinos y la relación isotópica del estroncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ). LOWESS 5, modificado de (McArthur et al., 2012).....	47
<b>Figura 16.</b> Señales isotópicas del estroncio en dientes de tiburones y moluscos fósiles, para una secuencia de diferentes depósitos del Mioceno Tardío.....	59
<b>Figura 17.</b> Valores promedios y rangos de $\delta^{18}\text{O}$ (valor máximo y mínimo), para las 19 conchas fósiles muestreadas.....	61
<b>Figura 18.</b> Valores promedio anual y rangos de $\delta^{13}\text{C}$ (valor máximo y mínimo), para las 19 conchas fósiles muestreadas. para los períodos muestreados.....	61
<b>Figura 19.</b> Comparación de valores promedios de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ para diferentes épocas.....	62
<b>Figura 20.</b> Perfiles de $\delta^{18}\text{O}$ (línea azul) y $\delta^{13}\text{C}$ (línea roja) y la relación entre ambas variables para conchas del Mioceno tardío (7.25 Ma.) del sitio Yauca RC.....	63
<b>Figura 21.</b> Perfiles de $\delta^{18}\text{O}$ (línea azul) y $\delta^{13}\text{C}$ (línea roja) para conchas del Mioceno tardío (5.65-5.45 Ma.) del sitio Sacaco Chacra. ....	67
<b>Figura 22.</b> Perfil de $\delta^{18}\text{O}$ (línea azul) y $\delta^{13}\text{C}$ (línea roja) para conchas del Pleistoceno temprano. ....	68
<b>Figura 23.</b> Histograma de frecuencia de las amplitudes estacionales de $\delta^{18}\text{O}$ en Sacaco Chacra, Mioceno Tardío (5.65-5.45 Ma).....	69
<b>Figura 24.</b> Muestra de rastros de disolución y recristalización en una concha de <i>A. chilensis</i> SAC 20-8-4, del área denominada Sacaco Chacra (5.65-5.45 Ma). ....	71

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Relación de localidades previamente fechadas en la sub cuenca de Sacaco.</i> .....	26
<b>Tabla 2.</b> <i>Relación de muestras utilizadas en cada localidad.</i> .....	30
<b>Tabla 3.</b> <i>Coordenadas de puntos de recolección de las muestras de agua de río.</i> .....	34
<b>Tabla 4.</b> <i>VARIABLES INDEPENDIENTES Y VARIABLES DEPENDIENTES DEL ESTUDIO.</i> .....	37
<b>Tabla 5.</b> <i>Análisis de difracción de rayos X en muestras de moluscos.</i> .....	49
<b>Tabla 6.</b> <i>Descripción de imágenes obtenidas con microscopio electrónico.</i> .....	52
<b>Tabla 7.</b> <i>Rango de edades de las zonas geológicas muestreadas en la Cuenca Pisco Este.</i> .....	55
<b>Tabla 8.</b> <i>Valores de las señales isotópicas y concentración de estroncio (Sr) en agua de cinco ríos de la costa sur del Perú.</i> .....	57
<b>Tabla 9.</b> <i>Valores calculados de las proporciones de aguas continentales y oceánica, en la Cuenca Pisco.</i> .....	58
<b>Tabla 10.</b> <i>Valores estadísticos para cada concha fósil muestreada del sitio Yauca RC (7.25 Ma).</i> .....	59
<b>Tabla 11.</b> <i>Valores estadísticos para cada concha fósil muestreada del sitio Sacaco Chacra (5.65-5.45 Ma.)</i> .....	60
<b>Tabla 12.</b> <i>Valores estadísticos para cada concha fósil muestreada del sitio Tel Pole (~1.0 Ma.).</i> .....	60
<b>Tabla 13.</b> <i>Valores estadísticos de <math>\delta^{18}O</math>, <math>\delta^{13}C</math>, obtenidos de todas las conchas muestreadas para análisis en alta resolución para los 3 sitios.</i> .....	68

## ANEXOS

### Tablas

<b>Tabla A 1.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil <i>A. Chilensis</i> SAC 18-21-R1. ....	99
<b>Tabla A 2.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 18-21-R2 de <i>A. Chilensis</i> . ....	100
<b>Tabla A 3.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 18-21-R3 de <i>A. Chilensis</i> . ....	101
<b>Tabla A 4.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 18-34-R1 de <i>A. Chilensis</i> . ....	101
<b>Tabla A 5.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-1-1 de <i>A. Chilensis</i> . ....	102
<b>Tabla A 6.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-1-3b de <i>A. Chilensis</i> . ....	102
<b>Tabla A 7.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-1-5 de <i>A. Chilensis</i> . ....	103
<b>Tabla A 8.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-2-2 de <i>A. Chilensis</i> . ....	104
<b>Tabla A 9.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-2-3 de <i>A. Chilensis</i> . ....	105
<b>Tabla A 10.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-2-4 de <i>A. Chilensis</i> . ....	106
<b>Tabla A 11.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-7.8-1 de <i>A. Chilensis</i> . ....	106
<b>Tabla A 12.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-7.8-2 de <i>A. Chilensis</i> . ....	107
<b>Tabla A 13.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-7.8-3 de <i>A. Chilensis</i> . ....	108
<b>Tabla A 14.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-7.8-4 de <i>A. Chilensis</i> . ....	109

<b>Tabla A 15.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-8-2 de <i>A.Chilensis</i> . .....	110
<b>Tabla A 16.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-8-3 de <i>A.Chilensis</i> . .....	111
<b>Tabla A 17.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-8-4 de <i>A.Chilensis</i> . .....	112
<b>Tabla A 18.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-8-5 de <i>A.Chilensis</i> . .....	113
<b>Tabla A 19.</b> Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 18-6-R1 de <i>G.Ovata</i> . .....	114

## **Figuras**

<b>Figura A 1.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-12-R1 .....	115
<b>Figura A 2.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-12-R2 .....	115
<b>Figura A 3.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-12-R3 .....	116
<b>Figura A 4.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-13-R1 .....	116
<b>Figura A 5.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-13-R2 .....	116
<b>Figura A 6.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-15-R1 .....	117
<b>Figura A 7.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-15-R2 .....	117
<b>Figura A 8.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-15-R3 .....	117
<b>Figura A 9.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R1 .....	118
<b>Figura A 10.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R2 .....	118
<b>Figura A 11.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R3 .....	118
<b>Figura A 12.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R4 .....	119
<b>Figura A 13.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R5 .....	119
<b>Figura A 14.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R6 .....	119
<b>Figura A 15.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R7 .....	120
<b>Figura A 16.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R8 .....	120
<b>Figura A 17.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R9 .....	120
<b>Figura A 18.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R10 .....	121
<b>Figura A 19.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-8-R1 .....	121
<b>Figura A 20.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-8-R2 .....	121
<b>Figura A 21.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-8-R3 .....	122
<b>Figura A 22.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-8-R4 .....	122
<b>Figura A 23.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-7-R1 .....	122
<b>Figura A 24.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-7-R2 .....	123
<b>Figura A 25.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-7-R3 .....	123
<b>Figura A 26.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-7-R4 .....	123
<b>Figura A 27.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-1-R1 .....	124

<b>Figura A 28.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-1-R2 .....	124
<b>Figura A 29.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-1-R3 .....	124
<b>Figura A 30.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-19-R1 .....	125
<b>Figura A 31.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-19-R2 .....	125
<b>Figura A 32.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-20-R1 .....	125
<b>Figura A 33.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-20-R2 .....	126
<b>Figura A 34.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-20-R3 .....	126
<b>Figura A 35.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-21-R1 .....	126
<b>Figura A 36.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-21-R2 .....	127
<b>Figura A 37.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-28-R1 .....	127
<b>Figura A 38.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-28-R2 .....	127
<b>Figura A 39.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-28-R3 .....	128
<b>Figura A 40.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-28-R4 .....	128
<b>Figura A 41.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-26-R1 .....	128
<b>Figura A 42.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-26-R3 .....	129
<b>Figura A 43.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-30-R1 .....	129
<b>Figura A 44.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-30-R2 .....	129
<b>Figura A 45.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-30-R3 .....	130
<b>Figura A 46.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R2 .....	130
<b>Figura A 47.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R3 .....	130
<b>Figura A 48.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R4 .....	131
<b>Figura A 49.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R5 .....	131
<b>Figura A 50.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R6 .....	131
<b>Figura A 51.</b> Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R7 .....	132
<b>Figura A 52.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 18-21-R1 .....	132
<b>Figura A 53.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 18-21-R2 .....	132
<b>Figura A 54.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 18-21-R3 .....	133
<b>Figura A 55.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 18-34-R1 .....	133
<b>Figura A 56.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-1-1 .....	133

<b>Figura A 57.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-1-3b.....	134
<b>Figura A 58.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-1-5.....	134
<b>Figura A 59.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-2-2.....	134
<b>Figura A 60.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-2-3.....	135
<b>Figura A 61.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-2-4.....	135
<b>Figura A 62.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-7.8-1.....	135
<b>Figura A 63.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-7.8-2.....	136
<b>Figura A 64.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-7.8-3.....	136
<b>Figura A 65.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-7.8-4.....	136
<b>Figura A 66.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-8-2.....	137
<b>Figura A 67.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-8-3.....	137
<b>Figura A 68.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-8-4.....	137
<b>Figura A 69.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Anadara chilensis</i> .SAC 20-8-5.....	138
<b>Figura A 70.</b> Sección transversal de la concha fósil <i>Glycymeris Ovata</i> .SAC 18-6-R1 .....	138
<b>Figura A 71.</b> Graphical abstract de la tesis.....	139

## **RESUMEN**

El Sistema de la Corriente de Humboldt presenta condiciones oceanográficas particulares que lo hacen el ecosistema más productivo del mundo. Sin embargo, el origen de estas condiciones es aún desconocido. Registros de sedimentos marinos indican condiciones más cálidas durante el Mioceno y Plioceno que conllevan a la hipótesis de condiciones permanentes de El Niño para el Pacífico Tropical Este. El gradiente moderno de temperatura entre el Pacífico Este y Oeste se pudo haber incrementado progresivamente con las condiciones glaciales durante el Pleistoceno Temprano. No está claro la evolución de las condiciones ambientales en la costa peruana. Durante el Mioceno, los Andes no eran tan altos como lo son actualmente, y un mar epicontinental poco profundo, protegido del océano abierto por una cadena montañosa conocida como la Cordillera de la Costa, estaba presente a lo largo de la costa sur del Perú. Esta cuenca sedimentaria, conocida hoy como la Formación Pisco, ha producido uno de los registros fósiles más extraordinarios de la evolución de vertebrados marinos. En este estudio recolectamos moluscos y dientes de tiburón fósiles en la Cuenca Pisco de diferentes depósitos sedimentarios desde el Mioceno Tardío hasta el Pleistoceno, las edades de estos depósitos se determinaron mediante estratigrafía isotópica de estroncio. Comparamos las señales isotópicas del estroncio entre dientes de tiburones pelágicos, que son indicadores de las condiciones oceanográficas del mar abierto y moluscos como indicadores de condiciones costeras. Mediante un modelo de mezcla, el cual incluyó análisis isotópicos de estroncio en muestra de agua de cinco ríos, se determinó el porcentaje de aportes de aguas oceánicas y aguas continentales en la Cuenca. Los resultados indican que para diferentes épocas existían conectividad entre la Cuenca y el océano

abierto a pesar de existir la Cordillera de la Costa. Sin embargo, para la localidad Sacaco Chacra del Mioceno Tardío existía una restricción que no permitía una mezcla completa entre las aguas oceánicas y de la Cuenca. Encontramos que para esta época los aportes de aguas continentales llegarían hasta (~45%) afectando considerablemente la salinidad.

Analizamos la esclerocronología y la variación mensual de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en 19 conchas para tres épocas distintas. Los resultados promedio de  $\delta^{18}\text{O}$  indican un enfriamiento de las aguas desde el Mioceno Tardío al Pleistoceno.

La evaluación en alta resolución de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  para el Mioceno Tardío del sitio Sacaco Chacra (5.65-5.45 Ma) en 15 conchas de la especie *Anadara Chilensis*, indican eventos El Niño con una frecuencia aproximada de 2.9 años. Además, estos eventos El Niño provocarían eventos de inundación en la Cuenca Pisco, indicando que la costa peruana no era hiperarida para esta época como actualmente se conoce.

Mis resultados representan el registro directo más antiguo de la actividad El Niño.

**Palabras clave:** Mioceno, Pleistoceno, isótopos, ENSO, Cuenca Pisco, Sacaco.

## **ABSTRACT**

The Humboldt Current System (HCS) presents particular oceanographic conditions that make it the most productive ecosystem in the world. The origins of these conditions, however, are still unknown. Marine sediments indicate much warmer conditions in the eastern tropical Pacific during the Miocene and Pliocene, which lead to the Hypothesis of permanent El-Niño-like conditions. The modern East-West temperature gradient of the Pacific may have progressively grown with glacial conditions during the Early Pleistocene. How environmental conditions have evolved on the coast of Peru remain unclear. In the Miocene, the Andes were not as high as today, and a shallow epicontinental sea, protected from the open ocean by a mountain ridge, was present along the southern coast. This sedimentary basin, known today as the Pisco formation, has yielded one of the most extraordinary fossil record of marine vertebrate evolution. In this study, we collected fossil shells and shark teeth from the East Pisco Basin (EPB) from different sedimentary deposits from Late Miocene to Pleistocene, the ages of these deposits were determined by radiogenic dating and strontium isotopic stratigraphy. We compared the strontium isotopic signature between fossil shark teeth, which are indicators of open ocean oceanographic conditions, and mollusks as indicators of coastal conditions. Results shows for different ages an important connectivity between EPB and the oceanic waters, despite the barrier that the Coastal Cordillera could represent. However, for the Sacaco Chacra locality (Late Miocene) a considerable restriction did not allow complete mixing between the EPB and oceanic waters. Results shows for this locality a continental waters contribution would reach up to (~45%), affecting considerably the salinity of EPB.

We analyzed the sclerochronology and the monthly variation  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  at high resolution in 19 shells for three ages. Mean  $\delta^{18}\text{O}$  indicate a cooling of the oceanic waters from Late Miocene to Pleistocene.

High-resolution evaluation of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  for Late Miocene (Sacaco Chacra locality) in 15 *Anadara chilensis* fossil shells would indicate El Niño events, with 2.9 years of frequency. Additionally, these El Niño events would cause flooding events in the EPB, showing that Peruvian south coast was not hyperarid for this time as it is currently known.

My results represent the oldest direct record of El Niño activity.

**Keywords:** Miocene, Pleistocene, isotopes, ENSO, East Pisco Basin, Sacaco.

## I. INTRODUCCIÓN

El margen costero del Perú es adyacente a la parte norte del sistema de la corriente de Humboldt (NHCS), entre los 70–90°W y 0–20°S (Grados et al., 2018). Se caracteriza por sus inusuales aguas frías que en promedio alcanzan los 19.4°C (Pennington et al., 2006) para una zona tropical ubicada cerca a los 5°S (Chavez et al., 2008) y vientos promedios de 5.7 m/s (Chavez & Messié, 2009). El mar peruano posee una alta productividad primaria debido al afloramiento de aguas profundas que vienen cargadas de nutrientes hacia la zona eufótica (Chavez et al., 2008; Pennington et al., 2006) y como consecuencia de esta alta productividad produce una mayor cantidad de peces por unidad de área que cualquier otra región oceánica en el mundo (Chavez et al., 2008). Sin embargo, las condiciones climáticas y oceanográficas en el mundo y por lo tanto en el Pacífico Ecuatorial Este (EEP) han ido variando en los últimos millones de años.

Para los últimos 10 millones de años, se ha observado un incremento gradual de la relación isotópica del isótopo estable del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) analizados en foraminíferos de sedimentos globales, lo que implicaría un descenso de la temperatura media del océano (Zachos et al., 2001).

La temperatura del mar frente a la costa peruana, estimada por el índice de insaturación de alquenonas ( $U_{37k'}$ ) en muestras de sedimentos profundos del testigo ODP 1237, se enfrió desde el inicio del Plioceno (5 Ma) hasta el periodo actual en 2.9°C, describiéndose el inicio de un enfriamiento de las aguas en zonas de afloramiento costero (Dekens et al., 2007), así mismo el Pacífico Ecuatorial Oriental mostró un descenso de la temperatura de 3.5 °C para el mismo periodo (Lawrence et al., 2006).

Actualmente en el Perú, una de las celdas de afloramiento costero de aguas profundas permanente se encuentra frente a la Cuenca sedimentaria Pisco, entre las ciudades de Pisco (14°S) y San Juan (16°S) (Grados et al., 2018).

La Cuenca Pisco Este es una cuenca de antearco y forma parte de las cuencas que conforman el margen continental peruano y se encuentra limitada por el oeste por la Cordillera de la Costa y por el este por la Cordillera Occidental (Leon et al., 2008; Macharé, 1987).

La Cuenca Pisco Este es una zona con gran contenido fosilífero de vertebrados e invertebrados y es una fuente importante de recursos para el estudio sobre los cambios faunísticos que podrían estar relacionados a la evolución climática de la costa peruana.

Este trabajo tiene por finalidad caracterizar las condiciones oceanográficas utilizando análisis isotópicos en alta resolución de oxígeno y carbono, así como análisis isotópicos promedio de estroncio, oxígeno, carbono sobre moluscos y dientes de tiburón fósiles para el periodo comprendido entre el Mioceno Tardío (10Ma) al Pleistoceno Temprano (1Ma) en la costa peruana, así como comprender los mecanismos que relacionan las condiciones locales y globales.

## **1.1. Marco Teórico**

### **1.1.1. Características oceanográficas del Pacífico Este frente a la costa peruana**

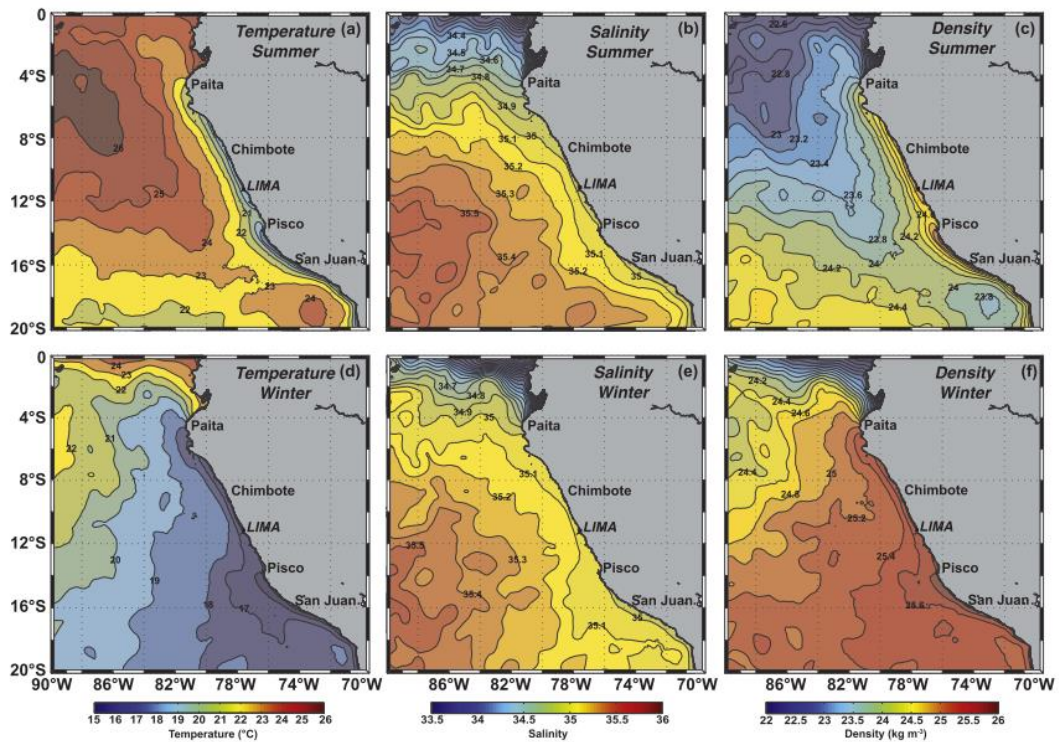
El sistema de afloramiento de la Corriente de Humboldt es considerado entre los más productivos del mundo, el cual se extiende frente a las costas de Chile y Perú.

Las características oceanográficas actuales en el Pacífico Este frente a Perú son las que representan a la parte norte del sistema de la Corriente de Humboldt.

Grados et al. (2018) describen las características hidrográficas (temperatura y salinidad) del sistema de Humboldt Peruano utilizando datos medidos in-situ obtenidos del Instituto del Mar del Perú (Imarpe) y del World Ocean Database para el periodo desde 1960 al 2014 aplicando el esquema de interpolación de cuatro dimensiones. Para ello divide el sistema de Humboldt en tres grandes zonas, la zona Norte representada por Paita ( $\sim 5^{\circ}\text{S}$ ), zona centro por Chimbote ( $\sim 9^{\circ}\text{S}$ ) y zona sur por San Juan ( $\sim 16.5^{\circ}\text{S}$ ). Cerca de la costa ( $\sim 100 - 200$  km), la temperatura superficial del mar (TSM) muestra un frente costero bien marcado, mucho más fuerte en el verano austral ( $\sim 4^{\circ}\text{C}$ ) que en el invierno ( $\sim 2^{\circ}\text{C}$ ), como se muestra en el panel de la izquierda de la Figura 1. Este frente térmico separa las aguas producto del afloramiento costero de las aguas superficiales subtropicales.

La zona de Paita presenta valores medios de temperatura de  $21^{\circ}\text{C}$  en el verano cerca de la costa, mientras que aproximadamente a 300 km de la línea costera tiene valores de  $24^{\circ}\text{C}$ . En esta temporada se produce un débil afloramiento costero y las salinidades son menores a 34.8, mientras que en el invierno el viento intensifica el afloramiento costero y la temperatura del mar cerca de la costa está en promedio en  $\sim 17-18^{\circ}\text{C}$  y la salinidad en  $\sim 35$ .

En la región central de la costa del Perú (Chimbote) la temperatura promedio en el verano es de  $18^{\circ}\text{C}$  y se presentan valores altos de salinidad ( $S > 35.1$ ) particularmente en los primeros 75 m superficiales y más allá de los 75 km fuera de la línea costera.



**Figura 1.** Valores promedio de temperatura en °C (panel de la izquierda) salinidad (panel central) y anomalía de densidad en  $\text{kg m}^{-3}$  (panel de la derecha) para el verano (Ene-Mar, en el panel superior) y para el invierno austral (Jul-Set, panel inferior). Los intervalos de contorno son de  $1^\circ\text{C}$  para la temperatura, 0.1 para la salinidad y  $0.2 \text{ kg m}^{-3}$  para la densidad. Extraído de (Grados et al., 2018).

El sur del país (San Juan), cerca de nuestra área de estudio, y donde actualmente se presenta la celda de afloramiento costero más intensa asociada a intensificación del viento, durante el invierno la TSM promedio es de  $15^\circ\text{C}$  y presenta una reducida salinidad ( $S < 35$ ) que es probablemente el resultado del afloramiento y la combinación con aguas de la corriente subsuperficial ecuatorial (ESSW) (Grados et al., 2018).

La costa peruana actualmente es hiperárida con valores promedio de precipitación anual menores a 10 mm. La variación de la salinidad debido al ingreso de las aguas continentales en Perú es mínima. La salinidad y el  $\delta^{18}\text{O}$  del agua de mar están muy correlacionados, por lo que la variación del  $\delta^{18}\text{O}$  de agua de mar es mínima a lo largo del año en la costa peruana; se midió esta variación en dos estaciones costeras

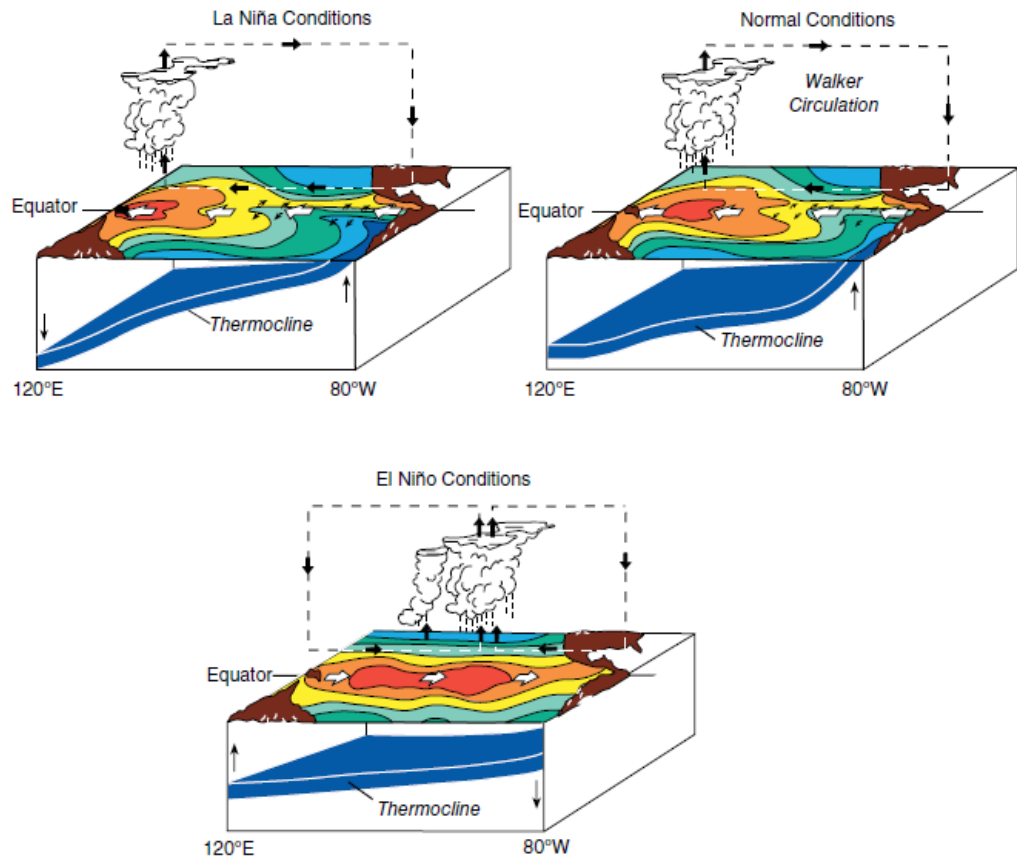
(Huacho e Ilo) entre el 2003 y 2004, encontrándose desviaciones estándar pequeñas, en el orden de 0.2‰ y 0.14‰ respectivamente (Carré et al., 2013).

### **1.1.2. El ENSO**

El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) es el más grande modo de variabilidad climática en escala interanual. El ENSO es generado en el Pacífico tropical a través de interacciones entre el océano y la atmósfera y está mediado por retroalimentaciones entre el viento superficial y la TSM (McPhaden et al., 2021). Es la variación anual más energética del sistema climático de la tierra, con eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) y ocurre aproximadamente cada 2-7 años.

En la Figura 2, se puede observar que cuando nos encontramos en una fase cálida de ENSO (El Niño) las condiciones de la termoclina presentan una menor pendiente, esto debido al debilitamiento de los vientos alisios que disminuyen el afloramiento costero y por lo tanto haya un incremento de la TSM. También, las altas temperaturas del agua ubicadas en el Pacífico Oeste (piscina cálida) se mueven hacia el Pacífico Central.

En la fase fría (La Niña), la pendiente de la termoclina se intensifica debido a la intensificación de los vientos alisios ya que esta produce una mayor surgencia de aguas frías.



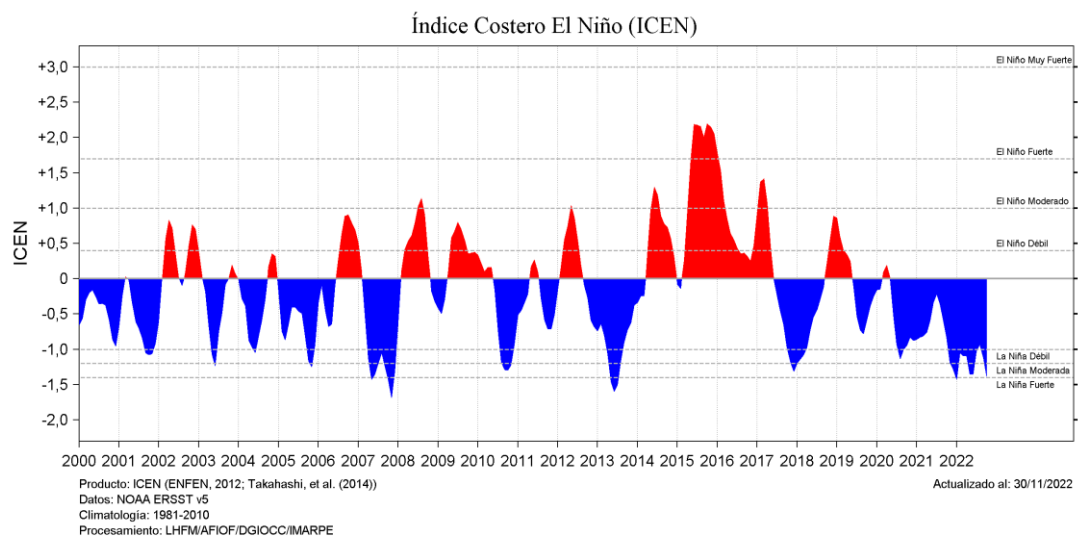
**Figura 2.** Representación esquemática de las condiciones La Niña, Normal y El Niño en el Pacífico Tropical. Las flechas indican el sentido direccional de la circulación en la atmósfera y en el océano. Extraído de (McPhaden et al., 2021).

El Niño y La Niña, no son necesariamente eventos opuestos, ya que El Niño presenta menor duración (~9-12 meses) y mayor intensidad que los eventos La Niña, que pueden ocurrir sucesivamente en 2 años. También las anomalías de la TSM se extienden más hacia el Oeste en eventos La Niña que en los eventos El Niño.

Para identificar El Niño que se origina en el Pacífico Oeste se usa comúnmente el ONI (Índice del Niño Oceánico) el cual está referido a una media móvil de tres meses de las anomalías de la TSM en la región Niño 3.4 localizada en el Pacífico Ecuatorial Central (170°W–120°W; 5°S–5°N). Aquellos períodos en los que el valor de ONI excede  $\pm 0.5$  °C es considerado por la Oficina Nacional de

Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) como eventos El Niño (anomalía positiva) o La Niña (anomalía negativa). Sin embargo, estos eventos no tienen grandes impactos en el Pacífico Ecuatorial Este por lo que para la región en donde se ubica el sistema de la corriente de Humboldt, se definió el ICEN (Índice costero El Niño) desarrollado por la Comisión Multisectorial encargada del Estudio del fenómeno El Niño (ENFEN).

El ICEN se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de TSM en la región Niño 1+2 (90°W–80°W; 10°S-0) del producto Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST v3b rt) con respecto a la climatología del periodo 1981-2010 como se muestra en la Figura 3.



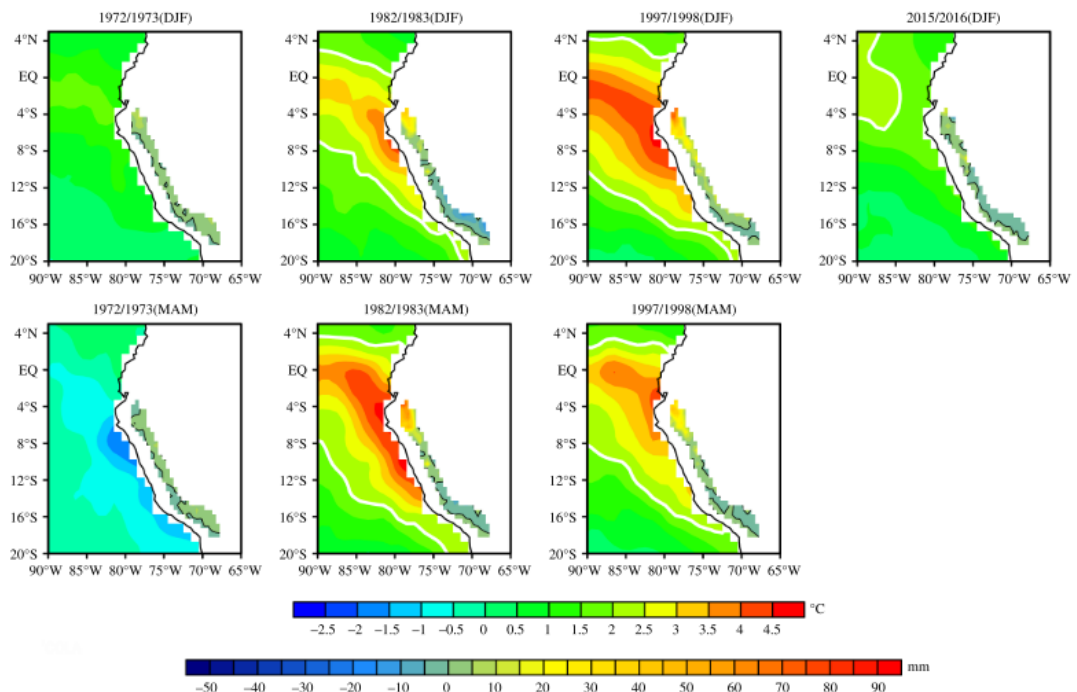
**Figura 3.** Representación gráfica del ICEN desde el año 2000. Los eventos en rojo de +0.5°C son considerados El Niño, mientras que los eventos en azul -0.5°C son considerados LaNiña. Fuente:

[http://www.imarpe.gob.pe/ftp/enso/imagenes/ATSM\\_mm\\_ICEN.png](http://www.imarpe.gob.pe/ftp/enso/imagenes/ATSM_mm_ICEN.png)

Los principales impactos de ENSO en sus ambas fases, fría (La Niña) y cálida (El Niño) son inundaciones, sequías, olas de calor y otros eventos extremos los cuales pueden afectar severamente a la agricultura, seguridad alimentaria, suministro de agua potable, entre otros.

En el Perú los eventos extremos de ENSO son aquellos producidos en fase cálida (El Niño), los cuales generan altas precipitaciones e inundaciones principalmente en la costa norte.

En nuestro país se han registrado cuatro eventos extremos en los últimos cincuenta años (1972/1973, 1982/1983, 1997/1998 y 2015/2016). La diferente evolución de las anomalías de precipitación en estos eventos extremos responde a dos modos, el primero que explica las fuertes lluvias en el norte del Perú y las precipitaciones leves en las zonas costeras del sur, y el segundo modo asociado con alta variabilidad (condiciones más secas y húmedas) en las partes altas a lo largo de la costa peruana. El primer modo reflejaría los eventos 1982/1983 y 1997/1998 mientras que el segundo serían los observados en 1972/1973 y 2015/2016 (Figura 4) (Sanabria et al., 2018).



**Figura 4.** Evolución de las anomalías de TSM y precipitación durante los 4 eventos extremos El Niño. Anomalías mensuales promedio. La línea negra indica para precipitación el contorno cero y para temperatura la línea blanca indica la isoterma de 2°C. figura extraída de (Sanabria et al., 2018).

Debido a que ENSO es la fuente más grande de variabilidad climática interanual en la Tierra, representa un objetivo crítico para las proyecciones de los futuros impactos del cambio climático (Emile-Geay et al., 2021). Por lo tanto, se requiere realizar estudios sobre archivos climáticos que nos permitan el análisis de la variabilidad del ENSO bajo distintos escenarios ya que existe evidencia de la sensibilidad del ENSO ante condiciones climáticas globales promedio.

La reconstrucción del ENSO en el pasado es muy importante para nuestro país debido a los fuertes impactos que causan los eventos y a la fragilidad de nuestro ecosistema. Un potente archivo climático para la reconstrucción de ENSO en Perú son los moluscos fósiles (Carré et al., 2013, 2014) en los cuales se analizan los proxys isótopos de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) y de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ). El isótopo de oxígeno mediante ecuaciones calibradas para algunas especies en específico como *Mesodesma donacium* (Carré et al., 2005) es transformado a valores de TSM, de esta forma se puede comprender la dinámica y la variación de ENSO bajo diferentes escenarios en el pasado.

### **1.1.3. Condiciones climáticas y oceanográficas globales desde el Mioceno Tardío al Pleistoceno Temprano (10-1 Ma)**

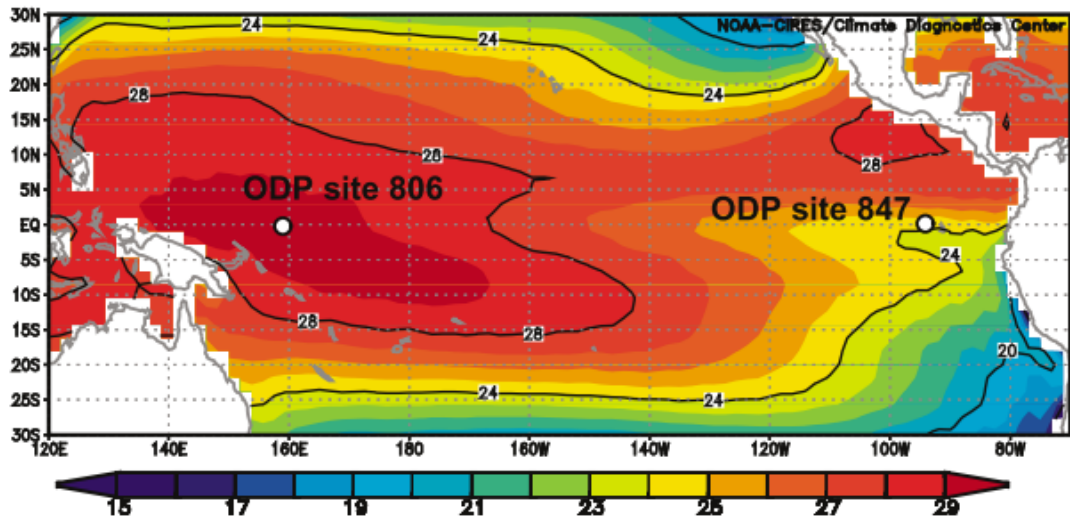
Desde el Mioceno Tardío a la actualidad el clima global ha experimentado una transición de un estado más cálido a uno más frío en todo el planeta. Entre los 10 y 6 millones de años se observa un aumento gradual de la relación isotópica de los isótopos de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) en el mar, indicando un enfriamiento general y la expansión de capas de hielo en el oeste de la Antártida y el Ártico (Zachos et al., 2001), como se observa en la Figura 6. Para este mismo periodo la TSM en el Pacífico Este subtropical descendió aproximadamente  $5^{\circ}\text{C}$ . Alrededor de los 8.6

Ma, el Pacífico Ecuatorial Este presentó una termoclina más profunda (Beltran et al., 2014; Lariviere et al., 2012), el Pacífico Noreste presentó un patrón similar y el Noroeste del Pacífico tuvo un descenso promedio de TSM de 3°C (Lariviere et al., 2012).

El Plioceno (5.3 -2.58 Ma) se caracteriza por ser el periodo cálido más reciente con condiciones de CO<sub>2</sub> atmosférico similares a las actuales (Seki et al., 2010). Estos valores promedios de CO<sub>2</sub> (330 - 400 ppm) serían los causantes de un efecto invernadero y de las temperaturas globales más elevadas (Tierney et al., 2019).

Para el periodo cálido del Plioceno existen diversos estudios sobre las condiciones ambientales con resultados no acordes entre sí. La reconstrucción de las temperaturas a partir del proxy Mg/Ca en tres especies de foraminíferos plantónicos muestreados en núcleos de sedimentos del fondo oceánico del Pacífico Este (Site 847) y Pacífico Oeste (Site 806) como se muestra en la **Figura 5**, plantean condiciones tipo La Niña con termoclinas más someras y gradientes de TSM entre el Pacífico Este y el Pacífico Oeste con mayor inclinación (Rickaby & Halloran, 2005). Sin embargo, para el mismo periodo Wara et al. (2005) en su estudio de sedimentos de fondo oceánico obtenidos del Pacífico Este (Site 847) y Pacífico Oeste (Site 806) en la que reconstruye los valores de TSM y  $\delta^{18}\text{O}$  para los últimos 5.3 Ma con una resolución de 10 ka y más de 400 datos, encuentran condiciones tipo El Niño en donde la termoclina es más profunda y el gradiente de TSM en el Pacífico Ecuatorial es menos pronunciado. Wara et al. (2005) señalan que esta contradicción con el estudio de Rickaby & Halloran (2005), se debe a que estos últimos solo utilizan 6 datos de TSM para representar los últimos 5 Ma y solo 1 para el periodo cálido del Plioceno y sospechan que la variabilidad de mayor

frecuencia (escala orbital) llevaron a concluir a estos autores erróneamente que el Pacífico Este era más frío en el periodo cálido del Plioceno que en la actualidad (Wara et al., 2005). El Pacífico Oeste era 2°C más frío y el Pacífico Este 2°C más cálido para el Plioceno (Fedorov et al., 2006; Wara et al., 2005).



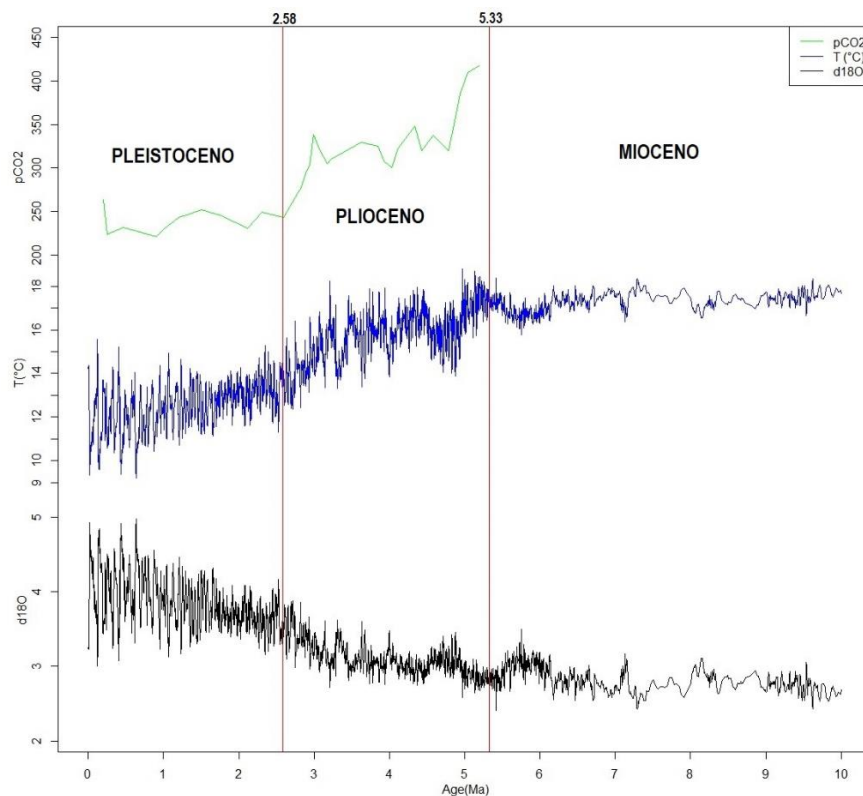
**Figura 5.** Sitios de donde se extrajeron los núcleos de sedimentos los estudios de (Rickaby & Halloran, 2005) y (Wara et al., 2005), superpuesto en un mapa climatológico de TSM media en Pacífico tropical. Extraído de (Wara et al., 2005).

Sin embargo, para el periodo cálido del Plioceno (3-5 Ma) la reconstrucción de TSM a partir del  $\delta^{18}\text{O}$  evaluados en dos corales fósiles (*Porites*) de Filipinas que representan 35 años de datos mensuales y estacionales cada uno, revela que El Niño era activo para este periodo con características similares a la actualidad (Watanabe et al., 2011). Lo cual rebate las hipótesis planteadas anteriormente, en los que se señala que existen condiciones permanente tipo La Niña (Rickaby & Halloran, 2005) y El Niño (Wara et al., 2005) respectivamente para ese mismo periodo de tiempo.

Adicionalmente, el estudio de Watanabe et al. (2011), revela que la actividad dinámica del ENSO es resultante de la variabilidad interanual de los movimientos de la Piscina Cálida del Pacífico Oeste durante el Periodo Cálido del Plioceno,

reforzando la hipótesis de que vientos más fuertes en el Pacífico Tropical actúan como una posible fuerza impulsora detrás de ENSO cuando las TSM son más altas que los niveles actuales.

Los niveles de  $p\text{CO}_2$  de los últimos 5.3 Ma reconstruidos a partir del índice de insaturación de alquenonas ( $U_{37k'}$ ), cuyas estimaciones se basan en las composiciones isotópicas de carbono estable y la fracción isotópica total del carbono que ocurrió durante el crecimiento de las algas, y  $\delta^{11}\text{B}$  de foraminíferos (**Figura 6**) revelan que los niveles en el Plioceno eran mayores que el Pleistoceno y entre 50 – 120 ppm mayores que la era pre industrial (Seki et al., 2010). El descenso progresivo de  $p\text{CO}_2$  coincide con el enfriamiento global que reporta (Zachos et al., 2001).



**Figura 6.** Evolución global histórica de los últimos 10 millones de años de isótopos de oxígeno y temperatura global. Modificado de (Zachos et al., 2001), (Hansen et al., 2013) y CO<sub>2</sub> para los últimos 5 millones de años (Seki et al., 2010).

#### 1.1.4. Características de la Cuenca Pisco Este

La Cuenca Pisco Este (CPE) es una cuenca de antearco que conforma el margen continental peruano, se ubica entre ( $12^{\circ}30'$  a  $15^{\circ}45'S$  y  $74^{\circ}30'$  a  $77^{\circ}$  W) y se extiende por 300 km a lo largo de la costa peruana y está limitada por el oeste por la cordillera de la Costa y por el este por los batolitos de la costa y forma parte del conjunto de cuencas de antearco que conforman el margen continental peruano (Leon et al., 2008; Ochoa et al., 2021).



**Figura 7.** Distribución de unidades geomorfológicas de la cuenca Pisco. La cuenca Pisco Oeste se encuentra aún sumergida y es separada por la Cordillera de La Costa de la parte Este. Extraído de (Leon et al., 2008) con base en (Macharé, 1987).

La cordillera de la Costa separa la parte Este de la Oeste de la cuenca Pisco y es una unidad en forma de franja que presenta valles y depresiones poco profundos, los

cuales se extienden desde el nivel del mar hasta los 600-800 metros, posee un relieve irregular con bahías e islas (Leon et al., 2008). Los sedimentos de CPE se depositaron durante al menos tres ciclos transgresivos (Dunbar et al., 1990; Leon et al., 2008; Macharé, 1987).

#### **1.1.5. La Formación Pisco**

La Formación Pisco es una sucesión sedimentaria marina de poca profundidad, depositada y expuesta a lo largo de la costa sur del Perú desde Pisco en Ica hasta Yauca en el norte de Arequipa (DeVries, 1998; Dunbar et al., 1990). Se caracteriza por rocas blandas y amarillentas de aspecto calcáreo (De Muizon & DeVries, 1985), y tiene un espesor aproximado que va desde los 200 hasta los 1000 metros (Dunbar et al., 1990), ocurre en dos subcuencas, la subcuenca Pisco-Ica en el norte y la subcuenca Sacaco en el sur.

Los sedimentos de la Formación Pisco en la subcuenca de Sacaco están fechados desde el Mioceno Tardío Hasta el Plioceno Temprano, entre 10 y 4.5 Ma (De Muizon & DeVries, 1985; Ochoa et al., 2021, 2022) y tiene un espesor de al menos 400 metros (Ochoa et al., 2021). En la subcuenca de Sacaco, los sedimentos de esta formación se caracterizan como depósitos terrígenos clásticos del tamaño de las arenas, con intercalaciones de depósitos bioclásticos y derivados de volcanes (DeVries, 2020; Ochoa et al., 2021). La Cordillera de la Costa, en la subcuenca de Sacaco, pudo haber sido una barrera protectora mas no aisladora ni restrictiva del intercambio de agua de mar con el océano (Ochoa et al., 2021).

La Formación Pisco se caracteriza por su gran contenido fosilífero de vertebrados e invertebrados, y es considerado uno de los mayores yacimientos de fósiles

marinos en el mundo. Esta formación ha sido objeto de muchos estudios paleontológicos, especialmente de vertebrados. Los fósiles estudiados son principalmente cetáceos debido a su abundancia (e.g R. Esperante & Poma, 2015; Raúl Esperante et al., 2014), tiburones (e.g Collareta et al., 2017; Ehret et al., 2009, 2012) y cocodrilos (e.g Ochoa et al., 2021; Salas-Gismondi et al., 2022).

La evidencia fósil de animales endémicos como el *Piscogavialis* y *Sacacosuchus* hallada en esta formación son indicativos de aguas costeras del Mioceno Tardío con temperaturas más cálidas que las actuales (Ochoa et al., 2021). Así también, reconstrucciones de TSM utilizando isótopos de oxígeno en bivalvos (*Anadara* y *Chlamys*) indicarían valores entre 20-30°C (Muizon, 1981) en el Mioceno Tardío, mientras que para el Pleistoceno Temprano la TSM reconstruida a partir de los bivalvos (*Mesodesma* y *Eurhomalea*) reflejan valores entre 12-20°C (Muizon, 1981), evidenciando un enfriamiento de las aguas costeras del sur del Perú.

En Sacaco, fueron hallados también los restos de un perezoso marino (*Thalassocnus*) compuesto por cinco especies pertenecientes al grupo de los *Xenarthrans* documentados desde el Mioceno Tardío hasta al Plioceno Temprano (~9.6-4.5 Ma) (Ochoa et al., 2021). Este perezoso se caracterizaba por ser un mamífero herbívoro que se alimentaba del pasto marino en ambientes de aguas poco profundas y protegidas (McDonald & De Muizon, 2002). Se refuerza la hipótesis de que un descenso de la TSM para la época (~9.6-4.5 Ma), extinguió esta especie debido a que el pasto marino que consumía eran de aguas tropicales y ambientes de poca profundidad (McDonald & De Muizon, 2002).

Para el Mioceno Tardío, el delfín *Pliopontos littoralis* descubierto en los sedimentos de la Formación Pisco habría tenido la capacidad de alternar zonas fluviales y marino-costeras, además el morfoespacio ocupado por esta especie refuerza el planteamiento de condiciones más cálidas del mar peruano para esta época (Carrasco Zúñiga, 2022). Estos resultados indicarían un posible ingreso de aguas continentales hacia la Cuenca Pisco en el Mioceno Tardío, mayores a los actuales.

#### **1.1.6. Conchas de moluscos fósiles: archivos paleoclimáticos de alta resolución**

Las conchas de los moluscos se forman con aragonita o calcita (Mann, 1982), los cuales son secretados en un equilibrio isotópico con respecto al ambiente en donde crecen (Kirby et al., 1998).

La esclerocronología es el estudio de incrementos periódicos en esqueletos calcáreos como las conchas de moluscos y corales, con lo que se puede descifrar los registros ambientales conservados en los fósiles (Kirby et al., 1998). Los cambios en la tasa de crecimiento de las conchas resultan en líneas de crecimiento las cuales representan una cronología desde la parte juvenil hasta la muerte del animal (Carré, 2007). Estos patrones de crecimiento pueden ser diarios, mareales, quincenales o anuales, y mediante su uso se puede colocar en un contexto temporal a cada porción de la concha (Schöne & Gillikin, 2013).

El carbonato de calcio generado por las conchas registra en su geoquímica la información del ambiente en el que se formó. Por lo que las conchas sirven como una potente herramienta para las reconstrucciones paleoclimáticas.

### 1.1.7. Análisis Isotópicos

#### 1.1.7.1 Isótopos estables de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ )

En la naturaleza, el oxígeno presenta 3 isótopos estables  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$ , cuyas composiciones en el oxígeno atmosférico total son de 99.759, 0.0374 y 0.2039% respectivamente y el ratio entre  $^{18}\text{O}$  y  $^{16}\text{O}$  es 1:489 sin embargo esto puede variar alrededor de 10% (Mann, 1982). Los ratios de isótopo de oxígeno usados como indicador de las temperaturas en el pasado se basan en el fraccionamiento termodinámico entre  $^{16}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$  (Epstein et al., 1951, 1953).

Los resultados de los análisis de isótopos se representan de la siguiente manera:

$$\delta (\text{Muestra}) = \left( \frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estandar}}} - 1 \right) \times 10^3 \text{ ‰}$$

Donde R es el ratio isotópico  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , el R estándar utilizado en carbonato de calcio es V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite).

El valor de  $\delta^{18}\text{O}$  de las conchas depende de la composición isotópica  $\delta^{18}\text{O}$  del agua donde ocurre la precipitación y de la temperatura que afecta el fraccionamiento isotópico entre el agua y el carbonato de calcio (Epstein et al., 1951, 1953).

Grossman & Ku (1986) desarrollaron una ecuación basándose en datos de foraminíferos y moluscos que ha sido considerada como la definición de equilibrio isotópico en aragonita biogénica:

$$T = 20.6 - 4.34(\delta^{18}\text{O}_{\text{arag}(PDB)} - \delta^{18}\text{O}_{\text{water}(MOW)})$$

Donde  $\delta^{18}\text{O}_{\text{arag}}$  está medido con referencia al estándar V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite) y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$  del agua de mar en referencia al estándar MOW (Mean Ocean Water) = SMOW-0.2.

Para estimar los valores de temperatura en el pasado es necesario determinar el valor isotópico de la muestra de carbonato de calcio y del agua en el que se precipitó el carbonato. El valor isotópico del agua muchas veces se debe asumir, o inferir usando otras técnicas (por ejemplo, los isótopos agrupados  $^{18}\text{O} - ^{13}\text{O}$  en los carbonatos) (Affek, 2012; Eiler, 2011).

#### **1.1.7.2 Isótopos estables de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ )**

El valor isotópico  $\delta^{13}\text{C}$  de la aragonita biogénica refleja principalmente el valor isotópico del carbono inorgánico disuelto (DIC) (Carré et al., 2005; Kirby et al., 1998). Sin embargo, en muchos organismos marinos el valor de  $\delta^{13}\text{C}$  es una función del  $\delta^{13}\text{C}$  del DIC del ambiente y del valor de  $\delta^{13}\text{C}$  del  $\text{CO}_2$  respirado por el organismo. La contribución al  $\delta^{13}\text{C}$  producto de la respiración se ha estimado que es menor a 10 % (McConnaughey et al., 1997).

Los valores isotópicos se expresan como una desviación en relación al estándar internacional V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite), usando la notación delta siguiente:

$$\delta (\text{Muestra}) = \left( \frac{\text{R muestra}}{\text{R estándar}} - 1 \right) \times 10^3 \text{ ‰}$$

Donde R es el ratio isotópico  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ , el R estándar utilizado en carbonato de calcio es V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite).

Debido a que el  $\delta^{13}\text{C}$  del carbono inorgánico disuelto del océano es ( $\sim 0\text{‰}$ ) y el carbono disuelto en las aguas continentales proviene de las plantas y tiene por lo tanto un valor mucho más negativo ( $\sim -5\text{‰}$  a  $-25\text{‰}$ ), la influencia de aguas

continentales en el medio donde vive el organismo se puede detectar por una disminución conjuntas en la serie temporal de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ .

### **1.1.7.3 Isótopos de estroncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )**

Este análisis tiene la capacidad de fechar fósiles marinos bien preservados basándose en el hecho de que la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  del estroncio disuelto en los océanos es homogénea en el océano global y ha variado con el tiempo a escalas geológicas de manera conocida (McArthur et al., 2012). El  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en conchas no se ve afectado por procesos de fraccionamiento biológico, por lo que si no existe diagénesis entonces reflejará adecuadamente la señal isotópica del agua en donde creció (citados en Vonhof et al., 1998) .

Las medidas del  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en minerales marinos han sido calibrados con curvas de cientos de valores (LOWESS 5) los cuales al compararse con estas, pueden arrojar un valor numérico sobre la edad de estos minerales marinos (McArthur et al., 2012) hallados sobre los sedimentos de alguna formación.

Estos análisis se realizaron en dientes de tiburón y en moluscos fósiles recolectados para cada época estudiada desde el Mioceno Tardío hasta el Pleistoceno.

Correlacionar las señales isotópicas registradas en los dientes de tiburón y en los moluscos fósiles, permite evaluar la conectividad entre el océano abierto y el mar de la cuenca Pisco para diferentes localidades.

## **1.2. Planteamiento de la Investigación**

### **1.2.1. Planteamiento del problema**

Para el periodo comprendido entre el Mioceno tardío (10 Ma) al Pleistoceno temprano (1 Ma), el incremento en la relación isotópica del isótopo estable de

oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) refleja cambios en las condiciones oceanográficas, principalmente de la TSM y el volumen de los cascos polares de hielo (Zachos et al., 2001). Desde el Plioceno Temprano, la formación del istmo de Panamá cortó la circulación oceánica entre el Atlántico Tropical y el Pacífico Tropical generando nuevas interacciones entre el océano y la atmosfera (Haug et al., 2001). Sin embargo, no se tiene claro como este proceso geológico afectó a las características oceanográficas del sistema costero del Perú en esa época.

Actualmente la costa peruana es hiperárida debido a que la cordillera de los Andes forman un obstáculo al Monzón Sudamericano, a la influencia constante del anticiclón del Pacífico Sureste y a los efectos estabilizadores de la corriente fría de Humboldt (Mächtle et al., 2010). Sin embargo, no conocemos la época en las que se estableció esta hiperaridez. La existencia y posterior extinción de especies endémicas como los cocodrilos *Piscogavialis* y *Sacacosuchus* hasta 4.8 Ma, indicarían que la costa peruana durante el Mioceno Tardío no era tan fría como es actualmente (Ochoa et al., 2021; Salas-Gismondi et al., 2022), condiciones que pudieron haber generado mayor evaporación del agua de mar y precipitaciones en la costa. Por otro lado, estudios sobre la medición de  $^{21}\text{Ne}$  cosmogénico en clastos de superficies sedimentarias en el desierto de Atacama en Chile, concluyen que la erosión no ha afectado considerablemente a estas superficies desde los últimos 25 Ma, lo que indicaría que la hiperaridez en esta zona se estableció en esta época (Dunai et al., 2005). Sin embargo, existe controversia de cuando se estableció la hiperaridez ya que existen estudios que indican que el Mioceno Tardío se caracterizaba por aumento de las precipitaciones en la región central de los Andes (e.g Poulsen et al., 2010).

Al no contar con estudios a detalles de las condiciones ambientales durante este periodo no queda claro, ¿Cuál es el papel que tuvo el cambio climático y oceanográfico local con la evolución de este ecosistema? ¿Cuáles fueron los tipos de clima en el que vivieron las especies hoy encontradas fosilizadas en la Cuenca Pisco? ¿Desde cuándo la costa peruana es hiperárida? ¿Cuál es la relación de estos cambios con eventos tectónicos de mayor escala como el surgimiento de los Andes y el cierre definitivo del istmo de Panamá? ¿Existía alguna similitud climática con lo que actualmente conocemos como El Niño?

### **1.3. Justificación del estudio**

Durante el periodo clave de transición (10 Ma – 1 Ma) ocurren grandes variaciones climáticas a nivel global. En este periodo se produjeron grandes cambios faunísticos en el norte del sistema de la corriente de Humboldt (Ochoa et al., 2021) que podrían estar asociados a variaciones en las condiciones ambientales en la costa peruana. Lamentablemente no se cuentan con reconstrucciones paleoclimáticas directas, necesarias para entender la dinámica de la evolución del sistema de la corriente de Humboldt y su origen.

Así también, la evidencia fósil de vertebrados e invertebrados encontrados a lo largo de la Cuenca Pisco representan archivos naturales de las condiciones ambientales del pasado y sugieren condiciones climáticas distintas a las modernas (e.g De Muizon & DeVries, 1985; DeVries, 2020; Ochoa et al., 2021; Ortlieb & Diaz, 1991). Por lo tanto, estos archivos, son una oportunidad excepcional para generar observaciones climáticas de la costa peruana del Mioceno Tardío y el Plioceno, a través del análisis de indicadores paleoclimáticos como isótopos de oxígeno y carbono en conchas fósiles.

Nuestro estudio ayudará a comprender si el clima costero peruano está determinado por factores tectónicos locales y globales, como el levantamiento completo de los andes y el cierre por completo del istmo de Panamá (Bartoli et al., 2005; Haug et al., 2001).

## **II. HIPÓTESIS**

H1: Las condiciones oceanográficas de la Cuenca Pisco reflejan las condiciones oceanográficas del mar abierto durante el periodo del Mioceno Tardío (10 Ma) al Pleistoceno Temprano (1 Ma) a pesar de la presencia de la Cordillera de la Costa.

H2: Durante el Mioceno tardío (7.25-5.45 Ma) la costa peruana frente a la Cuenca Pisco no presentaba condiciones de hiperáridez o tenía influencia de aguas continentales.

H3: Para el Mioceno tardío (5.65 - 5.45 Ma) existía actividad de El Niño Oscilación del Sur que podría ser registrado en las conchas de bivalvos fósiles.

### **III. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Caracterizar y evaluar las condiciones paleoceanográficas del mar peruano frente a la Cuenca Pisco utilizando fósiles de moluscos y dientes de tiburón en el periodo comprendido entre el Mioceno Tardío (10 Ma) hasta el Pleistoceno Temprano (1 Ma).

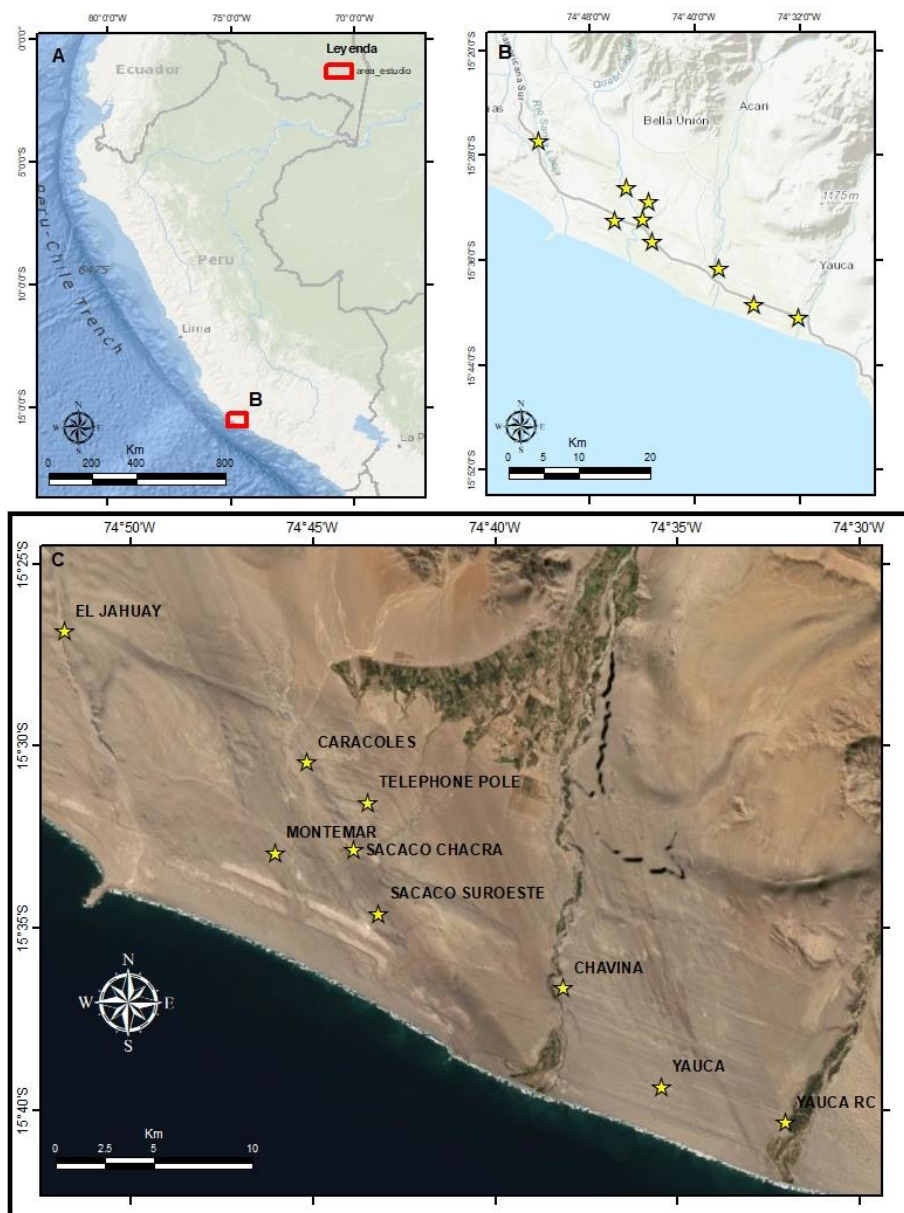
#### **3.1.1. Objetivos específicos**

- Identificar si las condiciones oceanográficas de la Cuenca Pisco reflejan las condiciones del mar abierto para los períodos comprendidos entre el Mioceno Tardío (10 Ma) al Pleistoceno Temprano (1Ma), a través de la comparación de la señal isotópica del estroncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) entre fósiles de invertebrados de hábitat costero y dientes de tiburón fósiles de hábitat pelágico.
- A partir de la evaluación de señales isotópicas en alta resolución, identificar posibles ciclos estacionales de precipitaciones o influencia de aguas continentales, y una posible actividad de El Niño Oscilación del Sur para el periodo comprendido entre (5.65-5.45 Ma).

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1. Sitio de estudio

El sitio de estudio está localizado en la Cuenca Pisco Este, al sur de la ciudad de Lima. El acceso a la zona de estudio se hace vía terrestre. El área de estudio se expande desde los 15°20' S hasta los 15°45' S de latitud Sur y entre los 74°30' W y 74°55' W de longitud Oeste (Figura 8).



**Figura 8.** A) Mapa de ubicación del proyecto. B) Ubicación geopolítica de la zona de estudio. C) Ubicación de las 9 localidades que representan diferentes edades geológicas.

Se identificaron 9 localidades para el muestreo, las cuales representan diferentes edades geológicas, los cuales se detallan en la Figura 8C. Algunas de las localidades han sido fechadas previamente por diferentes autores. En la Tabla 1 se detallan la edad, ubicación geográfica y el método de fechamiento para algunas localidades de la Formación Pisco.

**Tabla 1.** Relación de localidades previamente fechadas en la sub cuenca de Sacaco.

Localidad	Código de muestra	Lat	Lon	Método de fechamiento	Edad (Ma)	Error estándar	Intervalo de confianza	Referencia
El Jahuary (Alto Grande)	Tuff 1	-	-	K/Ar biotite	9.38	± 0.47	NA	1
El Jahuary (Alto Grande)	Tuff 1	-	-	K/Ar biotite	9.63	± 0.48	NA	1
El Jahuary (Alto Grande)	-	-	-	U/Pb zircon	9	± 0.4	NA (n= 1/55)	3*
El Jahuary (Alto Grande)	-	-	-	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr(in CaCO3 shells)	7.35	8.55-6.50	NA	3*
Montemar	-	-	-	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr(in CaCO3 shells)	7.15	8.25-6.52	NA	3*
Montemar	MG4-06	-15.582	-74.743	U/Pb zircon	6.336	± 0.035	0.274 (n=3/3)	4
Yauca Road Cut	MG3-54	-15.67	-74.532	U/Pb zircon	7.4	± 0.3	n=1	4
Sacaco - Chacra	MG4-1Mz	-15.551	-74.736	U/Pb zircon	5.741	± 0.056	0.706 (n= 2/3)	5
Sacaco - Chacra	DV 514-2 Snee	-	-	Ar/Ar	5.75	± 0.05	NA	2
Sacaco - Chacra	-	-	-	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr(in CaCO3 shells)	5.76	6.2-5.45	NA	3*
Sacaco - Chacra	MG3-25	-15.551	-74.737	U/Pb zircon	5.848	± 0.031	0.060 (n= 35/36)	5
Yauca	MG-138A	-15.655	-74.587	U/Pb zircon	4.85	± 0.044	0.086 (n= 14/17)	5
Sacaco Suroeste	MG4-01	-15.571	-74.728	U/Pb zircon	6.62	± 0.1	n=1	4
Caracoles	MG-117A	-15.502	-74.754	U/Pb zircon	4.541	± 0.061	0.119 (n= 2/4)	5
Caracoles	MG3-26	-15.503	-74.746	U/Pb zircon	1.945	± 0.033	0.065 (n= 5/6)	4
Caracoles	MG-126	-15.504	-74.725	U/Pb zircon	1.44	± 0.039	0.077 (n= 7/7)	4

Nota: Referencias: (1) (De Muizon & Bellon, 1986), (2) (Ehret et al., 2012), (3)\* (Valores recalculados por (Ochoa et al., 2022) con base en (Ehret et al., 2012) <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr: usando LOWESS 5 Fit 26/03/13 (McArthur et al., 2012) y U-Pb: Usando IsoplotR, (4)(Ochoa et al., 2022), (5)(Ochoa et al., 2021).

El Jahuay se designa como la sección inferior en la Formación Pisco dentro del área de Sacaco (De Muizon & DeVries, 1985). El lecho de la toba en ese lugar fue fechado radiométricamente entre 9.4-9.6 Ma (De Muizon & Bellon, 1980). Ochoa et al., (2022) recalcularon los valores radiométricos de edad obtenidos por (Ehret et al., 2012) en circones de la misma toba y lo fecharon en  $9.0 \pm 0.40$  Ma. Esta localidad representa la sucesión con contenido paleontológico más antigua de la subcuenca de Sacaco (Ochoa et al., 2022).

En la zona de Montemar se puede ubicar una sección expuesta de la Formación Pisco (De Muizon & DeVries, 1985). Los sedimentos en esta localidad se componen por arenisca gruesa y fina, limolita y yeso, junto a una mezcla de fósiles de vertebrados e invertebrados (De Muizon & DeVries, 1985). Esta localidad se extiende cerca a los 10 km de la línea costera y fue fechada entre  $\sim 7.15 - 6.13$  Ma (Ochoa et al., 2022).

La localidad Yauca Road Cut (Yauca RC) expone continuamente la roca de la Formación Pisco a lo largo de la carretera Panamericana Sur, aproximadamente a 1.5 km al suroeste del pueblo Yauca (Ochoa et al., 2022). El espesor de la sección es menor a 20 m y está compuesta por areniscas amarillentas, conglomerados y bancos de conchas dominados principalmente por la especie *Anadara chilensis* (Ochoa et al., 2022). Esta zona fue fechada radiométricamente utilizando la técnica de U-Pb en circones. La edad estimada fue  $7.4 \pm 0.3$  Ma (Ochoa et al., 2022).

La zona de Sacaco Chacra se ubica al norte de la carretera Panamericana Sur, cerca al museo de sitio de Sacaco (Ochoa et al., 2022) y es la sección más joven expuesta en el sur de la subcuenca Sacaco (Ehret et al., 2012). Los sedimentos se componen

principalmente de arenisca fina y de grano medio intercalada con capas pedregosas y capas de moluscos dominados principalmente por las especies *Anadara chilensis* y *Dosinia ponderosa* (Ehret et al., 2012; Ochoa et al., 2022). La localidad de Sacaco Chacra ha sido fechada, mediante datación radiométrica U-Pb y Ar/Ar e isotópicamente utilizando  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en el carbonato de calcio de conchas fósiles, entre  $\sim 5.9 - 5.7$  Ma (Ehret et al., 2012; Ochoa et al., 2021).

La localidad de Yauca se ubica entre los valles de los ríos Acarí y Yauca, entre los pueblos de Chaviña y Yauca a unos pocos cientos de metros de la carretera Panamericana Sur (Ochoa et al., 2021, 2022). En esta zona la sucesión está formada por alternancias de areniscas inmaduras, lutitas calcáreas y varios bancos de conchas de entre 10 a 20 cm de espesor (Ochoa et al., 2022). La zona fue fechada radiométricamente utilizando la técnica de U-Pb en circones, estimando una edad  $4.85 \pm 0.15$  Ma (Ochoa et al., 2021).

Sacaco Suroeste presenta afloramientos rocosos pocos comunes ya que el paisaje es plano, cubierto por arenas eólicas o cortado por yesos o terrazas de conchas más jóvenes correspondientes al Pleistoceno Temprano (Ochoa et al., 2022). La zona de Sacaco Suroeste ha sido fechada radiométricamente utilizando la técnica de U-Pb en circones, estimando una edad  $6.62 \pm 0.15$  Ma.

La localidad de Caracoles está ubicada a 5 km al noroeste de la localidad Sacaco Chacra. La Formación Pisco aflora solo en el margen oriental de la localidad y está compuesta por arenas inmaduras de grano medio intercaladas con bancos de conchas, lechos de limo gris y arenisca endurecidos, y capas de diatomita y pedernal de apenas unos cm de espesor (Ochoa et al., 2022). Los sedimentos más jóvenes

de la Formación Pisco ocurren en la localidad Caracoles y tienen una edad estimada de  $4.541 \pm 0.061$  Ma (Ochoa et al., 2021). Otras secciones de la localidad Caracoles han sido fechadas en  $1.945 \pm 0.033$  y  $1.44 \pm 0.039$  (Ochoa et al., 2022).

Por su posición estratigráfica o contenido paleontológico Chaviña está incluida como una localidad del Plioceno o Plio-Pleistoceno, sin embargo, no se tienen edades absolutas (DeVries, 2020).

La localidad Telephone Pole pertenece a la Formación Pongo, cuyos sedimentos se consideran que han sido acumulados durante el Pleistoceno en ambientes costeros de alta energía. La unidad Pongo 2 consiste en un conjunto distintivo de moluscos, en los cuales destacan especies como *C. chorus*, *Glycymeris ovata*, *A. purpuratus*, *Eurhomalea lenticularis*, *Protothaca thaca*, *thick-shelled Petricola*, *thick-shelled Mulinia edulis*, *Ensis macha*, *Cryptomya californica*, *low-profile Crepipatella dilatata*, *Crucibulum lignarium*, *Polinices uber*, *A. unicornis*, *Concholepas concholepas*, *T. chocolata*, *Xanthochorus buxeus*, and *Oliva peruviana* (DeVries, 2020).

#### **4.2. Material de estudio**

Para el presente proyecto se recolectaron muestras de bivalvos, gasterópodos y dientes de tiburón fósiles en diferentes localidades, los cuales se detallan en la Tabla 2. También se detallan el tipo de análisis que se realizó en cada muestra colectada.

Adicionalmente se realizó la toma de muestras de agua en cinco ríos de la costa sur del Perú, cerca del área de donde se recolectaron las muestras fósiles, los cuales se detallan en la Tabla 3.

**Tabla 2.** Relación de muestras utilizadas en cada localidad.

Localidad	Especie	Código	Latitud	Longitud	Tipo de análisis
El Jahuay (El Alto)	<i>Ostras</i>	SAC 20-12-R1	-74.8639	-15.4475	XRD, SEM
	<i>Ostras</i>	SAC 20-12-R2	-74.8639	-15.4475	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Ostras</i>	SAC 20-12-R3	-74.8639	-15.4475	XRD, SEM
	<i>Cosmopolitodus sp</i>	SAC 20-11-T1	-74.8642	-15.4469	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Cosmopolitodus sp</i>	SAC 20-9-T1	-74.8678	-15.4443	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Cosmopolitodus sp</i>	SAC 20-9-T2	-74.8678	-15.4443	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Montemar	<i>Ostras</i>	SAC 20-13-R1	-74.7673	-15.5491	XRD, SEM
	<i>Ostras</i>	SAC 20-13-R2	-74.7673	-15.5491	XRD, SEM
	<i>Ostras</i>	SAC 20-15-R1	-74.7598	-15.5524	XRD, SEM
	<i>Ostras</i>	SAC 20-15-R2	-74.7598	-15.5524	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Ostras</i>	SAC 20-15-R3	-74.7598	-15.5524	XRD, SEM
	<i>Cosmopolitodus sp</i>	SAC 20-16-T1	-74.7664	-15.5565	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Yauca RC	<i>Cosmopolitodus sp</i>	SAC 20-16-T2	-74.7664	-15.5565	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R1	-74.5340	-15.6723	XRD, SEM
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R2	-74.5340	-15.6723	SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R3	-74.5340	-15.6723	SEM
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R4	-74.5340	-15.6723	SEM
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R5	-74.5340	-15.6723	SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R6	-74.5340	-15.6723	XRD, SEM
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R7	-74.5340	-15.6723	SEM
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R8	-74.5340	-15.6723	XRD, SEM
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R9	-74.5340	-15.6723	XRD, SEM
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R10	-74.5340	-15.6723	XRD, SEM
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 18-21-R1	-	-	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 18-21-R2	-	-	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 18-21-R3	-	-	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO
Sacaco Chacra	<i>Carcharodon sp</i>	MUSM 4664	-74.729	-15.548	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Carcharodon sp</i>	MUSM 4665	-74.748	-15.521	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 18_34_R1			HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_1_1	-74.7338	-15.5425	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , XRD, MO
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_1_3b	-74.7338	-15.5425	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_1_5	-74.7338	-15.5425	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , XRD, MO
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_2_2	-74.7329	-15.5432	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_2_3	-74.7329	-15.5432	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_2_4	-74.7329	-15.5432	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_7.8_1	-74.7301	-15.5471	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , XRD, MO

Nota: tipo de análisis realizado: XRD (difracción de rayos X), SEM (escaneo por microscopio electrónico),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (isótopos de estroncio), HR  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  (isótopos de oxígeno y carbono en alta resolución), MO (microscopio óptico).

Continuación **Tabla 2.** *Relación de muestras utilizadas en cada localidad*

Localidad	Especie	Código	Latitud	Longitud	Tipo de análisis	
Sacaco Chacra	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_7.8_2	-74.7301	-15.5471	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_7.8_3	-74.7301	-15.5471	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , XRD, MO	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_7.8_4	-74.7301	-15.5471	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_8_2	-74.7314	-15.5476	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , XRD, MO	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_8_3	-74.7314	-15.5476	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_8_4	-74.7314	-15.5476	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20_8_5	-74.7314	-15.5476	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , XRD, MO	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R1	-74.7314	-15.5476	XRD, SEM	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R2	-74.7314	-15.5476	SEM	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R3	-74.7314	-15.5476	XRD, SEM	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R4	-74.7314	-15.5476	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-7-R1	-74.7301	-15.5471	SEM	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-7-R2	-74.7301	-15.5471	SEM	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-7-R3	-74.7301	-15.5471	SEM	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-7-R4	-74.7301	-15.5471	SEM	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-R1	-74.7338	-15.5425	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-R2	-74.7338	-15.5425	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-R3	-74.7338	-15.5425	XRD, SEM	
	Yauca	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-19-R1	-74.5907	-15.6560	XRD, SEM
		<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-19-R2	-74.5907	-15.6560	XRD, SEM
<i>Eurhomalea lenticularis</i>		SAC 20-20-R1	-74.5911	-15.6563	XRD, SEM	
<i>Eurhomalea lenticularis</i>		SAC 20-20-R2	-74.5911	-15.6563	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
<i>Eurhomalea lenticularis</i>		SAC 20-20-R3	-74.5911	-15.6563	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
<i>Eurhomalea lenticularis</i>		SAC 20-21-R1	-74.5877	-15.6572	XRD, SEM	
<i>Eurhomalea lenticularis</i>		SAC 20-21-R2	-74.5877	-15.6572	XRD, SEM	
<i>Carcharodon sp</i>		SAC 20-18-T1	-74.5901	-15.6545	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
<i>Carcharodon sp</i>		SAC 20-20-T1	-74.5911	-15.6563	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
<i>Carcharodon sp</i>		SAC 20-20-T2	-74.5911	-15.6563	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	

Nota: tipo de análisis realizado: XRD (difracción de rayos X), SEM (escaneo por microscopio electrónico),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (isótopos de estroncio), HR  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  (isótopos de oxígeno y carbono en alta resolución), MO (microscopio óptico).

Continuación **Tabla 2.** Relación de muestras utilizadas en cada localidad

Localidad	Especie	Código	Latitud	Longitud	Tipo de análisis
Sacaco Suroeste	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-28-R1	-74.7203	-15.5767	XRD, SEM
	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-28-R2	-74.7203	-15.5767	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Concholepa sp</i>	SAC 20-28-R3	-74.7203	-15.5767	XRD, SEM
	<i>Concholepa sp</i>	SAC 20-28-R4	-74.7203	-15.5767	XRD, SEM
	<i>Carcharodon sp</i>	SAC 20-29-T1	-74.7130	-15.5842	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Carcharodon sp</i>	SAC 20-29-T2	-74.7130	-15.5842	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Caracoles	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-26-R1	-74.7530	-15.5075	XRD, SEM
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-26-R3	-74.7530	-15.5075	XRD, SEM
	<i>Carcharodon sp</i>	SAC 20-27-T1	-74.7535	-15.5078	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Carcharodon sp</i>	SAC 20-27-T2	-74.7535	-15.5078	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Chaviña	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-30-R1	-74.6356	-15.6108	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-30-R2	-74.6356	-15.6108	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-30-R3	-74.6356	-15.6108	XRD, SEM
Telephone Pole	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R1	-	-	HR $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ , MO
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R2	-	-	XRD, SEM
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R3	-	-	XRD, SEM
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R4	-	-	XRD, SEM
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R5	-	-	XRD, SEM
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R6	-	-	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R7	-	-	XRD, SEM, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Nota: tipo de análisis realizado: XRD (difracción de rayos X), SEM (escaneo por microscopio electrónico),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (isótopos de estroncio), HR  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  (isótopos de oxígeno y carbono en alta resolución), MO (microscopio óptico).

#### 4.2.1. Conchas de moluscos fósiles para la reconstrucción paleoclimática en alta resolución.

Se utilizaron en total 19 muestras, colectadas en diferentes localidades, los cuales representan distintas edades geológicas, para el análisis paleoclimático en alta resolución.

Para la localidad de Yauca RC cuya edad estimada es de  $7.4 \pm 0.3$  Ma (Ochoa et al., 2022) se utilizaron tres conchas fósiles de la especie *Anadara chilensis*. En la

localidad Sacaco Chacra cuya edad estimada se encuentra entre ~5.9 – 5.7 (Ehret et al., 2012; Ochoa et al., 2021) se utilizaron quince conchas de la especie *Anadara chilensis*. Para esta localidad se seleccionaron quince individuos. Mientras que para la zona denominada Telephone Pole se utilizó una concha de la especie *Glycymeris Ovata*.

Para cada periodo se recolectaron bloques que contenían muchos individuos de diferentes especies de moluscos, de los cuales se separaron y limpiaron las conchas mejor preservadas utilizando herramientas manuales.

Los análisis que se realizaron en estas conchas fueron estudios isotópicos de alta resolución de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) y calcio ( $\delta^{13}\text{C}$ ). Previamente algunas de estas conchas fueron evaluadas con difracción de rayos X (XRD) y microscopio electrónico (SEM), para determinar posible alteración diagenética.

#### **4.2.2. Dientes de tiburón y conchas fósiles para la datación geológica y comparación de las condiciones oceanográficas**

Las muestras de dientes fósiles de tiburón (*Carcharodon sp*) y conchas fósiles fueron recolectadas por Matthieu Carré y Mario Urbina en noviembre del 2020 a lo largo de la Cuenca Pisco Este en diferentes localidades, las cuales representan distintas edades geológicas. Las localidades de donde se recolectaron las muestras fueron: El Jahuay, Montemar, Yauca, Sacaco Suroeste y Caracoles. Las muestras de dientes de tiburón utilizadas para este tipo de análisis de la localidad Sacaco Chacra, fueron prestadas por el Museo de Historia Natural de la Universidad Mayor de San Marcos, a través del Dr. Rodolfo Salas. En los dientes de tiburón y conchas fósiles se evaluó la señal isotópica del estroncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ).

### 4.2.3. Agua de ríos del sur del Perú

Para estimar los aportes de agua de río hacia la cuenca Pisco en el periodo de estudio, se requiere de una ecuación de mezcla que incluyen las concentraciones y señales isotópicas del estroncio del agua de mar y de los ríos aportantes a esta cuenca. En nuestro estudio se utilizaron muestras de agua de ríos modernos de la costa sur del Perú (Tabla 3), las cuales fueron recolectadas en abril del 2022. Mientras que las muestras SAC 20-24 y SAC 20-25 fueron recolectadas por Matthieu Carré en noviembre del 2020, siguiendo el mismo protocolo de muestreo. La recolección se realizó en los ríos Pisco, Ica, Grande, Acarí y Yauca. Se recolectó 125 ml de agua para cada río en una botella de plástico como se muestra en la Figura 9, filtrándose a través de una membrana de 0.45  $\mu\text{m}$  y preservándose con ácido clorhídrico dentro de una cámara fría.

**Tabla 3.** Coordenadas de puntos de recolección de las muestras de agua de río.

Río	Código	Coordenadas (grados)	
		Latitud	Longitud
Pisco	PIS-01	-13.688297	-76.158683
Ica	ICA-01	-13.922485	-75.676579
Grande	GRA-01	-14.518885	-75.211126
Acari	ACA-01	-15.628601	-74.636538
Yauca	YAU-01	-15.672857	-74.522601
Yauca	SAC 20-24	-15.674167	-74.515143
Yauca	SAC 20-25	-15.649072	-74.636344



**Figura 9.** Recolección de muestras de agua río para análisis isotópicos.

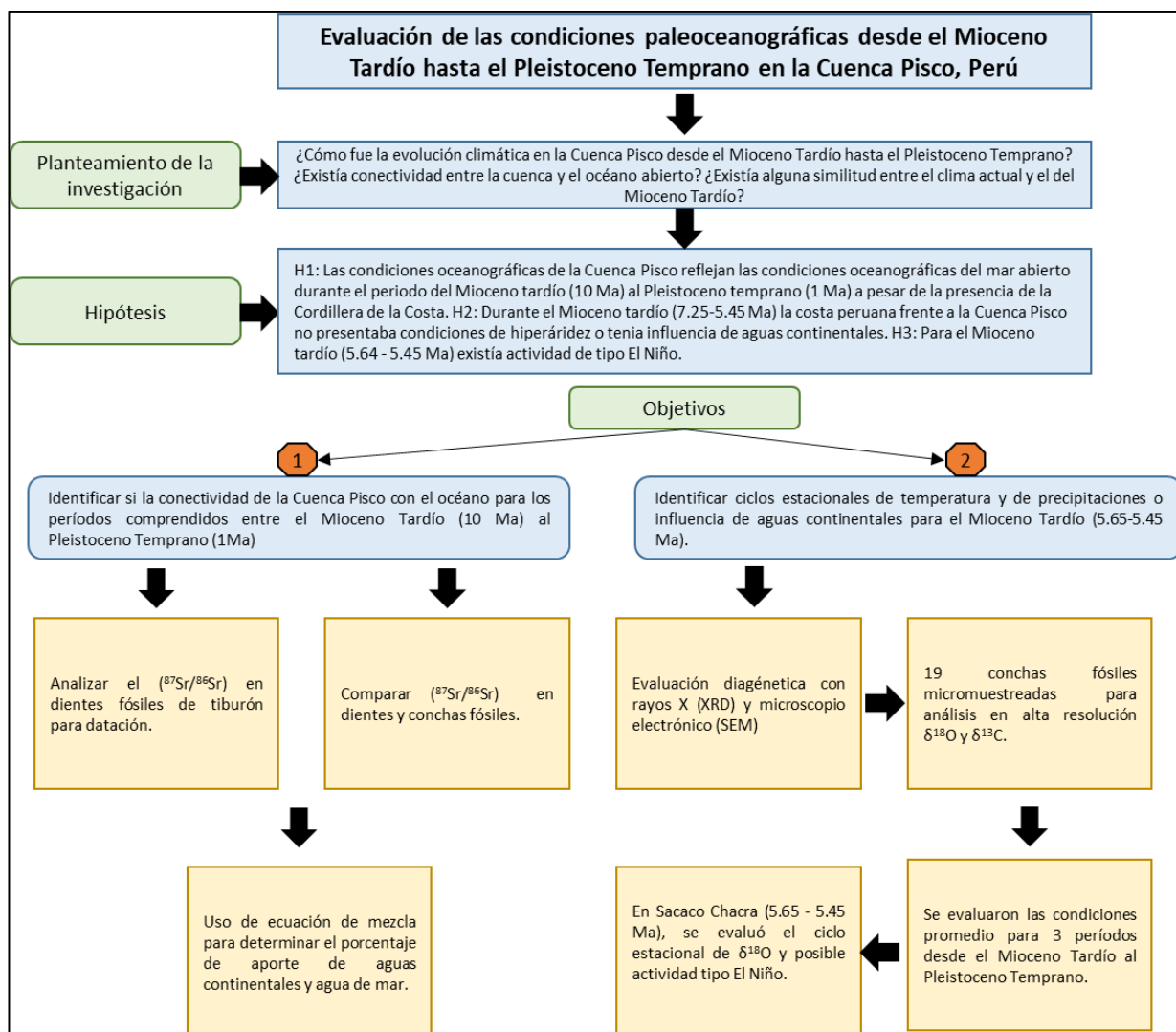
### **4.3. Diseño de estudio**

#### **4.3.1. Tipo de estudio**

Es una investigación explicativa, ya que se busca identificar la variación de las condiciones climáticas explicando sus posibles causas y consecuencias. Es del tipo longitudinal, ya que se realiza un análisis de las condiciones climáticas durante el periodo comprendido entre el Mioceno Tardío y el Pleistoceno y se infieren cambios o tendencias a través del tiempo utilizando proxys climáticos.

#### **4.3.2. Población**

Estuvo constituido por todos los individuos de diferentes especies de moluscos y dientes de tiburón fósiles que fueron recolectados en campo durante las diferentes campañas.



**Figura 10.** Esquema del diseño de investigación del presente proyecto. Etapas para determinar la conectividad entre la cuenca Pisco y el mar abierto y la estacionalidad de  $\delta^{18}\text{O}$  en conchas fósiles.

### 4.3.3. Muestra

Correspondió a los individuos de moluscos fósiles seleccionados para análisis XRD (difracción de rayos X), SEM (escaneo con microscopio electrónico) y de alta resolución para estudios isotópicos de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) y calcio ( $\delta^{13}\text{C}$ ).

Individuos de moluscos y dientes de tiburón fósiles seleccionados para análisis de isótopos de estroncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) para la datación y el modelo de mezcla.

#### 4.4. Operacionalización de las variables

De acuerdo a nuestros objetivos de estudio, se definieron variables independientes y dependientes. Las variables independientes fueron aquellas que se midieron y las variables dependientes fueron los resultados de cálculos a partir de las independientes. Las variables que trabajamos en nuestro proyecto fueron: el  $\delta^{18}\text{O}$  del carbonato de calcio en ‰ vs VPDB, el  $\delta^{13}\text{C}$  del carbonato de calcio en ‰ vs VPDB,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , proporción de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en el agua de la cuenca Pisco.

**Tabla 4.** Variables independientes y variables dependientes del estudio.

Tipo de variable	Reconstrucción del ciclo estacional del $\delta^{18}\text{O}$ en moluscos	Datación cronológica y conectividad de la Cuenca Pisco y el mar abierto
Variables independientes	<ul style="list-style-type: none"><li>• (<math>\delta^{18}\text{O}</math>) de moluscos fósiles en alta resolución.</li><li>• (<math>\delta^{13}\text{C}</math>) de moluscos fósiles en alta resolución.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <math>^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}</math> de dientes de tiburón y moluscos fósiles, agua de río.</li></ul>
Variables dependientes	<ul style="list-style-type: none"><li>• Amplitud estacional del (<math>\delta^{18}\text{O}</math>) de moluscos fósiles.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Edad cronológica</li><li>• Proporción de agua continental versus el agua oceánica en la cuenca Pisco.</li></ul>

#### 4.5. Procedimientos y técnicas

##### 4.5.1. Diagénesis

Las conchas de los moluscos fósiles se componen originalmente por carbonato de calcio en forma de aragonita o calcita, sin embargo, puede ocurrir un proceso de recristalización post mortem que puede alterar esta composición original y la microestructura de los cristales de la concha. La disolución y recristalización del carbonato de calcio produce calcita secundaria inorgánica. Para la evaluación

diagenética, se utilizaron dos técnicas: 1) Difracción de rayos X (XRD) que permite identificar la presencia de calcita secundaria en conchas aragoníticas y 2) el análisis de imágenes con microscopio electrónico (SEM) que permite observar la forma y disposición espacial de los microcristales de la concha y así evaluar si la microestructura esta preservada o si fue destruida por recristalización.

Adicionalmente utilicé el microscopio óptico en las conchas evaluadas en alta resolución, con la finalidad de evitar partes recristalizadas en el micro-muestreo.

#### **4.5.1.1 Análisis de difracción de rayos X (XRD)**

La diagénesis en las conchas aragoníticas se evaluó mediante difracción de rayos X, los cuales consiste en el bombardeo de cristales por rayos X provocando la difracción de estos en una serie de ángulos característicos de la composición química y su geometría. Si la calcita se encuentra en proporciones menores (<5%) se considera a la muestra como bien preservada para ser sometida a análisis geoquímicos, proporciones mayores a este porcentaje obligarían a descartar la muestra.

Se analizaron 47 muestras de moluscos, entre bivalvos, ostras y gasterópodos. Cada muestra consiste en aproximadamente 20 mg de carbonato de calcio en polvo extraídos de la charnela de la concha, de la zona ventral de la ostra o de algún fragmento visualmente bien preservado del molusco. Para extraer la muestra se limpió la parte mejor preservada y se cortó un fragmento utilizando un disco de corte diamantado Dremel, el fragmento fue molido utilizando un mortero de ágata.

El análisis XRD se realizó utilizando un difractómetro MZ VI Seifert en el Laboratorio Locean (Laboratoire d’Oceanographie et du Climat) de Francia, en enero del 2022, por Sandrine Caquineau.

#### **4.5.1.2 Análisis de imágenes de microscopio electrónico (SEM)**

El análisis de microscopio electrónico (SEM) busca observar la forma de la microestructura del carbonato de calcio de los moluscos fósiles e identificar patrones diagenéticos. Para cada individuo de molusco seleccionado, se fragmentó un pedazo de la charnela de la concha, parte ventral de la ostra, o de la parte mejor preservada. Cada fragmento consistió aproximadamente en 5 mm de largo y 5 mm de ancho, las observaciones se realizaron en la parte superior del fragmento que representaba las líneas de crecimiento del molusco. Los fragmentos de moluscos (51 individuos) fueron muestreados y procesados en el Laboratorio de Biogeociencias de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

La obtención de imágenes se realizó con un microscopio electrónico de barrido en el Laboratorio Locean (Laboratoire d’Oceanographie et du Climat) de Francia, en mayo del 2021, por Sandrine Caquineau.

#### **4.5.2. Análisis Isotópicos**

##### **4.5.2.1 Análisis isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en alta resolución para la estimación de la variabilidad climática estacional**

- **Preparación de la muestra**

Se seleccionaron las conchas más grandes como en la Figura 11 y en aparente mejor estado de conservación, se limpiaron manualmente y se les retiraron las partes mal

preservadas o dañadas, se utilizó agua desionizada para el enjuague de las conchas y posteriormente fueron secadas utilizando aire comprimido.

Cada concha fue colocada en un molde de silicona para luego ser cubierta en su totalidad por resina epóxica sin realizar ningún tratamiento químico. El molde de silicona con la concha tuvo un tiempo de secado aproximado de 24 horas en una campana extractora para evitar una posible contaminación.

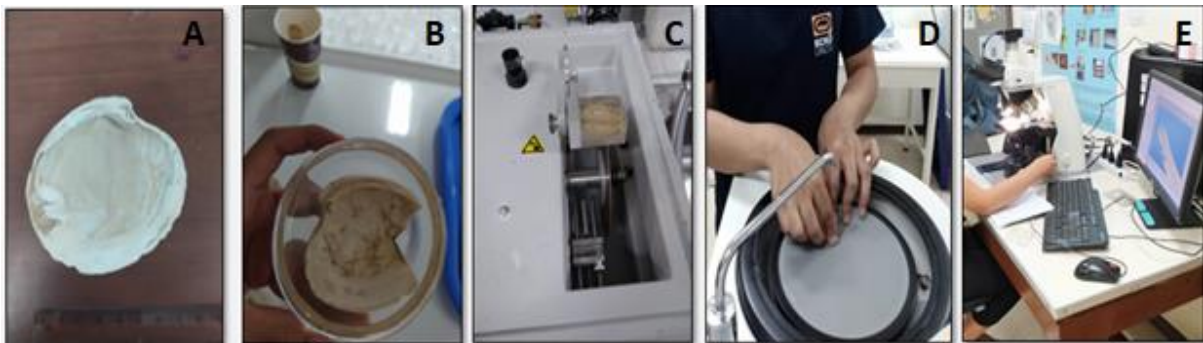
Teniendo a la concha en un bloque de resina epóxica endurecida, se procedió a hacer un corte radial por la sección axial de máximo crecimiento del individuo, usando un disco de diamantina de 0.3 mm de espesor, el cual es usado con la máquina de corte lento (Buehler, IsoMet 1000). Se hizo dos cortes por cada muestra, las secciones tuvieron un espesor aproximado de 1.0 milímetro. De los cortes realizados a cada concha, se seleccionó el de mejor condición, el cual fue pegado a una lámina de vidrio utilizando pegamento epóxico. Las secciones de corte seleccionadas fueron pulidas en la máquina pulidora utilizando lijas del grano más grueso al grano más fino, del número de grano entre 600 y 4000.



**Figura 11.** Concha fósil de la especie *Anadara Chilensis*. Muestra SAC-20-8-4.

Barra de escala de 1 cm.

Las secciones pulidas fueron observadas y fotografiadas en un microscopio óptico binocular bajo una luz reflectante en el Laboratorio de Ciencias del Mar de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. En la imagen escaneada se identificaron las estructuras de crecimiento características de los ciclos lunares de las mareas (Carré et al., 2005). A partir de esos ciclos de crecimiento se definieron los límites de micromuestreo, de tal forma que cada micromuestra represente un mes de crecimiento. Estas estructuras de crecimiento son variables en su apariencia lo cual genera incertidumbre en su reconocimiento y por lo tanto en la cronología. Por esa incertidumbre, se requiere ajustar a posteriori la cronología con los ciclos anuales isotópicos resultantes.



**Figura 12.** Procedimiento de preparación de la muestra para análisis isotópico en alta resolución. A) Limpieza de la concha utilizando herramientas manuales, B) inclusión de la concha en resina epóxica, C) corte longitudinal de 1 mm de espesor utilizando disco de diamantina, D) pulido de la sección de corte utilizando lijas de diferente grosor de grano, E) escaneo de la sección de la concha utilizando un microscopio óptico binocular.

- **Micromuestreo para análisis isotópico en alta resolución**

La técnica del micromuestreo por micromill se aplica a conchas con buen estado de preservación, de tamaño relativamente grandes y de rápido crecimiento. Esta técnica consiste en un sistema de micro perforación automatizado con un taladro piramidal de tres filos.

Para el micromuestreo se utilizó un microperforador automatizado (Micromill, Merchantek™). Las micromuestras consistieron en perforaciones de surcos de 0.15 mm de profundidad por 0.20 mm de ancho usando el micromill, las cuales fueron adyacentes entre sí (Carré et al., 2013).

El micromuestreo se hizo en la capa externa de la concha siguiendo las líneas de crecimiento desde el umbo hasta la parte ventral (Carré et al., 2014), como se muestran en la

**Figura 13A**, con la finalidad de obtener muestras de la vida completa del molusco.

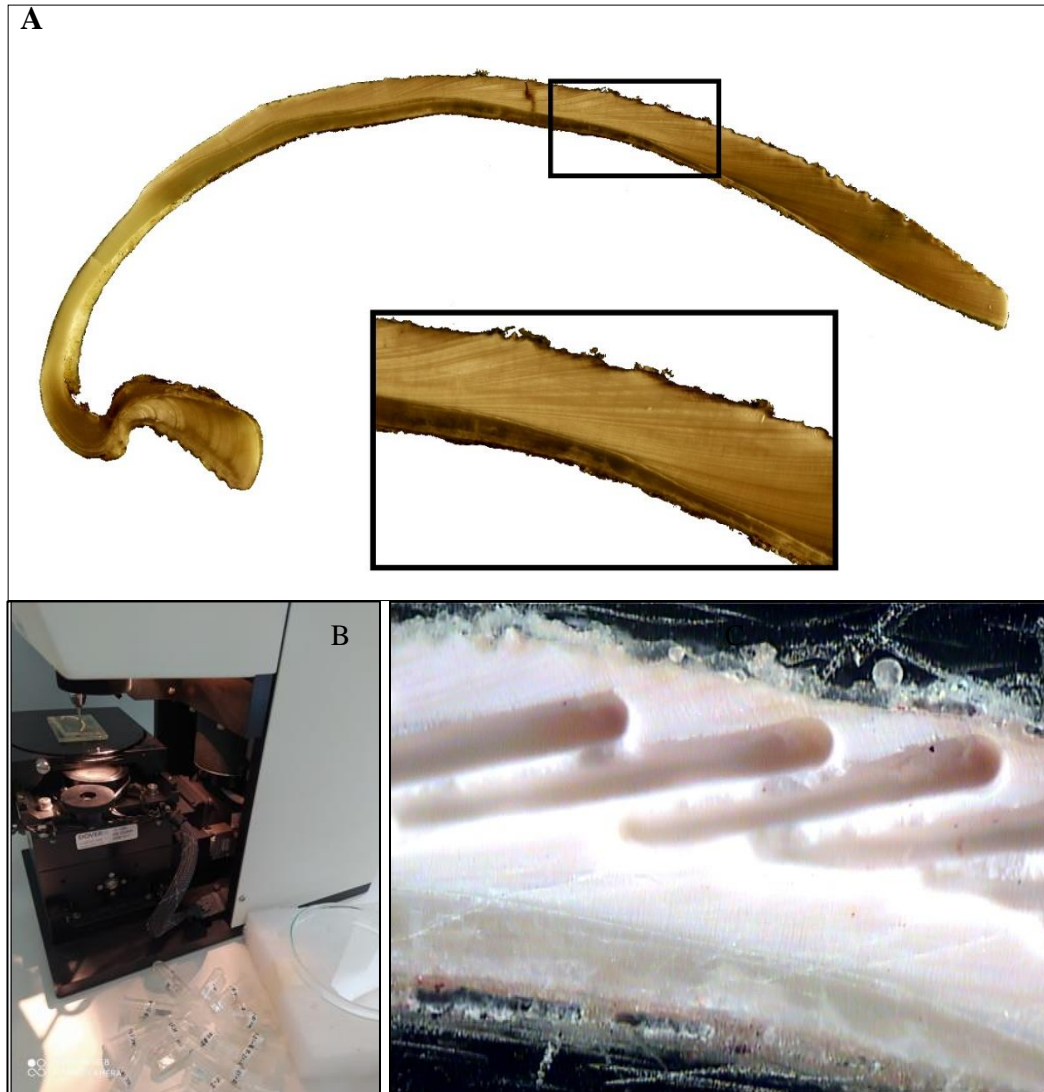
Durante el proceso de micromuestreo se evitaron las zonas degradadas. La resolución del micromuestreo buscó aproximarse a un mes lunar, guiándonos de las líneas de crecimiento quincenales relacionados con los ciclos de la marea (Carré et al., 2014).

El polvo de carbonato de calcio resultado de la microperforación fue retirado con dos hojas de bisturí y puestos en pequeños tubos de ensayo, como se muestra en la

**Figura 13B**, en donde se almacenaron para su posterior análisis isotópico. Cada micromuestra consistió en aproximadamente 100 µg (microgramos) de polvo carbonato de calcio. Antes de pasar a la siguiente línea de muestreo se limpió la zona ya muestreada utilizando aire comprimido. El trabajo de micromuestreo y preparación de conchas lo realicé en el Laboratorio de Biogeociencias de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

En la **Figura 13C** se pueden observar los surcos que se generan después de la perforación del micromill. Cada surco busca aproximarse al mes de crecimiento de la concha. Algunas muestras fueron pesadas con finalidad de tener al menos 100

microgramos de polvo de carbonato de calcio, en casos en los que no se llegue a ese peso, se puede volver a realizar el micromuestreo incluyendo el taladro a una mayor profundidad sobre la muestra.



**Figura 13.** A) Identificación de líneas de crecimiento para el micromuestreo en alta resolución. B) Proceso de micromuestreo que realicé usando Micromill en UPCH. C) Sección de concha micromuestreada, se observan los surcos de micromuestreo realizados. Muestra de especie *Anadara Chilensis* SAC 20-7.8-R3.

- **Análisis isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$**

Para el análisis isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en los moluscos, las muestras de carbonato fueron digeridas en ácido fosfórico al 100% en temperaturas de 70°C liberando el

CO<sub>2</sub> y este fue analizado en el espectrómetro de masas de ratios de isótopos. Los resultados fueron dados en la notación convencional  $\delta$  expresado en unidades por mil (Carré et al., 2005). Los valores obtenidos fueron reportados con respecto al Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) usando la escala NBS19 ( $\delta^{18}\text{O} = -2.2 \text{ ‰}$ ) y NBS18 ( $\delta^{18}\text{O} = -23.0.1 \text{ ‰}$ ).

Los análisis de isótopos de oxígeno y carbono se realizaron en el (MNHN) en Francia por el Dr. Matthieu Carré, con un espectrómetro de masas Thermo Delta V acoplado con un sistema Kiel IV para la introducción de carbonatos y en la University of Arizona (Estados Unidos) con un espectrómetro de masas Thermo MAT253 acoplado con un sistema Kiel IV, el análisis fue realizado por el equipo del Dr. Kaustubh Thirumalai. La reproductibilidad analítica estimada a partir del análisis de estándares fue mejor que 0.06 ‰.

#### **4.5.2.2 Análisis isotópicos del estroncio**

- **Preparación de la muestra**

Para la obtención de la muestra se utilizó un disco diamantado de la herramienta Dremel, con mucho cuidado se obtuvo unos fragmentos en polvo del esmalte de los dientes fósiles de tiburón. Cada muestra consistió en aproximadamente 5 mg, el cual fue envuelto en papel de pesaje e incluido en un tubo de plástico epperdonf de 2 ml. Fueron 14 muestras de dientes de tiburón que representan diferentes edades geológicas y 14 muestras de moluscos fósiles.

Para el caso de moluscos, los fragmentos obtenidos fueron adyacentes a los fragmentos utilizados para los otros análisis. Cada fragmento consistió en aproximadamente 5 mg.

El trabajo lo realicé en el Laboratorio de Biogeociencias de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

En la **Figura 14** se puede observar el diente de un tiburón fósil utilizado en este proyecto, el cual se encuentra en buen estado de preservación, y del cual se extrajo una porción del esmalte.

También se tomaron muestras de agua de los ríos Yauca, Acarí, Pisco, Ica y Grande, en la zona sur del Perú, cercanos a la zona de estudio. Las muestras fueron colectadas en envases plásticos previamente filtrados con un filtro de jeringa de 0.22  $\mu\text{m}$ , se le adicionó con un gotero ácido clorhídrico HCl hasta llegar a un pH =2 para su preservación hasta el análisis isotópico en el laboratorio.



**Figura 14.** Diente de tiburón (*Carcharodon sp*) utilizado para análisis de isótopos de estroncio. Muestra: MUSM-4665. Barra de Escala de 1 cm.

- **Análisis de isótopos de estroncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )**

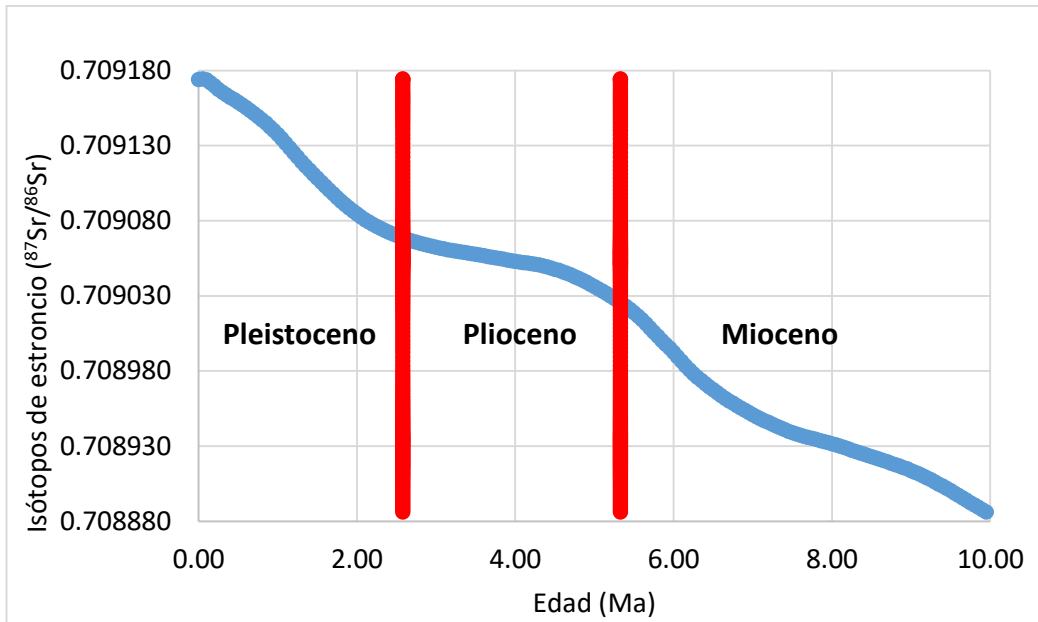
Las muestras de dientes y moluscos fósiles se disolvieron en 100  $\mu\text{l}$  de  $\text{HNO}_3$  de 3.5N luego se deben cargar en columnas de intercambio catiónico para separar el

Sr de otros iones. Los análisis de isótopos de estroncio se realizaron en el laboratorio UIEM (Institut Universitaire Européen de la Mer) de Francia, usando el equipo Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (MS-ICP MS), por la Dra. Sidonie Revillon. Los datos se adquieren a una intensidad de haz aproximadamente de 1.5V para el  $^{88}\text{Sr}$ , se asumen correcciones debido al instrumento de  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ . Los errores en la medida de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  son mejores que  $\pm 0.00006$  ( $2\sigma$ ) basados en la reproductibilidad a largo plazo del NBS987 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710250$ ). Para el cálculo del  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Norm NBS987, se utilizó el valor NBS987=0.710267 (medido en laboratorio) y el valor del estándar NBS987=0.710250. La ecuación es de la siguiente forma:

$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \text{ Norm NBS987} = ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (\text{muestra}) * (0.710250 \div 0.710267)$$

Para nuestros resultados usamos en valor  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Norm NBS987, ya que es producto de una corrección debido al error instrumental.

En la **Figura 15** se muestra la gráfica para la determinación de edades geológicas a partir de las señales isotópicas del estroncio en fósiles marinos. A partir de esta gráfica se correlacionan las señales isotópicas obtenidas de la muestra con una base de datos de todo el mundo, las cuales previamente ya fueron datadas (McArthur et al., 2012). Los errores estándares nos permitieron obtener el rango de edad y la edad media de cada una de las muestras estudiadas.



**Figura 15.** Relación de la edad geológica de fósiles marinos y la relación isotópica del estroncio (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr). LOWESS 5, modificado de (McArthur et al., 2012).

#### 4.5.3. Modelo de mezcla de aportes de estroncio de origen continental y marino

Para determinar la proporción de agua dulce y de agua de mar en la Cuenca Pisco Este, utilizaremos la firma isotópica de estroncio en los moluscos que crecieron en la cuenca y reflejan por lo tanto su química. Si existía un aporte de agua dulce en la cuenca, los valores isotópicos de los moluscos deben estar entre los valores isotópicos de los dientes de tiburón pelágicos asociados que reflejan la química del mar abierto, y los valores isotópicos del agua de río.

La proporción de agua dulce y de agua marina se puede calcular a partir del modelo de mezcla siguiente:

$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_m = \frac{^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_a \times A + ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_b \times B}{A \times [\text{Sr}]_a + B \times [\text{Sr}]_b} \dots\dots\dots(1) \text{ (Vanhof et al., 2003)}$$

Donde  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_m$  es el ratio isotópico de la mezcla, representado por la firma isotópica registrada en el molusco fósil;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_a$  y  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_b$  son los ratios isotópicos de cada uno de los miembros finales, representados por la firma isotópica registrada en los dientes de tiburón y del agua de río;  $[\text{Sr}]_a$  y  $[\text{Sr}]_b$  son las concentraciones de Sr para cada uno de los miembros finales;  $[\text{Sr}]_a$  representa la concentración de Sr de agua de mar  $[\text{Sr}]_a=7.886$  ppm (Palmer & Edmond, 1989) y  $[\text{Sr}]_b$  las concentraciones de Sr de agua de río evaluados en este estudio, y A y B son las proporciones relativas de cada uno de los miembros finales en la mezcla ( $A+B=1$ ). Suponemos que la concentración y el valor isotópico del estroncio de los ríos modernos son similares en los distintos periodos desde el Mioceno Tardío. Además, asumimos también que el fraccionamiento isotópico de origen biológico no es significativo y que los valores isotópicos del estroncio en conchas y dientes de tiburón reflejan los del agua donde crecieron.

#### **4.5.4. Análisis estadístico**

Se calculó el promedio de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  y se realizó un análisis de correlación entre  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  (intraestacional) para cada una de las conchas fósiles de las tres diferentes localidades muestreadas.

Se construyó un histograma de frecuencias con las amplitudes estacionales de  $\delta^{18}\text{O}$  para observar posibles eventos tipo El Niño.

Los análisis estadísticos se realizaron el software libre RStudio.

## V. RESULTADOS

### 5.1. Diagénesis

#### 5.1.1. Análisis de difracción de rayos x (XRD)

En la Tabla 5 se muestra el resumen de los resultados de los análisis de difracción de rayos X, realizados en 47 muestras de moluscos fósiles muestreados en diferentes localidades de la Cuenca Pisco Este.

**Tabla 5.** Análisis de difracción de rayos X en muestras de moluscos.

Localidad	Especie	Código de muestra	% Aragonita	% Calcita	XRD
El Jahuay	<i>Ostras</i>	SAC 20-12-R1	0.0	100.0	calcita
	<i>Ostras</i>	SAC 20-12-R2	0.0	100.0	calcita
	<i>Ostras</i>	SAC 20-12-R3	0.0	100.0	calcita
Montemar	<i>Ostras</i>	SAC 20-13-R1	0.0	100.0	calcita
	<i>Ostras</i>	SAC 20-13-R2	0.0	100.0	calcita
	<i>Ostras</i>	SAC 20-15-R1	0.0	100.0	calcita
	<i>Ostras</i>	SAC 20-15-R2	0.0	100.0	calcita
	<i>Ostras</i>	SAC 20-15-R3	0.0	100.0	calcita
Yauca RC	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R1	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R6	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R8	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R9	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R10	100.0	0.0	aragonita
Sacaco Chacra	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R1	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R3	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R4	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-R1	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-R2	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-R3	98.7	1.3	aragonita + traza calcita, poco Mg
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-2	100.0	0.0	aragonita + traza calcita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-5	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-1	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-5	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-7.8-1	100.0	0.0	aragonita
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-7.8-3	99.4	0.6	aragonita + traza calcita, poco Mg

Continuación de **Tabla 5**. *Análisis de difracción de rayos X en muestras de moluscos.*

Localidad	Especie	Código de muestra	% Aragonita	% Calcita	XRD
Yauca	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-19-R1	100.0	0.0	aragonita
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-19-R2	100.0	0.0	aragonita
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-20-R1	100.0	0.0	aragonita
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-20-R2	100.0	0.0	aragonita
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-20-R3	100.0	0.0	aragonita
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-21-R1	100.0	0.0	aragonita
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-21-R2	100.0	0.0	aragonita
Sacaco Suroeste	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-28-R1	0.0	100.0	calcita
	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-28-R2	0.0	100.0	calcita
	<i>Concholepas sp</i>	SAC 20-28-R3	0.0	100.0	calcita
	<i>Concholepas sp</i>	SAC 20-28-R4	0.0	100.0	calcita
Caracoles	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-26-R1	5.7	94.3	Calcita + aragonita (un poco)
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-26-R3	4.9	95.1	Calcita + aragonita (un poco)
Chaviña	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-30-R1	0.0	100.0	calcita
	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-30-R2	0.0	100.0	calcita
	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-30-R3	0.0	100.0	calcita
Telephone Pole	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R2	100.0	0.0	aragonita
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R3	100.0	0.0	aragonita
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R4	100.0	0.0	aragonita
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R5	100.0	0.0	aragonita
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R6	100.0	0.0	aragonita
	<i>Glycymeris Ovata</i>	SAC 18-6-R7	100.0	0.0	aragonita

Las ostras, la especie de bivalvo *Chlamys vidali* y la especie de gasterópodo *Concholepas sp* presentan composición original de carbonato de calcio en forma de calcita. Las especies de bivalvo *Anadara chilensis*, *Eurhomalea lenticularis* y *Glycymeris ovata* presentan composición original en forma de aragonita.

Las muestras SAC 20-1-R3 y SAC 20-7.8-3 correspondientes a la especie *Anadara chilensis* del sitio denominado Sacaco Chacra presentan un porcentaje de 1.3% y 0.6 % de calcita respectivamente, lo que indica recristalización post mortem; sin embargo, al ser un porcentaje mínimo la muestra puede considerarse apta para realizar posteriores análisis isotópicos.

Las muestras SAC 20-26-R1 y SAC 20-26-R3 correspondientes a la especie *Eurhomalea lenticularis* del sitio denominado Caracoles, presentan porcentajes de 94.3% y 95.1% de calcita respectivamente, indicando recristalización post mortem en un porcentaje muy alto, por lo que estas muestras fueron descartadas para cualquier tipo de análisis geoquímico posterior.

#### **5.1.2. Análisis de imágenes de microscopio electrónico (SEM)**

Se obtuvieron imágenes con el microscopio electrónico de 51 fragmentos de diferentes moluscos fósiles listados en la **Tabla 6**, estos fragmentos fueron extraídos de las partes adyacentes a los fragmentos utilizados para los análisis de difracción de rayos X y para los análisis geoquímicos.

Las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico nos muestran la microestructura que conforma a los moluscos fósiles, así como rastros de micro erosión por organismos perforadores y recristalización.

En general, las microestructuras de las muestras se encuentran bien preservadas. Sin embargo, las muestras SAC 20-26-R1 y SAC 20-26-R3 de la especie *Eurhomalea lenticularis* de la localidad Caracoles, presentan recristalización y la microestructura original no es posible ser observada con claridad, esta información

es consistente con la obtenida en los análisis de difracción de rayos X, descartando estas muestras para cualquier tipo de análisis geoquímico.

**Tabla 6.** Descripción de imágenes obtenidas con microscopio electrónico.

<b>Localidad</b>	<b>Especie</b>	<b>Código de muestra</b>	<b>Comentario</b>
El Jahuay	<i>Ostras</i>	SAC 20-12-R1	Estructura regularmente foliada. Recristalización en la superficie.
	<i>Ostras</i>	SAC 20-12-R2	Estructura regularmente foliada. Sin recristalización.
	<i>Ostras</i>	SAC 20-12-R3	Microestructura no muy clara. Posible recristalización.
Montemar	<i>Ostras</i>	SAC 20-13-R1	Estructura regularmente foliada. Sin recristalización.
	<i>Ostras</i>	SAC 20-13-R2	Estructura regularmente foliada. Sin recristalización.
	<i>Ostras</i>	SAC 20-15-R1	Posible estructura foliada. Sin recristalización.
	<i>Ostras</i>	SAC 20-15-R2	Posible estructura foliada. Sin recristalización.
	<i>Ostras</i>	SAC 20-15-R3	Microestructura no muy clara. Sin recristalización.
Yauca RC	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R1	Microestructura laminar cruzada. Algo de disolución. Sin recristalización.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R2	Posible microestructura laminar cruzada. Posible microerosión. Sin recristalización.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R3	Microestructura laminar cruzada preservada. Posible disolución. Sin recristalización. Presencia de NaCl.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R4	Microestructura laminar cruzada preservada. Algo de disolución. Sin recristalización. Presencia de NaCl.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R5	Microestructura laminar cruzada. Posible microerosión. Presencia de NaCl. Algo de disolución. Sin recristalización.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R6	Microestructura laminar cruzada. Posible microerosión. Presencia de NaCl. Algo de disolución. Sin recristalización.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R7	Microestructura laminar cruzada preservada. Sin recristalización.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R8	Microestructura laminar cruzada bien preservada. Sin recristalización. Algo de disolución. Posible microerosión.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R9	Microestructura laminar cruzada bien preservada. Sin recristalización. Algo de disolución. Posible microerosión.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-22-R10	Microestructura laminar cruzada bien preservada. Sin recristalización. Algo de disolución. Posible microerosión.

Continuación de **Tabla 6.** Descripción de imágenes obtenidas con microscopio electrónico.

Localidad	Especie	Código de muestra	Comentario
Sacaco Chacra	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R1	Microestructura cruzada. Posible estructura homogénea. Con disolución. Preservación dudosa.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R2	Microestructura cruzada. Posible estructura homogénea. Con disolución. Preservación dudosa.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R3	Microestructura laminar cruzada. Sin recristalización. Presencia de yeso.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-8-R4	Microestructura laminar cruzada. Sin recristalización.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-7-R1	Microestructura no muy clara. Sin recristalización. Disolución en pequeña escala.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-7-R2	Microestructura no observable.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-7-R3	Microestructura no observable.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-7-R4	Microestructura no muy clara. Sin recristalización. Disolución en pequeña escala.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-R1	Microestructura laminar cruzada. Sin recristalización. Algo de disolución.
	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-R2	Microestructura laminar cruzada. Sin recristalización. Algo de disolución.
Yauca	<i>Anadara chilensis</i>	SAC 20-1-R3	Microestructura laminar cruzada no muy clara. Microerosión. No presenta signos de recristalización, sin embargo, el análisis DRX encontró algo de remineralización.
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-19-R1	Sin recristalización. Microestructura bien preservada, posiblemente de forma laminar cruzada cónica compleja.
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-19-R2	Microestructura no muy clara. Sin recristalización. Disolución en pequeña escala.
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-20-R1	Microestructura no muy clara. Sin recristalización. Disolución en pequeña escala.
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-20-R2	Microestructura bien preservada, posiblemente de forma cruzada laminar compleja irregular. Sin microerosion. Sin recristalización.
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-20-R3	Posiblemente estructura laminar cruzada compleja. Sin recristalización. Presencia de disolución en pequeña escala.
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-21-R1	Microestructura no muy clara. Sin recristalización. Presencia de disolución.
<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-21-R2	Microestructura no muy clara. Sin recristalización. Presencia de disolución.	

Continuación de **Tabla 6.** Descripción de imágenes obtenidas con microscopio electrónico.

Localidad	Especie	Código de muestra	Comentario
Sacaco Suroeste	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-28-R1	Estructura regularmente foliada. Sin recristalización. Algo de disolución.
	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-28-R2	Estructura regularmente foliada. Sin recristalización. Algo de disolución.
	<i>Concholepa sp</i>	SAC 20-28-R3	Observación no muy clara.
	<i>Concholepa sp</i>	SAC 20-28-R4	Estructura irregularmente foliada. Bien preservada. Sin recristalización.
Caracoles	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-26-R1	Alto grado de recristalización. Microestructura original no visible.
	<i>Eurhomalea lenticularis</i>	SAC 20-26-R3	Alto grado de recristalización. Microestructura original no visible.
Chaviña	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-30-R1	Estructura regularmente foliada. Sin recristalización. Algo de disolución.
	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-30-R2	Estructura regularmente foliada. Sin recristalización. Algo de disolución.
	<i>Chlamys vidali</i>	SAC 20-30-R3	Se observa dos tipos de estructura: regularmente foliada en la superficie y homogénea en el interior. Sin recristalización. Bien preservada.
Telephone Pole	<i>Glycymeris ovata</i>	SAC 18-6-R2	Microestructura laminar cruzada. Algo de microerosion y disolución. Sin recristalización. Bien preservada.
	<i>Glycymeris ovata</i>	SAC 18-6-R3	Microestructura laminar cruzada. Algo de microerosion y disolución. Sin recristalización. Bien preservada.
	<i>Glycymeris ovata</i>	SAC 18-6-R4	Microestructura laminar cruzada. Algo de microerosion y disolución. Sin recristalización. Bien preservada.
	<i>Glycymeris ovata</i>	SAC 18-6-R5	Microestructura laminar cruzada. Algo de microerosion y disolución. Sin recristalización. Bien preservada.
	<i>Glycymeris ovata</i>	SAC 18-6-R6	Microestructura laminar cruzada. Algo de microerosion y disolución. Sin recristalización. Bien preservada.
	<i>Glycymeris ovata</i>	SAC 18-6-R7	Microestructura laminar cruzada. Algo de microerosion y disolución. Sin recristalización. Bien preservada.

Las microestructuras de las muestras SAC 20-7-R2 y SAC 20-7-R3 no fueron observables claramente, esto debido posiblemente a una contaminación en la muestra al momento de su preparación para el análisis.

## 5.2. Análisis isotópicos

### 5.2.1. Datación

Las edades geológicas de las localidades muestreadas para este estudio están representadas en la Tabla 7. En la cual se indica el código de la muestra, la localidad donde se obtuvo, el valor isotópico normalizado, el tipo de muestra, y la edad calculada a partir del LOWESS 5, así como el rango de edad generado por la incertidumbre en la medición isotópica en el laboratorio.

**Tabla 7.** Rango de edades de las zonas geológicas muestreadas en la Cuenca Pisco Este.

Código Muestra	Localidad	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ norm NBS987	Tipo de muestra	Edad Media (Ma)	Edad mínima (Ma)	Edad máxima (Ma)
SAC 20-9-T1	El Jahuay	0.708947048	Diente	7.15	7.00	7.30
SAC 20-9-T2	El Jahuay	0.708957047	Diente	6.80	6.70	6.90
SAC 20-11-T1	El Jahuay	0.708842052	Diente	11.70	11.50	11.95
SAC 20-16-T1	Montemar	0.70889605	Diente	9.65	9.50	9.75
SAC 20-16-T2	Montemar	0.708904049	Diente	9.37	9.10	9.65
SAC 20-18-T1	Yauca	0.709040044	Diente	4.85	4.70	5.00
SAC 20-20-T1	Yauca	0.709033045	Diente	5.10	4.95	5.25
SAC 20-20-T2	Yauca	0.709025045	Diente	5.35	5.20	5.50
SAC 20-27-T1	Caracoles	0.709027046	Diente	5.30	5.17	5.40
SAC 20-27-T2	Caracoles	0.709015038	Diente	5.60	5.50	5.65
SAC 20-29-T1	Sacaco Suroeste	0.708984039	Diente	6.15	6.05	6.20
SAC 20-29-T2	Sacaco Suroeste	0.709000039	Diente	5.85	5.80	5.95
MUSM 3618	Sacaco Chacra	0.709011038	Diente	5.65	5.60	5.75
MUSM 3620	Sacaco Chacra	0.709022038	Diente	5.45	5.35	5.55
SAC20-22-R2	Yauca RC	0.70894505	Concha	7.25	7.00	7.50
SAC20-22-R5	Yauca RC	0.708732058	Concha	15.90	15.80	16.00
SAC20-30-R1	Chaviña	0.709046046	Concha	4.60	4.35	4.80
SAC20-30-R2	Chaviña	0.709024047	Concha	5.40	5.20	5.55
SAC18-6-R6	Telephone Pole	0.709068045	Concha	2.60	2.40	2.85
SAC18-6-R7	Telephone Pole	0.709063045	Concha	2.95	2.65	3.35

Nota: Para el cálculo de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Norm, se utilizó NBS987 = 0.710267; valor recomendado de NBS987 = 0.710250.

Cuando fue posible, la edad se calculó de manera preferencial con las muestras de dientes de tiburón, ya que son más resistentes a la diagénesis y menos afectados por la variabilidad química costera.

### **5.2.2. Comparación entre las características oceanográficas de la Cuenca Pisco y el océano abierto**

Para realizar esta comparación, se realizó el cálculo de las proporciones de aportes de aguas de océano y aguas continentales dentro de la cuenca Pisco.

A través de las señales geoquímicas del isótopo de estroncio comparado entre dientes de tiburones y moluscos fósiles, se verificó que las condiciones oceanográficas del mar abierto (representado por los dientes de tiburón) y de la cuenca Pisco (representado por los moluscos fósiles) para una secuencia de depósitos del Mioceno Tardío (El Jahuay, Montemar y Sacaco Suroeste) y el depósito del Plioceno Temprano (Yauca) presentan valores muy similares. Sin embargo, para el periodo comprendido entre 5.65 y 5.45 Ma en la localidad conocida como Sacaco Chacra, la señal isotópica entre dientes y conchas difieren significativamente como se muestra en la **Figura 16**.

Para el cálculo de las proporciones de las aguas continentales y oceánicas presentes dentro de la cuenca Pisco (**Tabla 9**), se utilizaron los valores promedios de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Norm y concentración de estroncio obtenidos a partir del muestreo de cinco ríos de la costa peruana (**Tabla 8**), las señales isotópicas de los dientes de tiburón y conchas fósiles. El valor promedio de la concentración de estroncio se obtuvo de (Palmer & Edmond, (1989)) (~90  $\mu\text{mol}/\text{kg}$ , el cual fue convertido a ppm en este estudio). A pesar de ser un valor obtenido para el océano moderno, puede usarse para el periodo

del Mioceno debido al comportamiento conservativo del estroncio disuelto de los océanos. Se utilizó la ecuación (1) descrita en la sección 4.5.3.

**Tabla 8.** Valores de las señales isotópicas y concentración de estroncio (Sr) en agua de cinco ríos de la costa sur del Perú.

Código de muestra	Río	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma$	Sr (ppm)	$2\sigma$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Norm NBS987
ICA-01	ICA	0.705866	0.000004	0.152	0.001	0.70584911
PIS-01	PISCO	0.706696	0.000004	1.368	0.001	0.70667909
ACA-01	ACARÍ	0.706155	0.000004	0.789	0.001	0.7061381
GRA-01	GRANDE	0.705914	0.000004	0.297	0.001	0.7058971
YAU-01	YAUCA	0.706341	0.000004	0.832	0.001	0.70632409
SAC 20-24	YAUCA	0.706381	0.000004	-	-	0.70635514
SAC 20-25	YAUCA	0.706333	0.000004	-	-	0.70630714

Nota: Para el cálculo de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Norm, se utilizó NBS987 = 0.710267; valor recomendado de NBS987 = 0.710250.

Los valores de A, indican la proporción de agua oceánica en la mezcla. Los valores de A cercanos a 1, indican que el agua costera es químicamente idéntica al agua del mar abierto, indicando un aporte de agua continental débil en la cuenca o una mezcla completa, es decir gran conectividad entre la cuenca y el océano abierto. Los valores ligeramente superiores a 1, físicamente imposibles, son probablemente relaciones a un fraccionamiento isotópico biológico distinto entre dientes y moluscos. Para la localidad de Sacaco Chacra (5.65 - 5.45 Ma) se observa un valor promedio de A = 0.57, lo que indicaría que para esta sección de la Cuenca Pisco habría una restricción con el océano abierto y una influencia fuerte de aguas continentales que poseen valores menores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , el promedio moderno de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en agua de ríos de la costa sur del Perú (entre las latitudes -13.68 y -15.67) siendo de 0.7062. Este valor de A=0.57 correspondería a una salinidad de ~20 para esta localidad, sin contar con el efecto de la evaporación.

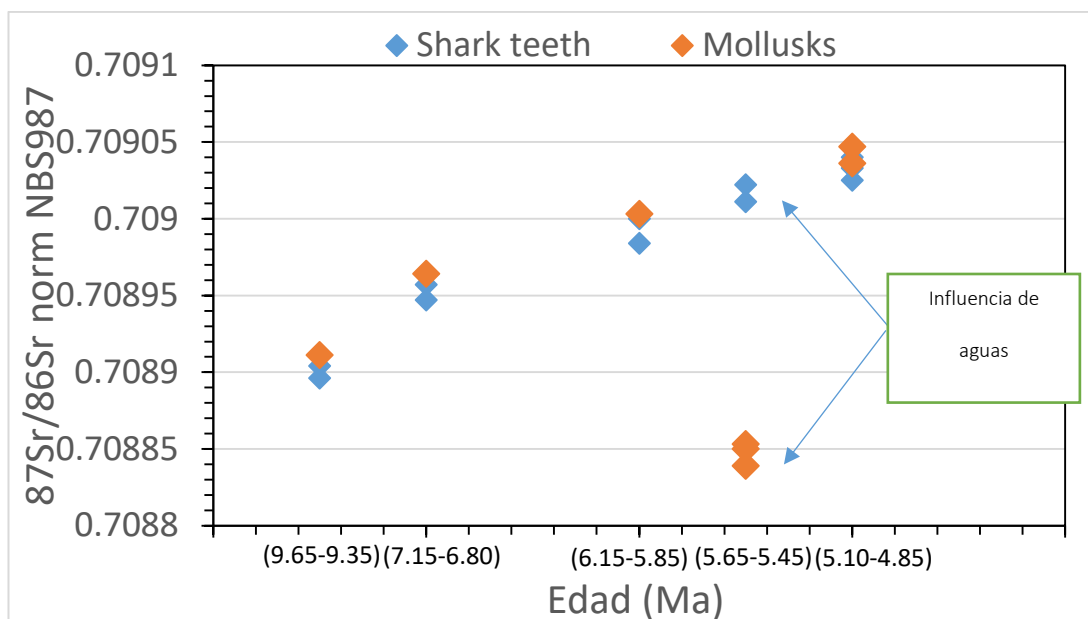
**Tabla 9.** Valores calculados de las proporciones de aguas continentales y oceánica, en la Cuenca Pisco.

Código Muestra (Dientes de tiburón)	Localidad	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ norm NBS987 (diente)	Edad (Ma)	Código Muestra (molusco)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ norm NBS987 (molusco)	Concentración SeaWater promedio (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ norm NBS987 promedio (Río)	Concentración RiverWater promedio (ppm)	A	B
SAC 20-9-T1	El Jahuay	0.7089470	7.15	SAC 20-12-R2	0.7089640	7.886	0.706221396	0.6876	1.076	-0.076
SAC 20-9-T2	El Jahuay	0.7089570	6.80	SAC 20-12-R2	0.7089640	7.886	0.706221396	0.6876	1.030	-0.030
SAC 20-16-T1	Montemar	0.7088960	9.65	SAC 20-15-R1	0.7089110	7.886	0.706221396	0.6876	1.068	-0.068
SAC 20-16-T2	Montemar	0.7089040	9.37	SAC 20-15-R1	0.7089110	7.886	0.706221396	0.6876	1.030	-0.030
SAC 20-18-T1	Yauca	0.7090400	4.85	SAC 20-20-R2	0.7090360	7.886	0.706221396	0.6876	0.984	0.0160
SAC 20-18-T1	Yauca	0.7090400	4.85	SAC 20-20-R3	0.7090470	7.886	0.706221396	0.6876	1.029	-0.029
SAC 20-20-T1	Yauca	0.7090330	5.10	SAC 20-20-R2	0.7090360	7.886	0.706221396	0.6876	1.012	-0.012
SAC 20-20-T1	Yauca	0.7090330	5.10	SAC 20-20-R3	0.7090470	7.886	0.706221396	0.6876	1.060	-0.060
SAC 20-20-T2	Yauca	0.7090250	5.35	SAC 20-20-R2	0.7090360	7.886	0.706221396	0.6876	1.046	-0.046
SAC 20-20-T2	Yauca	0.7090250	5.35	SAC 20-20-R3	0.7090470	7.886	0.706221396	0.6876	1.098	-0.098
SAC 20-29-T1	Sacaco Suroeste	0.7089840	6.15	SAC 20-28-R2	0.7090030	7.886	0.706221396	0.6876	1.085	-0.085
SAC 20-29-T2	Sacaco Suroeste	0.7090000	5.85	SAC 20-28-R2	0.7090030	7.886	0.706221396	0.6876	1.012	-0.012
MUSM 4664	Sacaco Chacra	0.7090110	5.65	SAC 20-8-R4	0.7088500	7.886	0.706221396	0.6876	0.587	0.412
MUSM 4664	Sacaco Chacra	0.7090110	5.65	SAC 20-1-R1	0.7088530	7.886	0.706221396	0.6876	0.592	0.407
MUSM 4664	Sacaco Chacra	0.7090110	5.65	SAC 20-1-R2	0.7088390	7.886	0.706221396	0.6876	0.570	0.429
MUSM 4665	Sacaco Chacra	0.7090220	5.45	SAC 20-8-R4	0.7088500	7.886	0.706221396	0.6876	0.571	0.428
MUSM 4665	Sacaco Chacra	0.7090220	5.45	SAC 20-1-R1	0.7088530	7.886	0.706221396	0.6876	0.5759	0.424
MUSM 4665	Sacaco Chacra	0.7090220	5.45	SAC 20-1-R2	0.7088390	7.886	0.706221396	0.6876	0.555	0.444

En la **Figura 16** se observa la comparación esquemática de las señales isotópicas

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  entre dientes y conchas fósiles. Las señales para el periodo (5.65 - 5.45

Ma) difieren en una magnitud importante.



**Figura 16.** Señales isotópicas del estroncio en dientes de tiburones y moluscos fósiles, para una secuencia de diferentes depósitos del Mioceno Tardío.

### 5.2.3. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en conchas fósiles

Se analizaron 19 conchas fósiles en alta resolución los cuales fueron listados en las Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12, correspondientes a 3 localidades que representan diferentes unidades geológicas y a su vez distintas épocas.

En la Tabla 10, se describen los valores medios para cada concha micromuestreada del sitio Yauca RC, cuya edad fue estimada en este estudio a partir de análisis isotópico de estroncio en moluscos fósiles en 7.25 Ma.

**Tabla 10.** Valores estadísticos para cada concha fósil muestreada del sitio Yauca RC (7.25 Ma).

Muestra	Mín $\delta^{18}\text{O}$	Max $\delta^{18}\text{O}$	Rango $\delta^{18}\text{O}$	Media $\delta^{18}\text{O}$	Mín $\delta^{13}\text{C}$	Max $\delta^{13}\text{C}$	Rango $\delta^{13}\text{C}$	Media $\delta^{13}\text{C}$
SAC18-21-R1	-0.68	1.48	2.16	0.35	-1.40	0.38	1.78	-0.62
SAC18-21-R2	-0.19	1.17	1.36	0.46	-1.37	0.14	1.51	-0.70
SAC18-21-R3	-0.20	0.65	0.85	0.33	-0.48	0.42	0.90	-0.20

Para el sitio denominado Sacaco Chacra cuya edad estimada en este estudio a partir de análisis isotópico de estroncio en dientes de tiburones fósiles (5.65-5.45 Ma.) se micromuestrearon 15 conchas fósiles. En la **Tabla 11** se describen los valores determinados en los análisis.

**Tabla 11.** Valores estadísticos para cada concha fósil muestreada del sitio Sacaco Chacra (5.65-5.45 Ma.)

Muestra	Min $\delta^{18}\text{O}$	Max $\delta^{18}\text{O}$	Rango $\delta^{18}\text{O}$	Media $\delta^{18}\text{O}$	Min $\delta^{13}\text{C}$	Max $\delta^{13}\text{C}$	Rango $\delta^{13}\text{C}$	Media $\delta^{13}\text{C}$
SAC18_34_R1	-1.84	1.12	2.96	-0.12	-3.52	0.40	3.92	-1.33
SAC20_1_1	-1.27	0.02	1.29	-0.56	-1.64	-0.81	0.83	-1.16
SAC20_1_3b	0.93	1.28	0.35	1.05	-1.51	-0.38	1.13	-0.95
SAC20_1_5	0.57	1.74	1.17	1.16	-1.06	0.32	1.38	-0.48
SAC20_2_2	0.34	1.78	1.44	1.06	-1.48	-0.08	1.40	-0.69
SAC20_2_3	0.31	1.15	0.84	0.78	-1.18	0.10	1.28	-0.48
SAC20_2_4	0.02	1.24	1.22	0.69	-1.72	-0.20	1.52	-0.72
SAC20_7.8_1	0.05	0.98	0.93	0.62	-1.49	-0.30	1.19	-0.66
SAC20_7.8_2	-2.69	1.20	3.89	-0.40	-3.09	-0.59	2.50	-1.68
SAC20_7.8_3	-1.66	1.53	3.19	0.34	-3.62	-1.01	2.61	-1.86
SAC20_7.8_4	-1.22	1.50	2.72	0.15	-3.01	-0.85	2.16	-1.60
SAC20_8_2	-1.11	1.41	2.52	0.61	-1.85	-0.23	1.62	-0.81
SAC20_8_3	-1.38	1.36	2.74	0.51	-2.67	-1.20	1.47	-1.77
SAC20_8_4	0.31	1.43	1.12	0.86	-2.22	-0.41	1.81	-1.18
SAC20_8_5	-0.73	1.39	2.12	0.42	-1.78	0.47	2.25	-0.80

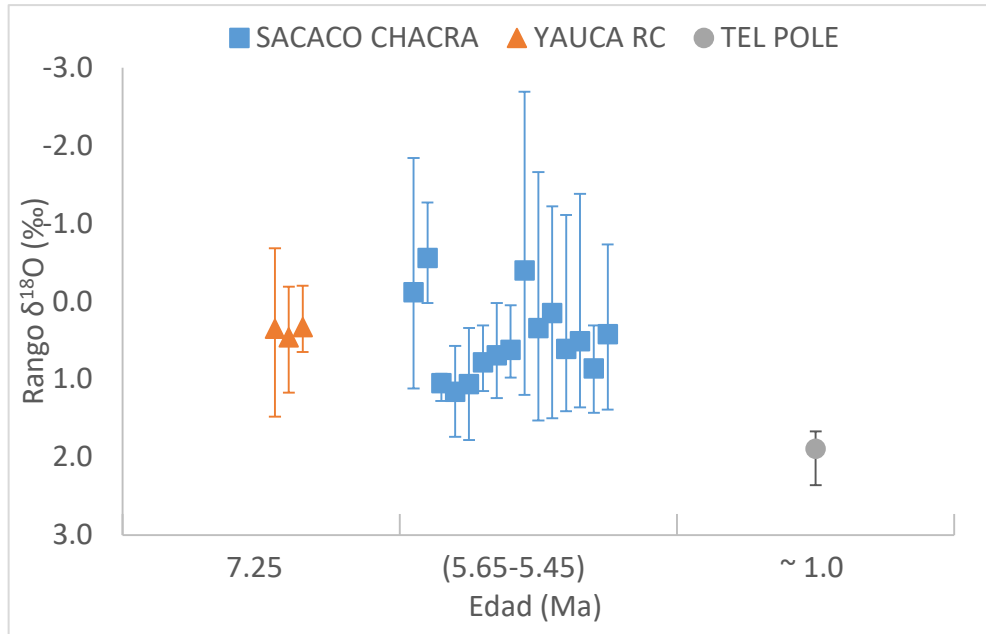
Para el periodo del Pleistoceno temprano (~1.0 Ma) se muestrearon conchas del sitio denominado Telephone Pole. En la

**Tabla 12** se describen los valores obtenidos a partir del análisis en alta resolución realizado a la concha.

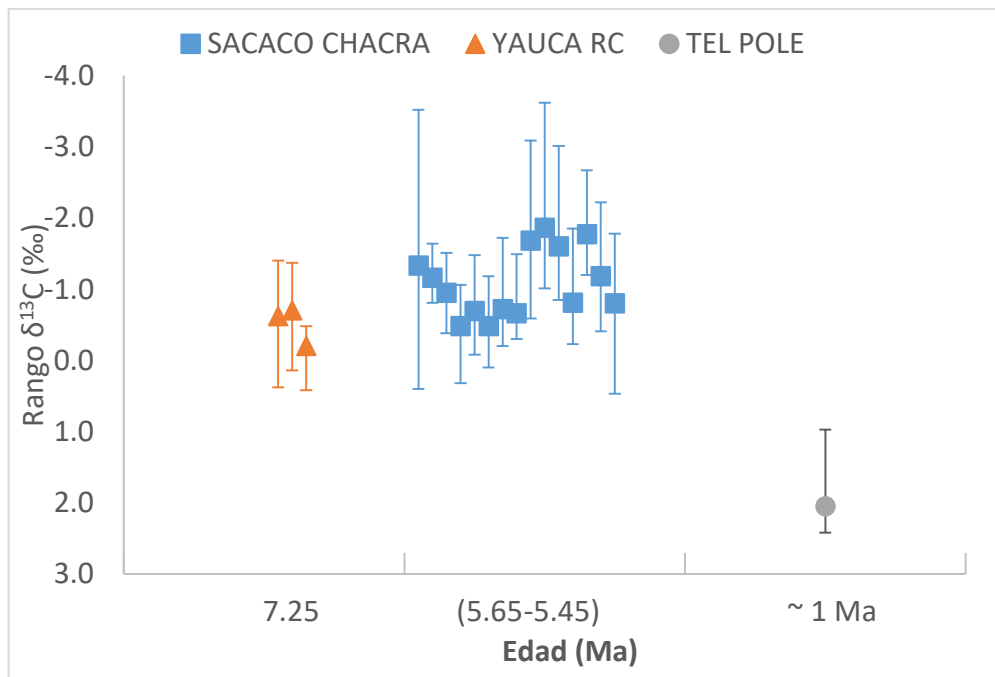
**Tabla 12.** Valores estadísticos para cada concha fósil muestreada del sitio Tel Pole (~1.0 Ma.).

Muestra	Min $\delta^{18}\text{O}$	Max $\delta^{18}\text{O}$	Rango $\delta^{18}\text{O}$	Media $\delta^{18}\text{O}$	Min $\delta^{13}\text{C}$	Max $\delta^{13}\text{C}$	Rango $\delta^{13}\text{C}$	Media $\delta^{13}\text{C}$
SAC18-6-R1	1.67	2.36	0.69	1.89	0.97	2.42	1.45	2.05

Para los 3 períodos muestreados se graficaron los valores promedios y los valores máximos y mínimos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  de cada una de las conchas micromuestreadas (Figura 17 y Figura 18).

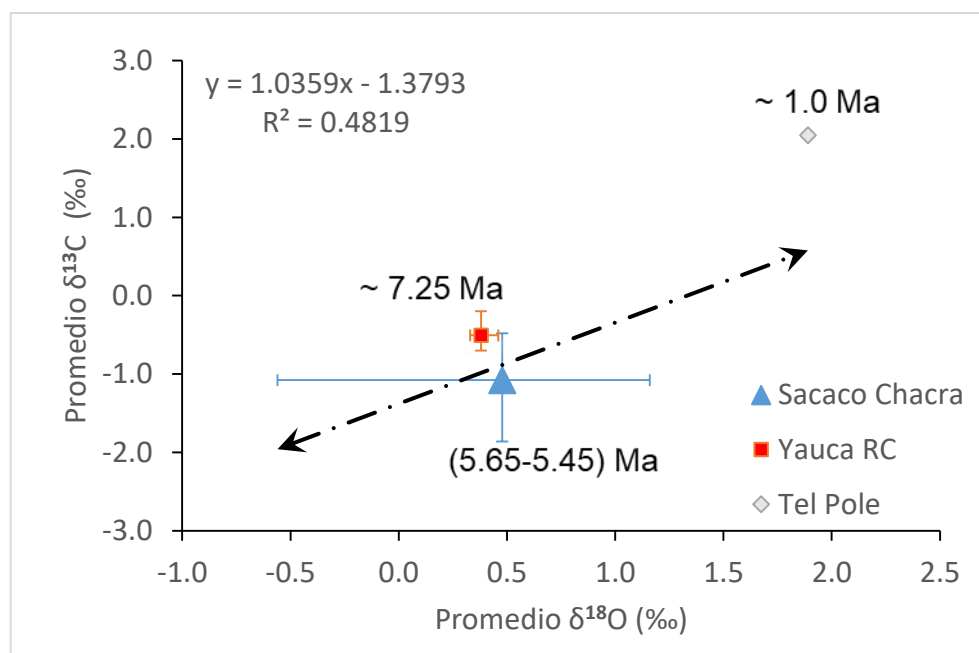


**Figura 17.** Valores promedios y rangos de  $\delta^{18}\text{O}$  (valor máximo y mínimo), para las 19 conchas fósiles muestreadas.



**Figura 18.** Valores promedio anual y rangos de  $\delta^{13}\text{C}$  (valor máximo y mínimo), para las 19 conchas fósiles muestreadas. para los períodos muestreados.

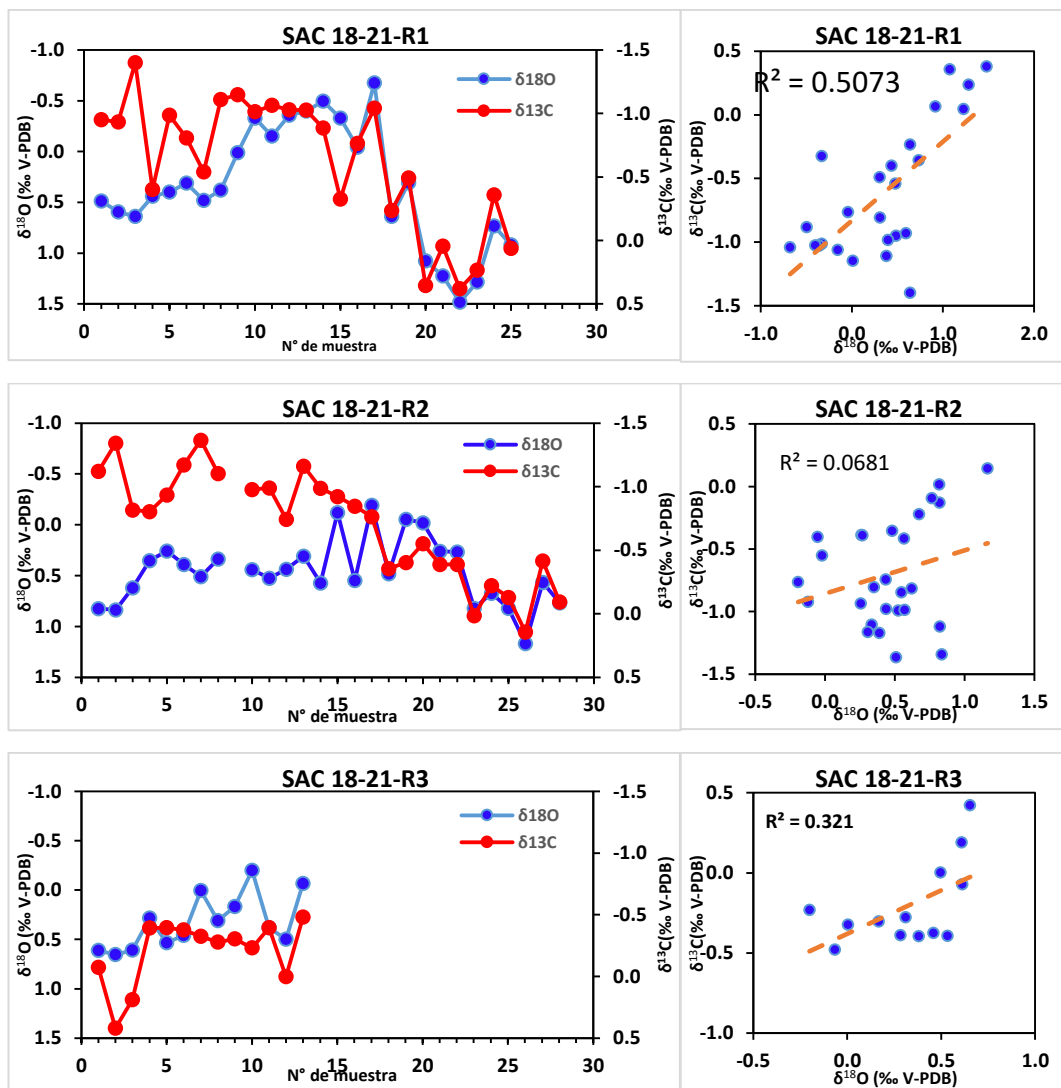
En la **Figura 19** se observa de forma general, una comparación entre los promedios de las señales isotópicas del  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  para cada una de las localidades evaluadas. Las barras indican el rango de los valores medios de cada una de las conchas evaluadas dentro de la localidad. La línea negra (puntos y rayas) con flechas nos indica la regresión lineal, calculada a partir de los valores medio de los 19 individuos estudiados en este proyecto.



**Figura 19.** Comparación de valores promedios de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  para diferentes épocas. Desde el Mioceno Tardío hasta el Pleistoceno se puede observar que la tendencia es el incremento de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ .

#### 5.2.4. Isótopos estables de oxígeno y carbono en alta resolución

La **Figura 20**, nos muestra los registros isotópicos en alta resolución de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  de las conchas fósiles de la especie *Anadara chilensis* del sitio denominado Yauca RC (~7.25 Ma). La concha SAC 18-21-R1 es presenta una buena correlación entre los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $R^2=0.5073$ . Mientras que la concha SAC 18-21-R2, es la que presenta menor correlación  $R^2=0.068$ .

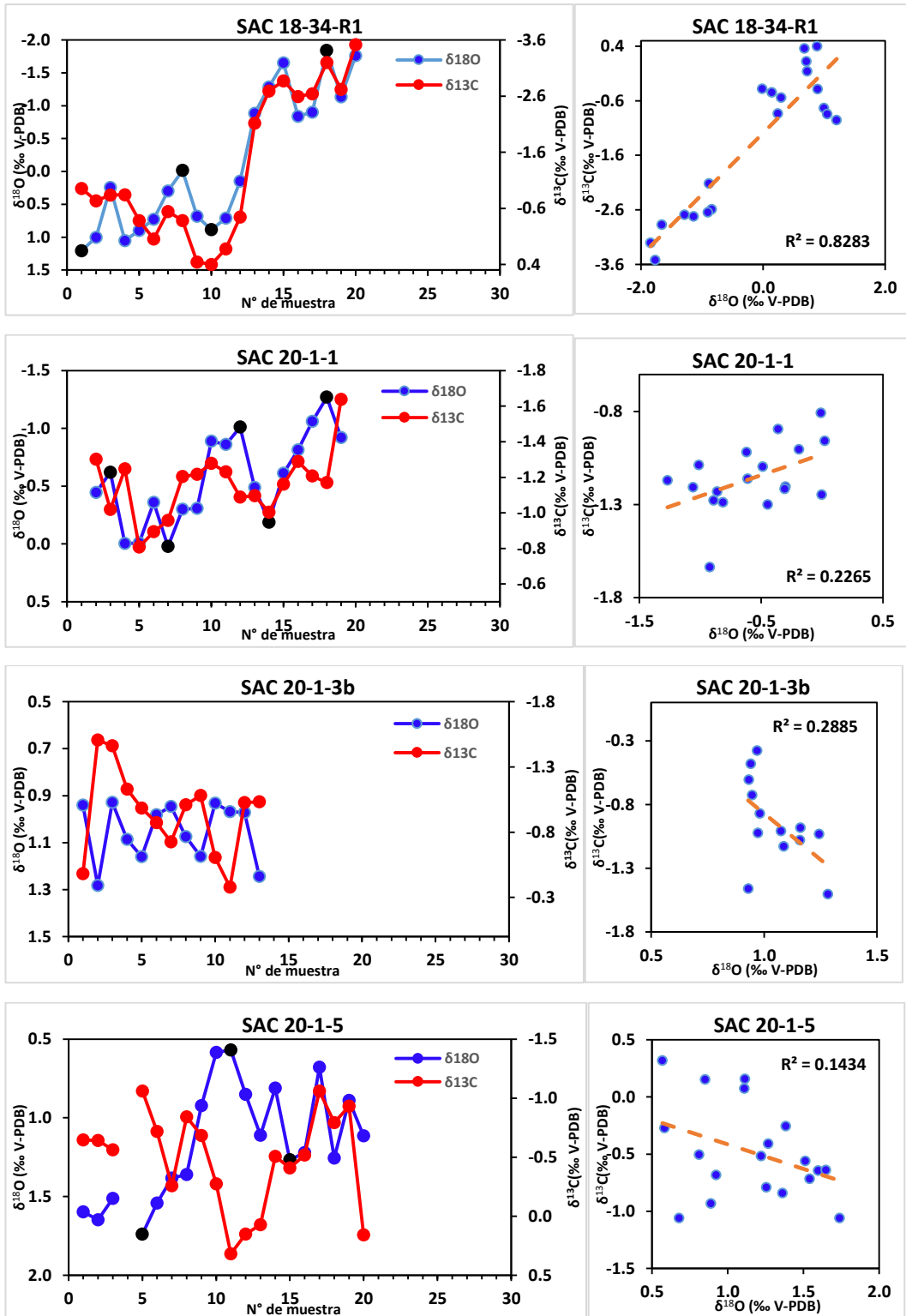


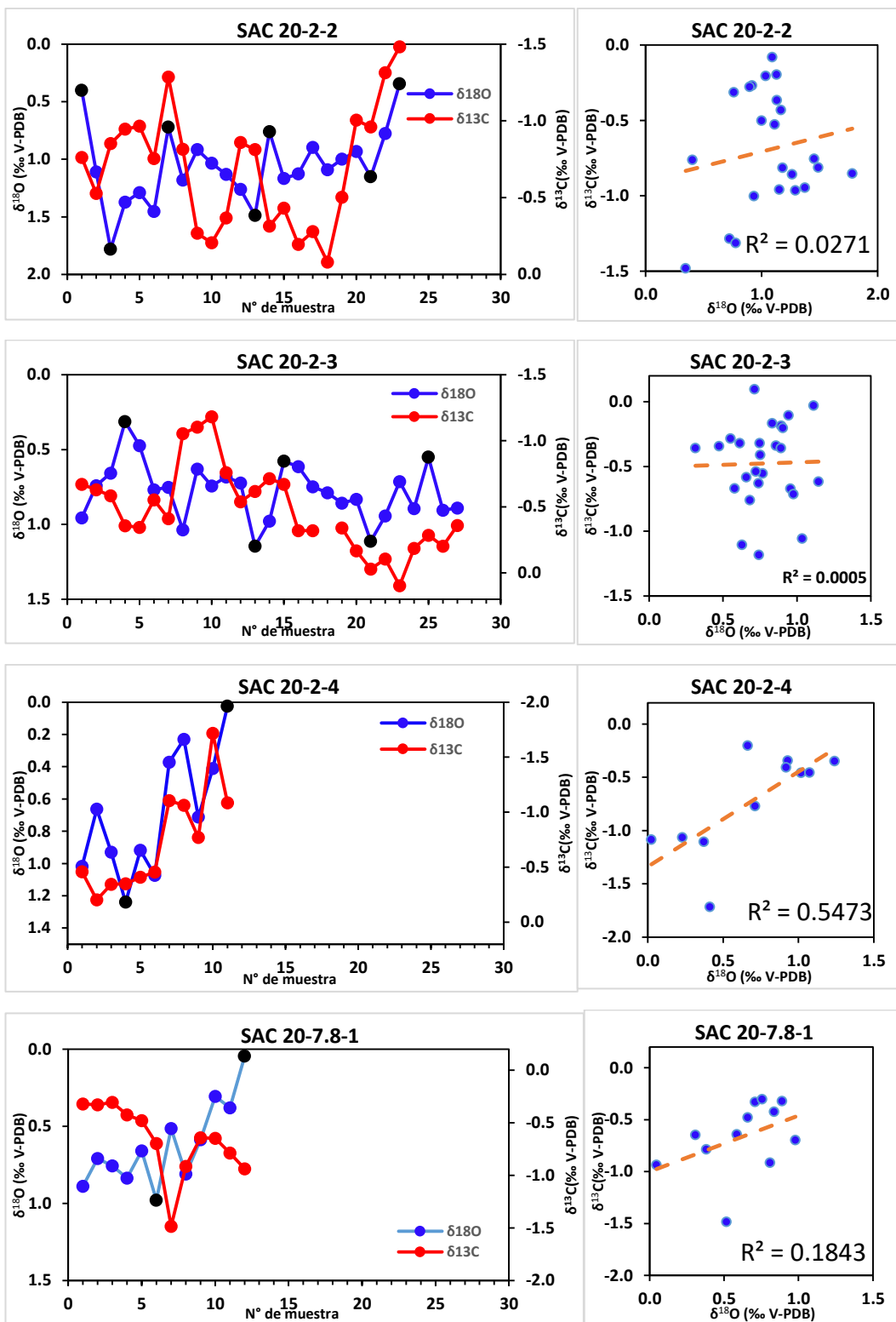
**Figura 20.** Perfiles de  $\delta^{18}\text{O}$  (línea azul) y  $\delta^{13}\text{C}$  (línea roja) y la relación entre ambas variables para conchas del Mioceno tardío (7.25 Ma.) del sitio Yauca RC.

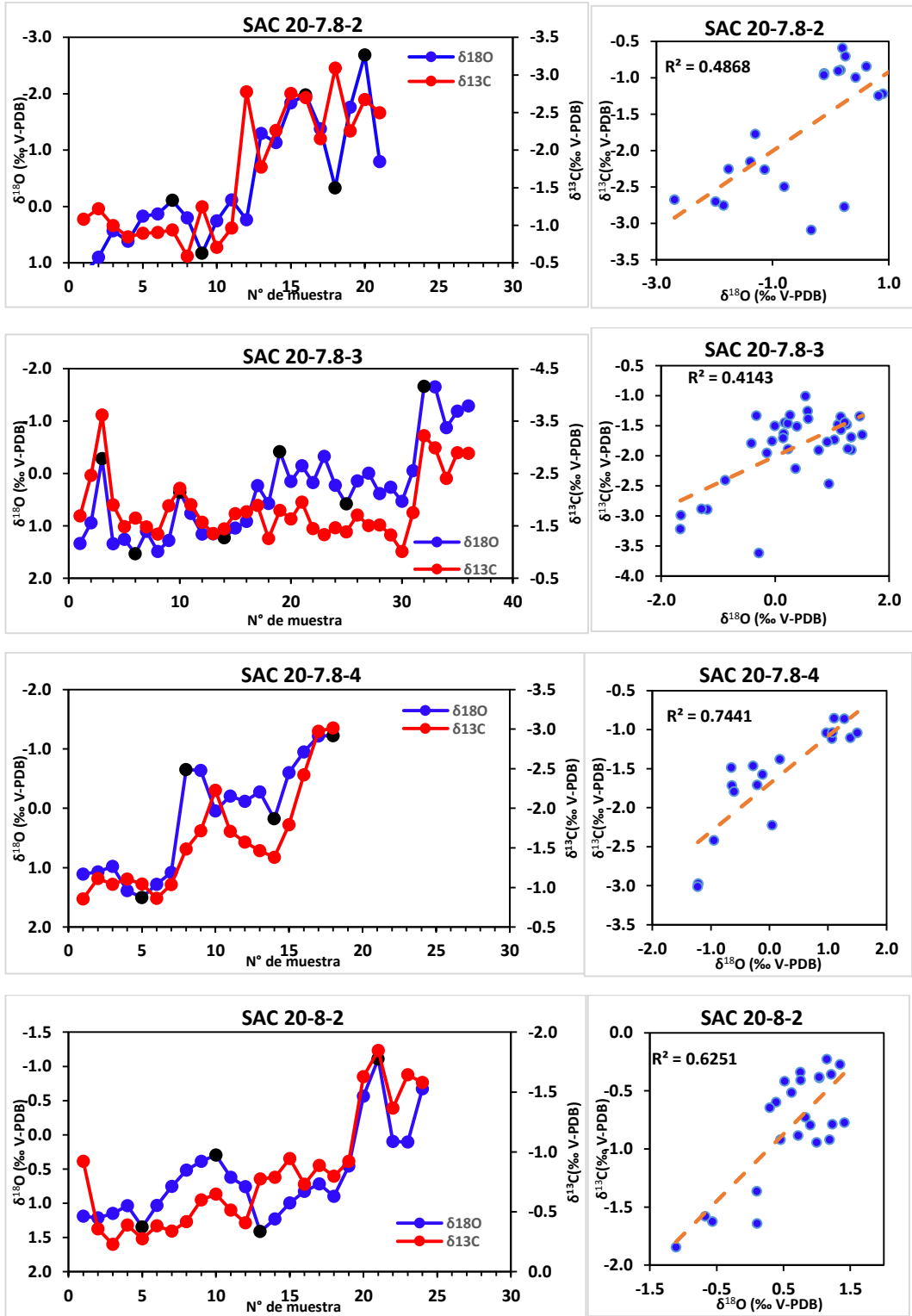
En las conchas analizadas para esta localidad, se detectan en la señal de  $\delta^{18}\text{O}$  uno o dos ciclos que interpretamos como anuales y confirman la buena preservación de los fósiles.

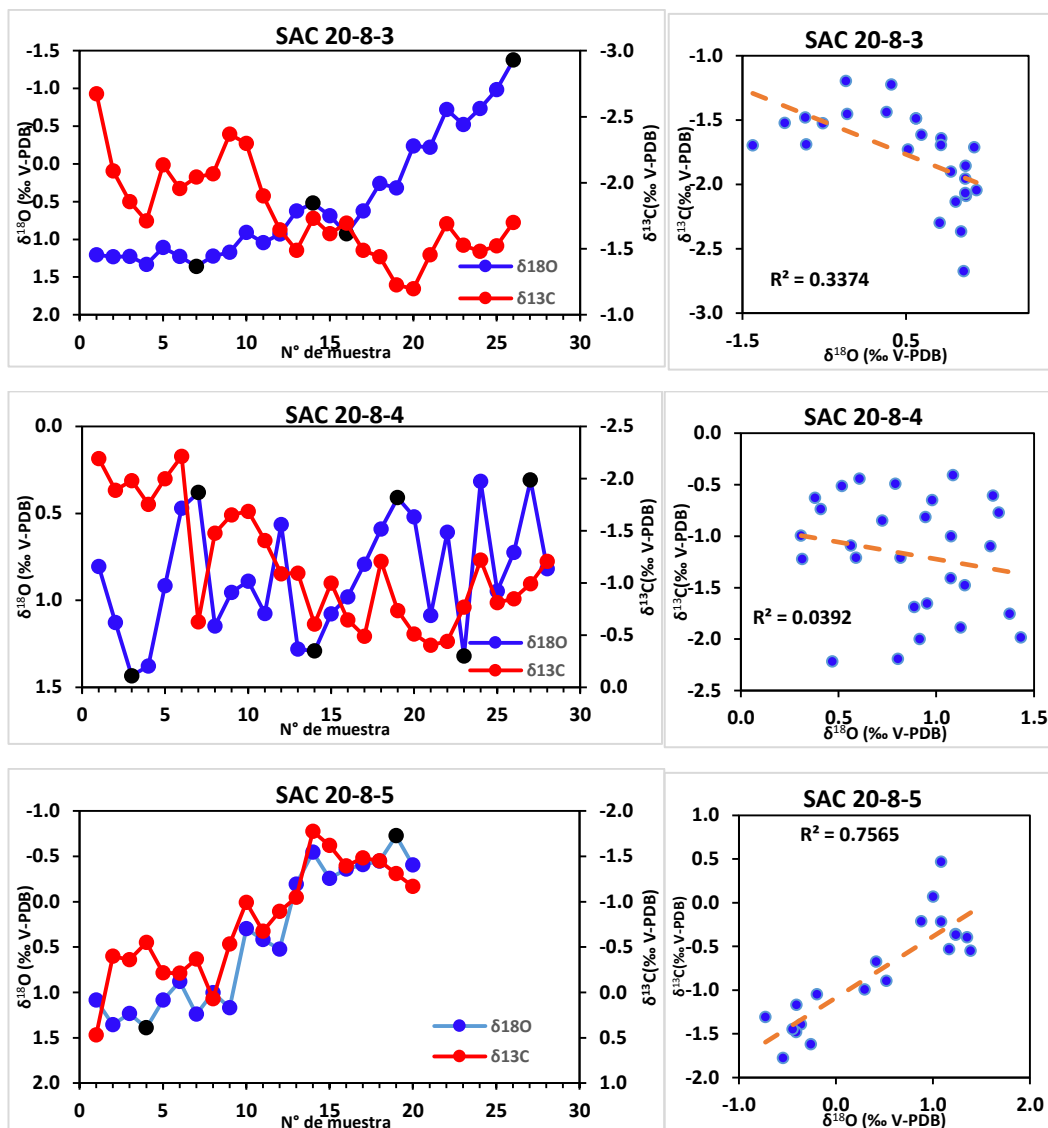
Del sitio conocido como Sacaco Chacra, cuya edad estimada en este estudio a partir de análisis isotópico de estroncio en dientes de tiburones fósiles entre 5.65-5.45 Ma., se obtuvieron 15 registros isotópicos (**Figura 21**).

La concha que presentó mayor correlación entre valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ , fue SAC 18-34-R1 con un  $R^2=0.82$ ; mientras que la concha SAC 20-2-3 presentó el valor de  $R^2=0.005$  más bajo de todas las muestras.





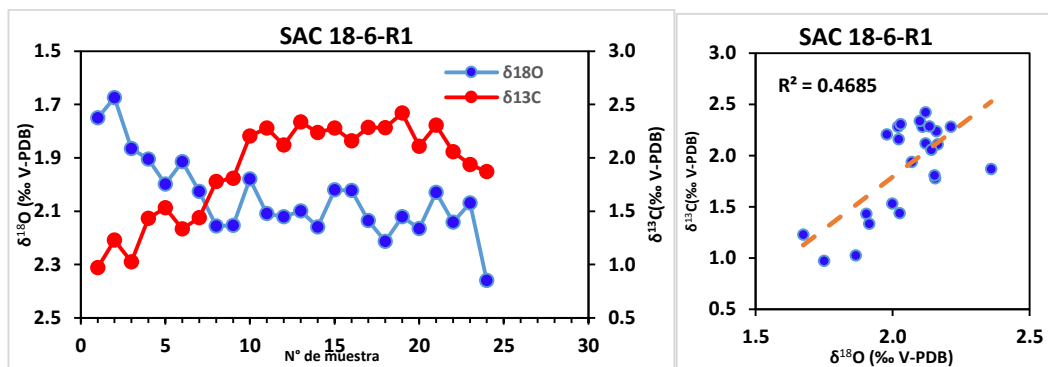




**Figura 21.** Perfiles de  $\delta^{18}\text{O}$  (línea azul) y  $\delta^{13}\text{C}$  (línea roja) para conchas del Mioceno tardío (5.65-5.45 Ma.) del sitio Sacaco Chacra.

En el conjunto total de conchas de Sacaco Chacra se lograron identificar 23.5 ciclos anuales completos. Dentro de toda la información se observaron 32 veranos.

La **Figura 22**, muestra el registro isotópico de la concha de la especie *Glycymeris Ovata*, SAC 18-6-R1. La correlación entre los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en esta muestra es  $R^2=0.4685$ . La línea naranja punteada representa la regresión lineal de los datos. Se pueden observar que todos los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  son positivos a diferencia de los valores obtenidos en las otras dos localidades.



**Figura 22.** Perfil de  $\delta^{18}\text{O}$  (línea azul) y  $\delta^{13}\text{C}$  (línea roja) para conchas del Pleistoceno temprano.

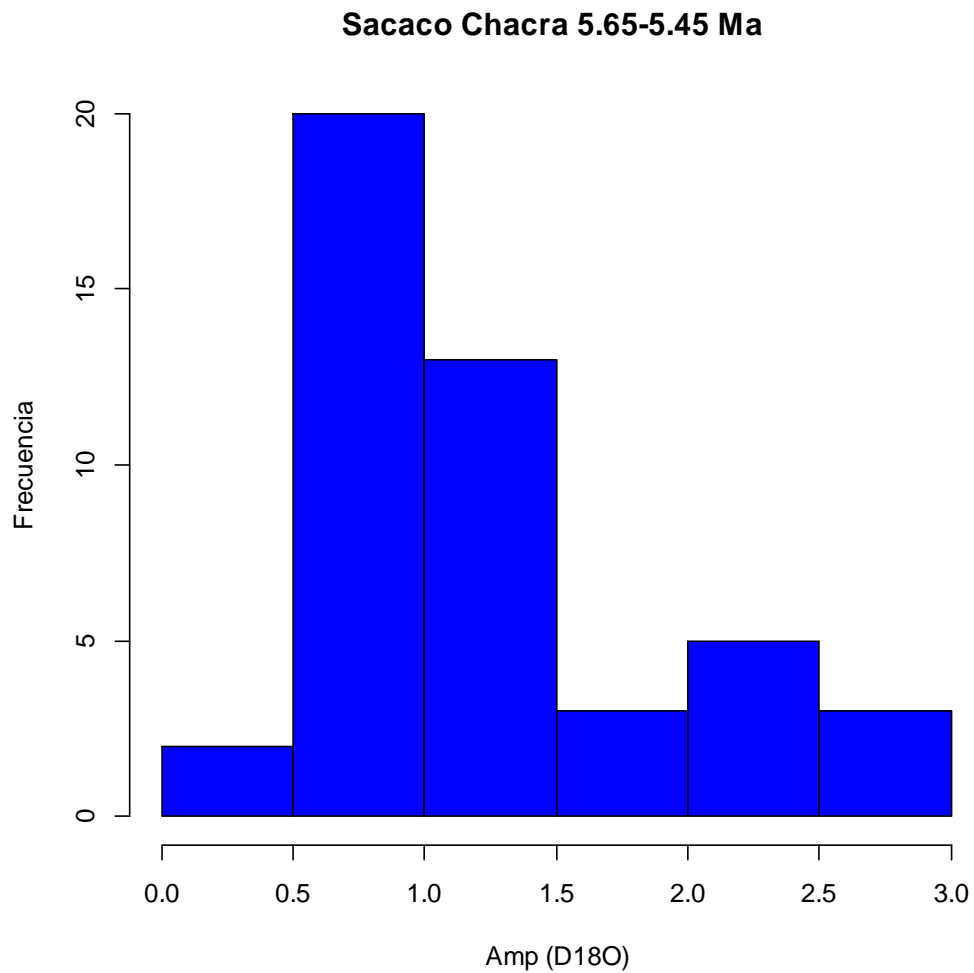
En la Tabla 13 se indica el resumen de los valores promedios, máximos y mínimos de todas las conchas muestreadas en alta resolución para cada localidad de estudio. Los valores promedios de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  para la localidad Telephone Pole, indicarían aguas más frías y menor ingreso de aguas continentales, respecto a las muestras obtenidas de los sitios Yauca RC y Sacaco Chacra

**Tabla 13.** Valores estadísticos de  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , obtenidos de todas las conchas muestreadas para análisis en alta resolución para los 3 sitios.

Código muestra	Estadístico	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{13}\text{C}$ ‰
Yauca RC (~7.25 Ma.)	Promedio	0.38	-0.51
	Máximo	1.48	0.42
	Mínimo	-0.68	-1.40
Sacaco Chacra (5.65-5.45 Ma.)	Promedio	0.48	-1.08
	Máximo	1.78	0.47
	Mínimo	-2.69	-3.62
Telephone Pole (~1.0 Ma.)	Promedio	1.89	2.05
	Máximo	2.42	2.42
	Mínimo	0.97	0.97

En la **Figura 23** se puede observar el histograma de frecuencias de las amplitudes estacionales del  $\delta^{18}\text{O}$  para el Mioceno Tardío, se puede observar que la amplitud que se presenta con mayor frecuencia es la amplitud de 0.5 a 1‰, también se ven

amplitudes superiores a 1.5 ‰, incluso superando el 2.5 ‰, lo que indicaría variaciones estacionales bruscas.



**Figura 23.** Histograma de frecuencia de las amplitudes estacionales de  $\delta^{18}\text{O}$  en Sacaco Chacra, Mioceno Tardío (5.65-5.45 Ma).

## **VI. DISCUSIÓN**

### **6.1. Diagénesis**

De las 51 muestras analizadas solo dos fueron descartadas para cualquier tipo de análisis geoquímico debido a la presencia de recristalización y micro erosión. Estos resultados fueron consistentes con los análisis de difracción de rayos X evaluados en las mismas muestras, en la que la composición original de aragonita de las dos conchas (SAC 20-26-R1 y SAC 20-26-R3) fueron remineralizadas en calcita alterando el registro inicial de la geoquímica del ambiente en donde se formó el molusco. Las microestructuras observadas bajo el microscopio electrónico de las muestras SAC 20-7-R2 y SAC 20-7-R3 no pudieron ser identificadas correctamente, esto debido probablemente a alguna contaminación o error en la preparación de las muestras.

Sin embargo, como la técnica del XRD y del microscopio electrónico solo se realiza en pequeños fragmentos, no se puede verificar de esta manera el estado diagenético en toda la concha, pero sí en la zona que fue micromuestreada. Esos resultados se consideran como indicativos para seleccionar las conchas que fueron estudiadas posteriormente. Las conchas utilizadas para análisis de alta resolución fueron también observadas de manera directa con microscopio óptico. Las partes en donde se observaron erosión (perforaciones) o posible recristalización (coloración marrón que se torna en un tono anaranjado o sombras más oscuras que el resto de la concha), se evitaron en el micromuestreo, por lo que esas secciones no fueron analizadas. La preservación de las líneas de crecimiento fue también un indicador de buena preservación de las conchas.

Finalmente, la ciclicidad anual registrada en las señales de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  de esas conchas confirman a posteriori la preservación química de las condiciones ambientales.

En la **Figura 24**, se puede observar rastros de disolución en una parte de la concha.

En el micromuestreo con micromill, se evitan estas partes.



**Figura 24.** Muestra de rastros de disolución y recristalización en una concha de *A. chilensis* SAC 20-8-4, del área denominada Sacaco Chacra (5.65-5.45 Ma).

## 6.2. Señales isotópicas del estroncio en la Cuenca Pisco y el océano abierto

La parte de la Cordillera de la Costa ubicado a lo largo de la subcuenca Sacaco, habría sido una barrera protectora entre la Cuenca Pisco y el océano abierto. Hasta el momento no está muy claro como esta pudo afectar los ambientes deposicionales del entorno de esta subcuenca (Ochoa et al., 2021).

Para evaluar hasta cierto punto la conectividad entre la Cuenca y el océano se utilizaron dientes de tiburón (*Cosmopolitodus* sp. y *Carcharodon* sp.) y moluscos

fósiles en las que se compararon las señales isotópicas del estroncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ). Debido a que el tiempo de residencia de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en el océano ( $\sim 10^6$  años) es considerablemente mayor que las tasas de mezcla del agua del océano ( $\sim 10^3$  años) (McArthur et al., 2012) entonces bajo condiciones normales la señal isotópica del estroncio debe ser igual a lo largo de todo el mundo.

Se asumió que las características geoquímicas del mar abierto se ven reflejadas en las señales isotópicas del estroncio en dientes de tiburones, ya que estos animales al ser de ambientes pelágicos se distribuyen a lo largo del océano. Estudios revelan que la cronoestratigrafía en la Cuenca Pisco puede ser confiable a partir de análisis isotópicos de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en muestras de dientes de tiburón para el Mioceno (Bosio et al., 2020, 2022), por lo que asumimos que las señales isotópicas reflejadas en mi análisis son confiables. En cambio, los moluscos fósiles al ser sésiles en ambientes costeros, reflejan la señal isotópica del agua en donde se formaron, incluyendo alguna posible señal de aguas continentales (Bryant et al., 1995). Si la cuenca está muy protegida por la Cordillera de la Costa, sus aguas deberían ser influenciadas por las aguas continentales caracterizadas por valores isotópicos de Sr distintas. El  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de partículas en suspensión evaluados en ríos modernos del norte del Perú revelan que estos valores se ven afectados por eventos de precipitaciones extremos como El Niño, de lo contrario en condiciones normales no afectaría el promedio de estos valores, por lo que podrían ser trazadores potenciales para estudios de variabilidad climática como ENSO del pasado en la costa del Pacífico (Moquet et al., 2020).

En efecto, como se verifica en los valores medidos en el agua de los ríos, los valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de las aguas continentales son más bajas (promedio  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7062$ ),

determinadas por las capas geológicas dominadas por rocas ígneas, mis resultados están de acuerdo con los datos obtenidos por (Scaffidi et al., 2020).

Las señales isotópicas muy similares entre los dientes de tiburón y los moluscos fósiles para los siguientes lugares: El Jahuay, Montemar, Sacaco Suroeste y Yauca, indican que para estas diferentes zonas que representan diferentes épocas las características geoquímicas del agua de la Cuenca serían representativas de las características del mar abierto. Ese resultado sugiere que los aportes de aguas continentales no eran significativos o que la mezcla de aguas entre el océano y la cuenca, principalmente por corrientes de mareas, o por procesos de afloramiento, era suficientemente importante en estos sitios para diluir completamente la influencia continental. Por lo tanto, significa que las condiciones ambientales de la cuenca Pisco en esos sitios podrían ser representativas de las condiciones oceanográficas del océano abierto.

En cambio, en la zona denominada Sacaco Chacra (5.65-5.45 Ma) las señales isotópicas entre los dientes de tiburón y las conchas muestreadas difieren en una proporción importante. Las señales isotópicas del estroncio de las conchas tienden hacia valores menores, indicando una mezcla entre agua de mar y aguas con señales isotópicas menores. En este trabajo se analizaron las señales isotópicas del estroncio en muestras de agua en 5 ríos de la costa sur del Perú con lo que se corroboró que estos valores tienden a ser menores que de aquellos que se registran en el agua de mar. Por lo que las señales reflejadas en las conchas y que representan a la Cuenca Pisco, son influenciadas por una mezcla entre el agua de mar y aguas continentales.

La zona denominada Sacaco Chacra, era probablemente una bahía protegida, en donde las aguas provenientes de ríos cercanos se mezclaban con el agua del océano. La profundidad de la bahía y la conexión con el océano eran suficientemente importante para que animales marinos de gran tamaño como ballenas y megalodon entren a la bahía, como lo muestra el registro fósil de este sitio. Condiciones protegidas de baja energía debieron prevalecer, que favorecían la productividad de bancos densos de moluscos como lo indica la presencia de capas densas en conchas de moluscos. Uno o varios ríos probablemente desembocaban en esta bahía contribuyendo en gran medida (~45%) con el agua de la bahía. Este resultado significa que esa bahía era sensible a las precipitaciones y podría por lo tanto registrar el clima continental pasado. Por otro lado, sugiere que los ríos de la costa peruana tenían un caudal mucho más importante que en la actualidad. La evidencia de esos aportes de agua continental confirma que, en los otros sitios estudiados, la similitud de las señales isotópicas costeras y oceánicas de Sr no se deben tanto a un aporte continental limitado sino más bien a una mezcla intensa de las aguas de la cuenca con las del océano.

Nuestros resultados confirma la hipótesis de (Ochoa et al., 2021) que menciona, con base en los resultados de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de (Ehret et al., 2012), que la Cordillera de la Costa sería una barrera protectora pero no aisladora de la Cuenca y tampoco restringiría el intercambio de agua de mar con el océano, excepto para la localidad de Sacaco Chacra (5.65-5.45 Ma) que aparece como una bahía restringida con posibles variaciones importantes de salinidad.

### 6.3. Estacionalidad del $\delta^{18}\text{O}$ en el Mioceno Tardío (5.65-5.45 Ma)

Los valores del  $\delta^{18}\text{O}$  de la aragonita de las conchas no solo dependen de la temperatura del agua de mar, sino que también varían en función al valor  $\delta^{18}\text{O}$  del agua del mar de la época en la que se precipitó el carbonato de calcio (Grossman & Ku, 1986).

En la localidad Sacaco Chacra mis resultados indican que, en muchas conchas, los valores  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  varían estacionalmente en fase (entre 15 conchas, 7 conchas presentan  $R^2 > 0.40$ ), es decir que siguen la misma tendencia. En el medio marino, el  $\delta^{13}\text{C}$  del carbono disuelto varía principalmente con la influencia del afloramiento costero, la productividad, la respiración de la comunidad y la degradación de la materia orgánica (McConnaughey et al., 1997), que no necesariamente se encuentran en fase con el ciclo anual de temperatura. Las aguas continentales se caracterizan por una firma isotópica más negativa que la del agua de mar para ambos isótopos: carbono y oxígeno. La correlación observada entre  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en ciertas conchas indicaría que parte de la variabilidad en esas conchas se debe a ingresos de aguas continentales (Sadler et al., 2012). En varias conchas, la correlación se produce principalmente durante una estación caracterizada por una considerable disminución de ambos ratios isotópicos. En varios casos, la amplitud estacional de estos picos supera los 2 ‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  y llega a casi 3 ‰. Esas amplitudes, si fueran únicamente relacionadas a la temperatura representarían picos de temperatura de 9°C a 13°C, lo que es poco probable y realista en esta región donde la amplitud estacional actualmente está cerca de 4°C (Grados et al., 2018). Por lo tanto, esos picos isotópicos de  $\delta^{18}\text{O}$  deben haber sido producidos por el efecto combinado de las temperaturas altas de verano y de una disminución del valor

isotópico del agua. Esa disminución del valor isotópico del agua durante el verano, asociado también a un pico negativo de  $\delta^{13}\text{C}$  es característico de un aporte de agua dulce con una influencia durante varios meses.

Este resultado concuerda con la diferencia observada en los valores isotópicos de Sr entre los dientes de tiburón y las conchas presentadas en la sección 6.2. Ambas evidencias soportan la existencia de aportes importantes de agua continental en la bahía Sacaco Chacra en el Mioceno Tardío. En la actualidad ningún río de la costa peruana podría afectar durante meses la salinidad de una bahía marina y contribuir hasta aproximadamente el 45% del agua en esta bahía debido a sus bajos caudales, como lo demuestra el análisis isotópico en alta resolución de conchas modernas de la zona de Ica, donde no se observan variaciones significativas negativas simultáneas de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  (Carré et al., 2013). Así también, las variaciones de salinidad evaluados en 3 estaciones costeras (Huacho, Callao, Ilo) son muy pequeñas, presentando desviaciones estándar de 0.11, 0.11 y 0.07 respectivamente (Carré et al., 2013).

Esto indicaría que la costa peruana en esta época no era hiperarida como actualmente la conocemos. Todavía se debe determinar si esos eventos de aporte brusco de agua dulce durante el verano eran debidos al sistema de monzón sudamericano que alcanzaba la costa en esta época o a eventos tipo El Niño.

### **6.3.1. Origen del agua dulce en la costa peruana durante el Mioceno Tardío (5.65-5.45 Ma)**

Estudios de reconstrucción de la actividad ENSO en la costa peruana a partir de registros isotópicos de moluscos mostraron que la variabilidad climática interanual,

determinada por ENSO en la costa peruana, puede ser estimada a partir de la variabilidad de los valores de amplitud estacional de una muestra de conchas (Carré et al., 2013, 2014). Determinamos igualmente las amplitudes estacionales dentro de las 15 conchas micromuestreadas. Se lograron identificar 46 valores de amplitudes estacionales del  $\delta^{18}\text{O}$ , que tienen una distribución de asimetría positiva, característica de las anomalías ENSO (las anomalías cálidas son de mayor amplitud que las anomalías frías) (Carré et al., 2013). La distribución, sin embargo, no puede ser directamente comparada con distribuciones actuales porque las anomalías positivas no son aquí solamente producidas por anomalías de temperatura sino también por la influencia de agua dulce que amplifican la anomalía isotópica. De los 46 valores de amplitudes identificados, 11 se pueden considerar eventos El Niño debido al cambio brusco de  $\delta^{18}\text{O}$  por incremento de las temperaturas del agua de mar y  $\delta^{13}\text{C}$  debido al ingreso de agua de río, y en los cambios en donde solo varía ampliamente el  $\delta^{18}\text{O}$ , podría considerarse El Niño sin la presencia de lluvias o ingreso importante de aguas continentales.

La amplitud hallada más frecuente es de 1.004 ‰ (mediana de la distribución), que corresponde a una amplitud estacional de temperatura de  $\sim 4$  °C, muy similar a la actual, así también se pueden observar 11 valores mayores a 1.5 ‰ que sobresalen de los valores promedios. Esos ciclos estacionales de  $\delta^{18}\text{O}$  de gran amplitud sistemáticamente se correlacionan con un pico negativo de  $\delta^{13}\text{C}$  significativo, indicando un evento de fuerte aporte de agua continental.

Una parte de las conchas analizadas no muestran correlación entre  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  y registran ciclos de  $\delta^{18}\text{O}$  que se asemejan a ciclos anuales de temperatura de una amplitud similar a la actualidad, lo que podría indicar que esas conchas han vivido

alejadas de las desembocaduras de ríos mientras que las que muestran una fuerte correlación vivían cerca de una desembocadura, o el ingreso de agua no era lo suficiente para generar amplitudes  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  simultáneas. La variabilidad de la distribución podría en este caso representar una variabilidad espacial más que una variabilidad climática temporal. Sin embargo, las conchas que registran varios años consecutivos, como SAC20-7.8-3, muestran claramente una variabilidad interanual, con años de baja amplitud de  $\delta^{18}\text{O}$ , sin picos negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  y años de mayor amplitud asociados a picos negativos de  $\delta^{13}\text{C}$ . Esos registros demuestran que las llegadas de agua dulce no eran regulares como lo serían si estuvieran asociadas al sistema de monzón, sino interanuales, lo que caracteriza los eventos de lluvia asociados a los eventos El Niño.

De los datos obtenidos de  $\delta^{18}\text{O}$  de las 15 conchas muestreadas para este periodo, se identificaron 32 veranos. Si consideramos que los veranos de fuerte amplitud asociados a un fuerte aporte de agua dulce son eventos tipo El Niño, de todos los veranos identificados 11 serían El Niño. La frecuencia de esos eventos en nuestro registro es de 2.9 años, encontrándose dentro del rango de frecuencia de 2-7 años observado para ENSO actualmente (McPhaden et al., 2021). Este resultado es un soporte adicional para inferir que ENSO existía durante el periodo del Mioceno Tardío (5.65-5.45 Ma), con una frecuencia similar a la actual. Una gran diferencia con la actualidad es la ocurrencia sistemática de lluvias costeras durante los eventos El Niño del Mioceno Tardío mientras que hoy en día solo los eventos más extremos como los de 1982-83 y de 1997-98 generaron lluvias en esa latitud. Esa intensificación de la respuesta atmosférica de ENSO en el Mioceno se puede atribuir a las condiciones globales más cálidas por el efecto invernadero que

aumentan el contenido de vapor en la atmosfera. Nuestras observaciones confirman los resultados de simulaciones que predicen un aumento de las lluvias extremas de El Niño con el calentamiento global futuro (Cai et al., 2014).

Nuestros resultados son consistentes con el trabajo previo de Weiss et al. (2017) que analizaron dos muestras de corales de la Formación Gurabo del Mioceno de la Republica Dominicana. Cada coral representa 27 y 29 años de una serie de tiempo mensual en donde se analizaron  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ . Las muestras fueron fechadas utilizando la técnica de U-Pb en  $5.52 \pm 0.15$  Ma ubicándose en la transición Mioceno-Plioceno. Weiss et al. (2017), descubren que las proporciones isotópicas del oxígeno de los corales contienen espectros de potencia similares a la variabilidad moderna ENSO observadas en el Pacífico Tropical. Sin embargo, la conexión entre el Pacífico y el Mar Caribe para esa época por medio del Istmo de Panamá y sus implicancias paleoceanograficas no soy muy bien entendidas y aún debatibles por el cierre completo de este. Los modelos actuales de simulación de teleconexiones entre la TSM del Caribe Central y la zona NINO 3, sugieren correlaciones débiles y con teleconexiones solo a través de la atmósfera.

Galeotti et al. (2010) utilizan varvas de evaporitas del Mioceno Tardío (5.6 Ma) del Mediterráneo, y demuestra que sus resultados revelan señales significativas de variabilidad interanual, cuya frecuencia y persistencia se comparan con las oscilaciones climáticas que afectan actualmente a esa región. Así también muestra una variabilidad en la banda de 2 a 7 años la cual se puede comparar con el espectro moderno de ENSO. Debemos tener en cuenta que las teleconexiones actuales de ENSO con la región mediterránea es débil y tiene una variabilidad interanual

compleja que puede verse afectado también por la Oscilación del Atlántico Norte (NAO).

El Mar Caribe y el Mediterráneo, sin embargo, no están ubicadas en el centro principal de influencia de ENSO y están influenciadas por diversos modos de variabilidad. La costa peruana en cambio es la región sometida a las anomalías más intensas de ENSO. Más del 75% de su variabilidad interanual es hoy determinada por ENSO. Nuestros datos serían por lo tanto el registro directo más antiguo de la variabilidad climática de ENSO.

### **6.3.2. Tendencia oceanográfica desde el Mioceno Tardío hasta el Pleistoceno**

Se puede observar claramente que para la zona denominada Telephone Pole del Pleistoceno (~1.0 Ma.), los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  tienden a ser mucho más positivos que los del Mioceno Tardío. Esto indicaría un enfriamiento de las aguas del mar frente a la costa del Perú y a su vez indicaría menos aporte de aguas continentales lo que se puede inferir como aridez de la costa. Estos valores son consistentes con los presentados por Zachos et al. (2001) en donde se muestra el incremento de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  en los últimos millones de años.

El enfriamiento gradual desde el inicio del Plioceno hasta condiciones modernas llega a valores de  $-2.9^\circ\text{C}$  observados en el margen peruano del testigo ODP 1237 y el enfriamiento ocurrió en la transición Plio-Pleistoceno (Dekens et al., 2007), estas condiciones se pueden ver reflejados en mis resultados en los cuales se observa un incremento del valor promedio  $\delta^{18}\text{O}$ , sin embargo, hay que tener en cuenta que el  $\delta^{18}\text{O}$  también es influenciado por ingreso de aguas continentales para el Mioceno Tardío producidos por eventos El Niño.

El valor  $\delta^{13}\text{C}$  del Mioceno Tardío es más negativo que para el Pleistoceno Temprano, esto debido a que para este periodo se estima ingreso de aguas continentales que arrastran valores  $\delta^{13}\text{C}$  muy negativos, lo que indicaría precipitaciones que alcanzarían el mar peruano posiblemente desde los Andes Centrales (e.g Poulsen et al., 2010). Estos valores muy negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  podrían también en parte relacionarse a la degradación de la materia de fitoplancton cuya productividad era muy alta en la Cuenca Pisco, como los muestran las grandes acumulaciones de diatomitas (Ochoa et al., 2021).

Para la localidad Sacaco Chacra (5.65-5.45 Ma) estos resultados promedio indicarían valores de TSM mayores a los del Pleistoceno y aporte de aguas continentales, los cuales son consistentes con los resultados de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución evaluados para determinar la presencia de ENSO. Estos resultados indican condiciones de salinidad y temperatura promedio similares a Yauca RC (~7.25 Ma) y en Sacaco Chacra (~5.5 Ma), fuera de las condiciones El Niño que afectan Sacaco Chacra, registrados en los moluscos.

Las condiciones más húmedas y cálidas del Mioceno Tardío registrados en mis resultados, coinciden con la presencia de una fauna de vertebrados hoy extinta como el cocodrilo *Piscogavialis sp* y el perezoso acuático *Thalassocnus sp* (Ochoa et al., 2021), cuya alimentación principal, de este último, era el pasto marino de los fondos acuáticos someros y de ambientes de aguas tropicales (McDonald & De Muizon, 2002) animal extinto aproximadamente en 4.5 Ma (Ochoa et al., 2021). El registro del fósil del delfín *Pliopontos* indicaría que tenía la capacidad de alternar sistemas marino-costeros y fluviales, así también los análisis morfométricos de esta especie

refuerzan la hipótesis de TSM más cálidas que las actuales para el Mioceno Tardío (Carrasco Zúñiga, 2022), en concordancia con mis resultados.

La secuencia sedimentaria en Sacaco tiene un hiato de más de 2 millones de años cuando termina la formación Pisco (Ochoa et al., 2021). Cuando el proceso de sedimentación se reinicia al final del Plioceno, la fauna de moluscos es distinta. El bivalvo *Anadara chilensis*, característico de la Formación Pisco, desaparece y aparecen especies más típicas del sistema de Humboldt actual, como la especie *Argopecten purpuratus*. Las condiciones más frías registradas en el Pleistoceno en el sitio Telephone Pole podrían explicar en parte este cambio faunístico. Entre las condiciones cálidas y húmedas registradas en Sacaco Chacra y las condiciones frías del Pleistoceno Temprano, el Istmo de Panamá se cerró por completo, evento que estaría relacionado con el inicio de afloramiento de aguas frías en el Pacífico Ecuatorial Este entre los 4-5 Ma (Schmidt, 2007) y los Andes tuvieron una fase de levantamiento intenso que transformó la geomorfología costera y probablemente abrió la Cuenca Pisco al océano y a la influencia directa del afloramiento costero. Ese proceso de enfriamiento costero concuerda con las reconstrucciones de paleotemperatura a partir de sedimentos marinos que muestran un enfriamiento importante del océano en esa transición (Hansen et al., 2013). El levantamiento de los Andes, según experimentos de simulación climática, hubiera intensificado los vientos costeros y el afloramiento (Sepulchre et al., 2009) resultando en condiciones más frías y áridas, en acuerdo con nuestros datos.

## VII. CONCLUSIONES

- Las señales isotópicas del estroncio de los dientes de tiburón fósiles son significativamente similares a la de las conchas fósiles para las localidades: El Jahuay, Montemar, Yauca y Sacaco Suroeste lo que indica que la Cordillera de la Costa no restringía la mezcla de aguas entre la Cuenca Pisco y el océano abierto, por lo que se puede inferir que las características geoquímicas de la Cuenca Pisco reflejarían las características del océano. Sin embargo, nuestros resultados indican que para la localidad de Sacaco Chacra (5.65-5.45 Ma) las señales isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de los dientes de tiburón y las conchas fósiles son significativamente diferentes. Nuestro modelo de mezcla indica un aporte aproximadamente del 45% de aguas continentales en la Cuenca Pisco para la localidad Sacaco Chacra, demostrando que esta sección de la cuenca estaba restringida y no permitía una mezcla completa de las aguas del océano y la cuenca.
- El incremento de los valores promedio de  $\delta^{18}\text{O}$  indican un enfriamiento de las aguas de la Cuenca Pisco y en conjunto con los valores  $\delta^{13}\text{C}$  de una aridificación de la costa en la transición del Mioceno Tardío al Pleistoceno temprano.
- Los resultados en alta resolución de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  para el Mioceno Tardío (5.65-5.45 Ma) en conchas fósiles reflejan variaciones de temperatura e ingreso de aguas continentales, indicando eventos tipo El Niño con una frecuencia aproximada de 2.9 años. Además, estos eventos El Niño provocarían eventos de inundación en la Cuenca Pisco. Reflejando que la

costa peruana en esas latitudes no eran hiperaridas para esta época, como actualmente la conocemos. Así también estos resultados, representan el registro directo más antiguo de la actividad tipo El Niño (Mioceno Tardío (5.65-5.45 Ma)).

## VIII. RECOMENDACIONES

- Utilizar la técnica de Clumped Isotopes ( $\Delta 47$ ) en los moluscos fósiles de carbonato de calcio con buena preservación trabajados en este proyecto para la determinación de los valores promedio de TSM para las diferentes épocas desde el Mioceno Tardío hasta el Pleistoceno Temprano y a su vez determinar el valor promedio de  $\delta^{18}\text{O}$  del agua de mar de la época en la que vivieron estos fósiles.
- Evaluar moluscos fósiles trabajados en este proyecto que presentan buena preservación en alta resolución para las diferentes épocas desde el Mioceno Tardío hasta el Pleistoceno Temprano para determinar la estacionalidad de precipitaciones o influencia de aguas continentales.
- Analizar conchas en alta resolución de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ , para épocas como el Plioceno y evaluar la actividad del ENSO en el Perú.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Affek, H. P. (2012). Clumped Isotope Paleothermometry: Principles, Applications, and Challenges. *The Paleontological Society Papers*, 18, 101–114.  
<https://doi.org/10.1017/s1089332600002576>
- Bartoli, G., Sarnthein, M., Weinelt, M., Erlenkeuser, H., Garbe-Schönberg, D., & Lea, D. W. (2005). Final closure of Panama and the onset of northern hemisphere glaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(1–2), 33–44.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.020>
- Beltran, C., Rouselle, G., Backman, J., Wade, B. S., & Sicre, M. A. (2014). Paleoenvironmental conditions for the development of calcareous nannofossil acme during the late Miocene in the eastern equatorial Pacific. *Paleoceanography*, 29, 210–222.  
<https://doi.org/10.1002/2013PA002506>.Received
- Bosio, G., Bianucci, G., Collareta, A., Landini, W., Urbina, M., & Di Celma, C. (2022). Ultrastructure, composition, and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dating of shark teeth from lower Miocene sediments of southwestern Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 118(March), 103909.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103909>
- Bosio, G., Malinverno, E., Collareta, A., Di Celma, C., Gioncada, A., Parente, M., Berra, F., Marx, F. G., Vertino, A., Urbina, M., & Bianucci, G. (2020). Strontium Isotope Stratigraphy and the thermophilic fossil fauna from the middle Miocene of the East Pisco Basin (Peru). *Journal of South American Earth Sciences*, 97(October 2019).

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102399>

Bryant, J. D., Jones, D. S., & Mueller, P. A. (1995). *Influence of freshwater flux on  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  chronostratigraphy in marginal marine environments and dating of vertebrate and invertebrate faunas*. *69*(1), 1–6.

Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., Van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., Mcphaden, M. J., Wu, L., England, M. H., Wang, G., Guilyardi, E., & Jin, F. F. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, *4*(2), 111–116. <https://doi.org/10.1038/nclimate2100>

Carrasco Zúñiga, P. A. (2022). *¿ Existieron delfines de río en la costa peruana hace ~ 6 millones de años ? El hábitat del delfín *Pliopontos littoralis* del Mioceno tardío de la Formación Pisco , Arequipa , Perú*. UNIVERSIDAD PERUANA CAYETANO HEREDIA.

Carré, M. (2007). El mes de recolección de la macha (*Mesodesma donacium*) determinado por sus líneas de crecimiento: aplicaciones arqueológicas. *Bulletin de l'Institut Français d'études Andines*, *36*(36 (2)), 299–304. <https://doi.org/10.4000/bifea.3983>

Carré, M., Bentaleb, I., Blamart, D., Ogle, N., Cardenas, F., Zevallos, S., Kalin, R. M., Ortlieb, L., & Fontugne, M. (2005). Stable isotopes and sclerochronology of the bivalve *Mesodesma donacium*: Potential application to Peruvian paleoceanographic reconstructions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *228*(1–2), 4–25. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.03.045>

Carré, M., Sachs, J. P., Purca, S., Schauer, A. J., Braconnot, P., Falcón, R. A.,

- Julien, M., & Lavallée, D. (2014). Holocene history of ENSO variance and asymmetry in the eastern tropical Pacific. *Science (New York, N.Y.)*, 345(6200), 1045–1048. <https://doi.org/10.1126/science.1252220>
- Carré, M., Sachs, J. P., Schauer, A. J., Rodríguez, W. E., & Ramos, F. C. (2013). Reconstructing El Niño-Southern Oscillation activity and ocean temperature seasonality from short-lived marine mollusk shells from Peru. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 371, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.12.014>
- Chavez, 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>
- Chavez, F. P., & Messié, M. (2009). A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Progress in Oceanography*, 83(1–4), 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>
- Collareta, A., Lambert, O., Landini, W., Di Celma, C., Malinverno, E., Varas-Malca, R., Urbina, M., & Bianucci, G. (2017). Did the giant extinct shark *Carcharocles megalodon* target small prey? Bite marks on marine mammal remains from the late Miocene of Peru. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 469, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.01.001>
- De Muizon, C., & Bellon, H. (1980). L'âge mio-pliocène de la Formation Pisco (Pérou). *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences*, 290(October), 1063–1066.

- De Muizon, C., & Bellon, H. (1986). Nouvelles données sur l'âge de la Formation Pisco (Pérou). *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences*, 303(January), 1401–1404.
- De Muizon, C., & DeVries, T. J. (1985). Geology and paleontology of late Cenozoic marine deposits in the Sacaco area (Peru). *Geologische Rundschau*, 74(3), 547–563. <https://doi.org/10.1007/BF01821211>
- Dekens, P. S., Ravelo, A. C., & McCarthy, M. D. (2007). Warm upwelling regions in the Pliocene warm period. *Paleoceanography*, 22(3), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2006PA001394>
- DeVries, T. (1998). Oligocene deposition and Cenozoic sequence boundaries in the Pisco Basin (Peru). *Journal of South American Earth Sciences*, 11(3), 217–231. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(98\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(98)00014-5)
- DeVries, T. (2020). Lithostratigraphy and Biostratigraphy of Pliocene and Pleistocene Marine Deposits and Age of the highest Marine Terrace from the Sacaco Basin and its Environs (southern Peru). *Boletín de La Sociedad Geológica Del Perú*, 114, 20–48.
- Dunai, T. J., Sciences, L., Universiteit, V., Boelelaan, D., Amsterdam, H. V., & Gonza, G. A. (2005). *Oligocene – Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms*. 4, 321–324. <https://doi.org/10.1130/G21184.1>
- Dunbar, R. B., Marty, R. C., & Baker, P. A. (1990). Cenozoic marine sedimentation in the Sechura and Pisco basins, Peru. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 77(3–4), 235–261. <https://doi.org/10.1016/0031->

0182(90)90179-B

Ehret, D. J., Hubbell, G., & MacFadden, B. J. (2009). Featured Article Exceptional Preservation of the White Shark *Carcharodon*. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 29(March), 1–13. <https://doi.org/10.1671/039.029.0113>

Ehret, D. J., Macfadden, B. J., Jones, D. S., Devries, T. J., Foster, D. A., & Salas-Gismondi, R. (2012). Origin of the white shark *Carcharodon* (Lamniformes: Lamnidae) based on recalibration of the Upper Neogene Pisco Formation of Peru. *Palaeontology*, 55(6), 1139–1153. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2012.01201.x>

Eiler, J. M. (2011). Paleoclimate reconstruction using carbonate clumped isotope thermometry. *Quaternary Science Reviews*, 30(25–26), 3575–3588. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.09.001>

Emile-Geay, J., Cobb, K. M., Cole, J. E., Elliot, M., & Zhu, F. (2021). Past ENSO Variability: Reconstructions, Models, and Implications. In *Geophysical Monograph Series* (Vol. 253, pp. 87–118). <https://doi.org/10.1002/9781119548164.ch5>

Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H., & Urey, H. (1951). Carbonate-Water Isotopic Temperature Scale By. *Bulletin of the Geological Society of America*, 62, 417–426. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1951\)62\[417:CITS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1951)62[417:CITS]2.0.CO;2)

Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H., & Urey, H. (1953). Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bulletin of the Geological Society of America*, 64, 1315–1326. <https://doi.org/10.1130/0016->

7606(1953)64[1315:RCITS]2.0.CO;2

- Esperante, R., & Poma, O. (2015). Taphonomy and palacopathology of two mysticete whales, upper miocene pisco formation, Peru. *Spanish Journal of Paleontology*, *30*(1).
- Esperante, Raúl, Brand, L. R., Chadwick, A. V., & Poma, O. (2015). Taphonomy and paleoenvironmental conditions of deposition of fossil whales in the diatomaceous sediments of the Miocene/Pliocene Pisco Formation, southern Peru-A new fossil-lagerstätte. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *417*(January 2016), 337–370. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.09.029>
- Fedorov, A. V., Dekens, P. S., McCarthy, M., Ravelo, A. C., DeMenocal, P. B., Barreiro, M., Pacanowski, R. C., & Philander, S. G. (2006). The pliocene paradox (mechanisms for a permanent El Niño). *Science*, *312*(5779), 1485–1489. <https://doi.org/10.1126/science.1122666>
- Galeotti, S., von der Heydt, A., Huber, M., Bice, D., Dijkstra, H., Jilbert, T., Lanci, L., & Reichert, G. J. (2010). Evidence for active El Niño Southern Oscillation variability in the Late Miocene greenhouse climate. *Geology*, *38*(5), 419–422. <https://doi.org/10.1130/G30629.1>
- Grados, C., Chaigneau, A., Echevin, V., & Dominguez, N. (2018). Upper ocean hydrology of the Northern Humboldt Current System at seasonal, interannual and interdecadal scales. *Progress in Oceanography*, *165*(May), 123–144. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.05.005>
- Grossman, E. L., & Ku, T. L. (1986). Oxygen and carbon isotope fractionation in

biogenic aragonite: Temperature effects. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 59(C), 59–74. [https://doi.org/10.1016/0168-9622\(86\)90057-6](https://doi.org/10.1016/0168-9622(86)90057-6)

Hansen, J., Sato, M., Russell, G., & Kharecha, P. (2013). Climate sensitivity, sea level and atmospheric carbon dioxide. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(2001). <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0294>

Haug, G. H., Tiedemann, R., Zahn, R., & Ravelo, A. C. (2001). Role of Panama uplift on oceanic freshwater balance. *Geology*, 29(3), 207–210. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0207:ROPUOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0207:ROPUOO>2.0.CO;2)

Kirby, M. X., Soniat, T. M., & Spero, H. J. (1998). Stable isotope sclerochronology of Pleistocene and recent oyster shells (*Crassostrea virginica*). *Palaios*, 13(6), 560–569. [https://doi.org/10.1043/0883-1351\(1998\)013<0560:SISOPA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0883-1351(1998)013<0560:SISOPA>2.0.CO;2)

Lariviere, J. P., Ravelo, A. C., Crimmins, A., Dekens, P. S., Ford, H. L., Lyle, M., & Wara, M. W. (2012). Late Miocene decoupling of oceanic warmth and atmospheric carbon dioxide forcing. *Nature*, 486(7401), 97–100. <https://doi.org/10.1038/nature11200>

Lawrence, K. T., Liu, Z., & Herbert, T. D. (2006). Evolution of the eastern tropical Pacific through Plio-Pleistocene glaciation. *Science*, 312(5770), 79–83. <https://doi.org/10.1126/science.1120395>

Leon, W., Rossel, W., Aleman, A., Torres, V., & de la Cruz, O. (2008). Estratigrafía, Sedimentología y Evolución Tectónica de la Cuenca Pisco

Oriental. *Boletín INGEMMET*, 27, serie D, 144.

<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/341>

Macharé, J. (1987). *La marge continentale du Pérou: régimes tectoniques et sédimentaires cénozoïques de l'avant-arc des Andes Centrales*. Université de Paris XI, Orsay.

Mächtle, B., Unkel, I., Eitel, B., Kromer, B., & Schiegl, S. (2010). Molluscs as evidence for a late Pleistocene and early Holocene humid period in the southern coastal desert of Peru (14.5°S). *Quaternary Research*, 73(1), 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.05.007>

Mann, R. (1982). Skeletal growth of aquatic organisms: Biological records of environmental change. *Aquaculture*, 29(1–2), 193–195. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(82\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0044-8486(82)90051-5)

McArthur, J. M., Howarth, R. J., & Shields, G. A. (2012). Strontium Isotope Stratigraphy. *The Geologic Time Scale 2012*, 1–2, 127–144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00007-X>

McConnaughey, T., Burdett, J., Whelan, J. F., & Paull, C. K. (1997). Carbon isotopes in biological carbonates: respiration and photosynthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(5), 611–622. <https://doi.org/10.1063/1.3067609>

McDonald, H. G., & De Muizon, C. (2002). The cranial anatomy of thalassocnus (xenarthra, mammalia), a derived nothrothere from the neogene of the pisco formation (Peru). *Journal of Vertebrate Paleontology*, 22(2), 349–365. [https://doi.org/10.1671/0272-4634\(2002\)022\[0349:TCAOTX\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1671/0272-4634(2002)022[0349:TCAOTX]2.0.CO;2)

- McPhaden, M. J., Santoso, A., & Cai, W. (2021). Introduction to El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. In M. J. McPhaden, A. Santoso, & C. Wenju (Eds.), *Acta Psychiatrica Scandinavica* (First Edit, Vol. 43, Issue 206 S, pp. 7–10). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0447.1968.tb02029.x>
- Moquet, J. S., Morera, S. B., Turcq, B., Poitrasson, F., Roddaz, M., Moreira-Turcq, P., Espinoza, J. C., Guyot, J. L., Takahashi, K., Orrillo, J. D., Petrick, S., Mounic, S., & Sondag, F. (2020). Control of seasonal and inter-annual rainfall distribution on the Strontium-Neodymium isotopic compositions of suspended particulate matter and implications for tracing ENSO events in the Pacific coast (Tumbes basin, Peru). *Global and Planetary Change*, 185(November 2019). <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103080>
- Muizon, C. de. (1981). *Les vertébrés fossiles de la Formation Pisco (Pérou)*.
- Ochoa, D., Devries, T. J., Quispe, K., Barbosa-espitia, A., Salas-gismondi, R., Foster, D. A., Gonzales, R., Revillon, S., Cardich, J., Perez, A., Romero, P., Berrospi, R., Pairazam, L., Urbina, M., & Carré, M. (2022). *Age and provenance of the Mio-Pleistocene sediments from the Sacaco area , Peruvian continental margin*. 116(April). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103799>
- Ochoa, D., Salas-Gismondi, R., DeVries, T. J., Baby, P., de Muizon, C., Altamirano, A., Barbosa-Espitia, A., Foster, D. A., Quispe, K., Cardich, J., Gutiérrez, D., Perez, A., Valqui, J., Urbina, M., & Carré, M. (2021). Late Neogene evolution of the Peruvian margin and its ecosystems: a synthesis from the Sacaco record. In *International Journal of Earth Sciences* (Vol. 110, Issue 3). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s00531-021->

02003-1

- Ortlieb, L., & Diaz, A. (1991). Distribución de moluscos litorales del Perú en el Pleistoceno Superior: Primeras interpretaciones paleoceanográficas y paleoclimáticas. *IIIa Reunión Anual Proyecto PICG 281 (Lima, 1991). Volumen de Resúmenes y COntribuciones, 281*, 39–56.
- Palmer, M. R., & Edmond, J. M. (1989). The strontium isotope budget of the modern ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, *92*(1), 11–26.  
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90017-4)
- Pennington, J. T., Mahoney, K. L., Kuwahara, V. S., Kolber, D. D., Calienes, R., & Chavez, F. P. (2006). Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, *69*(2–4), 285–317.  
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.012>
- Poulsen, C. J., Ehlers, T. A., & Insel, N. (2010). Onset of convective rainfall during gradual late miocene rise of the central andes. *Science*, *328*(5977), 490–493.  
<https://doi.org/10.1126/science.1185078>
- Rickaby, R. E. M., & Halloran, P. (2005). Cool La Niña during the warmth of the Pliocene? *Science*, *307*(5717), 1948–1952.  
<https://doi.org/10.1126/science.1104666>
- Sadler, J., Carré, M., Azzoug, M., Schauer, A. J., Ledesma, J., Cardenas, F., Chase, B. M., Bentaleb, I., Muller, S. D., Mandeng, M., Rohling, E. J., & Sachs, J. P. (2012). Reconstructing past upwelling intensity and the seasonal dynamics of primary productivity along the Peruvian coastline from mollusk shell stable isotopes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *13*(1), 1–17.

<https://doi.org/10.1029/2011GC003595>

Salas-Gismondi, R., Ochoa, D., Jouve, S., Romero, P. E., Cardich, J., Perez, A., Devries, T., Baby, P., Urbina, M., & Carré, M. (2022). Miocene fossils from the southeastern Pacific shed light on the last radiation of marine crocodylians. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 289(1974).

<https://doi.org/10.1098/rspb.2022.0380>

Sanabria, J., Bourrel, L., Dewitte, B., Frappart, F., Rau, P., Solis, O., & Labat, D. (2018). Rainfall along the coast of Peru during strong El Niño events.

*International Journal of Climatology*, 38(4), 1737–1747.

<https://doi.org/10.1002/joc.5292>

Scaffidi, B. K., Tung, T. A., Gordon, G., Alaica, A. K., González La Rosa, L. M., Marsteller, S. J., Dahlstedt, A., Schach, E., & Knudson, K. J. (2020). Drinking

Locally: A Water  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Isoscape for Geolocation of Archeological Samples in the Peruvian Andes. *Frontiers in Ecology and Evolution*,

8(September), 1–24. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00281>

Schmidt, D. N. (2007). The closure history of the Central American seaway:

Evidence from isotopes and fossils to models and molecules. *Geological*

*Society Special Publication*, 427–442. <https://doi.org/10.1144/tms002.19>

Schöne, B. R., & Gillikin, D. P. (2013). Unraveling environmental histories from

skeletal diaries - Advances in sclerochronology. *Palaeogeography,*

*Palaeoclimatology,* *Palaeoecology,* 373, 1–5.

<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.11.026>

Seki, O., Foster, G. L., Schmidt, D. N., Mackensen, A., Kawamura, K., & Pancost,

- R. D. (2010). Alkenone and boron-based Pliocene pCO<sub>2</sub> records. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(1–2), 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.01.037>
- Sepulchre, P., Sloan, L. C., Snyder, M., & Fiechter, J. (2009). Impacts of andean uplift on the Humboldt current system: A climate model sensitivity study. *Paleoceanography*, 24(4), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008PA001668>
- Tierney, J. E., Haywood, A. M., Feng, R., Bhattacharya, T., & Otto-Bliesner, B. L. (2019). Pliocene Warmth Consistent With Greenhouse Gas Forcing. *Geophysical Research Letters*, 46(15), 9136–9144. <https://doi.org/10.1029/2019GL083802>
- Vonhof, H. B., Wesselingh, F. P., & Ganssen, G. M. (1998). Reconstruction of the Miocene western Amazonian aquatic system using molluscan isotopic signatures. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 141(1–2), 85–93. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(98\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00010-8)
- Vonhof, H. B., Wesselingh, F. P., Kaandorp, R. J. G., Davies, G. R., van Hinte, J. E., Guerrero, J., Räsänen, M., Romero-Pittman, L., & Ranzi, A. (2003). Paleogeography of Miocene Western Amazona: Isotopic composition of molluscan shells constrains the influence of marine incursions. *Bulletin of the Geological Society of America*, 115(8), 983–993. <https://doi.org/10.1130/B25058.1>
- Wara, M. W., Ravelo, A. C., & Delaney, M. L. (2005). Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period. *Science*, 309(5735), 758–761. <https://doi.org/10.1126/science.1112596>

- Watanabe, T., Suzuki, A., Minobe, S., Kawashima, T., Kameo, K., Minoshima, K., Aguilar, Y. M., Wani, R., Kawahata, H., Sowa, K., Nagai, T., & Kase, T. (2011). Permanent El Niño during the Pliocene warm period not supported by coral evidence. *Nature*, *471*(7337), 209–211. <https://doi.org/10.1038/nature09777>
- Weiss, T. L., Denniston, R. F., Wanamaker, A. D., Villarini, G., & von der Heydt, A. S. (2017). El Niño-Southern Oscillation-like variability in a late Miocene Caribbean coral. *Geology*, *45*(7), 643–646. <https://doi.org/10.1130/G38796.1>
- Zachos, J., Pagani, H., Sloan, L., Thomas, E., & Billups, K. (2001). Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, *292*(5517), 686–693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>

## X. ANEXOS

### TABLAS

**Tabla A 1.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil A.Chilensis SAC 18-21-R1.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	0.49	-0.95	
2	0.60	-0.93	
3	0.64	-1.40	
4	0.44	-0.40	
5	0.40	-0.99	
6	0.31	-0.81	
7	0.48	-0.54	
8	0.38	-1.11	
9	0.01	-1.15	
10	-0.33	-1.01	
11	-0.15	-1.06	
12	-0.36	-1.03	
13	-0.40	-1.03	
14	-0.49	-0.88	
15	-0.33	-0.32	
16	-0.04	-0.77	
17	-0.68	-1.04	
18	0.64	-0.24	
19	0.31	-0.49	
20	1.08	0.36	
21	1.23	0.05	
22	1.48	0.38	
23	1.28	0.24	
24	0.73	-0.36	
25	0.92	0.06	

**Tabla A 2.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 18-21-R2 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	0.82	-1.12	
2	0.84	-1.34	
3	0.62	-0.82	
4	0.35	-0.81	
5	0.26	-0.94	
6	0.39	-1.17	
7	0.51	-1.37	
8	0.34	-1.10	
9			
10	0.44	-0.98	
11	0.53	-0.99	
12	0.44	-0.74	
13	0.31	-1.16	
14	0.57	-0.99	
15	-0.12	-0.92	
16	0.55	-0.85	
17	-0.19	-0.76	
18	0.48	-0.36	
19	-0.05	-0.40	
20	-0.02	-0.55	
21	0.26	-0.39	
22	0.27	-0.39	
23	0.82	0.02	
24	0.67	-0.22	
25	0.82	-0.13	
26	1.17	0.14	
27	0.57	-0.42	
28	0.77	-0.09	

**Tabla A 3.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 18-21-R3 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	0.61	-0.07	
2	0.65	0.42	
3	0.61	0.19	
4	0.28	-0.39	
5	0.54	-0.39	
6	0.46	-0.38	
7	0.01	-0.32	
8	0.31	-0.28	
9	0.17	-0.30	
10	-0.20	-0.23	
11	0.38	-0.40	
12	0.50	0.00	
13	-0.07	-0.48	

**Tabla A 4.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 18-34-R1 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	1.21	-0.96	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
2	1.00	-0.74	
3	0.24	-0.84	
4	1.05	-0.84	
5	0.90	-0.38	
6	0.73	-0.06	
7	0.30	-0.54	
8	-0.01	-0.38	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
9	0.68	0.36	
10	0.89	0.40	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
11	0.71	0.12	
12	0.14	-0.45	
13	-0.89	-2.12	
14	-1.28	-2.69	
15	-1.66	-2.87	
16	-0.84	-2.59	
17	-0.90	-2.64	
18	-1.84	-3.20	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
19	-1.14	-2.72	
20	-1.76	-3.52	

**Tabla A 5.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-1-1 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1			
2	-0.45	-1.30	
3	-0.62	-1.02	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
4	0.00	-1.25	
5	-0.01	-0.81	
6	-0.36	-0.89	
7	0.02	-0.96	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
8	-0.30	-1.20	
9	-0.31	-1.22	
10	-0.89	-1.28	
11	-0.86	-1.23	
12	-1.01	-1.09	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
13	-0.49	-1.10	
14	-0.19	-1.00	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
15	-0.61	-1.16	
16	-0.81	-1.29	
17	-1.06	-1.21	
18	-1.27	-1.17	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
19	-0.92	-1.64	

**Tabla A 6.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-1-3b de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	0.94	-0.48	
2	1.28	-1.51	
3	0.93	-1.46	
4	1.09	-1.13	
5	1.16	-0.98	
6	0.98	-0.87	
7	0.95	-0.73	
8	1.07	-1.01	
9	1.16	-1.08	
10	0.93	-0.61	
11	0.97	-0.38	
12	0.97	-1.03	
13	1.24	-1.03	

**Tabla A 7.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-1-5 de A.Chilensis.

N°Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	1.60	-0.65	
2	1.65	-0.64	
3	1.51	-0.56	
4			
5	1.74	-1.06	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
6	1.54	-0.72	
7	1.38	-0.26	
8	1.36	-0.84	
9	0.92	-0.68	
10	0.58	-0.27	
11	0.57	0.32	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
12	0.85	0.15	
13	1.11	0.07	
14	0.81	-0.51	
15	1.27	-0.41	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
16	1.22	-0.52	
17	0.68	-1.06	
18	1.26	-0.79	
19	0.89	-0.93	
20	1.11	0.16	

**Tabla A 8.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-2-2 de A.Chilensis.

N°Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	0.40	-0.76	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
2	1.11	-0.53	
3	1.78	-0.85	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
4	1.37	-0.95	
5	1.29	-0.96	
6	1.45	-0.75	
7	0.72	-1.28	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
8	1.18	-0.81	
9	0.92	-0.27	
10	1.04	-0.21	
11	1.13	-0.37	
12	1.26	-0.86	
13	1.49	-0.81	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
14	0.76	-0.31	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
15	1.17	-0.43	
16	1.13	-0.20	
17	0.90	-0.28	
18	1.09	-0.08	
19	1.00	-0.50	
20	0.93	-1.00	
21	1.15	-0.96	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
22	0.78	-1.31	
23	0.34	-1.48	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$

**Tabla A 9.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-2-3 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	0.96	-0.67	
2	0.74	-0.63	
3	0.66	-0.58	
4	0.31	-0.36	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
5	0.47	-0.34	
6	0.77	-0.55	
7	0.75	-0.41	
8	1.04	-1.06	
9	0.63	-1.10	
10	0.74	-1.18	
11	0.68	-0.76	
12	0.72	-0.54	
13	1.15	-0.62	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
14	0.98	-0.71	
15	0.58	-0.67	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
16	0.61	-0.32	
17	0.75	-0.32	
18	0.79		
19	0.86	-0.34	
20	0.83	-0.17	
21	1.11	-0.03	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
22	0.94	-0.10	
23	0.71	0.10	
24	0.89	-0.19	
25	0.55	-0.28	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
26	0.91	-0.20	
27	0.89	-0.36	

**Tabla A 10.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-2-4 de A.Chilensis.

N°Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	1.02	-0.46	
2	0.66	-0.20	
3	0.93	-0.34	
4	1.24	-0.35	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
5	0.92	-0.41	
6	1.07	-0.46	
7	0.37	-1.10	
8	0.23	-1.06	
9	0.71	-0.77	
10	0.41	-1.72	
11	0.02	-1.08	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$

**Tabla A 11.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-7.8-1 de A.Chilensis.

N°Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	0.89	-0.32	
2	0.71	-0.33	
3	0.76	-0.30	
4	0.84	-0.43	
5	0.66	-0.48	
6	0.98	-0.70	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
7	0.52	-1.49	
8	0.81	-0.91	
9	0.59	-0.64	
10	0.31	-0.65	
11	0.38	-0.79	
12	0.05	-0.94	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$

**Tabla A 12.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-7.8-2 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	1.20	-1.08	
2	0.90	-1.22	
3	0.43	-1.00	
4	0.62	-0.85	
5	0.17	-0.89	
6	0.13	-0.91	
7	-0.11	-0.94	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
8	0.20	-0.59	
9	0.83	-1.25	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
10	0.25	-0.71	
11	-0.12	-0.96	
12	0.24	-2.77	
13	-1.29	-1.77	
14	-1.13	-2.26	
15	-1.84	-2.75	
16	-1.98	-2.70	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
17	-1.38	-2.15	
18	-0.33	-3.09	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
19	-1.76	-2.25	
20	-2.69	-2.67	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
21	-0.80	-2.50	

**Tabla A 13.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-7.8-3 de *A.Chilensis*.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	1.34	-1.69	
2	0.94	-2.47	
3	-0.28	-3.62	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
4	1.34	-1.90	
5	1.26	-1.48	
6	1.53	-1.65	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
7	1.11	-1.48	
8	1.49	-1.34	
9	1.28	-1.89	
10	0.36	-2.22	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
11	0.76	-1.91	
12	1.16	-1.57	
13	1.15	-1.35	
14	1.23	-1.44	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
15	1.04	-1.73	
16	0.92	-1.77	
17	0.23	-1.89	
18	0.57	-1.26	
19	-0.42	-1.80	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
20	0.15	-1.63	
21	-0.15	-1.95	
22	0.17	-1.45	
23	-0.33	-1.33	
24	0.22	-1.46	
25	0.58	-1.39	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
26	0.14	-1.71	
27	-0.01	-1.51	
28	0.38	-1.52	
29	0.26	-1.33	
30	0.53	-1.01	
31	-0.05	-1.76	
32	-1.66	-3.22	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
33	-1.65	-2.99	
34	-0.88	-2.41	
35	-1.19	-2.90	

**Tabla A 14.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-7.8-4 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	1.11	-0.85	
2	1.07	-1.11	
3	0.98	-1.04	
4	1.39	-1.11	
5	1.50	-1.04	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
6	1.28	-0.86	
7	1.08	-1.04	
8	-0.65	-1.49	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
9	-0.64	-1.72	
10	0.05	-2.23	
11	-0.21	-1.71	
12	-0.12	-1.57	
13	-0.28	-1.47	
14	0.18	-1.38	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
15	-0.60	-1.79	
16	-0.95	-2.42	
17	-1.22	-2.97	
18	-1.22	-3.01	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$

**Tabla A 15.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-8-2 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	1.19	-0.92	
2	1.21	-0.36	
3	1.15	-0.23	
4	1.04	-0.39	
5	1.35	-0.27	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
6	1.03	-0.38	
7	0.75	-0.34	
8	0.52	-0.42	
9	0.39	-0.60	
10	0.30	-0.65	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
11	0.62	-0.51	
12	0.76	-0.41	
13	1.41	-0.77	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
14	1.23	-0.79	
15	1.00	-0.95	
16	0.83	-0.73	
17	0.72	-0.89	
18	0.90	-0.80	
19	0.45	-0.92	
20	-0.56	-1.63	
21	-1.11	-1.85	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
22	0.10	-1.37	
23	0.10	-1.64	
24	-0.67	-1.58	

**Tabla A 16.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-8-3 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	1.20	-2.67	
2	1.23	-2.09	
3	1.23	-1.86	
4	1.33	-1.71	
5	1.11	-2.14	
6	1.22	-1.96	
7	1.36	-2.04	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
8	1.22	-2.07	
9	1.17	-2.37	
10	0.91	-2.30	
11	1.05	-1.90	
12	0.93	-1.64	
13	0.62	-1.49	
14	0.52	-1.73	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
15	0.69	-1.61	
16	0.93	-1.69	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
17	0.62	-1.49	
18	0.26	-1.44	
19	0.32	-1.23	
20	-0.24	-1.20	
21	-0.22	-1.45	
22	-0.72	-1.69	
23	-0.52	-1.53	
24	-0.74	-1.48	
25	-0.98	-1.52	
26	-1.38	-1.70	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$

**Tabla A 17.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-8-4 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	0.80	-2.19	
2	1.13	-1.89	
3	1.43	-1.98	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
4	1.38	-1.75	
5	0.92	-2.00	
6	0.47	-2.22	
7	0.38	-0.63	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
8	1.15	-1.48	
9	0.95	-1.65	
10	0.89	-1.69	
11	1.07	-1.41	
12	0.56	-1.09	
13	1.28	-1.10	
14	1.29	-0.61	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
15	1.08	-1.00	
16	0.98	-0.65	
17	0.79	-0.49	
18	0.59	-1.21	
19	0.41	-0.74	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
20	0.52	-0.51	
21	1.09	-0.41	
22	0.61	-0.44	
23	1.32	-0.77	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
24	0.32	-1.22	
25	0.95	-0.81	
26	0.72	-0.85	
27	0.31	-0.99	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
28	0.82	-1.21	

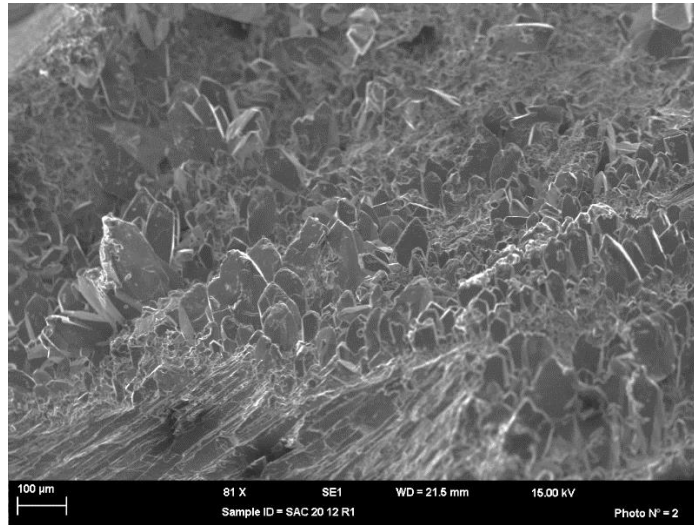
**Tabla A 18.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 20-8-5 de A.Chilensis.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	1.09	0.47	
2	1.36	-0.40	
3	1.23	-0.36	
4	1.39	-0.55	Valor máximo de $\delta^{18}\text{O}$
5	1.09	-0.21	
6	0.88	-0.21	
7	1.24	-0.37	
8	1.00	0.07	
9	1.17	-0.53	
10	0.30	-0.99	
11	0.42	-0.67	
12	0.52	-0.89	
13	-0.19	-1.05	
14	-0.54	-1.78	
15	-0.26	-1.62	
16	-0.36	-1.39	
17	-0.41	-1.48	
18	-0.45	-1.45	
19	-0.73	-1.31	Valor mínimo de $\delta^{18}\text{O}$
20	-0.40	-1.17	

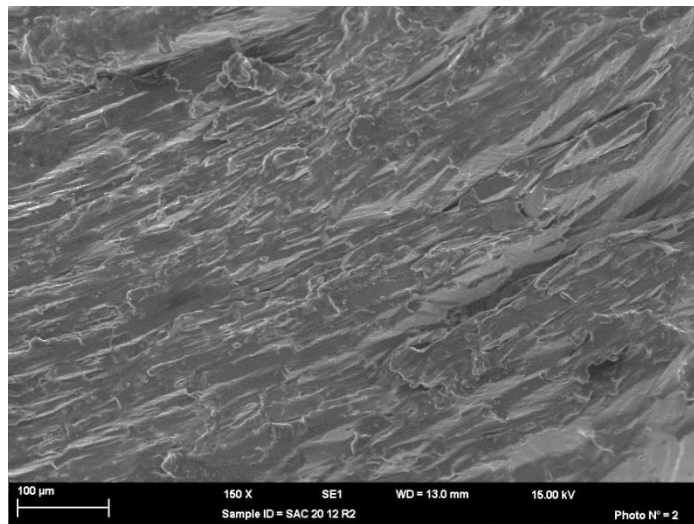
**Tabla A 19.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  en alta resolución medidos en la concha fósil SAC 18-6-R1 de G.Ovata.

NºMuestra	$\delta^{18}\text{O}$ (aragonita)	$\delta^{13}\text{C}$ (aragonita)	Nota
1	1.75	0.97	
2	1.67	1.23	
3	1.87	1.02	
4	1.90	1.43	
5	2.00	1.53	
6	1.91	1.33	
7	2.03	1.44	
8	2.16	1.78	
9	2.15	1.81	
10	1.98	2.21	
11	2.11	2.28	
12	2.12	2.12	
13	2.10	2.34	
14	2.16	2.24	
15	2.02	2.28	
16	2.02	2.16	
17	2.13	2.29	
18	2.21	2.28	
19	2.12	2.42	
20	2.16	2.11	
21	2.03	2.31	
22	2.14	2.06	
23	2.07	1.94	
24	2.36	1.87	

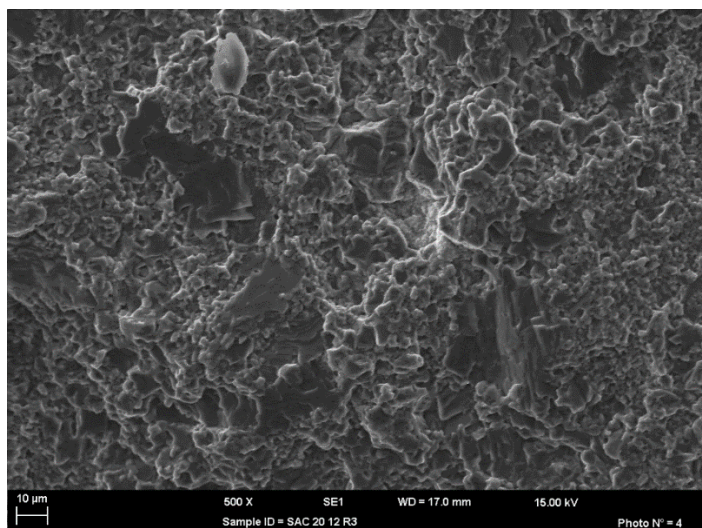
## FIGURAS



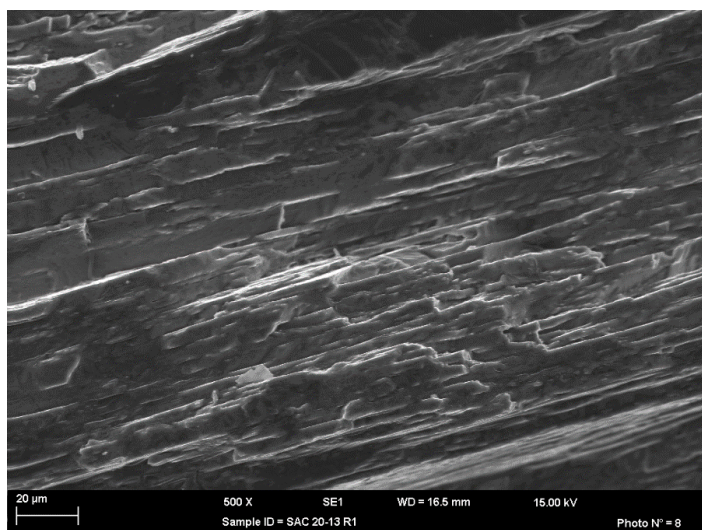
**Figura A 1.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-12-R1



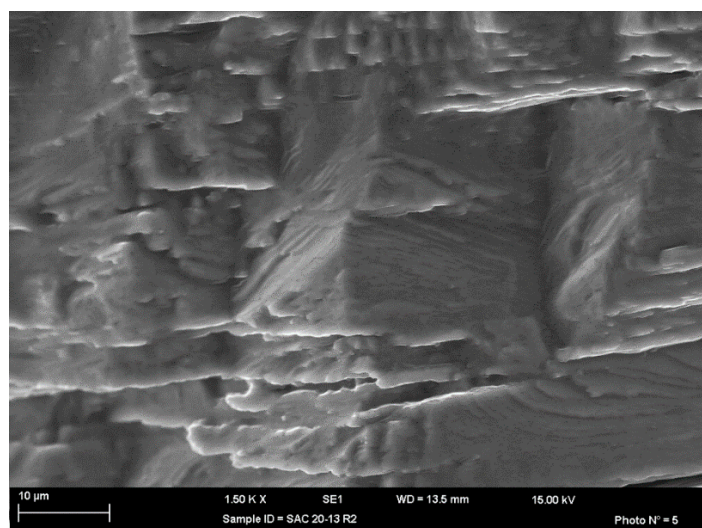
**Figura A 2.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-12-R2



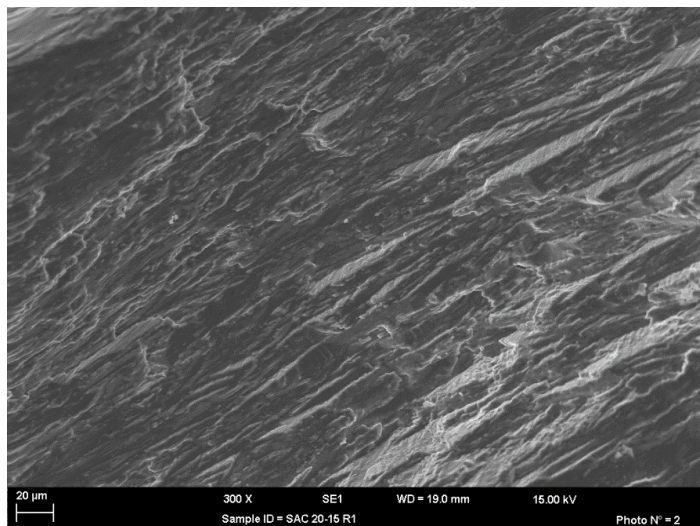
**Figura A 3.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-12-R3



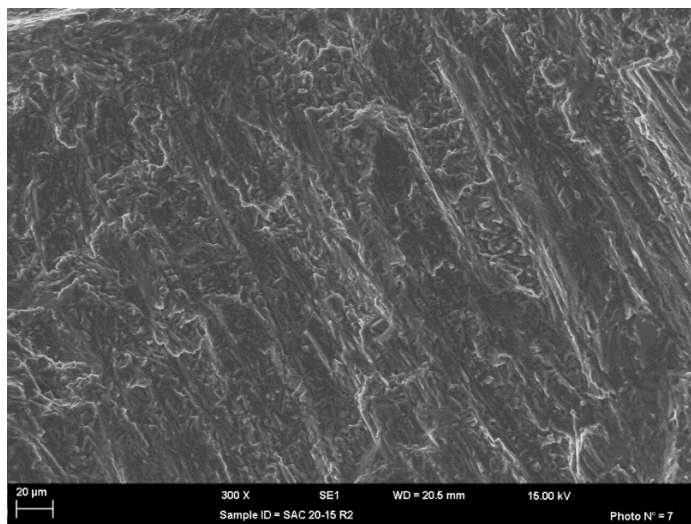
**Figura A 4.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-13-R1



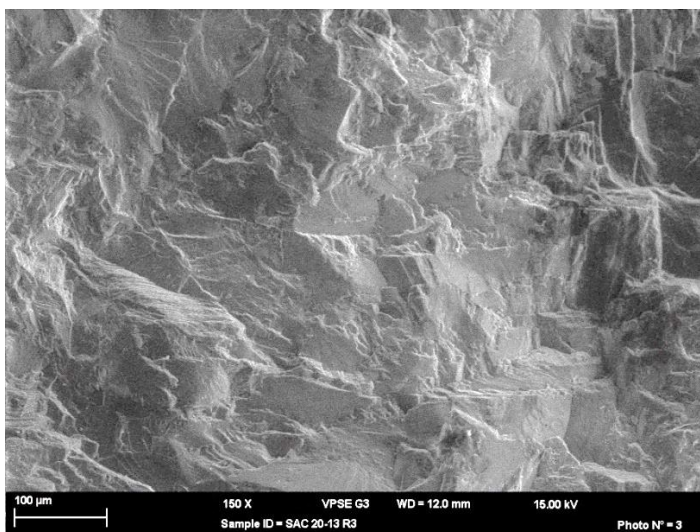
**Figura A 5.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-13-R2



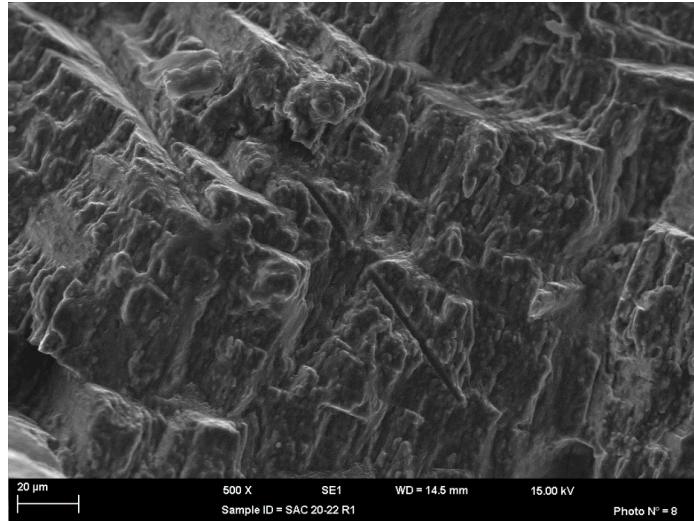
**Figura A 6.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-15-R1



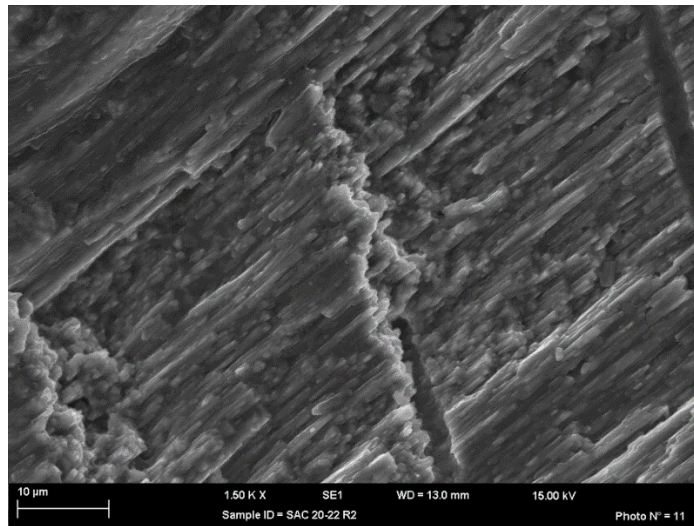
**Figura A 7.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-15-R2



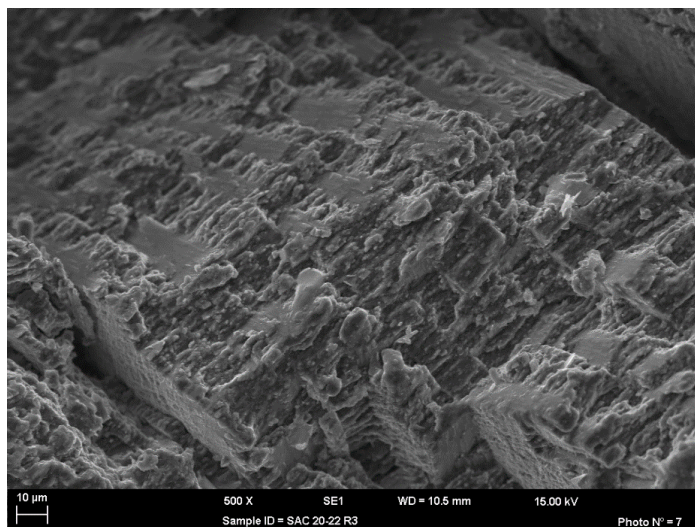
**Figura A 8.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-15-R3



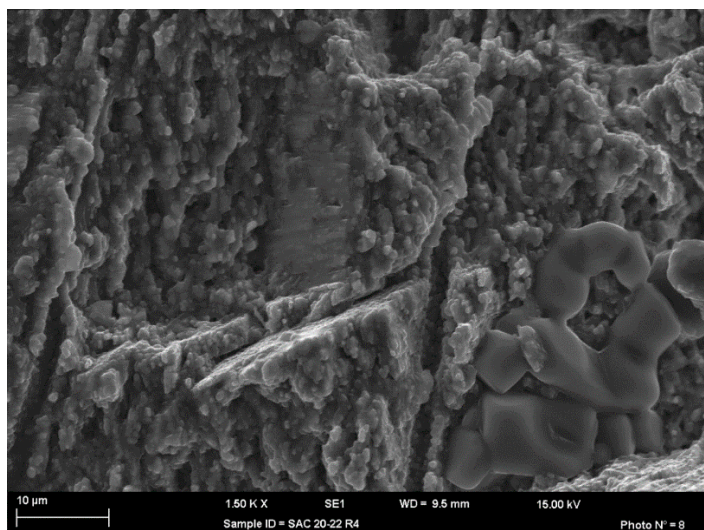
**Figura A 9.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R1



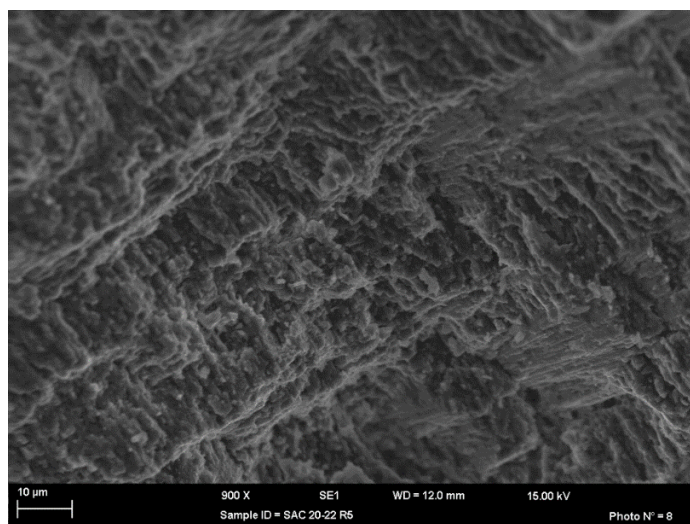
**Figura A 10.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R2



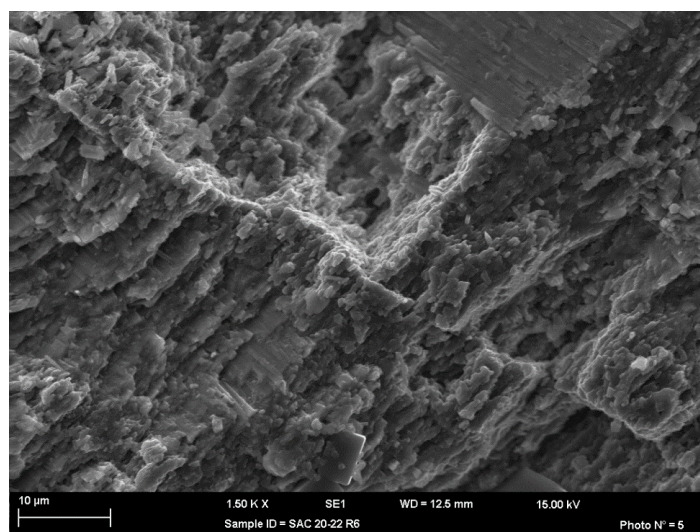
**Figura A 11.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R3



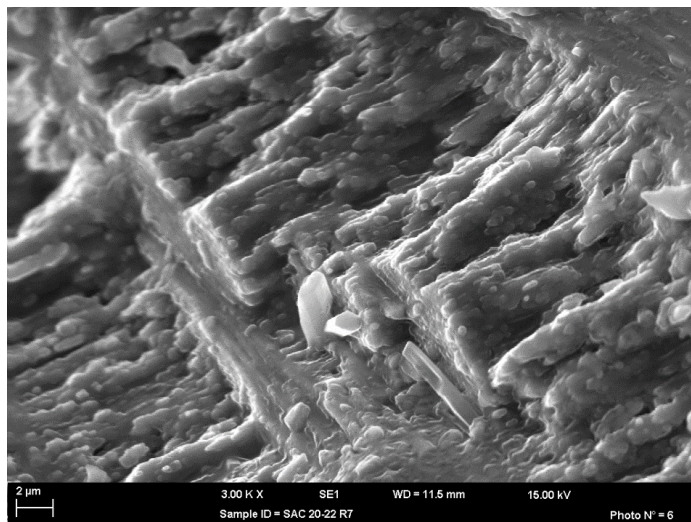
**Figura A 12.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R4



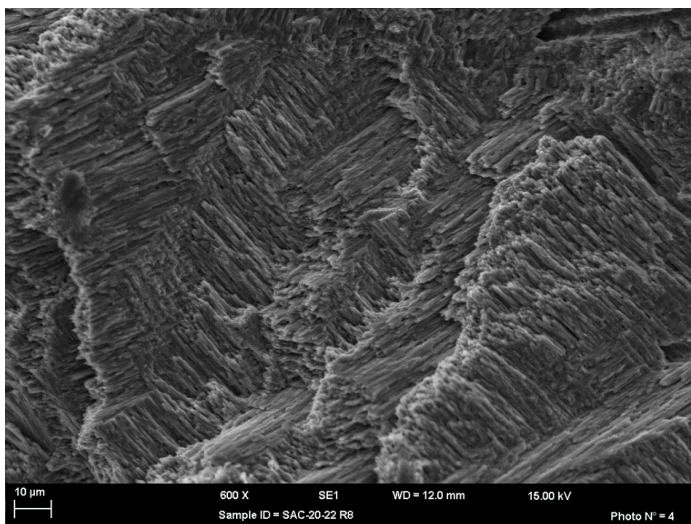
**Figura A 13.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R5



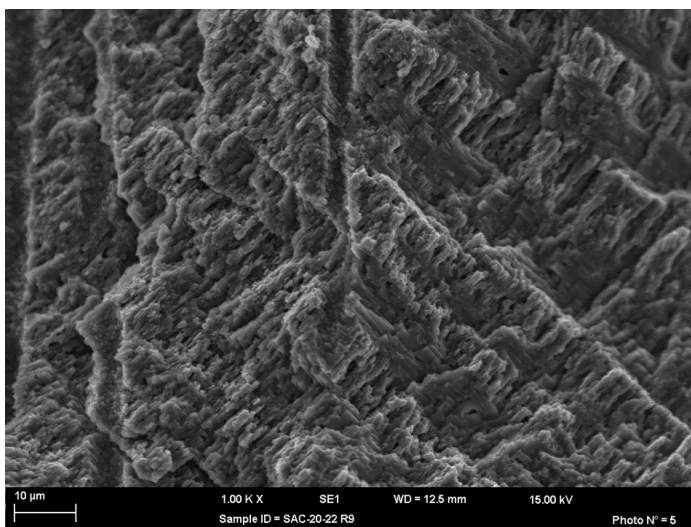
**Figura A 14.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R6



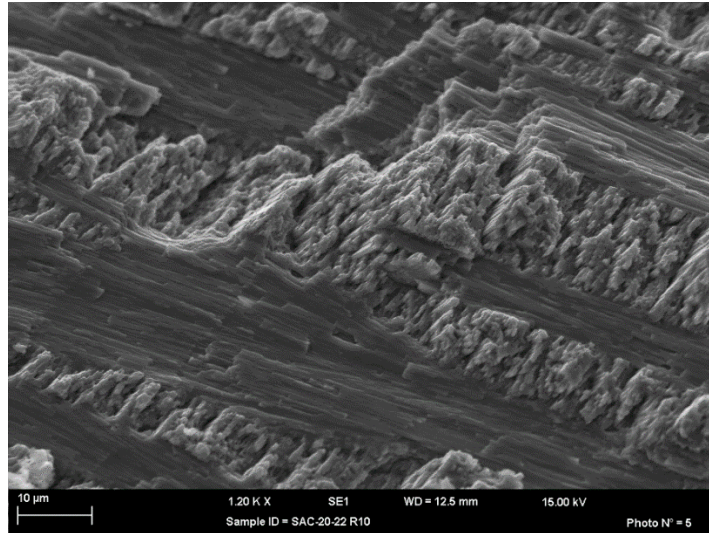
**Figura A 15.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R7



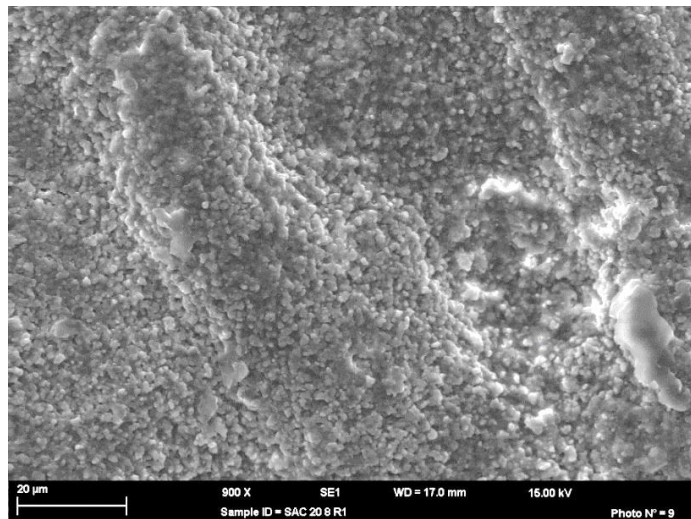
**Figura A 16.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R8



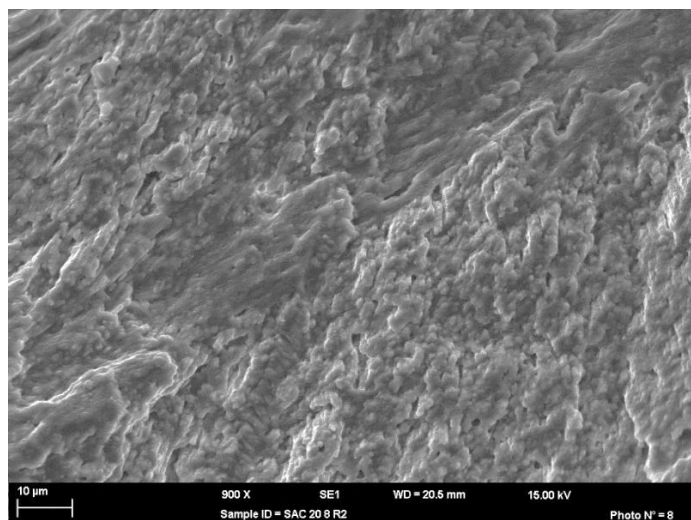
**Figura A 17.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R9



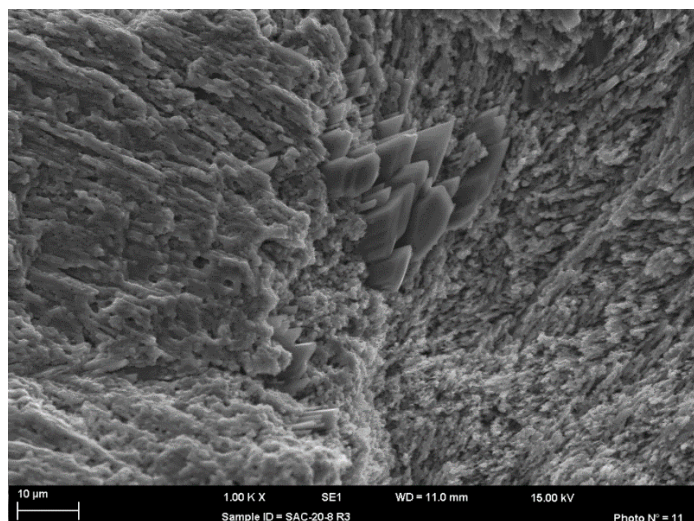
**Figura A 18.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-22-R10



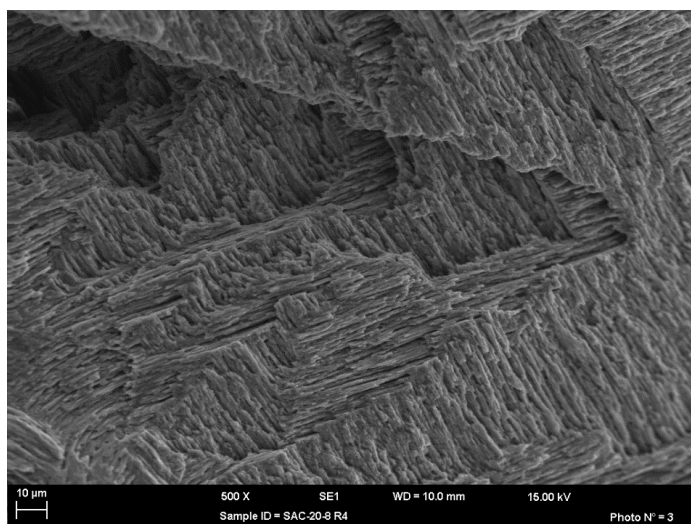
**Figura A 19.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-8-R1



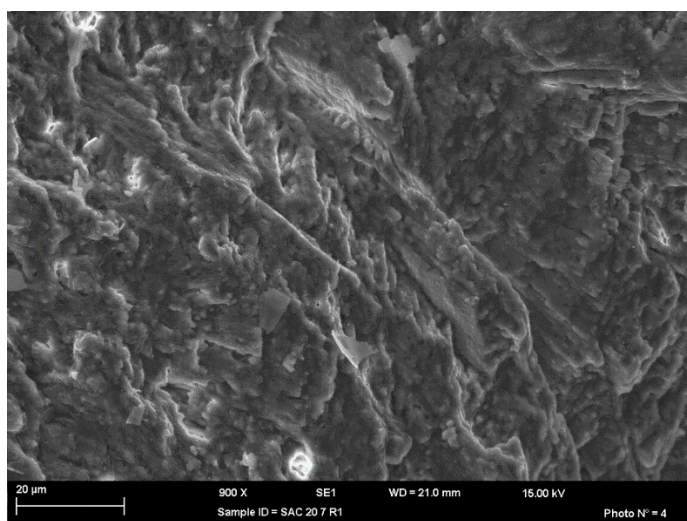
**Figura A 20.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-8-R2



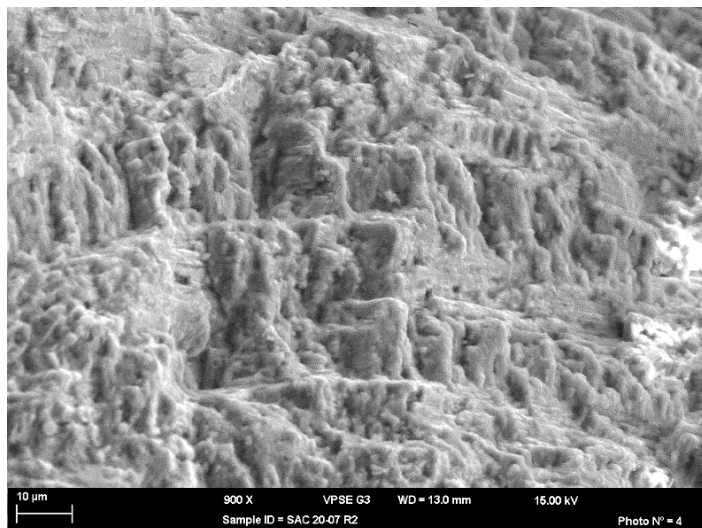
**Figura A 21.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-8-R3



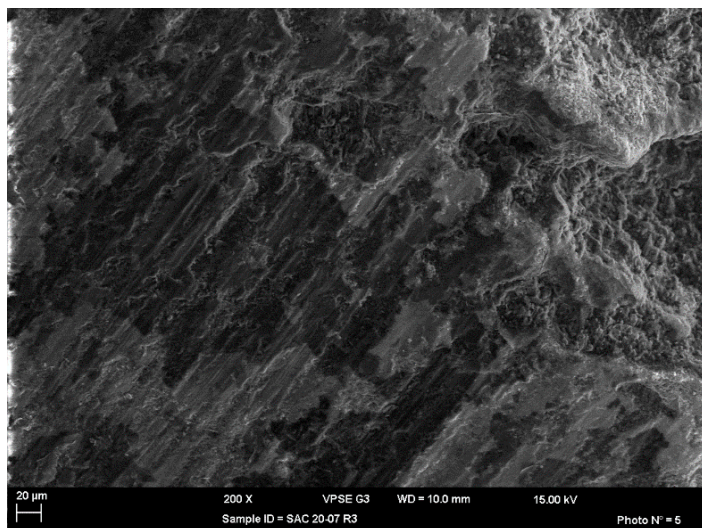
**Figura A 22.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-8-R4



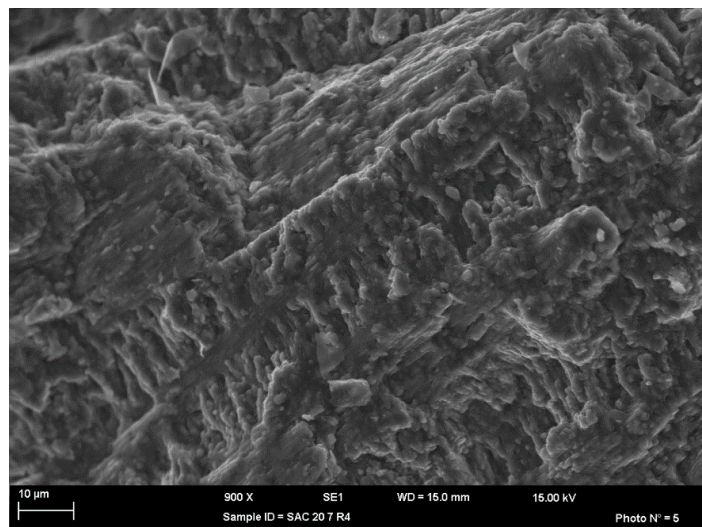
**Figura A 23.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-7-R1



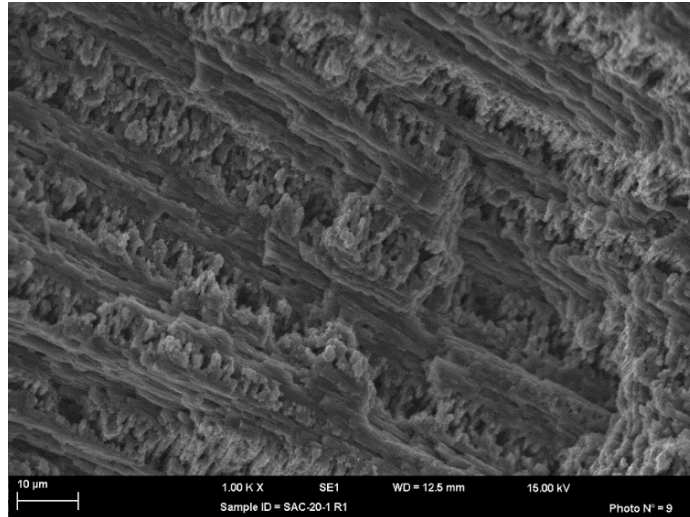
**Figura A 24.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-7-R2



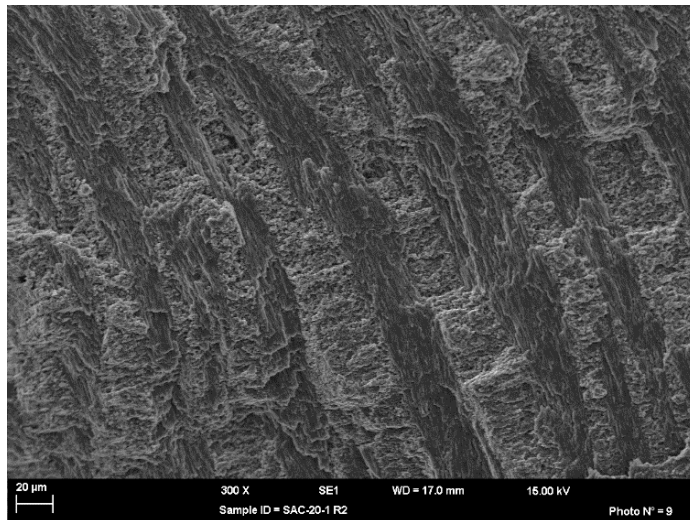
**Figura A 25.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-7-R3



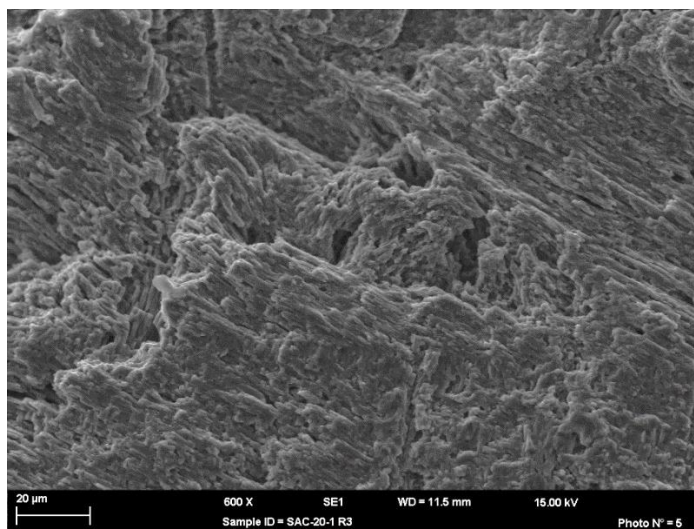
**Figura A 26.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-7-R4



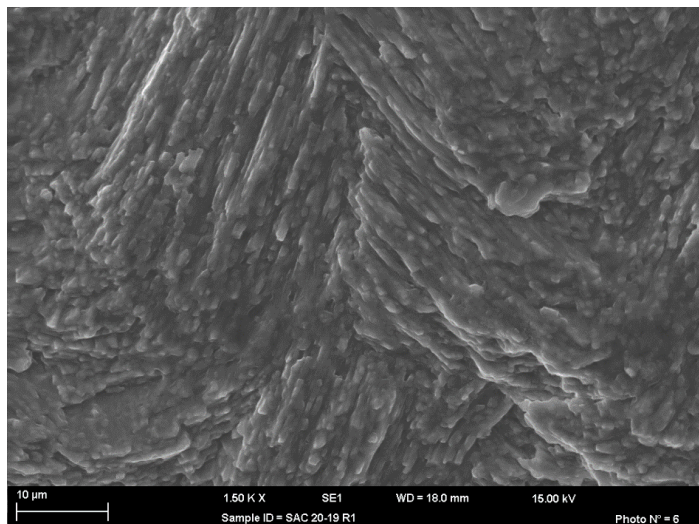
**Figura A 27.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-1-R1



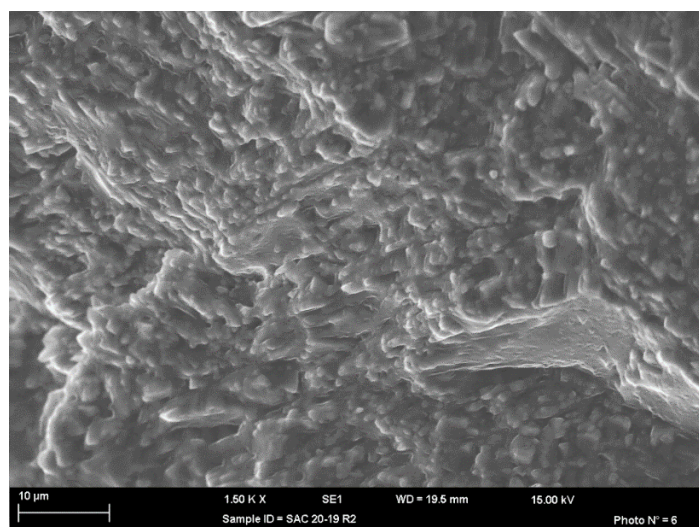
**Figura A 28.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-1-R2



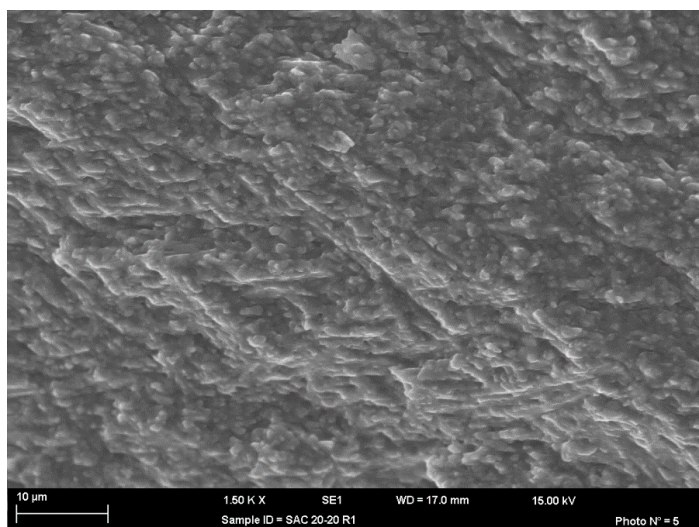
**Figura A 29.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-1-R3



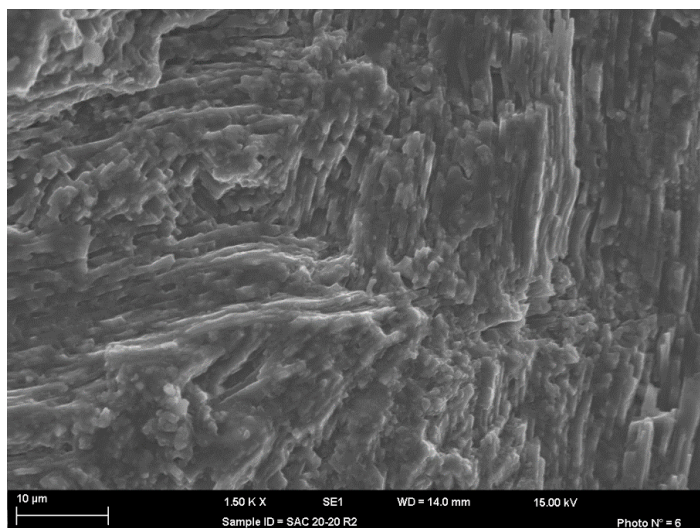
**Figura A 30.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-19-R1



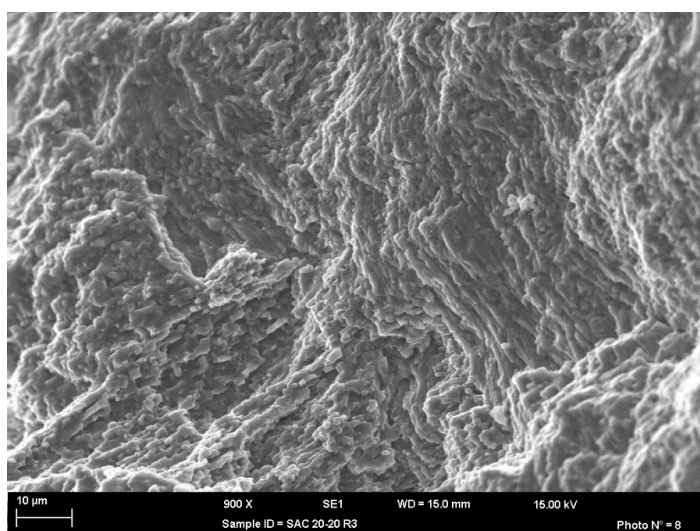
**Figura A 31.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-19-R2



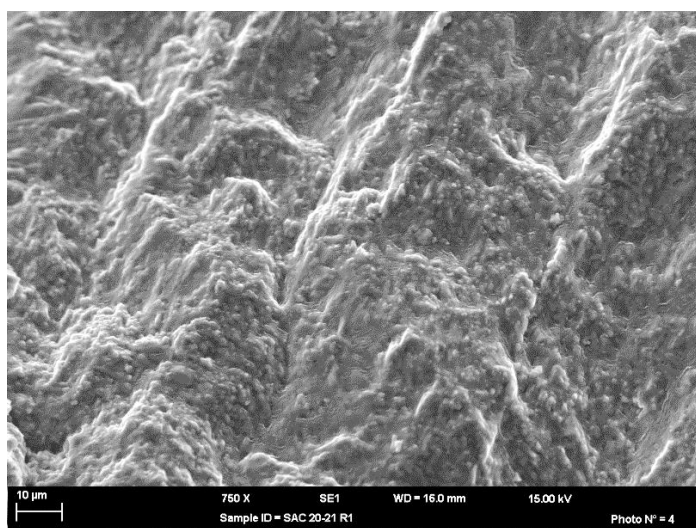
**Figura A 32.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-20-R1



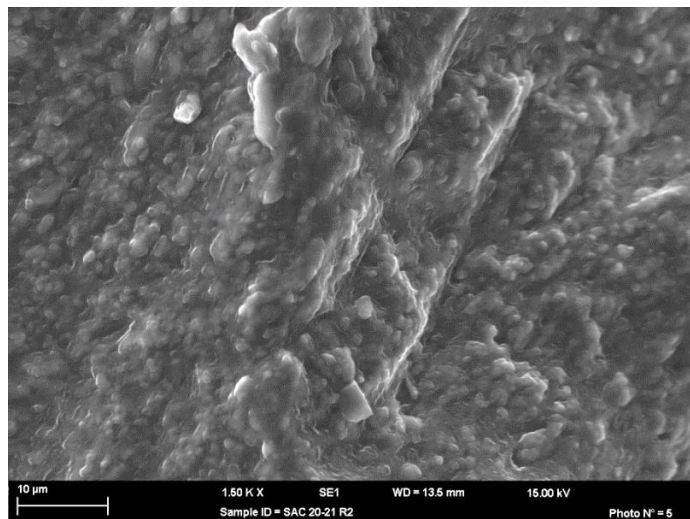
**Figura A 33.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-20-R2



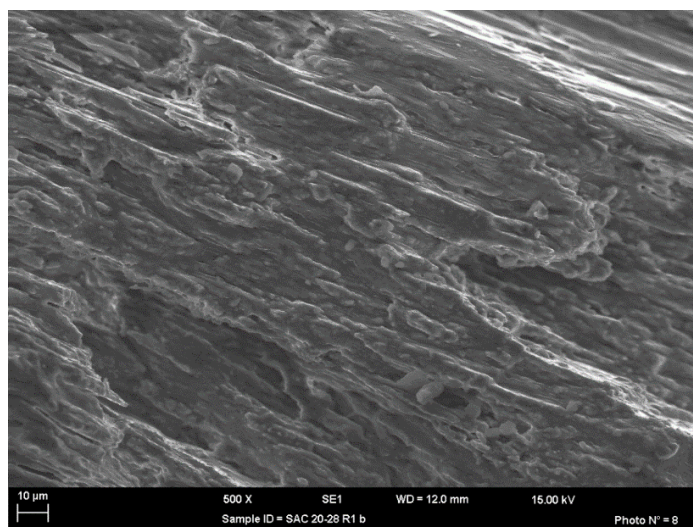
**Figura A 34.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-20-R3



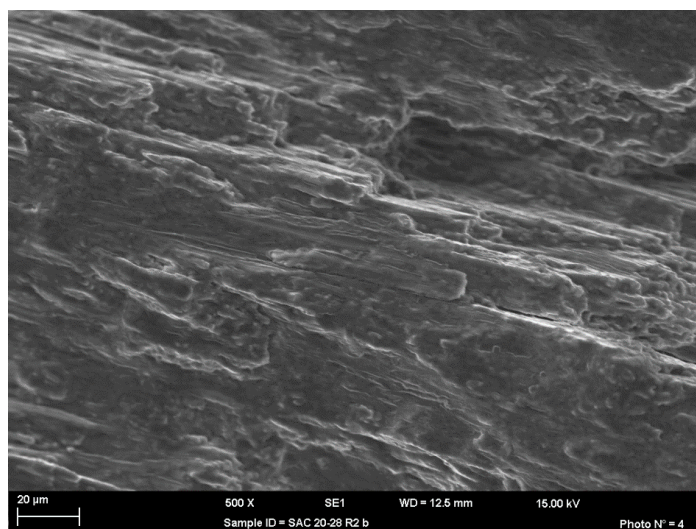
**Figura A 35.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-21-R1



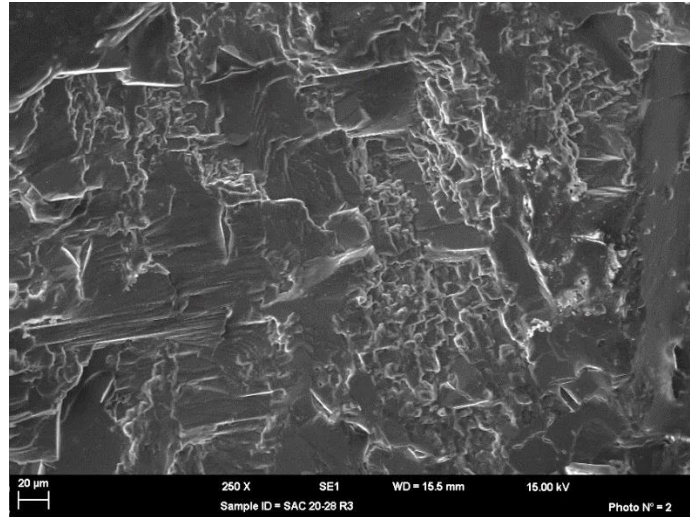
**Figura A 36.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-21-R2



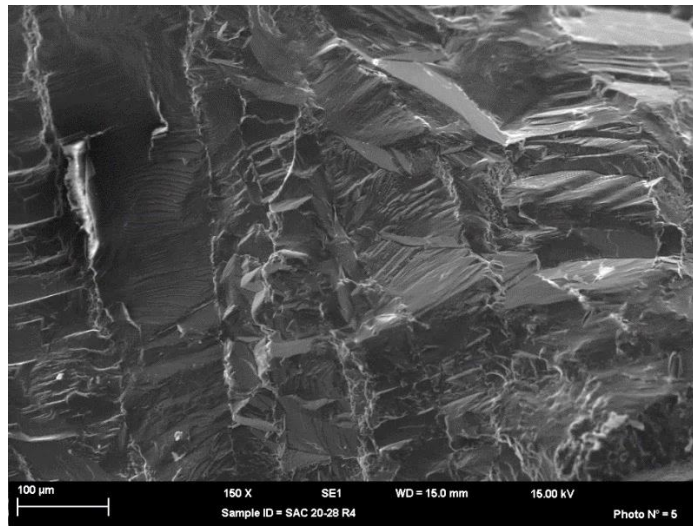
**Figura A 37.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-28-R1



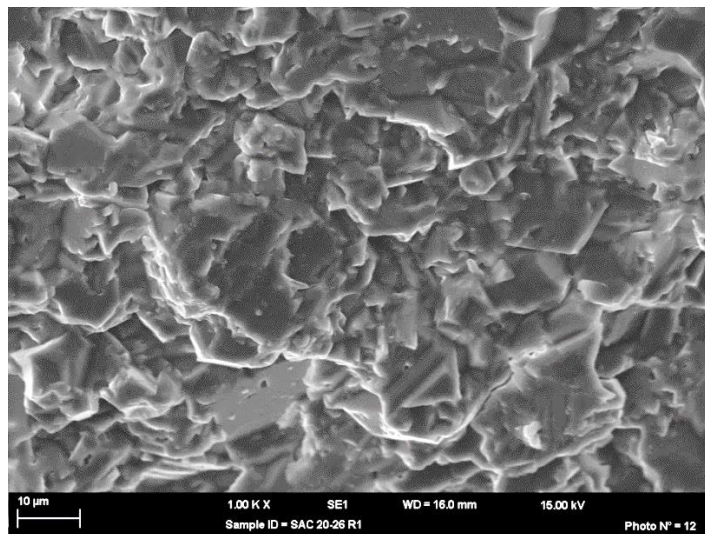
**Figura A 38.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-28-R2



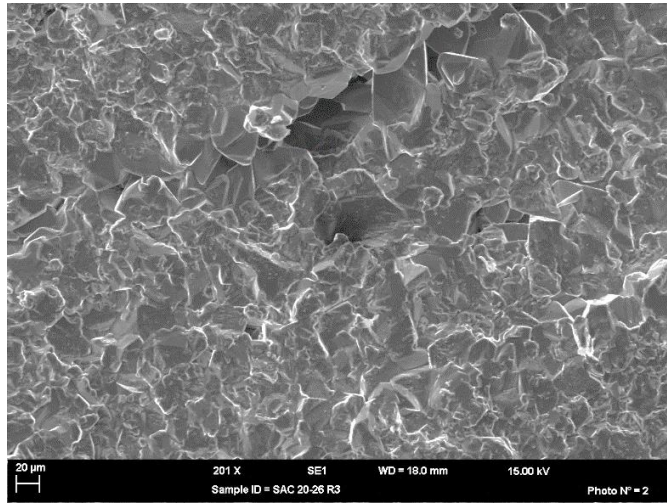
**Figura A 39.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-28-R3



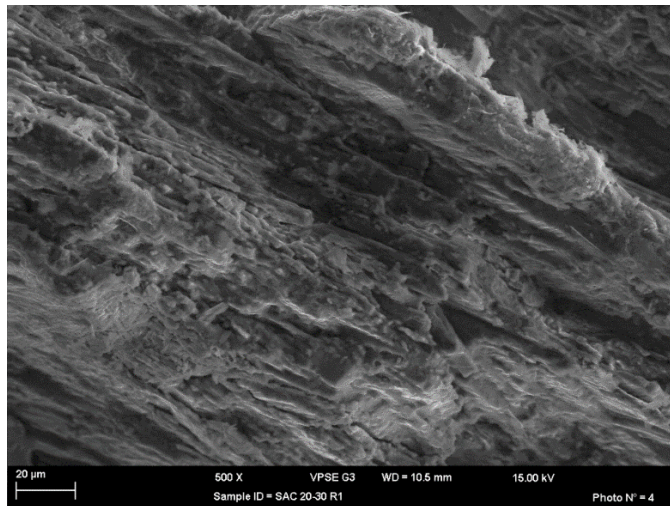
**Figura A 40.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-28-R4



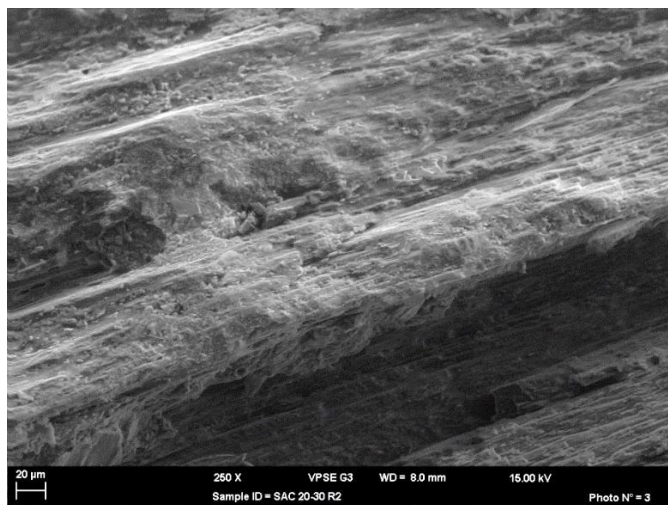
**Figura A 41.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-26-R1



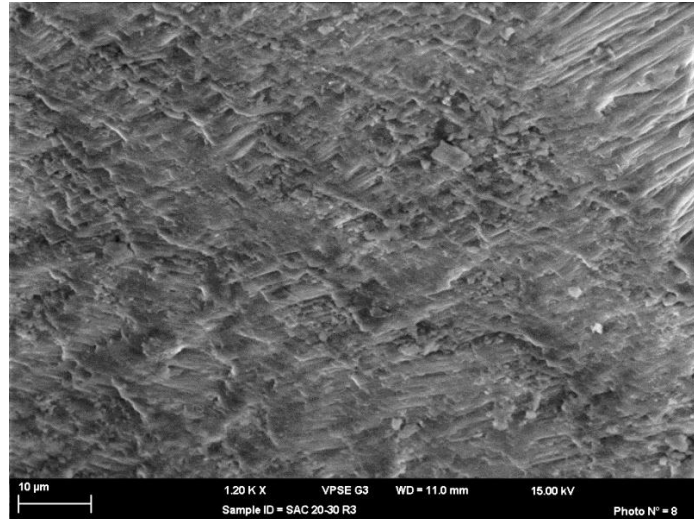
**Figura A 42.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-26-R3



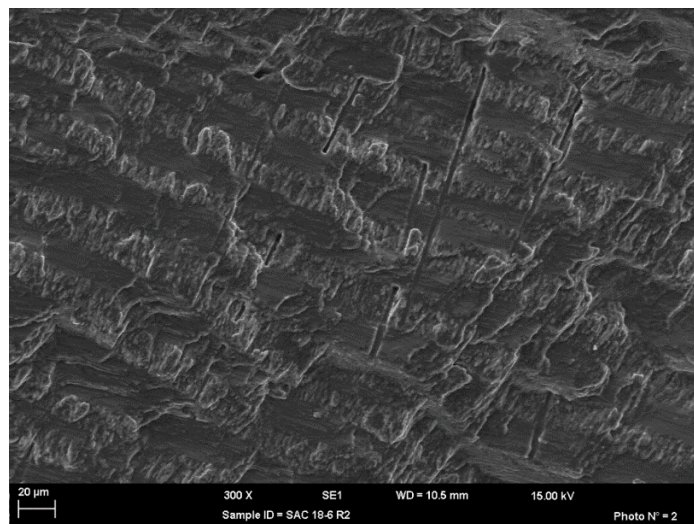
**Figura A 43.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-30-R1



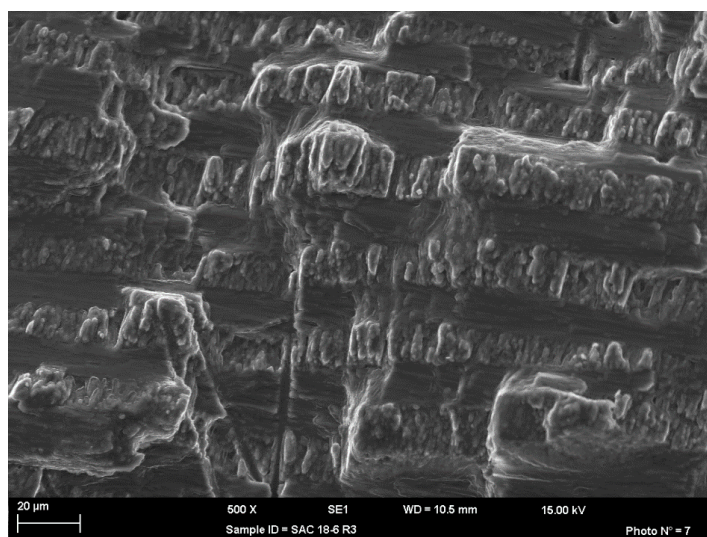
**Figura A 44.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-30-R2



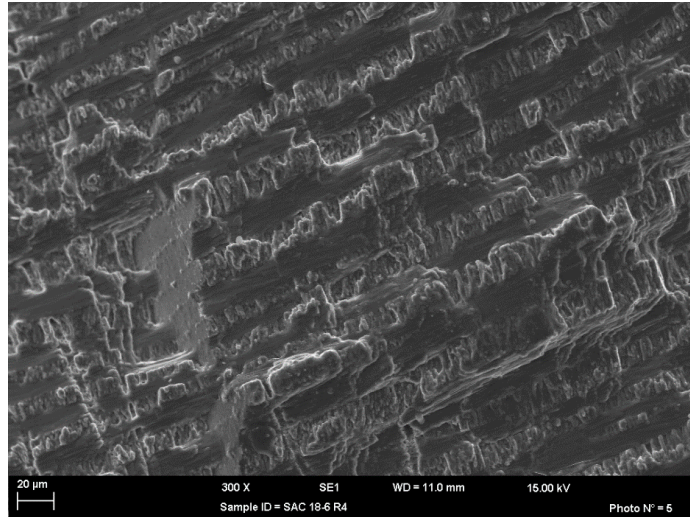
**Figura A 45.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 20-30-R3



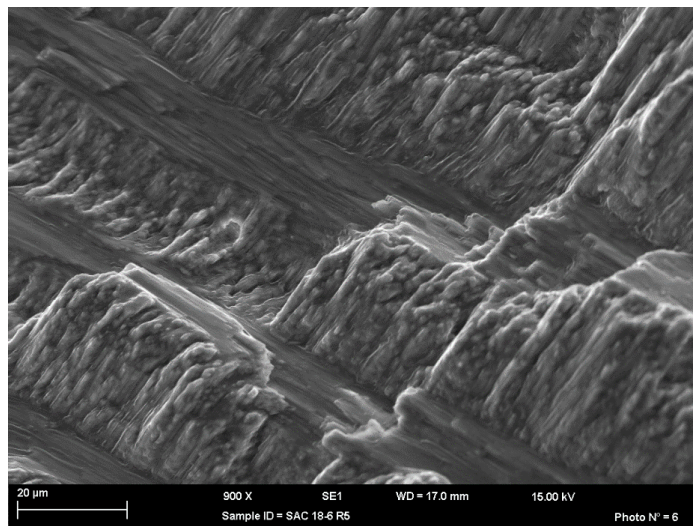
**Figura A 46.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R2



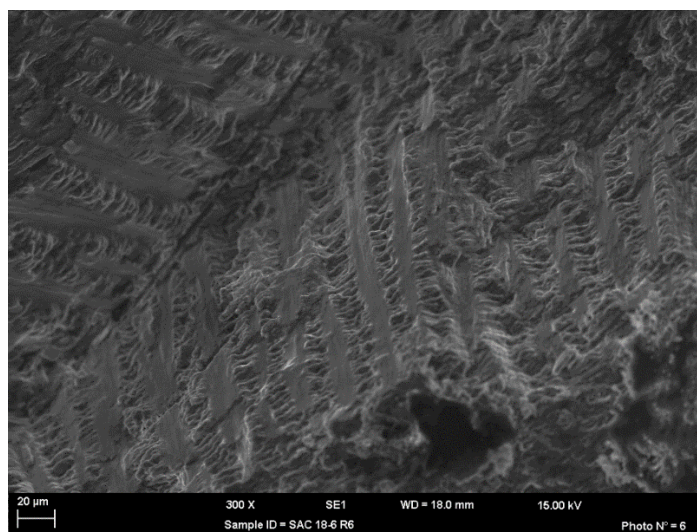
**Figura A 47.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R3



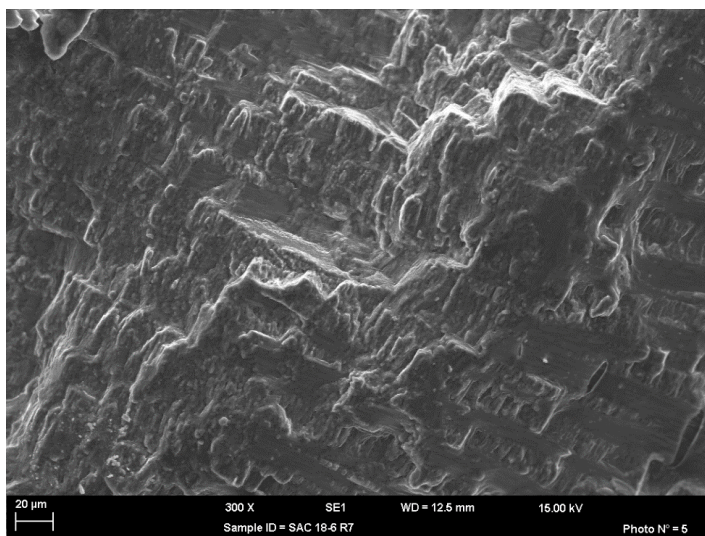
**Figura A 48.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R4



**Figura A 49.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R5



**Figura A 50.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R6



**Figura A 51.** Imagen obtenida con microscopio electrónico. Muestra SAC 18-6-R7



**Figura A 52.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 18-21-R1



**Figura A 53.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 18-21-R2



**Figura A 54.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 18-21-R3



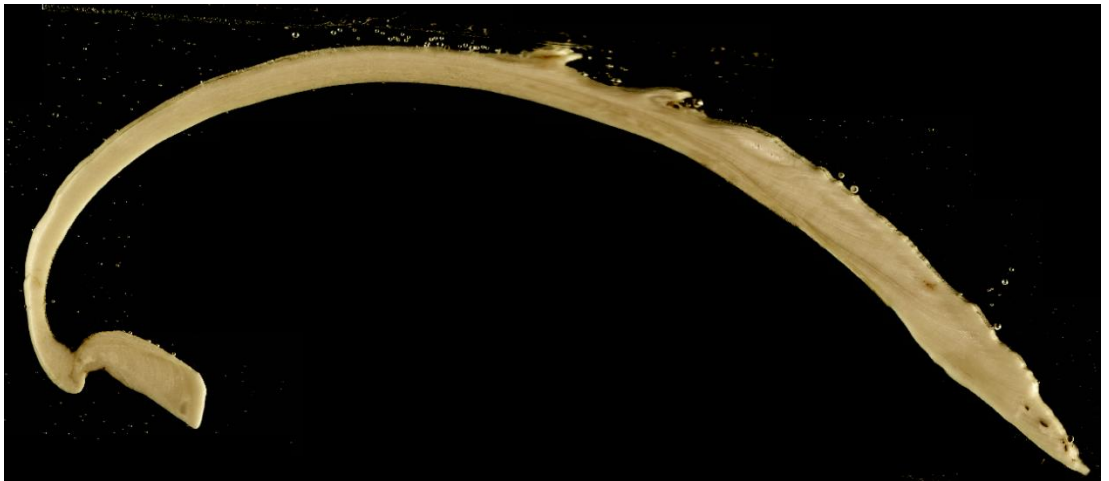
**Figura A 55.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 18-34-R1



**Figura A 56.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 20-1-1



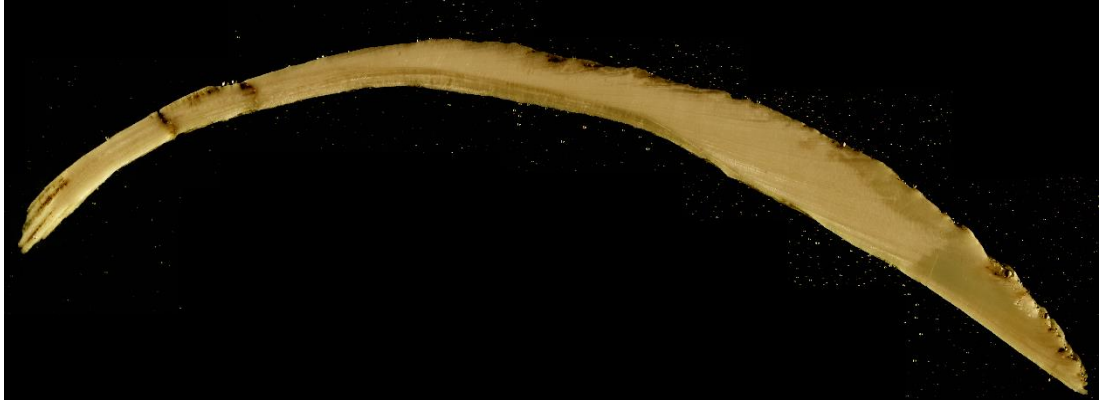
**Figura A 57.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 20-1-3b



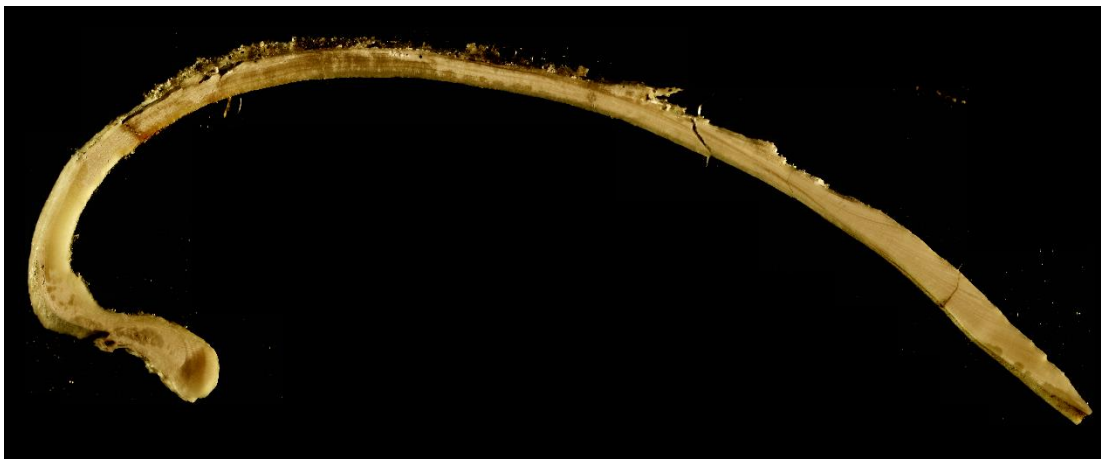
**Figura A 58.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 20-1-5



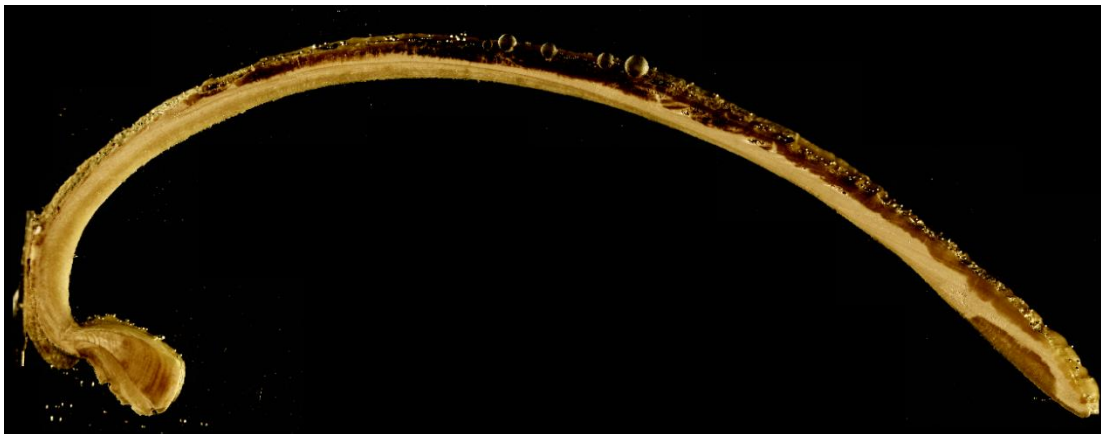
**Figura A 59.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 20-2-2



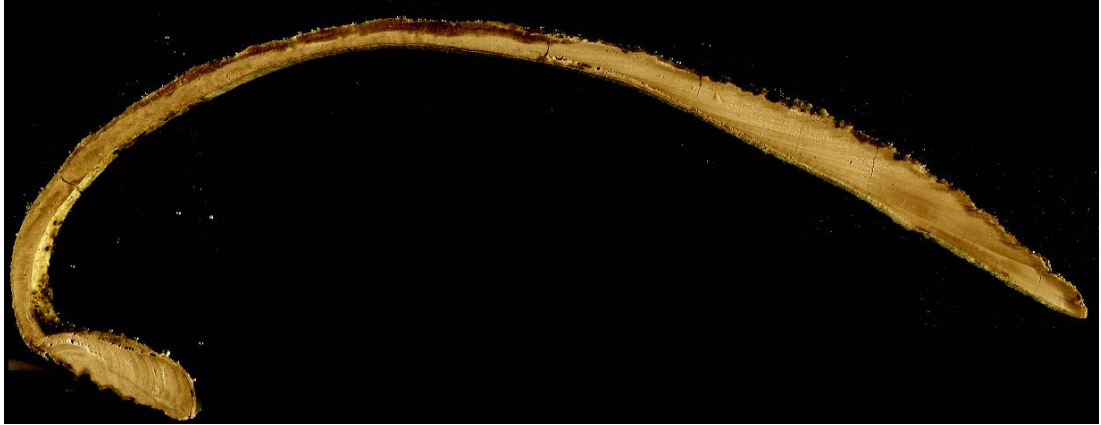
**Figura A 60.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*. SAC 20-2-3



**Figura A 61.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*. SAC 20-2-4



**Figura A 62.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*. SAC 20-7.8-1



**Figura A 63.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 20-7.8-2



**Figura A 64.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 20-7.8-3



**Figura A 65.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 20-7.8-4



**Figura A 66.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*. SAC 20-8-2



**Figura A 67.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*. SAC 20-8-3



**Figura A 68.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*. SAC 20-8-4

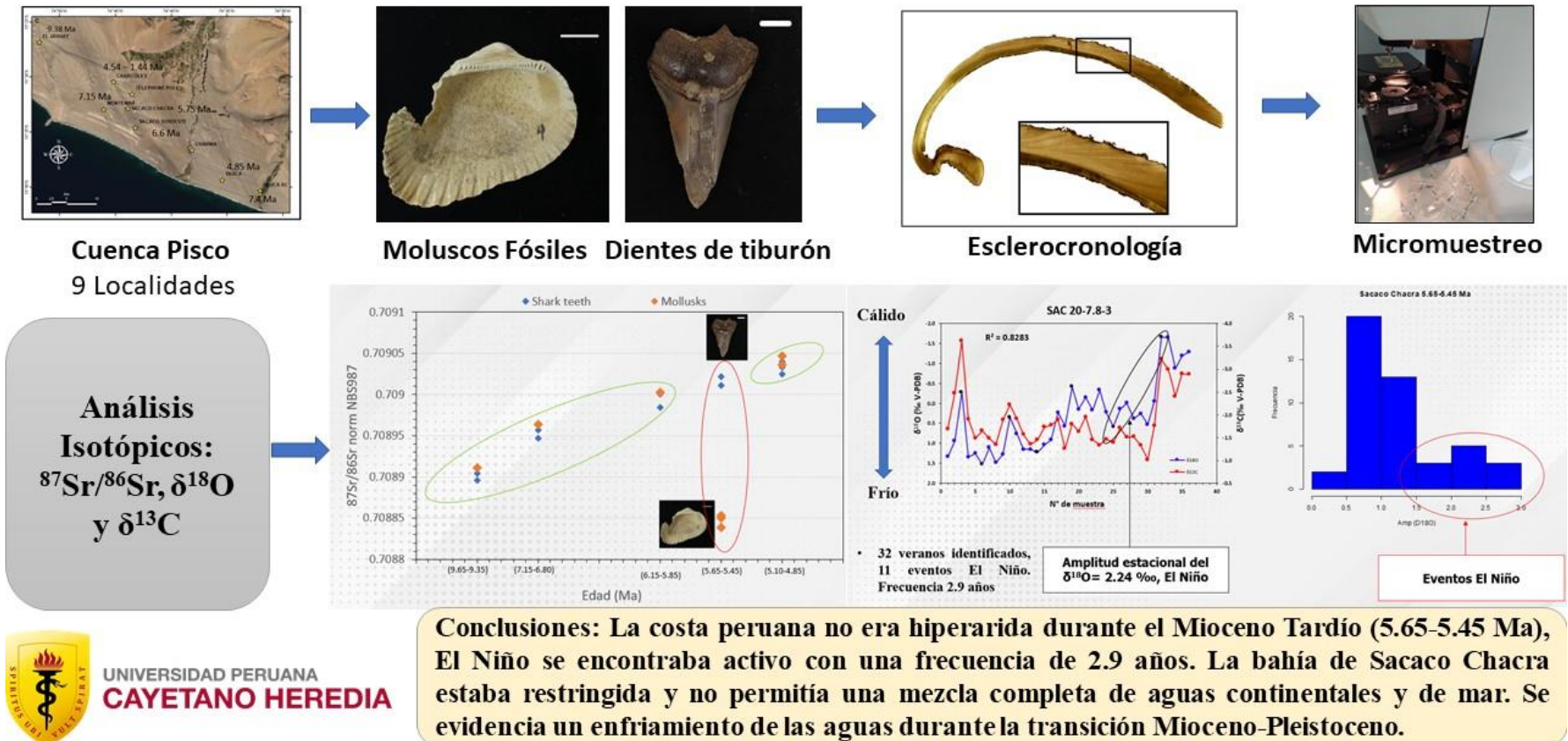


**Figura A 69.** Sección transversal de la concha fósil *Anadara chilensis*.SAC 20-8-5



**Figura A 70.** Sección transversal de la concha fósil *Glycymeris Ovata*.SAC 18-6-R1

# Evaluación de las condiciones paleoceanográficas desde el Mioceno Tardío hasta el Pleistoceno en la Cuenca Pisco, Perú



UNIVERSIDAD PERUANA  
**CAYETANO HEREDIA**

Figura A 71. Graphical abstract de la tesis