

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Análisis paleoambiental de la eutrofización mediante el
estudio de dinoquistes y parámetros geoquímicos en la bahía
de Paracas durante el Antropoceno**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

Yosel Andree Alvarado Fernandez

 [0000-0002-6848-8191](https://orcid.org/0000-0002-6848-8191)

Asesor

Mg. Rodrigo Alonso Uribe Ventura

 [0009-0003-9771-1094](https://orcid.org/0009-0003-9771-1094)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Alvarado Fernandez [1]
Referencia/Reference	[1] Y. Alvarado Fernandez, “ <i>Análisis paleoambiental de la eutrofización mediante el estudio de dinoquistes y parámetros geoquímicos en la bahía de paracas durante el Antropoceno</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Alvarado, 2024)
Referencia/Reference	Alvarado, Y. (2024). <i>Análisis paleoambiental de la eutrofización mediante el estudio de dinoquistes y parámetros geoquímicos en la bahía de paracas durante el Antropoceno</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

El presente trabajo de grado va dedicado a Dios y a mi familia, quienes estuvieron presentes en el caminar de mi vida, dándome fuerzas e inspiración para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer, y me ayudaron a culminar mi carrera profesional.

Agradecimientos

A Dios y a mis padres, quienes estuvieron presentes en el caminar de mi vida, dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer, y me ayudaron a culminar mi carrera profesional. A mi esposa Kelly, que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos.

Al Programa de incorporación de investigadores (Nº E038-2019-02-FONDECYT-BM) – proyecto UPCH “Sostenibilidad económica del ecosistema marino-costero frente a los riesgos climáticos” por el financiamiento en los trabajos de campo, los insumos de laboratorio y el alquiler de la campana extractora. Al Instituto del Mar del Perú por el apoyo en el submuestreo del núcleo sedimentario y el uso de la balanza digital. A la Universidad Peruana Cayetano Heredia por el uso del microscopio del Laboratorio de Ciencias del Mar para la identificación de dinoquistes.

Al Dr. Dimitri Gutiérrez Aguilar, director de la Maestría de Ciencias del Mar de la Universidad Peruana Cayetano Heredia por su apoyo en la extracción del núcleo sedimentario. También, por su tiempo, dedicación y paciencia en el análisis e interpretación de los datos, el desarrollo de la discusión y la revisión, corrección y asesoría constante en los últimos años, durante el desarrollo del manuscrito.

A la Dra. Tomasa del Carmen Cuéllar-Martínez incorporada al Instituto del Mar del Perú, a través del proyecto “Caracterización y pronóstico de eventos extremos en el mar peruano usando un sistema operacional de información oceánica” (FONDECYT-BM) quien contribuyó con el entrenamiento del tesista de investigación para el tratamiento biológico-palinoológico de los sedimentos, el uso del microscopio, la estufa y la balanza digital, la identificación microscópica de dinoquistes, la revisión, corrección y asesoría constante en los últimos años, durante la identificación y conteo de los dinoquistes y el desarrollo del manuscrito, al Mag. Rodrigo Uribe y el Mag. Manuel Ego Aguirre por su colaboración y la asesoría en el desarrollo del manuscrito.

Resumen

La bahía de Paracas, ubicada frente a Pisco, Perú, es un ecosistema marino de importancia por su alta concentración de nutrientes y la influencia del afloramiento costero peruano. Además, se encuentra parcialmente protegida, de modo que permite la conservación de un registro sedimentario. No obstante, la integridad de este ecosistema se ve amenazada por la contaminación, incluyendo los vertimientos de origen doméstico o industrial, así como residuos agrícolas transportados por el río Pisco que podrían ser causantes de la eutrofización.

Para comprender las interacciones entre la eutrofización, la variabilidad climática y su influencia en la composición de dinoquistes se llevó a cabo una reconstrucción paleoambiental de la abundancia y composición de dinoquistes. Se analizó un núcleo sedimentario extraído en la parte central de la bahía de Paracas y fechado con $^{238}\text{U}/^{210}\text{Pb}$, específicamente, su relación con la eutrofización y la variabilidad de las condiciones climáticas durante el Antropoceno. Se encontró que la eutrofización causa un mayor impacto en la abundancia y composición de dinoquistes y que estos responden tanto al cambio climático como a la polución generada por actividades antrópicas. Además, la construcción de obras de ingeniería como un emisario submarino puede disminuir el impacto de la eutrofización, más no, el incremento en la abundancia de dinoquistes heterótrofos. Esto evidencia cómo las variaciones ambientales y la intervención antrópica afectan la dinámica de los dinoquistes, destacando la importancia de un monitoreo para entender el impacto en los ecosistemas.

Palabras clave — dinoquiste, eutrofización, paleoambientes, Pisco.

Abstract

Paracas Bay, located off the coast of Pisco, Peru, is an important marine ecosystem due to its high concentration of nutrients and the influence of the Peruvian coastal upwelling. In addition, it is partially protected, allowing the conservation of a sedimentary record. However, the integrity of this ecosystem is threatened by pollution, including domestic or industrial waste, as well as agricultural waste transported by the Pisco River, which could cause eutrophication.

To understand the interactions between eutrophication, climate variability and their influence on dinocyst composition, a paleoenvironmental reconstruction of dinocyst abundance and composition was carried out. A sedimentary core extracted in the central part of Paracas Bay and dated by $^{238}\text{U}/^{210}\text{Pb}$ was analyzed, specifically, its relationship with eutrophication and the variability of climatic conditions during the Anthropocene. It was found that eutrophication is the process that causes a greater impact on the abundance and composition of dinocysts. And that these respond to both climate change and pollution generated by anthropogenic activities. Furthermore, the construction of engineering works such as an underwater outfall can reduce the impact of eutrophication, but not the increase in the abundance of heterotrophic dinocysts. This shows how environmental variations and anthropogenic intervention affect the dynamics of dinocysts, highlighting the importance of monitoring to understand the impacts on ecosystems.

Keywords — dinocyst, eutrophication, paleoenvironments, Pisco.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción.....	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	3
1.3 Objetivos del estudio.....	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Hipótesis.....	5
1.4.1 Hipótesis general.....	5
1.4.2 Hipótesis Específicas.....	5
1.5 Antecedentes investigativos.....	6
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	8
2.1 Marco Teórico.....	8
2.1.1 Antropoceno.....	8
2.1.2 Datación radiométrica con ^{210}Pb , ^{137}Cs y ^{241}Am	9
2.1.3 Bahía de Paracas.....	11
2.1.4 Influencia antrópica en la bahía de Paracas.....	15
2.1.5 Dinoflagelados y dinoquistes.....	18
2.1.6 Dinoquistes en el registro sedimentario.....	22
2.1.7 Floraciones algales nocivas y dinoflagelados.....	25

2.1.8	Floraciones algales en la bahía de Paracas	28
2.1.9	Indicadores geoquímicos.....	29
2.2	Marco conceptual	31
2.2.1	Dinoquistes	31
2.2.2	Eutrofización.....	32
2.2.3	Afloramiento costero.....	32
2.2.4	Floraciones algales.....	32
2.2.5	Remineralización de la materia orgánica	33
2.2.6	Mixotrofia	33
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		34
3.1	Investigaciones de campo	34
3.2	Investigaciones de laboratorio	37
3.2.1	Descripción sedimentológica del núcleo sedimentario.....	38
3.2.2	Submuestreo del núcleo sedimentario.....	39
3.2.3	Determinación de la actividad de los radioisótopos	40
3.2.4	Técnica palinológica.....	41
3.2.5	Análisis de proxys geoquímicos.....	44
3.2.6	Montaje en secciones delgadas.....	45
3.3	Investigaciones de gabinete	46
3.3.1	Análisis microscópico de las secciones delgadas.....	46
3.3.2	Cálculo de la densidad seca aparente.....	46
3.3.3	Geocronología basada en ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)	47
3.3.4	Dinoquistes	48

3.3.5 Tratamiento de datos de los dinoquistes	50
3.3.6 Análisis multivariado.....	50
3.4 Obtención de resultados	52
3.4.1 Densidad seca aparente.....	52
3.4.2 Geocronología.....	54
3.4.3 Dinoquistes	57
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	81
4.1 Presencia antrópica y natural y su influencia en la composición de los dinoquistes en el registro sedimentario.....	81
4.2 Influencia de los fenómenos naturales y las actividades antrópicas en la variabilidad de los dinoquistes en los sedimentos de la bahía de Paracas durante el Antropoceno.....	83
Conclusiones	94
Recomendaciones	95
Referencias bibliográficas.....	96
Anexos.....	115

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Distribución de especies que producen FAN entre los principales grupos filogenéticos del fitoplancton marino	27
Tabla 2: Coordenadas geográficas del núcleo sedimentario extraído. Datum WGS1984 y proyección UTM18S	36
Tabla 3: Densidad aparente seca en las submuestras del núcleo sedimentario ParP2 ...	53
Tabla 4: Resultados del modelo de edad CFCS (<i>constant flux, constant supply</i>) en el núcleo sedimentario	55
Tabla 5: Dinoquistes encontrados en el núcleo ParP2 clasificados por especie y género. Se indica el grupo trófico al que pertenecen las especies o géneros, de acuerdo con la literatura consultada	58
Tabla 6: Abundancia de dinoquistes en su totalidad y por especie del núcleo sedimentario (matriz reducida, ver 'Tratamiento de datos')	60
Tabla 7: Ocurrencia de especies de dinoquistes en las muestras del núcleo sedimentario ParP2. Los números corresponden al ranking de las especies por abundancia en el núcleo sedimentario	63
Tabla 8: Datos de proxys geoquímicos de muestras del núcleo ParP2	76
Tabla 9: Datos de proxys geoquímicos de muestras del núcleo ParP2	78
Tabla 10: Loadings de las variables predictoras	79
Tabla 11: Loadings de las variables predichas (especies de dinoquistes)	79
Tabla 12: Prueba ANOVA para la significancia del modelo RDA	80
Tabla 13: Prueba ANOVA para evaluación de la significancia de variables predictoras ..	80

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Esquema del decaimiento radioactivo del ^{238}U y sus productos, el transporte por vía atmosférica y la acumulación del exceso de ^{210}Pb (no soportado) en los sedimentos marinos, así como las explosiones y accidentes nucleares que son fuentes de ^{137}Cs	10
Figura 2: Distribución sedimentaria en la bahía de Paracas. Dat. WGS1984/UTM18S	13
Figura 3: Distribución del contenido de parámetros químicos en los sedimentos de la bahía de Paracas: a) materia orgánica (%), b) carbono orgánico (%). Datum WGS1984, proyección UTM18S	14
Figura 4: Desembarque de anchoveta en toneladas en Pisco. Datos obtenidos por parte del Instituto del Mar del Perú (IMARPE)	16
Figura 5: Diagrama de Hjulstrom. Relación del tamaño de los sedimentos con la velocidad de las corrientes en función a la granulometría	20
Figura 6: Diversidad de dinoquistes a través del Mesozoico y Cenozoico en comparación con la curva del nivel del mar	24
Figura 7: Frecuencia de FAN registradas en la bahía de Paracas (2008-2017) por especies de dinoflagelados	29
Figura 8: Recuperación del núcleo sedimentario (izquierda) y drenado (derecha)	35
Figura 9: Corte longitudinal del núcleo sedimentario (izquierda) y empaquetado de los núcleos para su conservación (derecha)	35
Figura 10: Mapa de ubicación de los sedimentos y el núcleo en la bahía de Paracas. Batimetría proporcionada por IMARPE. Datum WGS1984 y UTM18S	37
Figura 11: Descripción del núcleo ParP2 extraído en la bahía de Paracas	38
Figura 12: Submuestreo del núcleo sedimentario (izquierda) y submuestra de sedimento para el análisis de dinoquistes (derecha)	39
Figura 13: Pesaje del sedimento húmedo en balanza digital	39
Figura 14: Secado del sedimento en una estufa a 60°C	40

Figura 15: Pesado de sedimento seco para la técnica palinológica (izquierda) y adición del marcador <i>Lycopodium clavatum</i> (derecha)	42
Figura 16: Tamizado de las muestras de sedimento (izquierda) y centrifugado de muestras (derecha)	42
Figura 17: Adición de HCl al 10% a las muestras de sedimento	43
Figura 18: Adición de HF al 48% a las muestras de sedimento	43
Figura 19: Baño ultrasónico de las muestras de sedimento (izquierda) y tamizado final de las muestras de sedimento (derecha)	44
Figura 20: Transferencia de las muestras en tubos cónicos de 20 ml	44
Figura 21: Preparación de la estufa y el portaobjeto para el montaje de las láminas	45
Figura 22: Agitación de la muestra de sedimento con el vórtex	45
Figura 23: Perfiles verticales de los radioisótopos $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (izquierda), ^{137}Cs y ^{241}Am en función a la profundidad másica (derecha). Se señala la curva de ajuste del modelo CFCS para $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ basado en la profundidad másica (izquierda)	54
Figura 24: Modelo de edad CFCS versus profundidad del núcleo sedimentario	57
Figura 25: Fotografías de dinoquistes encontradas en el núcleo sedimentario ParP2, extraído en la bahía de Paracas, en microscopio de luz transmitida. a) <i>Echinidinium</i> spp., b) <i>Quinquecupis concreta</i> , c) <i>Spiniferites</i> sp., d) Quistes de <i>Polykrikos kofoidii</i> , e) <i>Polykrikos schwartzii</i> , f) <i>Spiniferites pachydermus</i> , g) <i>Spiniferites ramosus</i> ., h) <i>Spiniferites ramosus</i>	62
Figura 26: Perfiles de abundancia de los dinoquistes y de especies mayor al 4% en función a la profundidad a) Abundancia total, b) Heterótrofos c) Autótrofos, d) <i>Echinidinium</i> spp., e) <i>Quinquecupis concreta</i> , f) <i>Spiniferites</i> sp.1 g) quistes de <i>Polykrikos kofoidii</i> , h) quistes de <i>Polykrikos schwartzii</i> , i) DBD (densidad seca aparente)	65
Figura 27: Series de tiempo de la abundancia total de dinoquistes, abundancia total de dinoquistes autótrofos, abundancia total de dinoquistes heterótrofos, relación	

H/A, abundancia relativa de dinoquistes autótrofos y abundancia relativa de dinoquistes heterótrofos	66
Figura 28: Series de tiempo de la abundancia de especies de dinoquistes más importantes que se obtuvieron de la matriz reducida de especies del núcleo sedimentario: <i>Echinidinium</i> spp., <i>Quinquecuspis concreta</i> , <i>Spiniferites</i> sp. 1, quistes de <i>Polykrikos kofoidii</i> , quistes de <i>Polykrikos schwartzii</i> , <i>Impagidinium</i> spp. (abundancias absolutas: izquierda y abundancias relativas: derecha).	67
Figura 29: Variación de la riqueza y diversidad de las especies de dinoquistes en función al tiempo	69
Figura 30: Dendrograma resultante del análisis de conglomerados (modo R), de las especies de dinoquistes registradas en el núcleo sedimentario ParP2	70
Figura 31: Dendrograma resultante del análisis de conglomerados (modo Q), de las submuestras del núcleo sedimentario ParP2	70
Figura 32: Análisis NMDS entre los grupos Q1, Q2 y Q3	72
Figura 33: Perfiles de abundancia de dinoquistes y conglomerados formados en comparación con la radiografía del núcleo sedimentario ParP2 (grupo Q1: color azul, grupo Q2: color amarillo, Q3: color violeta)	73
Figura 34: Mapa de calor entre los grupos formados y las especies de dinoquistes	74
Figura 35: Análisis de redundancia entre dinoquistes y parámetros ambientales	77
Figura 36: Parámetros ambientales geoquímicos y antrópicos en el área de estudio	85
Figura 37: Variación de los parámetros ambientales del núcleo sedimentario ParP2	88
Figura 38: a) Temperaturas obtenidas con U_k^{37} del testigo B0406 recuperado frente a las costas de Pisco, la línea punteada es de polinomial de orden cúbico; la línea solida muestra la tendencia negativa desde 1950. b) Temperaturas promedio anuales, medidas en los muelles. Las líneas solidas describen la regresión lineal ajustada para Callao, Pisco, San Juan e Ilo. Tomado de Gutiérrez et al. (2011)	89

Introducción

Los efectos del calentamiento global y las consecuencias de las actividades antrópicas afectan los ecosistemas marino-costeros en diferentes partes del mundo, causando la pérdida de especies, algunas de importancia económica. Un ejemplo claro de cómo se manifiestan estas consecuencias es la eutrofización, que consiste en el aporte en exceso de nutrientes, principalmente compuestos por nitrógeno y fósforo, en un ecosistema acuático que conlleva al incremento en la concentración de materia orgánica de las aguas. La eutrofización puede ocurrir debido a los vertimientos contaminados de fábricas y otras fuentes hacia un cuerpo de agua. Cabe señalar que la eutrofización de origen natural o antrópico, antes y durante el Antropoceno, puede ser analizada con un núcleo sedimentario. Específicamente, al conocer la abundancia y composición de los microfósiles de dinoquistes en dicho núcleo, ya que pueden ser utilizados como indicadores de eutrofización. De este modo, se comprendería el comportamiento de los dinoquistes a nivel histórico y se conocería que especies son las que presentan una mayor variabilidad frente a los niveles de contaminación en los cuerpos de agua. En la actualidad, el conocer que especies de dinoquistes son indicadoras de eutrofización en la bahía de Paracas, antes y durante el Antropoceno, contribuiría con la identificación de episodios de contaminación natural o antrópica en la actualidad.

El desarrollo de este proyecto se plasmó en cuatro capítulos: En el primer capítulo se describieron las generalidades del proyecto, la descripción del problema de investigación, los objetivos y los antecedentes investigativos; también contiene la hipótesis general que consiste en que la abundancia y composición de los dinoquistes preservados en los sedimentos reflejan los cambios en la eutrofización y la variabilidad de las condiciones paleoclimáticas durante el Antropoceno. Por tanto, este análisis podría ser utilizado para plantear escenarios climáticos en la costa peruana, frente a los efectos del cambio climático actual y la eutrofización causada por la contaminación causada por los residuos derivados del desarrollo de actividades antrópicas.

El segundo capítulo comprende la descripción del marco teórico y conceptual, en el que se expusieron teorías y conceptos de forma detallada, entre los que se encuentran el Antropoceno y el método de datación radiométrica con ^{210}Pb . También se expusieron los conceptos de dinoflagelados, floraciones algales, que consisten en una proliferación de microorganismos entre los que podrían encontrarse los dinoflagelados y los dinoquistes, que son los microfósiles de los dinoflagelados. Estos son el principal objeto en este estudio, ya que pueden ser utilizados como indicadores de eutrofización. Para situar estos elementos en contexto se detalló sobre las condiciones ambientales en la bahía de Paracas, que forma parte del área de estudio.

El tercer capítulo abarca el desarrollo de trabajo de investigación, en este se encuentra incluida la metodología de investigación, que comprende la descripción del trabajo de campo, en el que se extrajo el núcleo sedimentario; el trabajo de laboratorio, que consistió en el tratamiento palinológico de los sedimentos para la obtención de microfósiles de dinoquistes; otros tratamientos para la obtención de parámetros geoquímicos y el trabajo de gabinete que consistió en la obtención de datos, el tratamiento de datos y los análisis estadísticos multivariados.

En el cuarto capítulo comprende el análisis y discusión de los resultados. Los principales puntos tratados consisten en la relación entre los factores abióticos y la composición de dinoquistes, como esta relación cambia con el tiempo y como responde ante los diferentes eventos climáticos, como El Niño, o ante la construcción de obras de ingeniería destinadas al tratamiento y el vertimiento de residuos de origen industrial para la preservación de la calidad de las aguas. A partir de esta discusión y en base a los resultados, se concluyó que existe una relación entre la abundancia y composición de algunas especies de dinoquistes con la eutrofización y que estas responden al cambio climático y la polución causada por las actividades antrópicas.

La investigación concluye que la abundancia y composición de ciertas especies de dinoquistes están relacionadas con la eutrofización, respondiendo tanto al cambio climático como a la polución generada por las actividades antrópicas. Este estudio evidencia como

las variaciones ambientales y la intervención antrópica afectan la dinámica de los dinoquistes en la bahía de Paracas, destacando la importancia de monitorear estos cambios para entender mejor el impacto sobre los ecosistemas marinos.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

Con la aparición del Homo Sapiens en Etiopía hace 195.000 años, durante el Pleistoceno (Monroy, 2013); la humanidad ha subsistido en el mundo a través de la caza, la pesca y la recolección de alimentos. No obstante, desde hace aproximadamente 12 000 años, el desarrollo de la agricultura transformó el modo de vida y la supervivencia humana (Latham, 2013). Desde entonces, predominó el sedentarismo y la formación de poblaciones, es desde aquí, que el hombre va dejando una huella en el mundo y con el tiempo estas huellas llegan a preservarse entre los sedimentos. En el Antropoceno, los microorganismos responden al efecto de las actividades antrópicas (Thibodeau et al., 2006, Heisler et al., 2008; Matsuoka, 1999 y Price et al., 2018). Uno de los principales microorganismos que responden a estos efectos son los dinoflagelados, que a diferencia de otros microorganismos y a nivel de especie, presentan una elevada sensibilidad a los cambios de temperatura, salinidad, productividad, concentración de materia orgánica, distancia a la costa, y contaminación por sustancias tóxicas (Penaud et al., 2018).

En general, los dinoflagelados son organismos microscópicos fitoplanctónicos que, como parte de su ciclo de vida, tienen la capacidad de enquistarse. Los quistes de resistencia, que serán llamados dinoquistes para efectos del proyecto de investigación, carecen de movilidad y presentan un comportamiento similar al de las partículas de limo, que se hunden en la columna de agua y se depositan entre los sedimentos del lecho marino (Dale, 1976; Lewis, 1988). La pared celular de los dinoquistes está compuesta por dinosporina, una molécula orgánica compleja, altamente resistente, que permite la preservación, e incluso la fosilización (Dale, 2001b; Frieling et al., 2022; Penaud et al., 2018). Cabe mencionar que, algunos fósiles datados registraron cientos de millones de años de antigüedad (Penaud et al., 2018).

La abundancia de los dinoquistes en la mayoría de los cuerpos de agua y sus diversas preferencias ecológicas, los hace útiles como indicadores en la reconstrucción de

paleoambientes (Likumahua et al., 2021). Esto ha permitido obtener información sobre los cambios en la temperatura, salinidad, concentración de nutrientes (nitrógeno, fósforo), productividad primaria (clorofila "a") de las masas de agua Dale, 1996; Zonneveld et al., 2013), el grado de contaminación industrial (Liu et al., 2012; Pospelova et al., 2002, 2005; Sætre et al., 1997), la eutrofización costera (Ismael et al., 2014) y reconstruir condiciones paleoclimáticas (De Vernal et al., 2001). Además, los dinoflagelados son los principales microorganismos que forman floraciones algales nocivas (FAN), que consisten en proliferaciones desmesuradas de microalgas planctónicas, generadas por condiciones anómalas de enriquecimiento de nutrientes, de origen natural o antrópico (Anderson, 2009), y condiciones estratificadas en la columna de agua. Las FAN ocasionan impactos negativos en peces e invertebrados por daño físico o por hipoxia, que es causada cuando la población de microalgas del cuerpo de agua pasa a fase de senescencia.

Las ocurrencias de FAN han sido reportadas frente a la costa peruana desde el siglo XX. En Pisco, Stiglich (1931) observó una coloración amarilla a pardo en el agua de mar y asoció la ocurrencia de este evento con el episodio de mortalidad de organismos marinos ocurrido en 1925. En 1928, Santander & Ochoa (1981) documentaron un evento que habría estado asociado a mortalidad de peces y aves guaneras. Ryther (1967) identificó parches de color rojizo que se extendieron en un área superficial de hasta 100 mn² frente a la costa, entre Cabo Blanco y Punta Aguja en Piura, asociados a la proliferación del ciliado *Cyclotrichium meunieri*. Asimismo, en 1986 la floración algal causada por el dinoflagelado *Prorocentrum micans* tuvo una duración aproximada de 30 días y se extendió en la Bahía de Miraflores, en la ciudad de Lima.

En el año 2000, una FAN asociada a la ocurrencia del dinoflagelado *Prorocentrum micans* en la bahía de Paracas, después de la senescencia, contribuyó al agotamiento del oxígeno disuelto que conllevó a un evento de mortalidad en el área (Cabello et al., 2002; López, 2008). Asimismo, en la bahía de Paracas entre 2003 y 2004, se ha reportado un predominio de los dinoflagelados como especies productoras de FAN comprendiendo un 64% de la abundancia total. La especie dominante y a la vez productora de FAN, fue

Prorocentrum micans, también se reportó la presencia de otras especies, entre las que se encuentran: *Akashiwo sanguinea*, *Ceratium dens*, *Ceratium furca*, *Ceratium fusus*, *Ceratium tripos*, *Gonyaulax polygramma*, *Prorocentrum gracile*, *Protoperidinium excentricum*, *Protoperidinium mendiolae*, *Protoperidinium minutum* y *Scrippsiella trochoidea*, algunas de las cuales, suelen formar FAN (López, 2008).

1.2 Descripción del problema de investigación

La ocurrencia de actividades antrópicas en las áreas marino costeras suelen ser un foco de contaminación, debido al tratamiento inadecuado de los residuos y vertimientos, tal como en las actividades agrícolas, en las que se da el vertimiento de aguas cargadas con fertilizantes hacia los cuerpos de agua. Estas actividades son causantes de la eutrofización por la carga de nutrientes, transportada por los efluentes, o la generada por la remineralización de la materia orgánica en las aguas de la bahía de Paracas. Estas condiciones promueven el incremento en la abundancia del fitoplancton y en algunos casos se da la ocurrencia de FAN, que pueden ser producidas por más de una especie tóxica o nociva (Anderson, 1989; Hallegraeff, 1993). La producción de FAN también se atribuye a otras causas, tal como el aumento de polución por el enriquecimiento de nutrientes (Smayda, 1997), el cambio climático y la descarga de agua de lastre de navíos (Anderson et al., 2012), lo que podría tener relación con el incremento en la frecuencia de las FAN a nivel global (Anderson et al., 2012).

Por otra parte, la ocurrencia de FAN puede generar efectos adversos en la salud humana, ya que existen especies capaces de producir toxinas, que pueden ser transferidas al ser humano a través del consumo de organismos marinos. Además, afecta a los ecosistemas marinos y la economía debido a la pérdida de recursos marinos cultivados y poblaciones silvestres por las condiciones hipóxicas que suelen generar en el interior de la bahía de Paracas.

Asimismo, existen estudios que respaldan la relación entre la eutrofización y los dinofitoplancton o las floraciones algales. Por ejemplo, Thibodeau et al. (2006) discutieron sobre los procesos de eutrofización y la hipoxia a causa de la degradación de la MO;

Heisler et al. (2008) trataron la relación entre eutrofización y floraciones algales nocivas y Matsuoka (1999) con Price et al. (2018) demostraron que se puede analizar la variación de las condiciones de eutrofización a través del tiempo, con el estudio de la abundancia y composición de los dinoquistes.

Aunque la bahía de Paracas destaca como una de las zonas con mayor incidencia de FAN a lo largo de la costa peruana, existe una brecha en el registro histórico de la ocurrencia de FAN, ya que solo se cuenta con información desde mayo de 1999, cuando el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) inició el Programa de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Laboratorio Costero de Pisco - IMARPE, frente a las indicaciones de enriquecimiento orgánico y deterioro de la salud ambiental en la bahía (Cabello et al., 2002; Velazco & Solís, 2000). Dada la carencia de información sobre ocurrencias de FAN, se utilizó información histórica de censos poblacionales (INEI, 2017), caudal del río Pisco (Nippon-Koei, 2012), volumen de descargas de recursos pesqueros (IMARPE, 2022), frecuencia de eventos del Niño (Peña, 2019), así como de la construcción de una planta de pretratamiento de residuos pesqueros y de un emisario submarino (Pitcher et al., 2021), que pueden ser utilizados como conductores de cambios en la eutrofización de la bahía de Paracas. Asimismo, por sus características topográficas, la bahía se encuentra expuesta a la variabilidad del afloramiento costero, asociado a los cambios en las condiciones climáticas.

En tal sentido, se plantea como pregunta principal de investigación, ¿Cómo se relacionan los cambios temporales en la abundancia y composición de dinoquistes con la eutrofización y la variabilidad de las condiciones climáticas en la bahía de Paracas?

Además, se presentan las siguientes preguntas específicas: ¿Cuáles son los principales factores físicos o químicos que influyen en la abundancia y composición de dinoquistes?, ¿se ha observado un incremento en la abundancia de dinoquistes en las últimas décadas? y ¿cómo afectaría a la abundancia de dinoquistes y las condiciones de eutrofización, la construcción de un emisario submarino?

Con el presente estudio se busca evaluar si la abundancia y composición de los dinoquistes preservados en los sedimentos están relacionados con la eutrofización en la bahía de Paracas. El registro temporal de dinoquistes preservados en los sedimentos de la bahía de Paracas reflejaría las variaciones temporales de la eutrofización en la columna de agua, permitiendo identificar especies indicadoras de este proceso, sea de origen natural o antrópico.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Caracterizar y reconstruir los cambios en la abundancia y composición de los dinoquistes en la bahía de Paracas en el último siglo y relacionarlos con la eutrofización, como indicador del impacto antrópico.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer la relación que existe entre la abundancia y composición de dinoquistes con abundancias de isótopos estables y parámetros fisicoquímicos.
- Realizar el conteo de dinoquistes en cada submuestra de un núcleo sedimentario extraído de la parte central de la bahía de Paracas, identificar las especies o asociaciones formadas y observar la variación en su abundancia y composición con el transcurrir del tiempo.
- Establecer la respuesta de dinoquistes y las condiciones de eutrofización en una escala temporal, ante la construcción del emisario submarino en la bahía de Paracas.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

En la bahía de Paracas, la abundancia y composición de los dinoquistes preservados en los sedimentos responden a los cambios en la eutrofización y la variabilidad de las condiciones climáticas en el Antropoceno.

1.4.2 Hipótesis Específicas

De la hipótesis general se desprenden las siguientes hipótesis específicas:

- Los dinoquistes son organismos con tolerancias muy sensibles a los cambios en el medio ambiente y la actividad antrópica, por lo que se podrían observar cambios en su abundancia y composición con el transcurrir del tiempo.
- A nivel global se ha observado un incremento en la ocurrencia de floraciones de algales nocivas (FAN), por ende, se espera encontrar una tendencia de aumento de la abundancia de dinoquistes en los sedimentos de la bahía de Paracas.
- Debido a la construcción del emisario que elimina la disposición directa de residuos y vertimientos en la bahía de Paracas, se espera encontrar una disminución en la abundancia de especies de dinoquistes indicadoras de condiciones de eutrofización en los últimos años.

1.5 Antecedentes investigativos

En el año 1962, el número de habitantes en las cercanías de la bahía de Paracas era menor a 40 000 (INEI, 2017) y la mayor parte de la población del lugar se dedicaba principalmente a la pesca y maricultura local (González, 2010). Durante los siguientes años ocurrió un incremento exponencial de la actividad antrópica en la bahía; esto empezó con la construcción de la primera fábrica de harina de pescado al norte de la bahía de Paracas, lo que llevó a una mayor intensidad en la actividad pesquera de anchoveta y la maricultura. Dado el incremento de la población en la provincia de Pisco, hubo otras actividades económicas que se desarrollaron, tal como la agricultura en el valle del río Pisco. Las actividades antrópicas suelen dejar residuos, en el caso de los habitantes de la provincia de Pisco, es el vertimiento de aguas residuales de origen doméstico. Por otra parte, en el caso de la fábrica de harina de pescado, es el vertimiento de efluentes de sanguaza con alta carga orgánica (González, 2010) y en el caso de la actividad agrícola, es el enriquecimiento de nutrientes en las aguas del río Pisco por el uso de los fertilizantes.

En otras partes del mundo, la influencia antrópica fue superlativa durante y después de la revolución industrial, o el aumento en la población a nivel global después de la Segunda Guerra Mundial (Steffen et al., 2007). Harland et al. (2019) indicaron que las actividades antrópicas tienen influencia en los procesos geológicos, por lo que se debería

reconocer su impacto en el ambiente a nivel global. Asimismo, Crutzen (2002) propuso la existencia de un nuevo periodo geológico, denominado “Antropoceno”, que comprende a los sedimentos recientes depositados en los últimos 70 años. Cabe señalar que, se han considerado muchas posibilidades para establecer el inicio del periodo, una de las propuestas más importantes se basa en los estudios desarrollados por Al-Rousan et al. (2004), Ford et al. (2014), Leorri et al. (2014), Wolfe et al. (2013) y Zalasiewicz et al. (2015).

Dado que el periodo de tiempo estudiado corresponde a los últimos 100 años, se estaría tratando con dos periodos: un periodo anterior al Antropoceno, en el que se observaría la variabilidad natural con actividades antrópicas incipientes y de muy bajo impacto; y otro correspondiente al Antropoceno, en el que la interacción del hombre con el medio produce un impacto constante sobre el mismo aumentando los problemas, principalmente por contaminación. El impacto de las actividades antrópicas en el transcurrir del tiempo se puede medir con los cambios en la abundancia y composición de los dinoquistes (Penaud et al., 2018), ya que, la mayor parte de las especies presentan una relación estrecha con una elevada carga orgánica de las aguas (Liu et al., 2012; Ruiz-Fernández & Hillaire-Marcel, 2009; Saetre et al., 1997; Shin et al., 2010).

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 *Antropoceno*

El término Antropoceno fue propuesto por Crutzen (2002), para describir la etapa actual en la que hay una influencia enorme de la humanidad en el planeta. Dado que el establecimiento de un periodo en el tiempo geológico requiere de una correlación estratigráfica en la cual basarse, se ha sugerido el inicio de la Revolución Industrial, como un tiempo representativo del mayor cambio en el sistema terrestre, ya que las señales estratigráficas correspondientes se extienden desde Europa hasta América del Norte. Inclusive comprende la industrialización de China e India, entre otros países, por lo que se tratarían de señales diacrónicas (Zalasiewicz et al., 2015). Snowball et al. (2014) afirmaron que uno de los marcadores podría consistir en la señal de minerales magnéticos asociados con la quema de carbono. Asimismo, desde 1950, se ha observado un aumento en los niveles de dióxido de carbono atmosférico a nivel global (Zalasiewicz et al., 2015). Crutzen (2002) sostiene que el Antropoceno empezó a finales del siglo XVIII con el aumento en las concentraciones de CO₂ de origen antrópico. No obstante, Trischler et al. (2017) indicaron que el inicio del Antropoceno se dio durante la década de 1950, ya que las curvas de numerosos parámetros ambientales cambiaron de una forma lineal a un crecimiento exponencial a escala global ante el uso intensivo de recursos naturales (petróleo, crudo, agua y fertilizantes artificiales), el aumento en la construcción de presas, la producción de vehículos, teléfonos y el incremento en los indicadores económicos. Es así que Finney & Edwards (2016) sostienen que el concepto de Antropoceno no deriva del registro estratigráfico y que la documentación y estudio del impacto de la humanidad en la Tierra se basa más en la observación directa que en el registro estratigráfico.

Hasta mediados del siglo XX, las actividades de origen antrópico en la bahía de Paracas eran incipientes, por lo que la variabilidad climática en ese entonces tendría únicamente causas naturales. Asimismo, Cardich et al. (2019) señalaron que durante ese

periodo hubo un incremento en la productividad, una disminución en la tendencia de la desnitrificación de la columna de agua y una relajación de las condiciones sedimentarias reductoras.

En la bahía de Paracas, las primeras actividades de origen antrópico fueron la pesquería a escala local y la maricultura (González, 2010). A diferencia de otras partes del mundo, en las que el desarrollo de la industria empezó en la década de 1940. En la bahía de Paracas, el desarrollo de la industria empezó en la década de 1960. En 1962, se edificó la primera planta de procesamiento de harina de pescado y con el pasar del tiempo se incrementó la producción y el número de fábricas. No obstante, para ese entonces no había un sistema de tratamiento de los efluentes, por lo que los residuos eran vertidos directamente a las aguas al norte de la bahía de Paracas; estos restos consistían en sanguaza, una mezcla de agua, sangre y restos orgánicos de pescado (González, 2010). En el periodo 1960-2010 se registró una tendencia de incremento de la productividad, pero con diferencias locales en las condiciones sedimentarias reductoras, mayor influencia de procesos de desnitrificación de la columna de agua (Cardich et al., 2019) y una mayor intensidad del afloramiento costero (Gutiérrez et al., 2011).

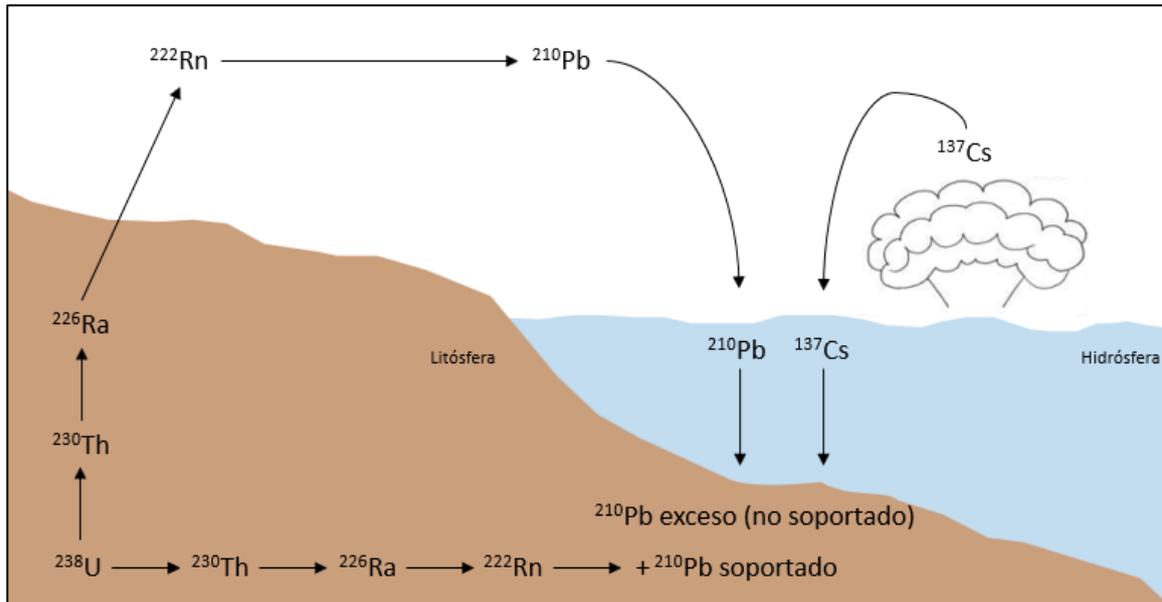
Cabe señalar que el Antropoceno es un concepto que aún se encuentra en discusión en el ámbito de las ciencias geológicas debido al periodo de tiempo y su cercanía en la actualidad. No obstante, es más aceptado en las ciencias biológicas.

2.1.2 Datación radiométrica con ^{210}Pb , ^{137}Cs y ^{241}Am

El radioisótopo ^{210}Pb se usa junto con ^{137}Cs y ^{241}Am para establecer un marco geocronológico en los sedimentos marinos recientes. El ^{210}Pb es un radioisótopo natural, a diferencia del ^{137}Cs y ^{241}Am , que son radioisótopos artificiales, ya que derivan de los procesos de fisión nuclear. El ^{137}Cs y ^{241}Am se utilizan como trazadores o marcadores de tiempo en el periodo: 1950 - actualidad (Bruel & Sabatier, 2020). Cabe señalar que, el período de semidesintegración del ^{210}Pb es de 22.3 años y se utiliza para obtener fechados hasta una antigüedad no mayor a 150 años (Ivanovich & Harmon, 1992).

Figura 1

Esquema del decaimiento radioactivo del ^{238}U y sus productos, el transporte por vía atmosférica y la acumulación del exceso de ^{210}Pb (no soportado) en los sedimentos marinos, así como las explosiones y accidentes nucleares que son fuentes de ^{137}Cs .



Fuente: modificado de (Bernal et al., 2010)

Dentro de la serie radioactiva del ^{238}U , se encuentra el ^{230}Th , que se desintegra y genera ^{226}Ra (periodo de desintegración = 1600 años), el cual se desintegra para generar el gas ^{222}Rn (periodo de desintegración = 3.83 días). Parte del gas ^{222}Rn generado en la parte externa de la litósfera se difunde en la atmósfera. Posteriormente, se desintegra en varios radioisótopos de vida media corta hasta generar el ^{210}Pb y se vuelve a depositar en la litósfera durante las precipitaciones (Bernal et al., 2010) (figura 1).

El método de datación de sedimentos con ^{210}Pb se basa en el cálculo de la actividad del ^{210}Pb atmosférico (considerado “en exceso”) que se encuentra presente en los sedimentos marinos y es diferente a la actividad del ^{210}Pb soportado, que se considera como una actividad base. El ^{210}Pb se forma durante el proceso de desintegración del ^{222}Rn que no llega a alcanzar la atmósfera y alcanza el equilibrio con el ^{226}Ra ; la actividad del ^{210}Pb depende de la mineralogía del substrato y se considera constante en una columna sedimentaria. Es así como, la incorporación de más ^{210}Pb atmosférico al sedimento provoca un exceso de este radioisótopo ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) (Bernal et al., 2010), el cual es medido y utilizado para la elaboración de un modelo de edad.

Para la elaboración de un modelo de edad se puede utilizar el método CFCS (*constant flux, constant supply*) (Appleby & Oldfield, 1978), que asume un flujo constante de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ y tasa de sedimentación de masa de sedimento seco constante. Esto se representa de la siguiente forma:

$$A_{m\text{TOT}} = A_{0(\text{exceso})} e^{\frac{-\lambda m}{r}} \quad (1)$$

En la Ecuación 1: $A_{m\text{TOT}}$ es la actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ en exceso (mBq g^{-1} en masa de sedimento seco), es decir $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$, $A_{0(\text{exceso})}$ es la actividad inicial de ^{210}Pb en exceso en la interfase agua/sedimento (mBq g^{-1} en masa de sedimento seco), m es la masa de sedimento seco, λ es la constante de desintegración radioactiva del ^{210}Pb ($0.03114 \text{ años}^{-1}$) y r es la tasa de acumulación de masa de sedimento seco ($\text{g cm}^{-2} \text{ años}^{-1}$).

2.1.3 Bahía de Paracas

La bahía de Paracas constituye una entrante del océano Pacífico, se ubica frente al litoral de la costa peruana, a la altura de la provincia de Pisco, departamento de Ica y forma parte de la cuenca sedimentaria Pisco, cuya geomorfología es el resultado de una serie de eventos tectónicos y estratigráficos, la acción de los agentes erosivos y los aportes de origen continental durante su historia geológica (Macharé et al., 1986). Los principales rasgos geomorfológicos de la cuenca Pisco son el talud continental, los altos estructurales y la plataforma continental. La unidad geomorfológica que comprende el área de estudio, en la bahía de Paracas, es la plataforma continental. Según Macharé et al. (1986), la configuración actual de la cuenca sedimentaria Pisco se alcanzó durante el Plio-Pleistoceno.

La bahía de Paracas presenta una configuración semicerrada y orientada hacia el norte, la longitud es de aproximadamente 5 km y la profundidad promedio es de 4 metros, aunque alcanza una profundidad máxima de 14 metros frente al puerto San Martín (Arellano et al., 2023). Limita por el oeste con la península de Paracas, elemento topográfico que causa una disminución en la intensidad de los vientos y un cambio en la dirección de los vientos hacia el continente. Aproximadamente 15 km al norte de la bahía

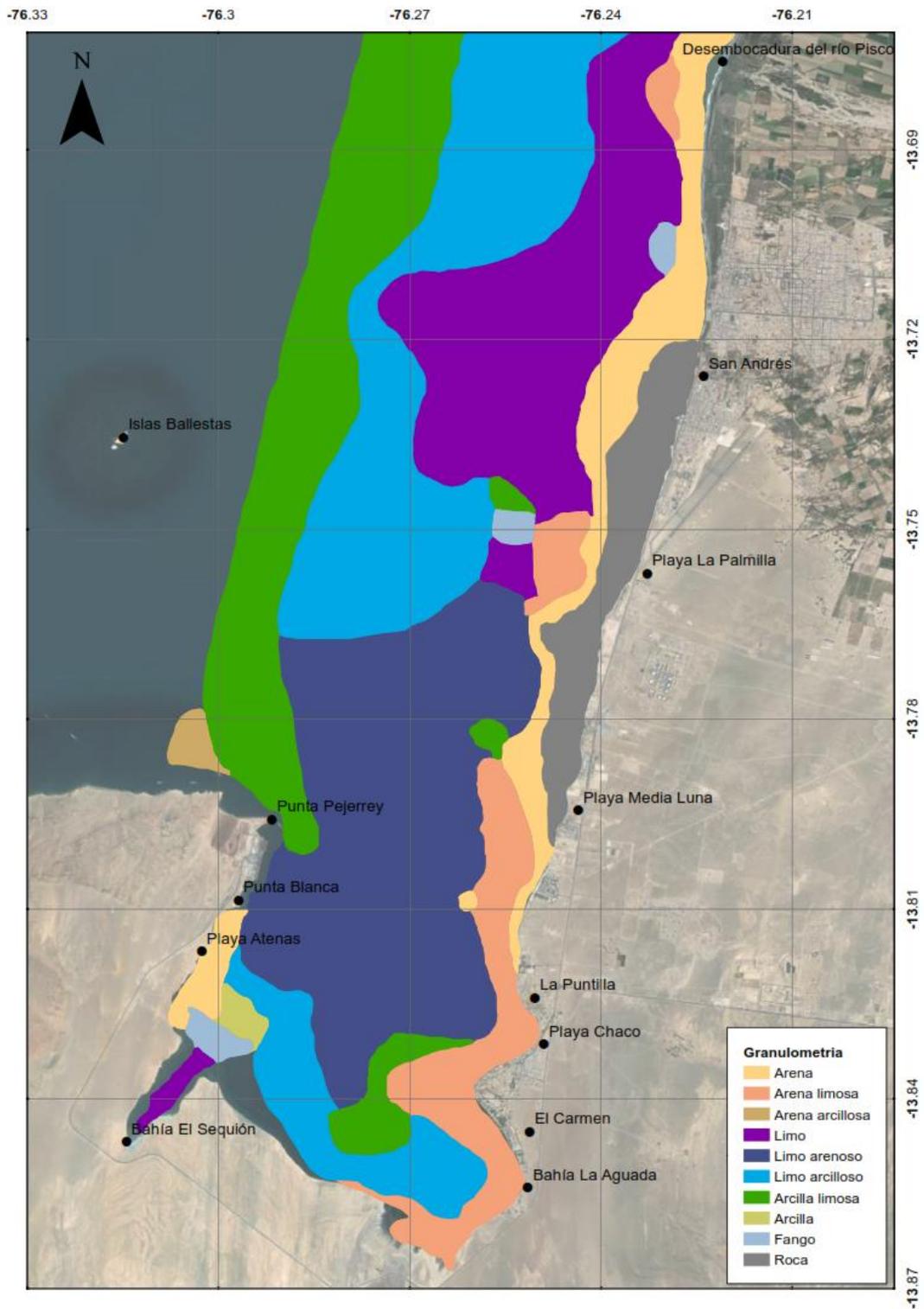
se encuentra la desembocadura del río Pisco, que suele presentar mayores descargas durante el verano austral (Arellano et al., 2023).

La bahía de Paracas se ubica aguas abajo de una de las principales celdas de afloramiento del Sistema de Afloramiento Peruano (Arellano et al., 2023; Pitcher et al., 2021; Strickland et al., 1969) y presenta dos regímenes de circulación asociado a la intensidad de los vientos. Durante los periodos de mayor intensidad de los vientos, principalmente en invierno y primavera, las aguas afloradas, ricas en nutrientes y pobres en oxígeno son transportadas por la Corriente Costera Peruana en sentido sur a norte y estas son impulsadas por los vientos en dirección paralela a la línea costera alcanzando velocidades de hasta 12.9 m s^{-1} que se presentan frente a la bahía Independencia (Quispe et al., 2010) y frente a la isla San Gallán (PNUMA y COMAN, 2007). Una parte del agua aflorada que llega a la bahía de Paracas ingresa por el oeste desde la península de Paracas y bajo condiciones promedio de vientos fuertes ($>10 \text{ m s}^{-1}$) forma una circulación en sentido antihorario en el interior de la bahía (Arellano et al., 2023; Flores et al., 2004), lo que influye en el enfriamiento de esta.

De acuerdo con Velazco & Solís (2000), en la parte interna de la bahía predominan los limos, mientras que hacia la costa la granulometría se hace más gruesa, pasando de limos y limos arenosos a arenas limosas, arenas, guijarros y cantos (figura 2).

Figura 2

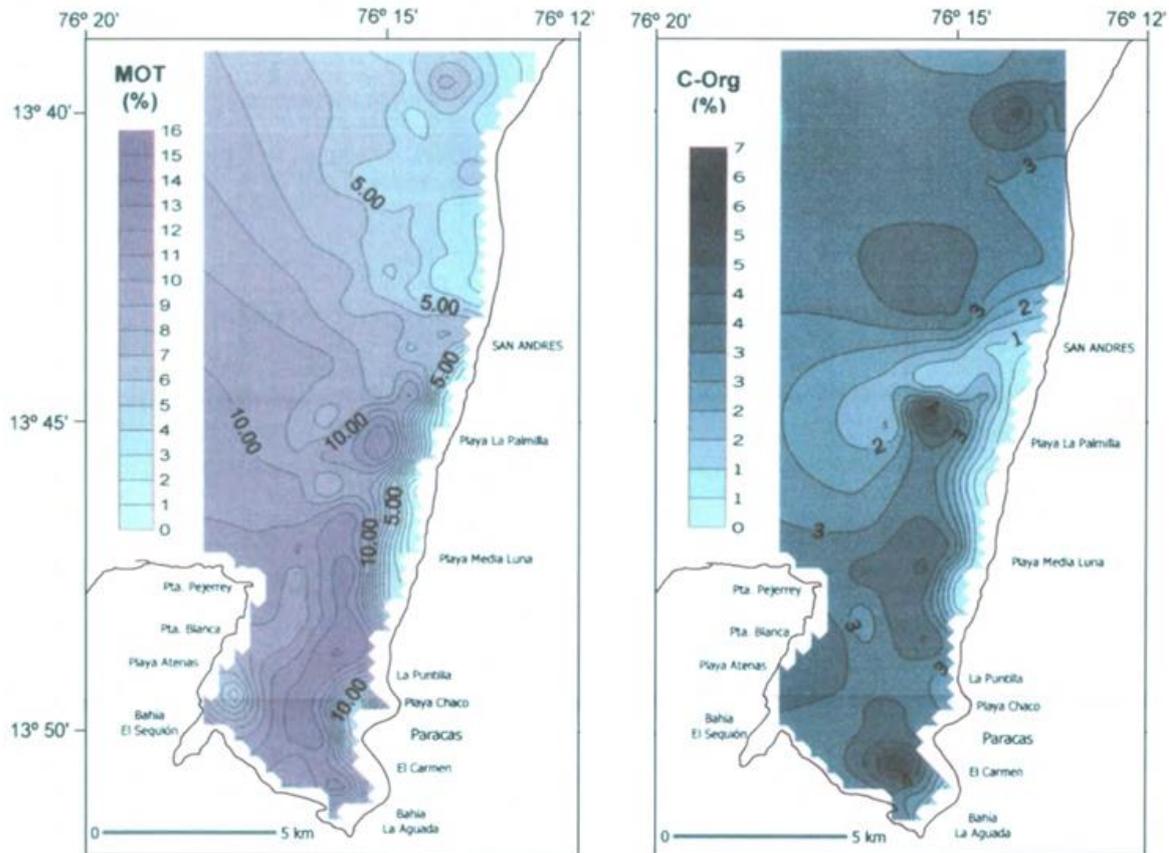
Distribución de sedimentos en la bahía de Paracas. Dat. WGS1984/UTM18S.



Fuente: modificado de (Velazco & Solís, 2000)

Figura 3

Distribución del contenido de parámetros químicos en los sedimentos de la bahía de Paracas: a) materia orgánica (%), b) carbono orgánico (%). Datum WGS1984, proyección UTM18S.



Fuente: modificado de (Velazco & Solís, 2000).

En cuanto a la materia orgánica, los valores más bajos se registraron frente a la zona litoral de Paracas y los valores más altos se registraron dentro de la bahía y hacia el norte de la desembocadura del río Pisco; los valores disminuyen cerca de la línea de costa y en el norte (Figura 3). El contenido del carbono orgánico presenta una distribución espacial semejante al contenido de materia orgánica; las mayores concentraciones se registraron dentro de la bahía y hacia el norte del río Pisco y los valores más bajos se registraron cerca de la línea de costa (Figura 3) (Velazco & Solís, 2000).

La bahía de Paracas es adyacente al sistema de afloramiento costero de Pisco-San Juan (Strickland et al., 1969), que aporta aguas poco oxigenadas y ricas en nutrientes a la bahía (Aguirre-Velarde et al., 2019; Merma, 2023). Los reportes de datos oceanográficos del área de Pisco, que comprenden la bahía de Paracas, mostraron que

las concentraciones de oxígeno pueden caer a valores menores a 1.0 ml L^{-1} (Aguirre-Velarde et al., 2019). Estas condiciones hipóxicas/anóxicas permitieron la preservación de los sedimentos al reducir la ocurrencia de especies causantes de bioturbación (Kemp & Baldauf, 1993).

La ocurrencia de eventos de hipoxia/anoxia observados en la bahía de Paracas pueden estar relacionados o amplificados por los procesos de degradación y remineralización de la materia orgánica (Aguirre-Velarde et al., 2019). Ahora bien, las condiciones deficientes de oxígeno disuelto en el fondo de la bahía de Paracas permiten la preservación de la materia orgánica. Por tanto, los sedimentos pueden ser usados para construir un registro de productividad, condiciones sedimentológicas, condiciones climáticas (Emery & Hülsemann, 1961), y como una guía en el muestreo para el análisis de dinoquistes.

2.1.4 Influencia antrópica en la bahía de Paracas

Durante la década pasada, los desembarques de peces en Pisco-Paracas fueron en promedio $33\,000 \text{ T año}^{-1}$, y la anchoveta peruana *Engraulis ringens* comprendió el 75% de la pesca. Además, las cosechas de mariscos alcanzaron 1569 T año^{-1} durante el mismo periodo, que incluyeron conchas de abanico, caracoles marinos, choros, cangrejos y macroalgas (Pitcher et al., 2021).

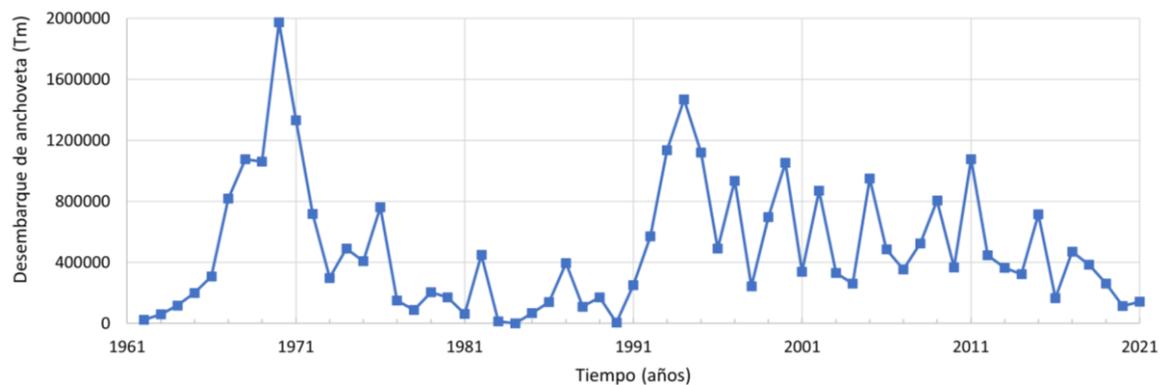
La influencia antrópica se ha incrementado de forma gradual en la bahía de Paracas. De acuerdo con los censos de la población, en el distrito de Paracas se ha registrado un incremento en la población que pasó de 727 habitantes en 1961, a 7147 habitantes en 2017 y en la provincia de Pisco se ha registrado un incremento en la población que pasó de 25 289 habitantes en 1940, a 150 744 habitantes en 2017 (INEI, 2018). El incremento de la población costera trajo consigo un aumento en el volumen de descarga de aguas residuales de origen doméstico (Jacinto, 2014). Por tanto, en el año 2000, se inició el tratamiento de las aguas domésticas de la ciudad de Pisco y el puerto de San Andrés. No obstante, Chira et al. (2011) indicaron que aún se arrojan residuos de

diversa naturaleza en el lecho del río Pisco y más recientemente, Pitcher et al. (2021) señalaron la ocurrencia de vertimientos domésticos en diferentes partes del río Pisco.

De acuerdo con Tilic (1962) la primera planta de harina de pescado fue construida a mediados de 1962 con una capacidad de 30 T hora⁻¹ de materia prima. Es así que, se asume la existencia de una relación entre los desembarques de anchoveta (figura 4) con la cantidad de anchoveta procesada en las plantas de harina de pescado y los residuos vertidos a la bahía de Paracas.

Figura 4

Desembarque de anchoveta en toneladas en Pisco. Datos obtenidos por parte del Instituto del Mar del Perú (IMARPE).



Fuente: elaboración propia.

En 2004, se registró la existencia de 130 naves pesqueras con base en Pisco y 7 fábricas relacionadas con actividades pesqueras, ubicadas en la misma área (Kahru et al., 2004). Las aguas residuales, principalmente los efluentes industriales de las fábricas de harina de pescado, con un tratamiento mínimo, eran vertidas directamente en la bahía y la costa adyacente a las fábricas, causando un incremento en la concentración de materia orgánica en los sedimentos superficiales cerca de las fábricas (Pitcher et al., 2021). Por tanto, es posible que este enriquecimiento orgánico haya tenido relación con los frecuentes eventos de floraciones algales nocivas (FAN) ocurridos en el área (Cabello et al., 2002; Fuentes et al., 2018), debido a los procesos de remineralización de los nutrientes de la materia orgánica. En el mismo año, se implementó un nuevo tratamiento para los vertimientos industriales y se construyó un emisario submarino, con una longitud de 13.77 km, utilizado para descargar los vertimientos industriales en la zona oceánica, fuera de la

bahía de Paracas, a una profundidad de 50 m (Pitcher et al., 2021). Esto redujo drásticamente el aporte de materia orgánica al ecosistema de la bahía de Paracas. Otra de las actividades que empezaron el mismo año fue el embarque de productos de gas en un muelle ubicado al norte de la bahía de Paracas (Pitcher et al., 2021).

Actualmente, una de las actividades económicas más importantes en la bahía de Paracas es el turismo, como ejemplo, la Reserva Nacional de Paracas recibió la visita de un millón de turistas en 2019. Otra de las actividades importantes son la pesca de anchoveta, la crianza de peces y la crianza de mariscos (Arellano et al., 2023). Los desembarques de anchoveta y la acuicultura de conchas de abanico en el puerto de Pisco, ubicado al norte de la bahía de Paracas, comprendieron el 10% de los desembarques totales en el Perú (Arellano et al., 2023).

La bahía de Paracas también se vio afectada por la descarga de efluentes mineros, vertidos en el río Pisco, que a lo largo de su cuenca recibe las descargas de los procesos mineros, haciéndose más significativo durante épocas de lluvia. Asimismo, el río también transporta residuos líquidos que son arrojados por pequeñas y medianas industrias, tal como la industria agroquímica, que fue señalada por la ANA (2013) durante un monitoreo participativo de la calidad de agua, indicando que, a 850 metros de la desembocadura del río Pisco, las aguas del río presentan valores anómalos elevados en la concentración de sodio, fosfatos, cloruros, aceites y grasas, coliformes termotolerantes y *Escherichia Coli*. Las concentraciones de nitrato, nitrito y silicatos en el río Pisco también son elevadas, alcanzando valores de 59 uM, 22.5 uM y 186 uM, valores por encima de los límites máximos permitidos, a causa del uso intenso de fertilizantes en la actividad agrícola (Pitcher et al., 2021).

El río Pisco tiene su origen en la confluencia de los ríos Chiris y Huaytará, específicamente en las lagunas de Pultoc, Aguacocha y Tacacocha, y recorre una distancia de 472 km a lo largo de la cuenca (ANA, 1999). Asimismo, es un elemento determinante en la bahía de Paracas debido al aporte del material terrígeno. En el periodo 1940-1950 se dio la explotación minera de plomo, plata, cobre y zinc a escala local, por parte de los

pobladores que habitaban las zonas cercanas a las lagunas mencionadas previamente. A inicios de la década de 1960, el Banco Minero del Perú financió la construcción de una planta concentradora de 20 hectáreas de extensión y en el periodo 1955-1958 se obtuvo la autorización para la puesta en funcionamiento de la planta concentradora de minerales polimetálicos (plomo, plata, cobre y zinc) con una capacidad de producción de 450 TMD. En el año 2020, esta planta incremento su capacidad instalada a 1440 TMD (Kolpa, 2021).

2.1.5 Dinoflagelados y dinoquistes

Los dinoflagelados son protistas microscópicos, unicelulares, biflagelados y presentan un diámetro que varía entre 20 y 80 μm , aunque hay excepciones, ya que algunas especies pueden alcanzar un diámetro de 130 μm (Van Nieuwenhove et al., 2020). Se encuentran clasificados dentro de la división *Dinoflagellata*, clase *Dinophyceae* (Fensome, 1993). Además, son componentes importantes del plancton marino y se encuentran entre los principales productores primarios, junto a las diatomeas y los cocolitofóridos. Aproximadamente, la mitad de las especies conocidas son autótrofas (Dale, 2001a). Aunque también pueden ser heterótrofos o mixótrofos (Jacobson & Anderson, 1996; Jeong et al., 2010; Schnepf & Elbrächter, 1992). En términos generales, los dinoflagelados autótrofos forman parte del grupo taxonómico *Gonyaulacales*, mientras que los heterótrofos y mixótrofos se incluyen en el grupo taxonómico *Peridinales* (Fensome, 1993).

La proporción H/A es la relación entre dinoflagelados heterótrofos y autótrofos. Se utiliza como un indicador del enriquecimiento orgánico en las aguas superficiales (Egger et al., 2018). Esta proporción es muy utilizada en los cuerpos de agua donde suelen ocurrir procesos de eutrofización (Pospelova & Kim, 2010). En contraste con esta proporción, se tiene a la proporción P/G (Versteegh, 1994), que consiste en la relación entre *Peridinales* y *Gonyaulacales*, es semejante a la proporción H/A, pero no incluye familias heterótrofas como *Polykrikaceae* y *Diplopsalidaceae*.

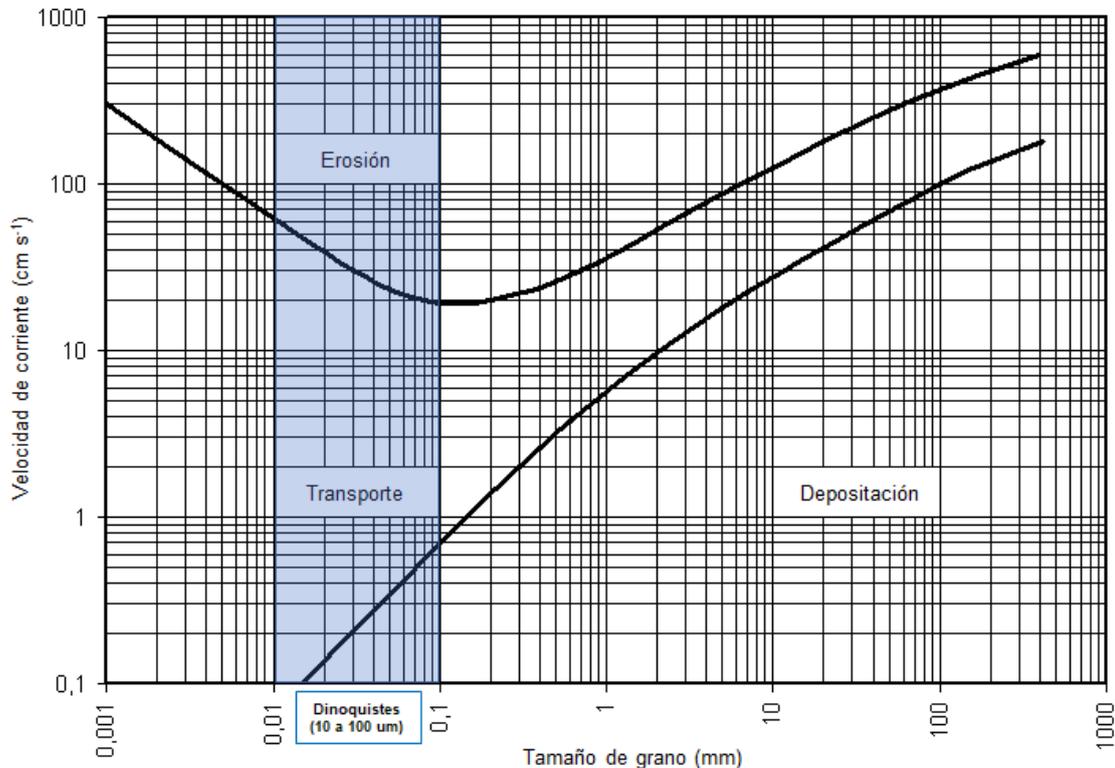
La abundancia de dinoflagelados varía con el tiempo, y cuando las condiciones son favorables para la reproducción, esta aumenta considerablemente al punto que pueden

formar floraciones algales. Además, ciertas especies de dinoflagelados pueden llegar a proliferar de forma excesiva, provocando efectos adversos en los ecosistemas, la salud humana y la economía (Anderson, 2009). Es frecuente que en algunos casos ocurran cambios en el color del agua (Anderson, 2009).

Durante su ciclo de vida, algunas especies de dinoflagelados presentan un mecanismo de supervivencia conocido como enquistamiento, proceso asociado a la reproducción sexual y se manifiesta ante condiciones no favorables para la supervivencia de estos organismos (Bravo & Figueroa, 2014). Después del enquistamiento, los dinoflagelados tienen la capacidad de germinar al completar un periodo de dormancia cuya duración es variable. De las 2294 especies de dinoflagelados marinos descritas, aproximadamente el 13-16% producen quistes de resistencia (Penaud et al., 2018). Los quistes de resistencia consisten en células no móviles, con un comportamiento hidrológico semejante al limo ya que carecen de movilidad, se hunden en la columna de agua y se depositan entre los sedimentos del lecho marino (Dale, 1983; Lewis, 1988; Nehring, 1993). Los quistes también sirven como inóculo para el inicio y recurrencia de floraciones algales (Ustup et al., 2012).

Figura 5

Diagrama de Hjulstrom. Relación del tamaño de los sedimentos con la velocidad de las corrientes en función a la granulometría.



Fuente: elaboración propia.

El estado previo al enquistamiento es un estado de vida libre o fase vegetativa, en el que los dinoflagelados presentan un metabolismo activo. La existencia de dos etapas en el ciclo de vida de los dinoflagelados causó la elaboración de dos sistemas de clasificación: en el caso de la fase vegetativa, las especies de dinoflagelados reciben un nombre biológico y las especies de dinoquistes reciben un nombre paleontológico (Penaud et al., 2018). La versión más reciente del Código Internacional de la Nomenclatura (ICN) para algas, hongos y plantas estipula que se admiten estos nombres separados para los dinoflagelados en fase vegetativa y como dinoquistes (Penaud et al., 2018). En el desarrollo de este proyecto se usa como guía a la taxonomía paleontológica.

El diámetro de los dinoquistes varía entre 10 a 100 μm , mientras que el diámetro del limo varía entre 2 a 50 μm . No obstante, la densidad de los dinoquistes es menor con un valor aproximado de 1.14 g cm^{-3} (Bravo & Figueroa, 2014), a diferencia del limo que alcanza valores entre 1.80 a 2.20 g cm^{-3} . Arellano et al. (2023) indicaron que en condiciones

promedio la velocidad de las corrientes en las aguas de fondo son de aproximadamente 1.0 cm s^{-1} , no obstante, existen zonas en las que las velocidades de las corrientes son menores a 0.5 cm s^{-1} . El comportamiento de los dinoquistes se puede evaluar con el uso del diagrama de Hjulstrom (Hjulstrom, 1935) que muestra la relación entre el tamaño de las partículas de sedimento y la velocidad de las corrientes requerida para la resuspensión de los dinoquistes (figura 5).

De esta forma, se puede observar que se requerirían corrientes muy superiores a las estimadas por Arellano et al. (2023) para que se dé la resuspensión de los dinoquistes, incluso durante los regímenes de vientos favorables al afloramiento en los que las velocidades de las corrientes submarinas varían de 2 a 3 cm s^{-1} . De acuerdo con el diagrama de Hjulstrom, se puede observar que se requiere una velocidad de corriente submarina que varíe entre 20 y 60 cm s^{-1} para erosionar los depósitos y causar la resuspensión de dinoquistes.

Hay diversos mecanismos relacionados con la formación de dinoquistes: (1) sobrevivencia durante las condiciones no favorables, que se vinculan con la tolerancia a la temperatura y la concentración de nutrientes (Bravo & Figueroa, 2014), (2) estrategia de protección durante la oscuridad y la anoxia, (3) evitar el pastoreo del zooplancton y (4) defensa contra los parásitos (Bravo & Figueroa, 2014). Cuando el dinoflagelado se enquistado, experimenta un periodo de dormancia, el cual se define como un periodo del ciclo de vida del organismo donde el crecimiento, desarrollo y la actividad física se suspenden de forma temporal, de modo que, cuando las condiciones ambientales vuelven a ser favorables estos germinan y pasan a una fase vegetativa (Anderson, 1980; Dale, 2001b).

La pared celular de los dinoquistes en la mayoría de las especies se compone de una molécula orgánica compleja, llamada dinosporina, que permite la preservación de los dinoquistes, al punto que tienen el potencial de fosilizar (Dale, 2001b; Frieling et al., 2022; Penaud et al., 2018). Esta característica, junto con la distribución y abundancia en la mayor parte de los cuerpos de agua, permite el uso de dinoquistes como indicadores ambientales.

Cabe señalar que, algunas especies pueden generar dinoquistes con paredes de calcita o sílice, estos últimos casos se conocen a partir del registro fosilífero (Dale, 2001b).

La exposición de los sedimentos del lecho marino a ambientes óxicos resulta en la pérdida de dinoquistes por degradación, mientras que su exposición a ambientes subóxicos o anóxicos no los afectan significativamente (Gray et al., 2017). Cuando la concentración de oxígeno se incrementa en el lecho marino no todos los dinoquistes se degradan de la misma forma, existe una degradación selectiva, la cual fue analizada por Gray et al. (2017), quienes señalaron que las especies *Trinovantedinium applanatum* y *Stelladinium robustum* son las más resistentes, después, las especies *Bitectatodinium spongium*, *Brigantedinium* spp., *Echinidinium* spp, *Echinidinium aculeatum* y *Gymnodinium trapeziforme* muestran una vulnerabilidad intermedia y por último, las especies *Echinidinium transparentum/zonneveldiae* y *Selenopemphix* quanta presentan una vulnerabilidad alta ante la oxidación.

Fensome et al. (1996) señalaron que durante el Triásico muchos grupos de fósiles con paredes orgánicas, relacionados con los dinoquistes, aparecieron y se diversificaron, específicamente desde el Ladiniano, durante el Triásico Medio, hace aproximadamente 240 Ma. MacRae et al. (1996) lo relacionó el incremento del nivel del mar a nivel global, debido al incremento en el número de plataformas someras. (Penaud et al., 2018).

La proporción H/A muestra la relación entre dinoflagelados heterótrofos y autótrofos y se utiliza como un indicador del enriquecimiento orgánico en las aguas superficiales (Egger et al., 2018). Este cociente es muy utilizado en los sistemas estuarinos donde suelen ocurrir procesos de eutrofización de las aguas (Pospelova & Kim, 2010).

2.1.6 Dinoquistes en el registro sedimentario

El estudio de los sedimentos anóxicos aporta datos de importancia ya que registran los diferentes eventos que ocurren en el océano con el transcurrir del tiempo, los cuales se pueden interpretar a partir de la medición o cuantificación de sustancias o elementos, entre los que se encuentran los dinoquistes. Al ser abundantes a profundidades someras y en regiones oceánicas con menor energía de corrientes oceánicas, los dinoquistes pueden

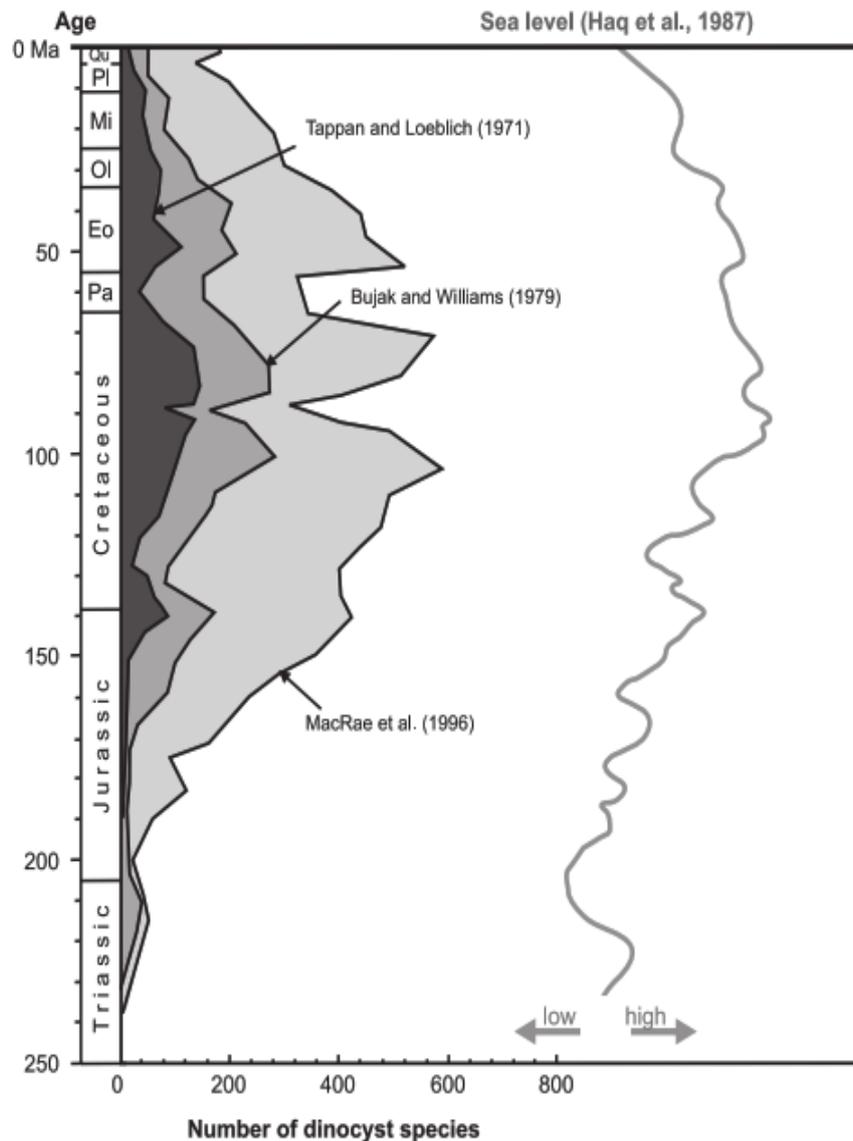
tener gran utilidad como indicador, ya que podrían estar relacionados con la ocurrencia de las especies en fase vegetativa en un área específica que desarrollan floraciones algales (Andriyono et al., 2023). En tal sentido, pueden ser una herramienta útil en el entendimiento de las floraciones de dinoflagelados asociadas a la variabilidad climática (Cuéllar-Martínez et al., 2018).

Los dinoquistes son indicadores paleoambientales en diferentes escalas de tiempo que abarcan desde años a millones de años. Hasta la fecha, los registros más antiguos de dinoquistes han sido encontrados en Australia (Anisiano – Triásico Medio) y el ártico de Canadá (Triásico Temprano). No obstante, cabe señalar que las interpretaciones paleoambientales más acertadas se han hecho con las asociaciones del Cuaternario debido al alto número de taxones existentes que pueden ser estudiados a detalle (Sluijs et al., 2005). Haq et al. (1987), señalaron que la diversidad de dinoquistes muestra una fuerte correlación con el aumento del nivel del mar, mostrando una curva (figura 6) en la que se observa que los intervalos con mayor diversidad de dinoquistes se asocian con incrementos en el nivel del mar. Sluijs et al. (2005) indicaron que esta correlación probablemente refleja la varianza ecológica en ambientes de plataforma a comparación de los ambientes marinos abiertos.

El uso de los dinoquistes para las exploraciones de los hidrocarburos empezó con estudios sustanciales sobre los dinoquistes del Cretácico y Jurásico elaborados por Deflandre (1937, 1938) y Eisenack (1938) (Penaud et al., 2018), quienes desarrollaron bioestratigrafía aplicada a la exploración de hidrocarburos. Con esto, se incrementó el número de publicaciones sobre la descripción de los nuevos taxones y las asociaciones de dinoquistes relacionados a etapas o estratotipos.

Figura 6

Diversidad de dinoquistes a través del Mesozoico y Cenozoico en comparación con la curva del nivel del mar.



Fuente: modificado de (Haq et al., 1987).

A partir de la década de 1950, estos microfósiles han sido incorporados a la bioestratigrafía y usados de forma exitosa en combinación con datos de otros fósiles como los amonites, foraminíferos, calpionelas y nanofósiles. Asimismo, se consideró la primera y última aparición de las especies para establecer correlaciones más robustas en la bioestratigrafía, a nivel de cuenca para la interpretación de eventos geológicos (Penaud et al., 2018).

Cabe señalar que, en la industria de los hidrocarburos se suele hacer el análisis bioestratigráfico de los dinoquistes, no solo por la alta resolución estratigráfica de estos,

sino también, porque los dinoquistes junto a otros palinomorfos son elementos importantes de la roca madre (Sluijs et al., 2005). Además, el color de los dinoquistes fosilizados puede ser usado para reconstruir la historia termal de la roca en la que se encontraron, lo que los hace esenciales en la evaluación de la roca madre en la exploración de hidrocarburos. Esta propiedad se relaciona con la dinosporina que compone las paredes de los dinoquistes, ya que el color de esta se relaciona con diferentes temperaturas de enterramiento. Por ejemplo, una mayor madurez termal y elevada concentración de carbono en los dinoquistes hace que estos cambien de un color amarillo pálido a naranja, luego a pardo, hasta que llega a ser negro y completamente opaco (Pross et al., 2007; Traverse, 2007). Este análisis se conoce como PDI (índice de oscuridad de palinomorfos).

En los últimos 30 años se ha incrementado el uso de los dinoquistes como indicadores paleoambientales (Sluijs et al., 2005), por lo que la composición y abundancia absoluta pueden reflejar cambios en temperatura, salinidad, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y productividad primaria (Cuéllar-Martínez et al., 2018; Zonneveld et al., 2013), presencia de aguas oceánicas o costeras (incursión de agua oceánica y eutrofización costera) (Dale, 1996), además de insumos para la reconstrucción de condiciones climáticas pasadas (Dale, 1996; De Vernal et al., 2001) y los efectos de la contaminación industrial (Dale, 2001a; Liu et al., 2012; Matsuoka, 1999; Pospelova et al., 2002, 2005; Sætre et al., 1997). Por ejemplo Dale (2001a), señaló que en el Oslofjord, se dio un incremento en la abundancia de dinoquistes con respecto al tiempo reflejando un incremento en la producción de fitoplancton; además, la especie autótrofa *Gonyaulax polyedra* tuvo un incremento considerable en su abundancia lo que indicaría una mayor frecuencia de floraciones algales de especies que estarían limitadas por nutrientes en ausencia del aporte adicional de nutrientes procedentes de la contaminación industrial.

2.1.7 Floraciones algales nocivas y dinoflagelados

Una floración algal consiste en la acumulación masiva de una o dos especies que coexisten con densidades de 10^4 a 10^6 células litro^{-1} que durante cierto periodo componen el 95-99% de la biomasa fitoplanctónica total (Paerl, 1988). Además, la presencia de

pigmentos de estas especies puede provocar cambios en la coloración del agua. Aunque su ocurrencia no necesita estar acompañada por un cambio de color del agua (Kudela et al., 2015; Smayda, 1997), debido a este cambio de coloración es que reciben el nombre coloquial de mareas rojas.

Bajo ciertas condiciones, algunas especies de organismos fitoplanctónicos, especialmente los dinoflagelados, generan un alto contenido de biomasa y aunque algunas especies sean inocuas (no tóxicas) tienen el potencial de producir FAN (Smayda & Reynolds, 2002). Ahora bien, las FAN pueden estar asociadas o no a cambios de color del agua, inclusive existen especies de dinoflagelados que pueden provocar efectos nocivos a una baja abundancia celular; causando efectos adversos a los ecosistemas acuáticos y seres humanos, a través de la exposición directa al agua o por el consumo de mariscos contaminados con toxinas (Kudela et al., 2015).

Entre los factores que promueven las FAN, se ha encontrado que existe una alta correlación entre la degradación de la calidad del agua, por el enriquecimiento en nutrientes a causa de la contaminación agrícola, y la ocurrencia de FAN (Heisler et al., 2008). Además, existe un efecto por la composición de los nutrientes, ya que un enriquecimiento de fósforo o silicio en relación con el nitrógeno favorece a géneros que producen FAN (Burkholder & Glasgow, 1997). La ocurrencia de floraciones algales requiere de nutrientes y estos pueden generarse en respuesta al cambio en la relación depredador-presa, los nutrientes pueden llegar a manera de pulsos y depende mucho de la eficiencia de la especie depredadora (Smayda & Reynolds, 2002). Asimismo, los dinoflagelados son abundantes cuando hay una mayor calidez y estratificación en la columna de agua y las FAN causadas por dinoflagelados se asocian al enriquecimiento con nutrientes, intensa estratificación y alta irradiancia de la columna de agua.

En los sistemas de afloramiento costero, en particular, las FAN de dinoflagelados prosperan durante los periodos de relajación del viento, que resultan en el calentamiento de las masas de agua y menor mezcla y turbulencia (Smayda & Trainer, 2010). La mayoría de las FAN son causadas por dinoflagelados (Smayda & Reynolds, 2002) (tabla 1).

Según Smayda (1997), existen diferentes mecanismos por los cuales las FAN causan daños graves o fisiológicos a otras especies. Uno de los efectos más comunes es la generación de condiciones anóxicas o hipóxicas en la columna de agua, ya que los organismos incrementan tanto su abundancia, de modo que, cuando las condiciones ambientales cambian, no se sostiene su crecimiento, ocurriendo la senescencia y a esto le suceden altas tasas de descomposición del material acumulado. El proceso de descomposición involucra el consumo de oxígeno, lo que conlleva a la formación de condiciones anóxicas o hipóxicas, que resultan en eventos de migración o mortalidad de especies, dependiendo de su toleración a la concentración de oxígeno.

Tabla 1

Distribución de especies que producen FAN entre los grupos filogenéticos del fitoplancton marino.

Clase	Número de especies descritas	Especies que producen FAN
<i>Raphidophyceae</i>	12	9
<i>Cyanophyceae</i>	10	6
<i>Euglenophyceae</i>	37	9
<i>Cryptophyceae</i>	73	8
<i>Dinophyceae</i>	1880	184
<i>Diatomophyceae</i>	1300	89
<i>Chrysophyceae</i>	126	7
<i>Chlorophyceae</i>	122	6
<i>Prymnesiophyceae</i>	303	14
<i>Prasinophyceae</i>	136	5

Nota: modificado de Smayda & Reynolds (2002)

Algunos organismos que ingieren especies generadoras de FAN se ven afectados por el tamaño de estas, que al ser muy pequeñas causan un desbalance en la nutrición del depredador, llegando a morir por inanición. Otras especies, al ser ingeridas pueden alterar la capacidad de absorción del sistema digestivo tal como en el caso de *Prorocentrum mínimum* (Wikfors & Smolowitz, 1995). El exceso en la población de especies heterótrofas, por ejemplo, en el caso de *Aureococcus anophagefferens* conlleva a la falla en la

reproducción y causa la ocurrencia de eventos de mortalidad del mejillón, *Mytilus edulis* (Tracey, 1988).

2.1.8 Floraciones algales en la bahía de Paracas

El primer registro reportado de la ocurrencia de FAN fue en 1941; dicho evento se relacionó con la incursión de la Corriente del Niño (Sears, 1954), la ocurrencia de estos eventos se relacionó con la presencia de un material gelatinoso de color amarillo-parduzco que fue asociado a fitoplancton degradado, específicamente a flagelados desnudos (Gunther, 1936; Vogt, 1942).

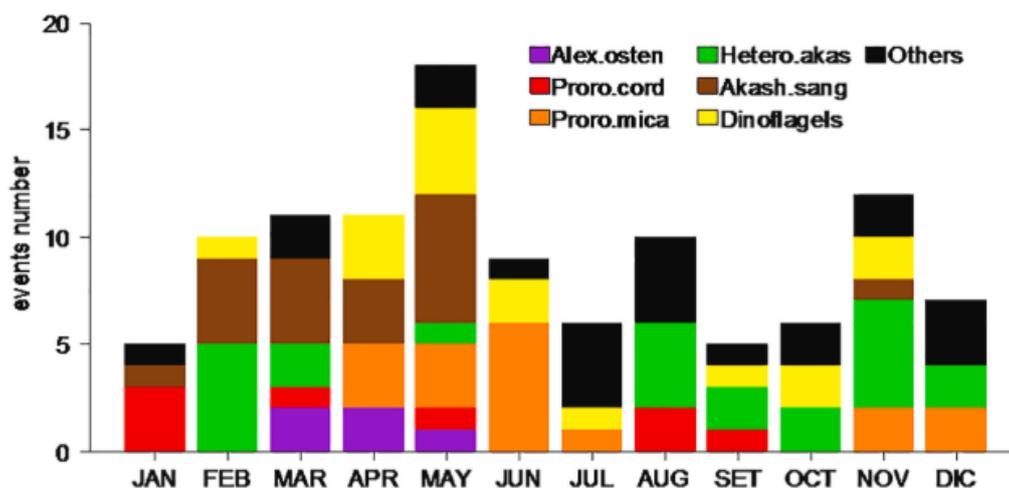
Santander & Ochoa (1981) sugirieron que las floraciones algales son producidas por microalgas que habitan la bahía, cuyos efectos tóxicos son muy limitados. Sumado a esto, Pitcher et al. (2021) señalaron que son más frecuentes en otoño, durante los periodos de relajación de los vientos. Los factores ambientales asociados a la ocurrencia de dichos eventos son la intensidad de la radiación solar, la estabilidad de la columna de agua y las concentraciones de nutrientes (López, 2008; Santander & Ochoa, 1981). Estas condiciones impulsan el crecimiento de dinoflagelados que asimilan los nutrientes disueltos. Cuando ocurre la senescencia y el decaimiento de las floraciones algales, ocurre la sedimentación de grandes cantidades de fitodetritos, lo que causa el agotamiento del oxígeno, por tanto, el impulso de la respiración anaeróbica y la hipoxia (Cabello et al., 2002; Pitcher et al., 2021).

Las floraciones algales de mayor impacto en la bahía de Paracas ocurrieron en 2000 y 2004; las especies relacionadas a estos eventos fueron *Prorocentrum micans* asociada a eventos de mortalidad de la concha de abanico (Cabello et al., 2002) y *Akashiwo sanguinea* asociada a eventos de mortalidad de peces (Kahru et al., 2004). Uno de los acontecimientos de mayor trascendencia se dio en el 2004, cuando una floración algal nociva (FAN) producida por la especie *Akashiwo sanguinea* causó un evento de mortalidad de especies bentónicas (Cabello et al., 2002), perjudicando la economía en la bahía de Paracas.

Por otra parte, la ocurrencia de las FAN formadas por *Prorocentrum cordatum* y *Heterosigma akashiwo* han sido observadas en las zonas costeras y en la parte central de la bahía, y su distribución es coincidente con la de las aguas hipóxicas y estratificadas formadas después de los eventos de relajación de los vientos (Pitcher et al., 2021).

Figura 7

Frecuencia de FAN registradas en la bahía de Paracas (2008-2017) por especies de dinoflagelados.



Nota: modificado de (Pitcher et al., 2021)

En el ciclo anual, se observó que desde invierno hasta inicios de primavera las diatomeas son el grupo fitoplanctónico más abundante, no obstante, desde mediados de verano se da un incremento y predominancia de flagelados que persisten hasta otoño. Estos flagelados incluyen a las especies productoras de FAN *A. sanguinea*, *Heterosigma akashiwo* y *Prorocentrum micans* (Pitcher et al., 2021). Asimismo, Pitcher et al. (2021) describió la frecuencia de las FAN registradas en la bahía de Paracas en el periodo de tiempo comprendido entre los años 2008-2017, indicando que se registraron 106 eventos de FAN, con un promedio de 10 eventos FAN a nivel mensual, principalmente de las especies de dinoflagelados *Akashiwo ostenfeldii*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum cordatum*, *Akashiwo sanguinea*, *Prorocentrum micans*, entre otros (figura 7).

2.1.9 Indicadores geoquímicos

La materia orgánica del lecho marino se puede expresar en función al carbono orgánico total (COT) y el nitrógeno total (NT) y desempeña un rol importante en la química

de los océanos. Los contenidos más importantes de carbono son generados por los organismos fitoplanctónicos, que, mediante la fotosíntesis, fijan CO₂ atmosférico y al terminar su ciclo de vida se hunden en la columna de agua, contribuyendo al incremento de la materia orgánica entre los sedimentos del lecho marino. No obstante, la oxidación contribuye a la degradación de una gran parte de la materia orgánica durante su hundimiento, de forma que solo una pequeña fracción alcanza los sedimentos (Escobar-Briones & García-Villalobos, 2009).

En general, el carbono orgánico total y el nitrógeno provienen de la descomposición de plantas y animales o plancton y fuentes antrópicas tales como fertilizantes, contaminantes químicos o desechos con altos contenidos de material orgánico (Avramidis et al., 2015). Estos indicadores han sido usados con frecuencia en el estudio de la variabilidad ambiental en núcleos sedimentarios, ya que existe una muy alta correlación entre la concentración del carbono orgánico con los contaminantes orgánicos.

Además, se ha utilizado la relación entre el COT (carbono orgánico total) y NT (nitrógeno total) para distinguir la fuente de la materia orgánica depositada en los sedimentos, ya sea terrestre o marina, con el uso de la razón de Redfield, que caracteriza típicamente el material orgánico de origen planctónico. Esta relación entre COT y NT se denominará el cociente C/N. En el caso del fitoplancton y zooplancton, el cociente C/N es 6, aunque varía entre 4 y 10, dependiendo de la composición proteica y en el caso de las plantas terrestres vasculares, el valor es mayor a 15 (Escobar-Briones & García-Villalobos, 2009). Asimismo, esta relación aporta información sobre las condiciones de óxido-reducción (Froelich et al., 1979; Hartnett et al., 1998; Raiswell et al., 1988), ayuda en la reconstrucción de ambientes sedimentarios y en la identificación de los cambios en la fuente de la materia orgánica en el pasado (Avramidis et al., 2013, 2014).

También se utilizaron isótopos, la importancia de estos consiste en que son indicadores importantes de procesos en sistemas donde las medidas absolutas son poco confiables. Una de sus aplicaciones consiste en la reconstrucción de procesos en ambientes sedimentarios, a través de la comparación de las firmas isotópicas de los

mismos (Johnston & Fischer, 2012). Entre los isotopos estables más utilizados se encuentran el ^{13}C y ^{15}N .

El carbono y el nitrógeno se acumulan entre los sedimentos y forman parte de la materia orgánica. Por ejemplo, el carbono se puede presentar como ^{12}C que es el isótopo más abundante y ligero, o como ^{13}C que es el isótopo más escaso y pesado. El $\delta^{13}\text{C}$ se utiliza para distinguir el origen continental o marino de la materia orgánica sedimentaria y el tipo de fuente vegetal, que depende de las rutas metabólicas utilizadas por estas (Meyers, 1994).

Por otra parte, el ^{15}N es un indicador de desnitrificación en la columna de agua. Por ejemplo, en la zona mínima de oxígeno ocurre un proceso llamado desnitrificación, donde en ausencia de oxígeno, el nitrato con el isótopo ^{14}N es usado por los microorganismos como oxidante, esto incrementa la concentración relativa de ^{15}N en el agua de mar, que es el isótopo más escaso y pesado, por lo cual el nitrato asimilado por el fitoplancton también se enriquece de este isótopo, y por extensión el fitodetritus y la materia orgánica sedimentaria de origen fitoplanctónico. Por tanto, el $\delta^{15}\text{N}$ de la materia orgánica sedimentaria se usa como un indicador de la desnitrificación asociada al grado de oxigenación de la columna de agua. En consecuencia, el análisis de los isótopos estables de C y N puede ser usado para determinar el origen de la materia orgánica en los cuerpos de agua y el grado de oxigenación de los mismos (Meyers, 1994; Torres et al., 2012).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 *Dinoquistes*

Es el caparazón de los dinoflagelados que se produce como resultado de un proceso de enquistamiento, el cual se manifiesta ante condiciones no favorables (Bravo & Figueroa, 2014), los cuales germinan después de un periodo de tiempo variable. Están compuestos por una macromolécula refractaria conocida como dinosporina (Dale, 2001b). Los dinoquistes no presentan locomoción, de modo que se comportan como sedimentos del tamaño del limo (Dale, 1983; Lewis, 1988; Nehring, 1993).

2.2.2 Eutrofización

La eutrofización consiste en una condición de un cuerpo de agua que presenta una alta carga orgánica, principalmente nitrógeno y fósforo. A pesar de que este fenómeno forme parte de un proceso natural de envejecimiento de los cuerpos de agua, independientemente de la actividad antrópica (Bonansea et al., 2012). A pesar de esto, hay muchos cuerpos de agua que presentan esta condición a causa de las actividades antrópicas, tal como los vertimientos de origen doméstico e industrial, las actividades mineras, las actividades agrícolas o accidentes que pueden llegar a exacerbar este proceso.

2.2.3 Afloramiento costero

El afloramiento consiste en el ascenso de masas de agua desde el fondo de la columna de agua por acción de la fuerza del viento, el efecto Coriolis, la gradiente de presión y la fricción interna en los bordes costeros. Este ascenso vertical de masas de agua toma desde varios días a varias semanas (Umasangaji et al., 2021). El área donde ocurre el afloramiento suele ser rica en nutrientes (fosfatos, nitratos y silicatos), por lo que es rica en recursos pesqueros, no obstante, puede estar sujeta a condiciones anóxicas por la elevada productividad que puede llegar a consumir enormes cantidades de oxígeno (Umasangaji et al., 2021).

2.2.4 Floraciones algales

Consisten en eventos efímeros de proliferaciones súbitas de fitoplancton, lo que lleva a la formación de colonias densas de estas especies en diversos ecosistemas acuáticos, incluyendo ríos de agua dulce, lagos, regiones polares, aguas costeras y mar abierto. Suelen estar compuestas por más de una especie de fitoplancton, que a su vez forman parte de la base de la cadena trófica. Estas pueden alcanzar concentraciones muy elevadas, de decenas a miles de células por litro y pueden variar en duración, de días a semanas, y en área de decenas a centenas o incluso miles de kilómetros cuadrados (Schleyer y Vardi, 2020).

2.2.5 Remineralización de la materia orgánica

Es el proceso por el que la materia orgánica se degrada, a través de los microorganismos, transformándose en diferentes compuestos y a menudo liberando nutrientes a la columna de agua como nitrógeno, fósforo, silicatos entre otros (García, 2006). Este proceso se encuentra sujeto a las condiciones ambientales que puede ser oxigenadas, hipóxicas o anóxicas.

2.2.6 Mixotrofia

Es la combinación de la nutrición autótrofa y heterótrofa, suele ser una estrategia trófica entre los organismos unicelulares en el océano. Hay una serie de hipótesis sobre las condiciones que impulsan la mixotrofia. No obstante, la evidencia es limitada en cuanto a la forma en la que la mixotrofia varía en las diferentes condiciones ambientales (Edwards, 2019).

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

El trabajo consistió en la extracción de un núcleo sedimentario en la bahía de Paracas. Posteriormente, se hizo el submuestreo, el tratamiento palinológico de estos y el conteo de dinoquistes en el microscopio. La segunda etapa del trabajo se basó en el tratamiento estadístico de los datos y la elaboración del manuscrito de tesis.

3.1 Investigaciones de campo

La fase de campo comprendió la extracción de un núcleo sedimentario. Las principales consideraciones para la selección del sitio de colecta del núcleo fueron: (1) una zona con mínima o nula perturbación, (2) lejanía de las zonas pesqueras o de maricultura, (3) profundidad somera y (4) una zona en la que se hubieran desarrollado episodios de FAN previamente.

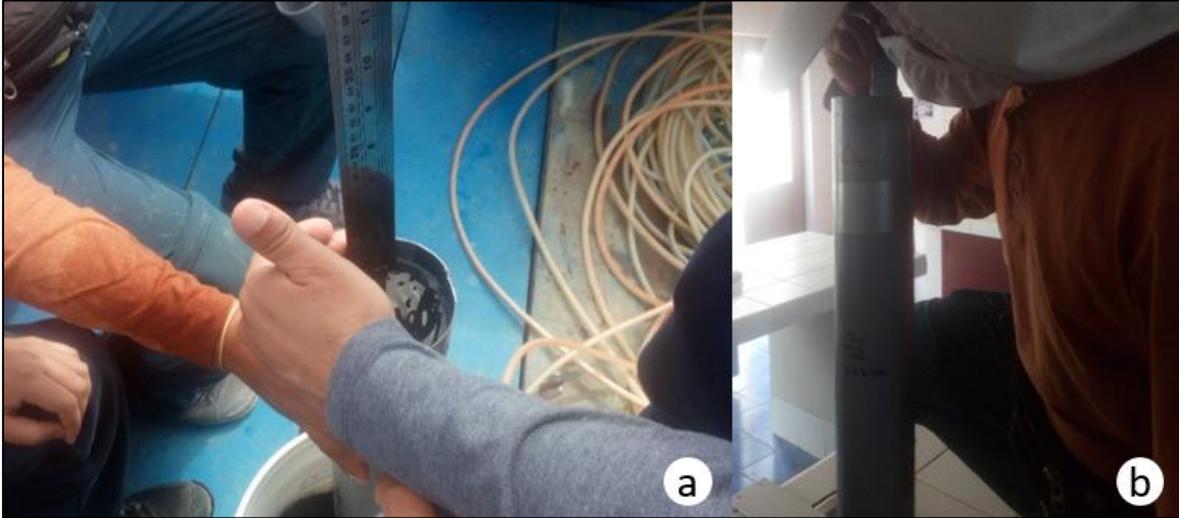
El trabajo de campo se llevó a cabo entre noviembre y diciembre de 2020 en la parte central de la bahía de Paracas. Para el traslado del equipo de trabajo hacia la zona de muestreo se utilizó una lancha con motor fuera de borda de 60 HP. El trabajo de campo se llevó a cabo entre las 9.00 a.m. y 1.00 p.m.; se contó con la colaboración de un buzo profesional para realizar la extracción del núcleo sedimentario. El punto muestreado fue georreferenciado con un geoposicionador GPS Garmin map76CSx.

El núcleo sedimentario se recolectó mediante buceo, extrayéndosele de la parte central de la bahía de Paracas, este fue trasladado para su conservación al Laboratorio de Ciencias del Mar de la Universidad Peruana Cayetano Heredia y se evitaron movimientos oscilatorios para no perturbar la superficie del núcleo sedimentario, preservando el perfil vertical de la muestra. La posición y coordenadas geográficas se presentan en la tabla 2.

Para esto se utilizó un tubo de plástico PVC como contenedor, que fue cortado de forma longitudinal y sellado con papel aluminio acerado a fin de impermeabilizarlo e impedir la filtración de agua y sedimento. Se realizó la medición de la longitud total del núcleo (figura 8).

Figura 8

Recuperación del núcleo sedimentario (izquierda) y drenado (derecha).



Fuente: elaboración propia.

Figura 9

Corte longitudinal del núcleo sedimentario (izquierda) y empaquetado de los núcleos para su conservación (derecha).



Fuente: elaboración propia.

Después, se tapó para evitar la introducción de oxígeno y fue llevado al Laboratorio Costero de IMARPE – Pisco, en donde el líquido sobrenadante fue drenado, el tubo PVC fue cortado longitudinalmente y posteriormente empaquetado para su preservación (figura 9).

Tabla 2

Coordenadas geográficas del núcleo sedimentario extraído. Datum WGS1984 y proyección UTM18S.

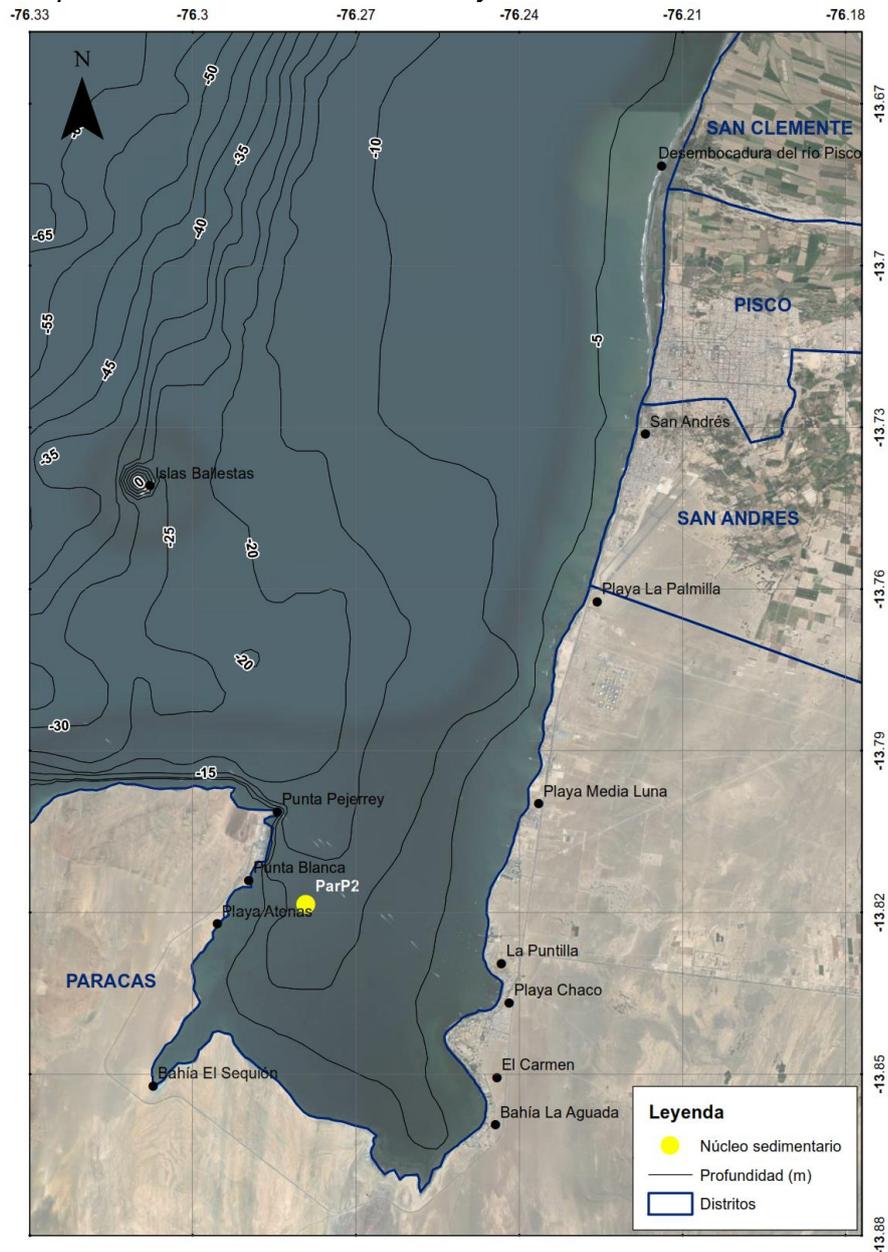
Núcleo	Fecha de recuperación	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (m)	Análisis de los dinoquistes
ParP2	23/04/2021	-13.81395	-76.28366	-11	X

Nota: elaboración propia.

En la figura 10 se muestra la delimitación provincial en el área de estudio, el punto donde se extrajo el núcleo sedimentario, que se encuentra en la parte central de la bahía de Paracas y la batimetría del área de estudio.

Figura 10

Mapa de ubicación de los sedimentos y el núcleo en la bahía de Paracas. Batimetría proporcionada por IMARPE. Datum WGS1984 y UTM18S.



Fuente: elaboración propia.

3.2 Investigaciones de laboratorio

El tratamiento de las muestras de sedimento comprendió el submuestreo del núcleo, la aplicación de la técnica palinológica y el montaje en secciones delgadas. Además, se hizo la descripción sedimentológica del núcleo sedimentario y se hizo el fechado geocronológico con los valores del ^{210}Pb en exceso.

3.2.1 Descripción sedimentológica del núcleo sedimentario

La descripción sedimentológica del núcleo sedimentario ParP2 comprendió la medición de la longitud total del núcleo, la identificación de estructuras sedimentarias, la caracterización de perturbaciones, y la asignación del color de acuerdo con la codificación establecida en la tabla de Munsell (Nickerson, 1940) y la descripción sedimentológica se hizo en base a la escala de Udden-Wentworth. El núcleo se encontraba en buenas condiciones en el momento de la descripción (figura 11).

Figura 11

Descripción del núcleo ParP2 extraído en la bahía de Paracas.

Representación gráfica	Color	Fotografía del núcleo sedimentario	Litología
0 cm	4/3		Fango arcilloso fluido en superficie, el tamaño de grano aumenta ligeramente hacia la base, color olivo, sección homogénea (0-16.5 cm).
16.5 cm	4/4 -> 4/3		Fango arcilloso se hace menos plástico-fluido homogéneo, color olivo, presenta un contacto irregular (16.5-18 cm).
18 cm	4/3		Fango arcilloso, limo en menor abundancia, se encontró un lente pequeño aproximadamente a 19-19.5 cm de profundidad, color olivo (18-22.5 cm)
22.5 cm	4/3 -> 4/4		Fango arcilloso, limo en menor abundancia, color olivo, presenta un contacto irregular difuso (22.5-25 cm).
25 cm	4/3		Fango arcilloso, presenta un contacto difuso, aunque entre 31-33.5 cm de profundidad, hay una serie de bandas de contactos difusos, presenta limo (25-42 cm).
31 cm	4/3 -> 4/4		Fango arcilloso (42-45 cm).
42 cm	4/3		Fango arcilloso con bandas claras y presenta contacto irregular (45-49 cm).
45 cm	4/4 -> 4/3		Fango arcilloso con limo en mayor abundancia (49-62.5 cm)
49 cm	4/3 -> 4/4		
60 cm	4/3 -> 4/4		

Leyenda

Limo

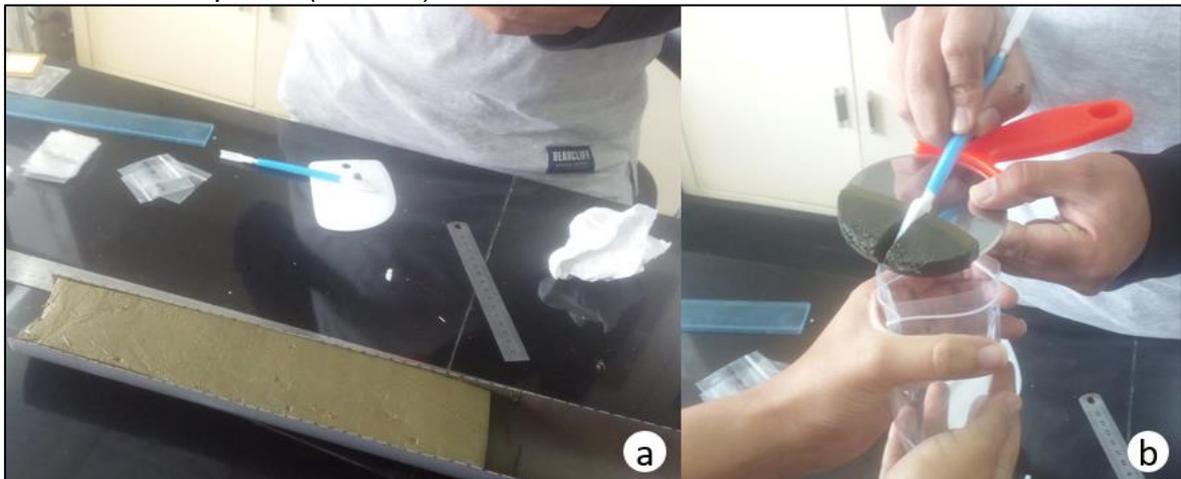
Fuente: elaboración propia.

3.2.2 *Submuestreo del núcleo sedimentario*

El núcleo ParP2 fue submuestreado a intervalos de 1 centímetro (figura 12). Se extrajo una porción de cada submuestra con un sacabocado (volumen de 6 cm³) (figura 12), para el análisis de dinoquistes, se hizo el pesaje de los sedimentos húmedos en una balanza digital (figura 13) y al terminar fueron colocadas en una estufa a 60°C, el tiempo de secado tardó aproximadamente 5 días (figura 14), de modo que se obtuvo el sedimento seco y se hizo el pesaje de estos en una balanza digital.

Figura 12

Submuestreo del núcleo sedimentario (izquierda) y submuestra de sedimento para el análisis de dinoquistes (derecha).



Fuente: elaboración propia.

Figura 13

Pesaje del sedimento húmedo en balanza digital.



Fuente: elaboración propia.

Figura 14

Secado del sedimento en una estufa a 60°C.



Fuente: elaboración propia.

Para la determinación de la densidad seca aparente (DBD) se utilizaron los datos de masa húmedas y seca de las submuestras extraídas para el análisis de dinoquistes.

Por otra parte, se extrajo otra porción de cada submuestra para la medida de la actividad de ^{210}Pb , ^{137}Cs y ^{241}Am , y del mismo modo, fueron secados en una estufa a 60°C . Se obtuvieron un total de 61 muestras, no obstante, se obtuvo el resultado de 47 submuestras. Se usaron los datos de DBD calculados en las muestras de dinoquistes para el análisis de la actividad de ^{210}Pb . Los datos se detallan en el Anexo 1.

3.2.3 Determinación de la actividad de los radioisótopos

La edad de depositación de los sedimentos en el área de estudio fue determinada mediante el método de datación con ^{210}Pb en el núcleo de sedimento ParP2 de 61 centímetros de longitud. Todas las muestras fueron molidas con un mortero de ágata. El sedimento molido fue destinado para el análisis de actividad del radionúclido natural ^{210}Pb , de los radionúclidos artificiales ^{241}Am y ^{137}Cs con el fin de determinar la edad y las tasas de acumulación de los sedimentos. La actividad de un radioisótopo consiste en el número de núcleos que desaparecen por unidades de tiempo, por lo que representa la velocidad de desintegración. La actividad total del ^{210}Pb fue determinada por medición de rayos gamma utilizando detectores coaxiales de Ge de alta pureza (CANBERRA BE3830P) en la Universidad de Kiel, Alemania. La actividad del ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) se estimó

restando la actividad de ^{226}Ra , también estimada a partir de la espectrometría gamma, de la medida de ^{210}Pb (Moore, 1984).

3.2.4 Técnica palinológica

La técnica palinológica se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencias del Mar de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. Se tomaron aproximadamente 2 cm³ de sedimento seco de cada una de las submuestras extraídas del núcleo sedimentario ParP2, las cuales fueron colocadas cada una en una probeta graduada (figura 15), se agregó una tableta de esporas foráneas (*Lycopodium clavatum*) a cada una de las muestras de sedimentos (figura 15) para permitir la cuantificación de los dinoquistes por gramo de sedimento, usando el método de grano marcador (Price et al., 2016; Stockmarr, 1971). Para esto, se empleó un set de tabletas que contienen en promedio 18 407 esporas de *Lycopodium clavatum* (Batch N° 050220211), con una desviación estándar de 592 esporas. Posteriormente, cada muestra de sedimento fue filtrada a través de un sistema de dos tamices de nylon de 100 µM y 10 µM, respectivamente, usando agua destilada como dispersante, sobre un agitador magnético (figura 16) y, por último, cada muestra filtrada fue centrifugada durante 10 minutos a 2500 rpm (figura 16). Para eliminar la fracción carbonatada, se añadió HCl al 10% a temperatura ambiental, y se agitó la muestra hasta el punto de no observar reacción mediante la forma de burbujeo, para eliminar los carbonatos, aproximadamente durante 5 minutos (figura 17). Después, se diluyó con agua destilada, se centrifugó el contenido y se drenó el sobrenadante. También se añadió HF al 48% a temperatura ambiental, y se agitó la muestra hasta no observar ninguna reacción, para eliminar los silicatos (figura 18).

La solución fue diluida con agua destilada, se centrifugó el contenido y se drenó el sobrenadante. Este proceso se repitió nuevamente; la única diferencia fue que el HF al 48% se dejó durante 24 horas en reacción con cada muestra de sedimento. Después, se agregó HCl al 10% (5 minutos), se diluyó el contenido con agua destilada, se centrifugó el contenido y se drenó el sobrenadante. Finalmente se agregó agua destilada para diluir la actividad de los ácidos remanentes, se centrifugó y se drenó el sobrenadante. Cada

muestra de sedimento fue sonicada durante 5 minutos (figura 19). Posteriormente las muestras fueron colocadas en tubos cónicos de 20 ml (figura 20) y finalmente, cada muestra fue centrifugada durante 10 minutos a 2500 rpm y se drenó el sobrenadante.

Figura 15

*Pesado de sedimento seco para la técnica palinológica (izquierda) y adición del marcador *Lycopodium clavatum* (derecha).*



Fuente: elaboración propia.

Figura 16

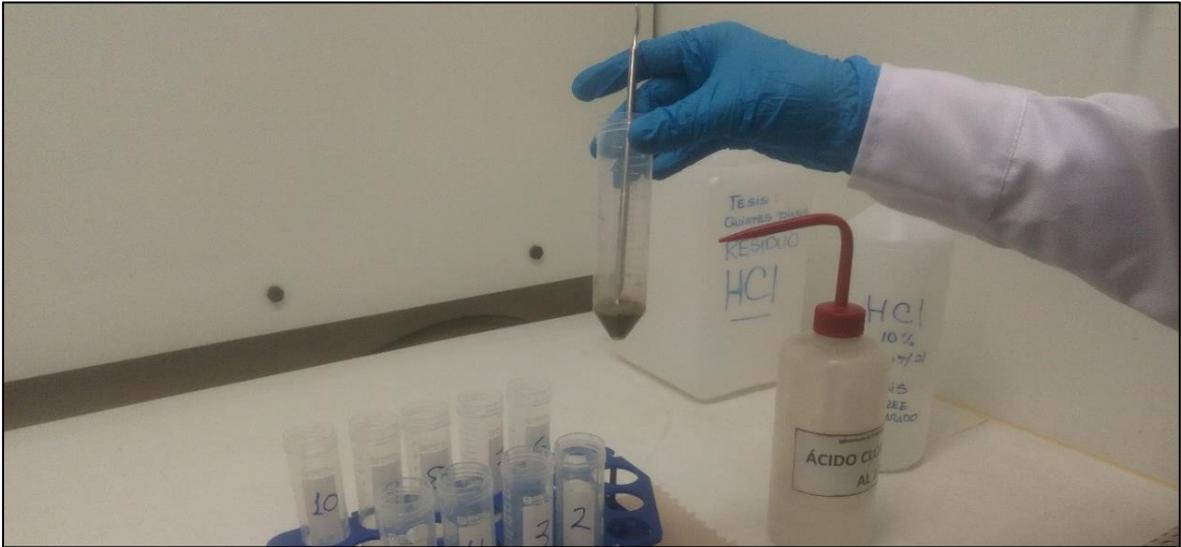
Tamizado de las muestras de sedimento (izquierda) y centrifugado de muestras (derecha).



Fuente: elaboración propia.

Figura 17

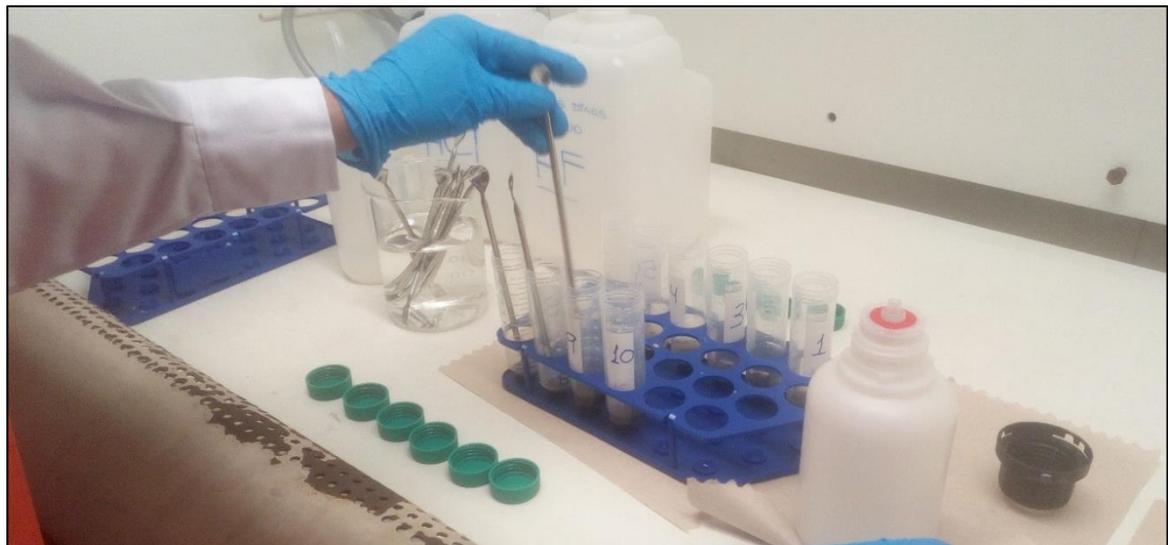
Adición de HCl al 10% a las muestras de sedimento.



Fuente: elaboración propia.

Figura 18

Adición de HF al 48% a las muestras de sedimento.



Fuente: elaboración propia.

Figura 19

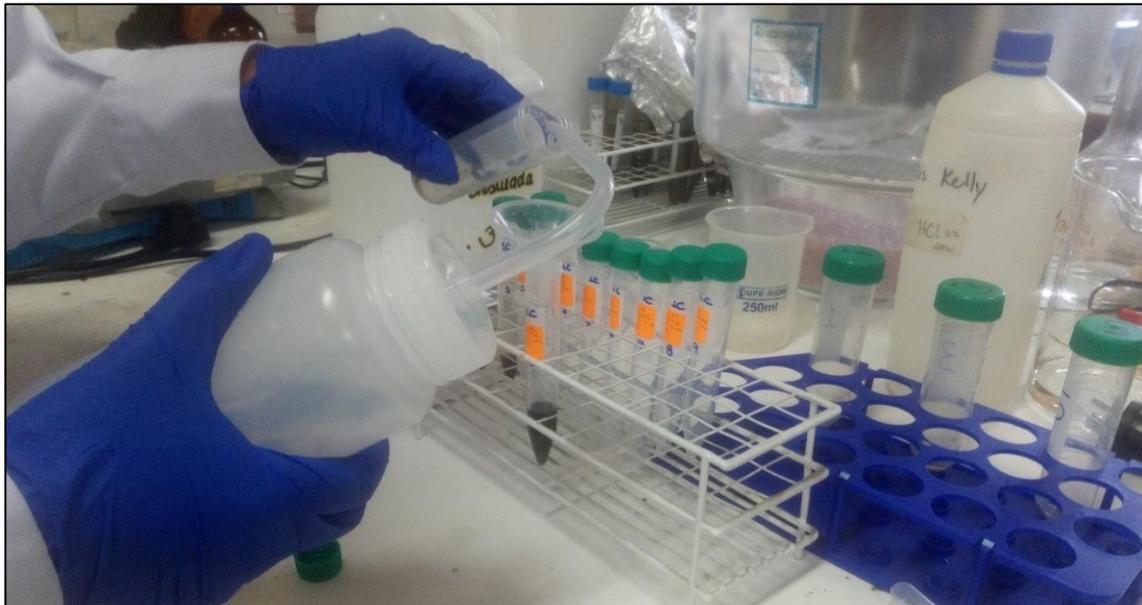
Baño ultrasónico de las muestras de sedimento (izquierda) y tamizado final de las muestras de sedimento (derecha).



Fuente: elaboración propia.

Figura 20

Transferencia de las muestras en tubos cónicos de 20 ml.



Fuente: elaboración propia.

3.2.5 Análisis de proxys geoquímicos

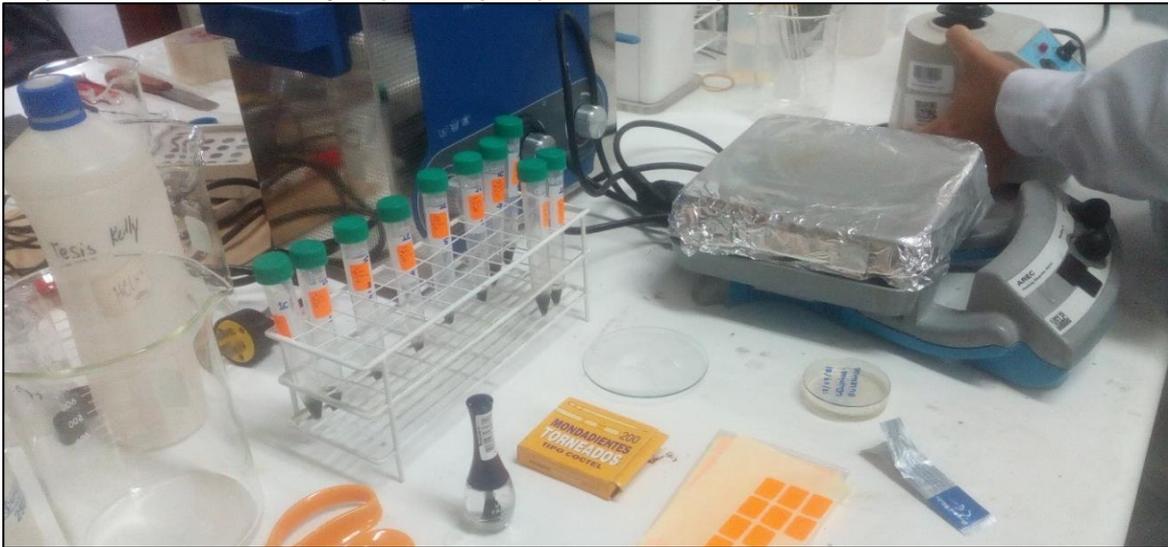
Se utilizaron los siguientes proxys geoquímicos: carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (NT), relación C/N, concentración de isótopo de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$), concentración de isótopo de ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$). Para ello, se utilizaron los datos geoquímicos de Merma (2023), para ayudar a la interpretación de la variabilidad temporal de los dinoquistes.

3.2.6 Montaje en secciones delgadas

En cada uno de los portaobjetos se agregó un corte de aproximadamente 3 mm² de un preparado de grenetina-glicerina, que sirvió como dispersante, el portaobjeto fue colocado sobre una estufa a una temperatura de 65°C hasta que la grenetina-glicerina se derritieran (figura 21). Por otra parte, se procedió a agitar el tubo cónico con la muestra de sedimento en un vórtex (figura 22).

Figura 21

Preparación de la estufa y el portaobjeto para el montaje de las láminas.



Fuente: elaboración propia.

Figura 22

Agitación de la muestra de sedimento con el vórtex.



Fuente: elaboración propia.

Luego, con una pipeta se extrajo una gota de muestra del tubo cónico y se colocó sobre el portaobjeto, precisamente en donde se observó la mayor concentración de la grenetina-glicerina. Con la ayuda de un palillo de madera se mezcló la muestra y la grenetina-glicerina derretida, esta mezcla se expandió a lo largo y ancho del portaobjeto y después se colocó el cubreobjeto.

Posteriormente, se retiró el portaobjeto de la estufa y se procedió a colocar el cubreobjeto cuidadosamente sobre el portaobjeto y se presionó con el otro extremo del palillo de madera a fin de evitar la formación de burbujas y finalmente se dejó enfriar a temperatura ambiente. Todas las secciones delgadas fueron guardadas en un portasecciones, que se encuentra en el Laboratorio de Ciencias del Mar de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

3.3 Investigaciones de gabinete

3.3.1 Análisis microscópico de las secciones delgadas

Para el análisis microscópico de las muestras de sedimento tratadas con la técnica palinológica se utilizaron las secciones delgadas, el conteo se hizo en el microscopio mencionado previamente.

Se identificaron los dinoquistes en cada una de las muestras y para la identificación de estos se utilizaron claves publicadas y artículos científicos relacionados a la taxonomía de dinoquistes (Limoges et al., 2018, 2020; Mertens et al., 2012; Mertens et al., 2020; Van Nieuwenhove et al., 2020; Wrenn, 1988; Zonneveld et al., 2013; Zonneveld & Pospelova, 2015). Para tomar las coordenadas de los ejemplares estudiados se empleó la reglilla England Finder y las coordenadas ubicadas en la reglilla del microscopio. Las microfotografías de los palinomorfos se obtuvieron a través de una cámara TOUPCAM 12MP 1/1.7" conectada al microscopio antes mencionado.

3.3.2 Cálculo de la densidad seca aparente

Se hizo el cálculo de la densidad de las submuestras de sedimento del núcleo sedimentario ParP2, utilizando el DBD o DSA (densidad seca aparente) como medida de referencia. La ecuación para el cálculo presenta la siguiente expresión:

$$DBD = m_{\text{sedimento seco}} / V_{\text{sedimento húmedo}} \quad (2)$$

En la Ecuación 2: $m_{\text{sedimento seco}}$ es la masa de sedimento seco y $V_{\text{sedimento húmedo}}$ es el volumen de sedimento húmedo con un valor aproximado de 6.0306 cm^3 .

3.3.3 Geocronología basada en ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)

Si la tasa de acumulación del sedimento y el flujo de ^{210}Pb son constantes, además, no hay procesos de redistribución de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en los sedimentos, un perfil de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ debería presentar una distribución exponencial. Aunque estas condiciones no siempre se dan, los modelos de fechado por ^{210}Pb permiten obtener resultados válidos (Sanchez-Cabeza, 2012). Uno de los métodos más utilizados para la elaboración de modelos de edad es el *constant flux constant supply* (CFCS). En el modelo CFCS, se asume que la tasa de suministro de ^{210}Pb y de sedimentación son constantes y la actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ decrecerá en el perfil de acuerdo con su decaimiento radioactivo natural (Sorgente et al., 1999). Representado en un diagrama semilogarítmico la evolución de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ con la profundidad se convierte en una línea y su pendiente permite calcular la tasa de sedimentación (Bernal et al., 2010).

Para la elaboración del modelo de edad se utilizó el método CFCS (constant rate supply) (Appleby & Oldfield, 1978), que asume un flujo constante de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ y tasa de sedimentación de masa de sedimento seco constante. Esto se representa de la siguiente forma:

$$A_{m\text{TOT}} = A_{0(\text{exceso})} e^{\frac{-\lambda m}{r}} \quad (3)$$

En la Ecuación 3: $A_{m\text{TOT}}$ es la actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en exceso (mBq g^{-1} en masa de sedimento seco), es decir $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$, $A_{0(\text{exceso})}$ es la actividad inicial de ^{210}Pb en exceso en la interfase agua/sedimento (mBq g^{-1} sedimento seco), m es la masa de sedimento seco acumulativa (g cm^{-2}) a una profundidad dada, λ es la constante de desintegración radioactiva del ^{210}Pb (0.03114 año^{-1}) y r es la tasa de acumulación de masa de sedimento seco ($\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$).

3.3.4 *Dinoquistes*

3.3.4.1 Abundancia de dinoquistes. Se hizo un solo conteo para el desarrollo de la técnica palinológica en el cual se consideró el criterio indicado por Mertens et al. (2009), quienes señalaron que un conteo de 300 dinoquistes contados es suficiente para generar datos confiables de diversidad y abundancia absoluta para sedimentos del Cuaternario. Asimismo, para el cálculo de la concentración de dinoquistes gramo^{-1} se utilizaron esporas de *Lycopodium clavatum* que se usan como marcadores para el cálculo de la abundancia absoluta de los palinomorfos. Asimismo, se tomaron en cuenta los parámetros señalados por (Price et al., 2016), los cuales son: (1) el número de dinoquistes contados, (2) el número de *Lycopodium clavatum* por tableta, (3) el número de tabletas añadidas a la muestra, (4) el número de esporas de *Lycopodium clavatum*, (5) peso de sedimento seco en gramos, mediante la siguiente operación:

$$Abundancia = \frac{(E) * (L_t) * (T)}{(L_c) * (m)} \quad (4)$$

En la Ecuación 4: E es el número de especímenes de dinoquistes contados, L_t es la cantidad de esporas de *Lycopodium clavatum* por tableta, T es la cantidad de tabletas de *Lycopodium clavatum* utilizadas, L_c es la cantidad de esporas de *Lycopodium clavatum* contadas y m es la masa de sedimento seco utilizada en el tratamiento.

Asimismo, se estimó el error de conteo, mediante el cálculo del error total del número de esporas en las tabletas. Esta operación se expresa mediante la siguiente ecuación (Stockmarr, 1971):

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2} \quad (5)$$

En la Ecuación 5: el error total (e) se calculó a partir de los siguientes elementos (e_1 , e_2 , e_3), de la siguiente forma:

$$e_1 = \frac{\text{desviación estandar de esporas en tableta}}{\text{total de esporas en tableta}} \quad (6)$$

$$e_2 = \frac{\sqrt{\text{dinoquistes contados}}}{\text{dinoquistes contados}} \quad (7)$$

$$e_3 = \frac{\sqrt{\text{esporas contadas}}}{\text{esporas contadas}} \quad (8)$$

En la Ecuación 6, e_1 es el error en el número de esporas de las tabletas marcadoras, en la Ecuación 7, e_2 es el error en los dinoquistes contados y en la Ecuación 8, e_3 es el error en el número de esporas contadas.

El valor de e_1 se calculó a partir de las especificaciones estadísticas correspondientes al batch utilizado, en el cual se describe el número total de esporas por tableta y la desviación estándar de esporas por tableta de utilizada. Los valores de e_2 y e_3 se obtuvieron después del conteo, ya que requirió del número de esporas y dinoquistes contados.

3.3.4.2 Riqueza de dinoquistes. La riqueza es el número total de especies encontradas en un hábitat, ecosistema, o región determinada (Colwell, 2009). En el desarrollo de esta investigación, la riqueza hace referencia al número total de especies de dinoquistes observados en cada submuestra del núcleo sedimentario.

3.3.4.3 Diversidad de dinoquistes. La diversidad se representó con el índice de Shannon-Wiener y el índice de dominancia de Simpson. El índice de Shannon contempla la cantidad de especies presentes en la muestra (riqueza) y la cantidad relativa de individuos de cada una de esas especies (abundancia). en la misma (Shannon, 1948) y su cálculo se obtiene de la siguiente forma:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i \quad (9)$$

En la Ecuación 9: S es el número de especies, p_i es la proporción de individuos de la especie i respecto al total de individuos (abundancia relativa de la especie i) y H' es el índice de diversidad de Shannon-Wiener.

El índice H' varía entre 0.5 y 5, los valores inferiores a 2 se consideran bajos en diversidad y superiores a 3 son altos en diversidad de especies.

El índice de Dominancia de Simpson (D) considera el número de especies presentes, la abundancia relativa de cada especie, y representa la posibilidad de que dos

individuos aleatoriamente seleccionados del hábitat pertenezcan a la misma especie (Simpson, 1949), y su cálculo se obtiene de la siguiente forma:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^S s_i(s_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (10)$$

En la Ecuación 10: S es el número de especies, N es el número total de organismos presentes, s es el número de ejemplares por especie y D es el índice de diversidad de Simpson.

A medida que el valor del índice de Simpson se acerca más a la unidad existe una mayor posibilidad de dominancia de una especie, y cuanto más se acerca el valor de este índice a cero, mayor es la uniformidad de la composición específica.

3.3.5 Tratamiento de datos de los dinoquistes

A partir del conteo de dinoquistes de las muestras de sedimento, se generó una matriz de abundancias absolutas, diversidad y riqueza (Anexo 4) para las submuestras del núcleo sedimentario. Se realizó un análisis exploratorio en el que se determinó el criterio de abundancia y frecuencia para la selección de las especies. Para tener una representación óptima de las muestras del núcleo sedimentario y no sobrerrepresentar las especies raras o muy poco frecuentes, se consideran aquellas con una abundancia porcentual mayor al 1%. Los datos de la matriz fueron estandarizados utilizando la transformación de Hellinger, que consiste en la transformación de datos de abundancia absoluta en abundancia relativa y el cálculo de la raíz cuadrada (Legendre & Gallagher, 2001).

3.3.6 Análisis multivariado

3.3.6.1 Análisis de conglomerados. El análisis de conglomerados es una técnica de estadística multivariada, que se usa para agrupar elementos o variables de modo que se logre la máxima homogeneidad entre los elementos de cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos. No existe una solución única, esta depende de la cantidad de variables utilizadas, por lo que la adición o sustracción de variables relevantes tienen un gran impacto en la solución (Alkarkhi & Alqaraghuli, 2020).

Para agrupar las variables (especies de dinoquistes) o los puntos de origen (niveles de profundidad o estaciones) se utilizó la distancia de Bray-Curtis, que evalúa la disimilaridad entre dos muestras diferentes y hace referencia a la diferencia en la abundancia relativa de una especie que existe entre dos muestras (Bray & Curtis, 1957). Cuando el valor de la distancia de Bray Curtis es 0, significa que las dos muestras tienen una composición semejante y cuando es 1, significa que las dos muestras tienen una composición completamente diferente (Bray & Curtis, 1957). De este modo, se generaron matrices de distancia para el conjunto de datos del núcleo sedimentario.

Existen diferentes algoritmos para la formación de conglomerados y pueden agruparse de la siguiente manera: (1) algoritmos de partición, en el que se divide el conjunto de observaciones o variables en “n” conglomerados, donde “n” es un número escogido previamente y los (2) algoritmos jerárquicos, que resultan en una jerarquía de divisiones de las muestras o variables en conglomerados, estos últimos pueden ser aglomerativos o disociativos. Para este estudio, se utilizó el método de Ward, que consiste en un algoritmo jerárquico aglomerativo, que se usa para unir elementos de modo que la varianza entre estos sea mínima, además de ser más preciso para el análisis de abundancias (Eszergár-Kiss & Caesar, 2017). Con el fin de formar grupos de profundidades, estaciones y especies de dinoquistes se realizaron dos tipos de análisis de conglomerados, uno por profundidad o por estación (modo Q) y otro por especies (modo R). Los conglomerados que se formaron fueron representados a través de dendrogramas.

Una de las consideraciones principales al hacer un análisis de conglomerados es la elección del número de estos. Por lo que hay una serie de métodos de segmentación que se utilizan para elegir el número apropiado de conglomerados y uno de los más utilizados es el método del codo (*elbow method*) en el que se minimiza la varianza intra-conglomerado y se maximiza la varianza inter-conglomerado. Esto se expresa en una gráfica cuyo eje Y consiste en la distancia promedio al centroide de cada uno de los conglomerados y cuyo eje X consiste en el número de conglomerados, de modo que, se escoge el número de conglomerados en el que la distancia promedio tiene una menor

variabilidad o, dicho de otra forma, cuando la curva muestre un cambio abrupto en la pendiente.

3.3.6.2 Análisis de escalamiento multidimensional no métrico. Es una técnica de ordenación multivariada para visualizar el nivel de similaridad de muestras individuales pertenecientes a un conjunto, dicho de otra forma, se usa para visualizar la información contenida en una matriz de distancias. El NMDS intenta representar el grado de disimilaridad, de la forma más estrecha posible, entre objetos en un espacio bidimensional de modo que se puedan reconocer patrones e interpretarlos para buscar gradientes que representen las gradientes ecológicas o geográficas, dependiendo del evento o fenómeno a analizar.

3.3.6.3 Análisis de redundancia (RDA). De acuerdo con Gauch & Gauch Jr., (1982), el análisis de correspondencias sin tendencias (DCA) se utiliza para conocer la respuesta de una especie a los diferentes valores que comprende un eje de ordenación, esta respuesta puede ser unimodal o lineal. El método de ordenación a utilizar depende del valor de la longitud del primer eje del DCA, que se mide en unidades de desviación estándar; si el valor es mayor a 4, el conjunto de datos es heterogéneo y se deberían utilizar métodos unimodales para la ordenación, tal como el análisis canónico de correspondencias (CCA); si el valor es menor a 3, el conjunto de datos es homogéneo y se deberían utilizar métodos lineales para la ordenación, tal como el análisis de redundancia (RDA) (Smilauer & Leps, 2014). El valor de la longitud del primer eje del DCA fue menor a 3 en los dos conjuntos de datos que se usaron, por lo que se optó por aplicar el RDA. Es así que el RDA se usó para extraer y resumir la variación en un conjunto de variables respuesta (especies de dinoquistes o muestras) que puede explicarse mediante un conjunto de variables explicativas (parámetros ambientales) (DeSarbo, 1981).

3.4 Obtención de resultados

3.4.1 Densidad seca aparente

Los valores de densidad seca aparente se muestran en la tabla 3.

Tabla 3*Densidad aparente seca en las submuestras del núcleo sedimentario ParP2.*

Profundidad	Masa sedimento húmedo	Masa sedimento seco	Humedad	Volumen húmedo	Densidad húmeda	DBD
Unidades	(g)	(g)	(%)	(cm³)	(g cm⁻³)	(g cm⁻³)
1	7.2830	1.4709	79.8037	6.0306	1.2077	0.2084
2	7.7329	1.8882	75.5823	6.0306	1.2823	0.2774
3	8.4503	2.1423	74.6482	6.0306	1.4012	0.3167
4	6.6771	1.6712	74.9712	6.0306	1.1072	0.2465
5	7.5174	1.8828	74.9541	6.0306	1.2465	0.2778
6	7.0665	1.6716	76.3447	6.0306	1.1718	0.2442
7	7.5183	1.8358	75.5822	6.0306	1.2467	0.2697
8	8.1681	1.9924	75.6075	6.0306	1.3544	0.2926
9	7.3001	1.7678	75.7839	6.0306	1.2105	0.2593
10	6.6261	1.5779	76.1866	6.0306	1.0987	0.2308
11	7.0548	1.7117	75.7371	6.0306	1.1698	0.2512
12	7.5381	1.9106	74.6541	6.0306	1.2500	0.2824
13	7.7440	1.8824	75.6921	6.0306	1.2841	0.2763
14	7.1401	1.7401	75.6292	6.0306	1.1840	0.2555
15	7.6221	1.9047	75.0108	6.0306	1.2639	0.2809
16	7.4046	1.8939	74.4227	6.0306	1.2278	0.2804
17	7.3575	2.2078	69.9925	6.0306	1.2200	0.3346
18	7.5458	2.2589	70.0641	6.0306	1.2513	0.3423
19	8.4437	2.4631	70.8291	6.0306	1.4001	0.3719
20	7.8331	2.0933	73.2762	6.0306	1.2989	0.3120
21	9.2529	2.5227	72.7361	6.0306	1.5343	0.3772
22	8.0533	2.1914	72.7888	6.0306	1.3354	0.3276
23	7.5904	2.1630	71.5035	6.0306	1.2586	0.3255
24	8.4537	2.4948	70.4887	6.0306	1.4018	0.3773
25	8.1892	2.4881	69.6173	6.0306	1.3579	0.3777
26	8.0304	2.4107	69.9803	6.0306	1.3316	0.3654
27	8.1379	2.5483	68.6860	6.0306	1.3494	0.3884
28	8.5371	2.7186	68.1555	6.0306	1.4156	0.4152
29	8.2864	2.6467	68.0597	6.0306	1.3741	0.4044
30	9.1303	2.8865	68.3855	6.0306	1.5140	0.4405
31	8.2660	2.6293	68.1914	6.0306	1.3707	0.4015
32	9.8642	3.0967	68.6067	6.0306	1.6357	0.4721
33	7.3096	2.2886	68.6905	6.0306	1.2121	0.3488
34	8.1935	2.5918	68.3676	6.0306	1.3587	0.3955
35	8.4143	2.6841	68.1007	6.0306	1.3953	0.4101

Fuente: elaboración propia.

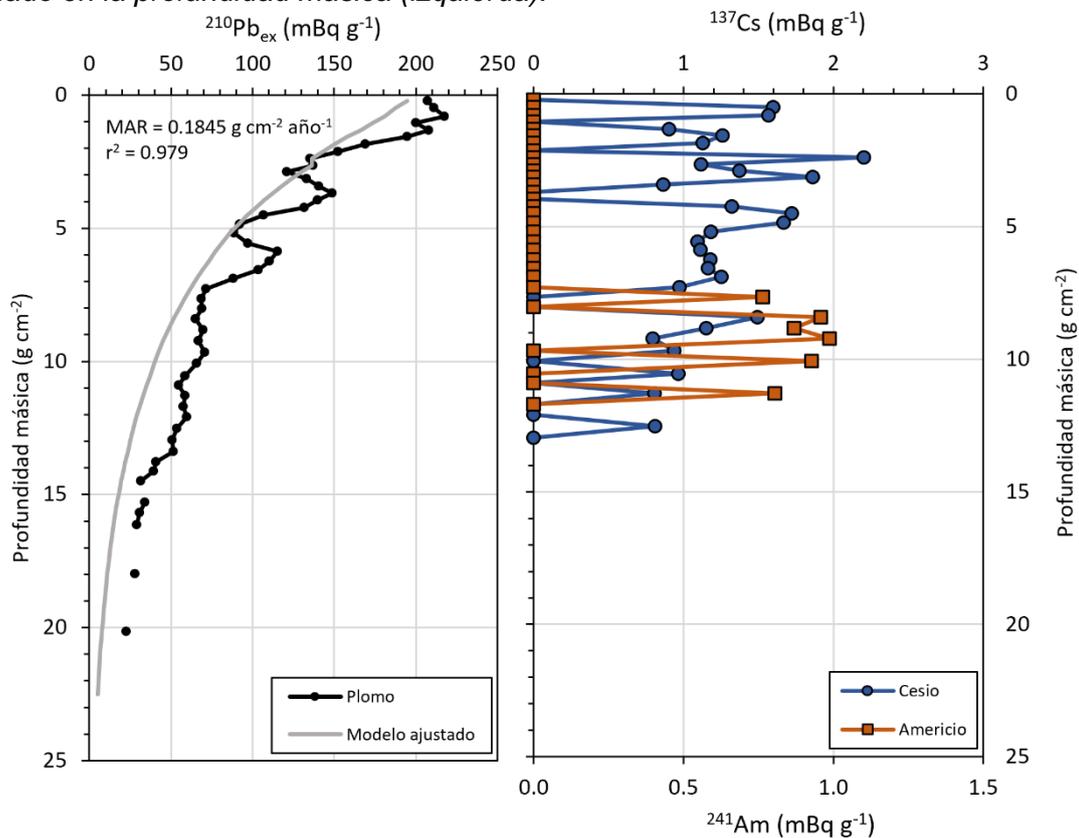
De acuerdo con los resultados, el valor del DBD presenta un valor mínimo de 0.2084 en la superficie y un valor máximo de 0.4721 a una profundidad de 32 cm, además se observa que hay un incremento en el DBD a medida que aumenta la profundidad en el núcleo sedimentario.

3.4.2 Geocronología

Se graficaron los perfiles de decaimiento de los radioisótopos de ^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{241}Am (figura 23) y el modelo de edad (figura 24).

Figura 23

Perfiles verticales de los radioisótopos $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (izquierda), ^{137}Cs y ^{241}Am en función a la profundidad másica (derecha). Se señala la curva de ajuste del modelo CFCS para $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ basado en la profundidad másica (izquierda).



Fuente: elaboración propia

Estos datos se analizaron con el modelo CFCS, basado en la profundidad másica, es decir en la masa acumulada con la profundidad. De acuerdo con el modelo, la tasa de acumulación de sedimentos fue $0.1845 \pm 0.012 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$, correspondiendo a una tasa de sedimentación promedio de $0.5083 \pm 0.033 \text{ cm año}^{-1}$. Los datos que ingresaron al modelo se presentan en el Anexo 2.

El modelo produjo los siguientes datos (tabla 4):

Tabla 4

Resultados del modelo de edad CFCS (constant flux, constant supply) en el núcleo sedimentario.

Profundidad superficial – media (cm)	Profundidad másica (g cm ⁻²)	Edad	Error negativo	Error positivo
-	-	2020.95	0	0
0.5	0.21	2019.82	0.047	0.046
1.5	0.49	2018.32	0.155	0.156
2.5	0.80	2016.60	0.289	0.289
3.5	1.05	2015.27	0.415	0.415
4.5	1.33	2013.76	0.533	0.533
5.5	1.57	2012.44	0.65	0.649
6.5	1.84	2010.97	0.765	0.765
7.5	2.13	2009.39	0.891	0.891
8.5	2.39	2007.98	0.891	0.891
8.5	-	2006.58	1.015	1.015
9.5	2.88	2005.33	1.125	1.125
10.5	3.13	2003.97	1.233	1.232
11.5	3.42	2002.43	1.353	1.352
12.5	3.69	2000.94	1.478	1.478
13.5	3.95	1999.55	1.597	1.597
14.5	4.23	1998.03	1.717	1.717
15.5	4.51	1996.51	1.843	1.844
16.5	4.84	1994.70	1.981	1.981
17.5	5.19	1992.84	2.133	2.132
18.5	5.56	1990.83	2.292	2.293
19.5	5.87	1989.13	2.446	2.447
20.5	6.25	1987.09	2.601	2.601
21.5	6.57	1985.32	2.759	2.759
22.5	6.90	1983.55	2.906	2.905
23.5	7.28	1981.51	3.063	3.063
24.5	7.66	1979.46	3.232	3.233
25.5	8.02	1977.48	3.399	3.399
26.5	8.41	1975.37	3.567	3.568
27.5	8.82	1973.12	3.748	3.749
28.5	9.23	1970.93	3.932	3.932
29.5	9.67	1968.54	4.121	4.121
30.5	10.07	1966.37	4.31	4.31
31.5	10.54	1963.81	4.506	4.506
32.5	10.89	1961.92	4.69	4.69

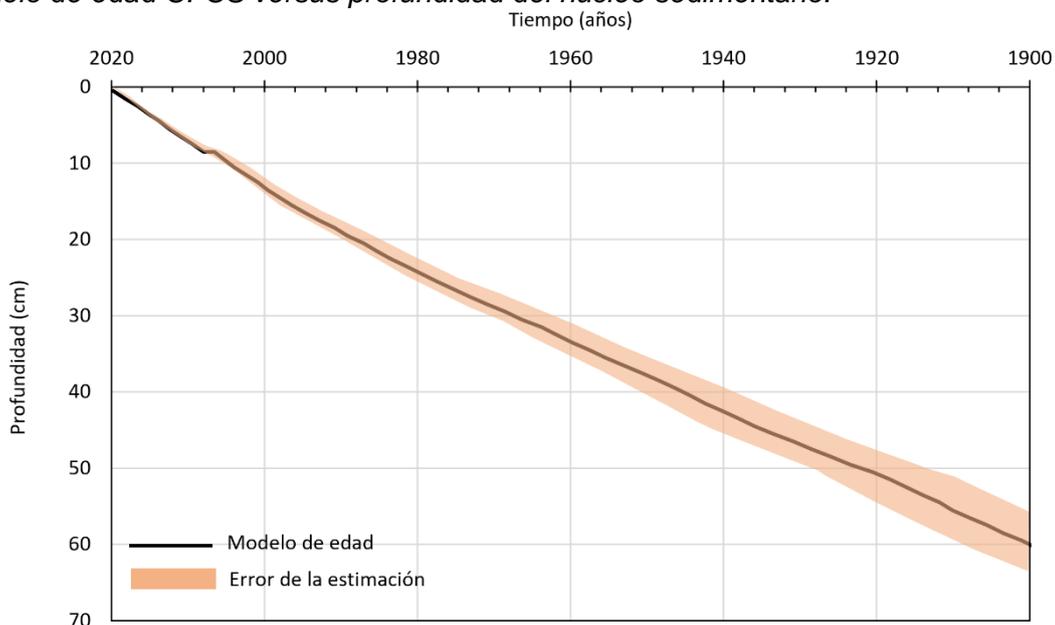
33.5	11.29	1959.77	4.857	4.857
34.5	11.70	1957.55	5.037	5.038
35.5	12.09	1955.40	5.218	5.219
36.5	12.53	1953.06	5.404	5.404
37.5	12.95	1950.74	5.597	5.597
38.5	13.39	1948.39	5.79	5.79
39.5	13.77	1946.32	5.973	5.973
40.5	14.13	1944.35	6.14	6.14
41.5	14.50	1942.36	6.304	6.304
42.5	14.91	1940.14	6.478	6.479
43.5	15.29	1938.08	6.656	6.655
44.5	15.69	1935.92	6.83	6.83
45.5	16.13	1933.51	7.019	7.02
46.5	16.61	1930.92	7.225	7.226
47.5	17.07	1928.44	7.436	7.435
48.5	17.53	1925.94	7.642	7.641
49.5	17.99	1923.47	7.847	7.847
50.5	18.53	1920.53	8.071	8.072
51.5	18.96	1918.16	8.291	8.291
52.5	19.36	1916.02	8.477	8.477
53.5	19.73	1914.00	8.65	8.649
54.5	20.14	1911.79	8.825	8.825
55.5	20.46	1910.06	9.0229	9.022
56.5	20.86	1907.87	9.2096	9.2084
57.5	21.29	1905.54	9.3963	9.3948
58.5	21.69	1903.41	9.583	9.5812
59.5	22.13	1901.00	9.7697	9.7676
60.5	22.51	1898.95	9.9556	9.9678

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados se representaron gráficamente en la figura 24.

Figura 24

Modelo de edad CFCS versus profundidad del núcleo sedimentario.



Fuente: elaboración propia

Los resultados a detalle se pueden observar en el Anexo 3: Modelo de edad – CFCS (*constant flux, constant supply*).

3.4.3 Dinoquistes

3.4.3.1. Abundancia de dinoquistes. Se hizo el análisis palinológico en 35 submuestras del núcleo sedimentario ParP2, que fue extraído en la bahía de Paracas, Ica. Este análisis reveló la ocurrencia de 29 especies de dinoquistes y una abundancia promedio de $15\,382 \pm 1226$ dinoquistes gramo^{-1} (Anexo 4) (tabla 5). Luego de aplicar el procedimiento de selección de especies con una abundancia porcentual mayor al 1% (ver ‘Cálculos y aplicaciones’), se obtuvo una matriz reducida de 18 especies (tabla 6).

Tabla 5

Dinoquistes encontrados en el núcleo ParP2 clasificados por especie y género. Se indica el grupo trófico al que pertenecen las especies o géneros, de acuerdo con la literatura consultada.

Género	Especie	Grupo trófico
<i>Archaeoperidinium</i>	spp.	Heterótrofo (Niechwedowicz et al., 2021)
<i>Bitectatodinium</i>	spp.	Autótrofo (Zonneveld et al., 2022)
<i>Brigantedinium</i>	<i>cariacoense</i> Wall, 1967; <i>simplex</i> Wall, 1965; spp.	Heterótrofo (Niechwedowicz et al., 2021)
<i>Echinidinium</i>	spp.	Heterótrofo (Niechwedowicz et al., 2021)
<i>Impagidinium</i>	spp.	Autótrofo (Zonneveld et al., 2022)
<i>Lingulodinium</i>	<i>machaerophorum</i> (Deflandre and Cookson 1955) Wall 1967.	Autótrofo (Zonneveld et al., 2022)
<i>Nematosphaeropsis</i>	spp.	Autótrofo (Zonneveld et al., 2022)
<i>Operculodinium</i>	spp.	Autótrofo (Zonneveld et al., 2022)
Quistes de <i>Polykrikos</i>	<i>kofoidii</i> Chatton 1914; <i>schwartzii</i> (Butschli 1873) Matsuoka 2009; sp 1.	Heterótrofo (Niechwedowicz et al., 2021)
<i>Protoperidinium</i>	<i>americanum</i> (Gran and Braarud) Balech 1974	Heterótrofo (Niechwedowicz et al., 2021)
<i>Quinquecuspis</i>	<i>concreta</i> (Reid 1977) Harland 1977.	Heterótrofo (Niechwedowicz et al., 2021)
<i>Selenopemphix</i>	<i>nephroides</i> (Benedek 1972) Benedek and Sarjeant, 1981; <i>quanta</i> (Bradford 1975) Matsuoka 1985; <i>undulata</i> Verleye et al., 2011.	Heterótrofo (Niechwedowicz et al., 2021)
<i>Spiniferites</i>	<i>delicatus</i> Reid 1974; <i>membranaceus</i> (Rossignol 1964) Sarjeant 1970; <i>pachydermus</i> (Rossignol 1964) Reid 1974; <i>ramosus</i> (Ehrenberg 1838) Mantell 1854; sp. 1; sp. 2; spp.	Autótrofo (Zonneveld et al., 2022)
<i>Stelladinium</i>	<i>stellatum</i> (Wall) Reid 1977.	Heterótrofo (Niechwedowicz et al., 2021)

<i>Trinovantedinium</i>	<i>applanatum</i> (Bradford 1977) Bujak et Davies 1983.	Heterótrofo (Niechwedowicz et al., 2021)
<i>Votadinium</i>	<i>calvum</i> Reid 1977; <i>spinosum</i> Reid 1977.	Heterótrofo (Niechwedowicz et al., 2021)

Fuente: elaboración propia.

La composición de los dinoquistes estuvo dominada por *Echinidinium* spp. (240 228 dinoquistes gramo^{-1} ~ 39.0%), *Quinquecuspis concreta* (65 000 dinoquistes gramo^{-1} ~ 10.5%), y *Spiniferites* sp. 1 (50 635 dinoquistes gramo^{-1} ~ 8.3%). Otras especies, con abundancias porcentuales mayores al 4%, fueron los quistes de *Polykrikos kofoidii* (39 313 dinoquistes gramo^{-1} ~ 6.4%), *Polykrikos schwartzii* (28 311 dinoquistes gramo^{-1} ~ 4.6%), *Spiniferites pachydermus* (21 684 dinoquistes gramo^{-1} ~ 3.5%) y *Spiniferites ramosus* (18 565 dinoquistes gramo^{-1} ~ 3.0%). Las especies mencionadas representaron el 75% de la abundancia total (figura 25). Las especies restantes, que presentan una abundancia porcentual entre el 1% y 4% son: *Archaeoperidinium* spp., *Brigantedinium* spp., *Impagidinium* spp., *Lingulodinium machaerophorum*, *Protoperidinium americanum*, *Selenopemphix nephroides*, *Spiniferites membranaceus*, *Spiniferites pachydermus*, *Spiniferites ramosus*, *Spiniferites* sp. 2, *Stelladinium stellatum*, *Votadinium calvum* y *Votadinium spinosum*.

Tabla 6

Abundancia de dinoquistes en su totalidad y por especie del núcleo sedimentario (matriz reducida, ver 'Tratamiento de datos').

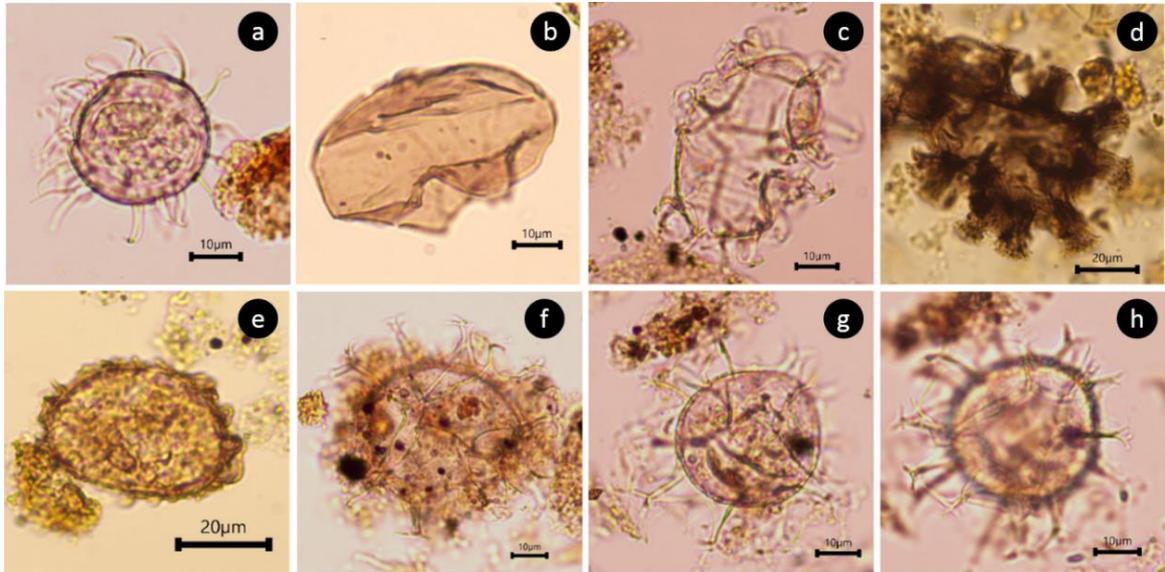
Género	Abundancia (dinoquistes g ⁻¹)	<i>Archaeoperidinium</i> spp.	<i>Brigantedinium simplex</i>	<i>Echinidinium</i> spp.	<i>Impagidinium</i> spp.	<i>Lingulodinium machaerophorum</i>	Quistes de <i>Polykrikos kofoidii</i>	Quistes de <i>Polykrikos schwartzii</i>	<i>Protoperidinium americanum</i>	<i>Quinquecupis concreta</i>	<i>Selenopemphix nephroides</i>	<i>Spiniferites membranaceus</i>	<i>Spiniferites pachydermus</i>	<i>Spiniferites</i> sp. 1	<i>Spiniferites ramosus</i>	<i>Spiniferites</i> sp. 2	<i>Stelladinium stellatum</i>	<i>Votadinium calvum</i>	<i>Votadinium spinosum</i>	Abundancia de autótrofos (dinoquistes g ⁻¹)	Abundancia de heterótrofos (dinoquistes g ⁻¹)
1	18 779	475	272	10 000	0	113	1131	792	226	973	91	0	23	0	0	701	1901	249	249	1629	17 603
2	25 338	578	193	8382	96	0	1541	2601	1349	2601	482	0	0	867	1445	0	0	3565	1060	2698	22 737
3	20 690	958	527	7902	383	144	1724	1485	671	1676	335	0	383	1054	814	48	1341	48	527	2921	17 768
4	15 438	152	152	4862	61	30	1945	1185	243	638	152	30	0	547	152	30	4711	122	243	912	14 527
5	13 627	161	64	3802	64	0	1514	1063	1031	2126	226	0	0	0	0	1450	838	32	258	2126	11 566
6	17 155	475	45	5500	136	23	770	2512	249	2806	136	91	475	1652	543	339	566	113	204	3463	13 738
7	21 793	368	184	6872	257	0	1286	882	478	4153	37	294	404	2977	1323	37	992	257	294	5623	16 170
8	21 612	237	0	5769	514	0	1343	751	79	2726	158	593	435	5373	1462	395	790	119	316	9048	12 564
9	21 470	369	164	5296	739	82	862	534	369	3777	82	534	575	3202	1026	411	1560	287	534	7061	14 409
10	21 217	638	23	5652	228	0	1572	273	23	3988	273	0	2735	1778	160	1960	1139	182	205	6905	14 334
11	30 098	317	144	5127	720	0	1584	662	144	4810	202	950	4407	6941	979	144	1526	173	259	14602	15 495
12	24 278	401	0	5618	482	0	1003	441	241	3692	120	361	1284	6140	1685	522	1003	201	401	10875	13 443
13	20 551	551	103	5060	379	0	1136	379	34	3133	138	138	1205	4028	1274	551	757	275	344	8468	12 117
14	16 044	203	0	5522	203	29	930	320	610	3430	87	203	349	1976	698	29	610	87	320	3633	12 585

15	21 260	964	28	7389	168	28	1760	349	14	3394	196	0	2389	1592	237	922	922	70	279	5559	15 714
16	31 909	142	142	13 604	499	71	1781	285	499	4345	285	641	855	3561	2066	71	1496	214	712	8120	23 789
17	8808	277	69	3482	323	23	461	461	138	899	208	0	115	323	438	0	484	69	184	1937	6894
18	6939	158	32	2586	142	63	505	284	173	804	95	0	0	788	284	237	189	95	32	1908	5078
19	12 308	536	167	3818	167	17	938	586	50	1876	435	0	603	1055	151	352	603	117	218	2646	9679
20	13 344	1140	56	4859	262	0	953	187	93	1065	374	0	1701	0	206	878	430	75	280	3215	10 130
21	10 941	335	167	3740	372	74	1116	260	74	856	130	0	819	1209	167	186	465	93	205	3070	7889
22	14 933	722	197	6860	361	66	1116	689	591	1149	131	33	0	1149	427	0	427	197	197	2297	12 636
23	5970	541	87	2492	58	29	415	599	97	628	68	0	58	377	0	97	145	10	29	686	5284
24	16 785	313	418	9998	131	26	1227	1488	392	966	78	0	0	183	261	0	339	26	157	783	16 001
25	13 323	70	0	9766	0	0	419	767	279	349	209	0	0	0	0	628	140	70	70	1116	12 207
26	14 314	592	511	8422	81	27	592	1345	296	726	135	0	0	377	242	0	377	81	108	996	13 346
27	22 239	1132	740	11 141	435	131	1480	783	174	1306	653	0	783	914	435	44	218	174	174	3308	19 018
28	7901	236	298	3613	141	0	597	660	377	487	126	0	31	236	157	141	31	16	31	974	6958
29	10 432	726	264	4556	99	0	594	462	99	726	132	0	363	891	330	132	132	66	99	2212	8221
30	11 604	457	0	5517	114	76	761	304	723	266	342	0	152	0	0	1408	0	38	38	2397	9245
31	8604	280	336	3279	168	28	504	280	56	589	56	448	336	448	336	56	56	28	336	2438	6166
32	6724	604	412	2223	110	27	329	165	0	412	0	357	192	494	384	0	137	0	329	1949	4776
33	4620	175	175	1082	146	29	205	117	175	351	58	234	292	380	263	0	29	29	439	1608	3012
34	8284	614	0	2884	307	61	859	184	61	614	0	307	368	123	552	61	0	123	245	2209	6075
35	5372	136	34	1802	51	51	510	544	255	306	34	0	0	0	0	425	17	51	0	799	4573
40	10 646	100	434	6308	33	0	667	1035	33	367	300	0	0	0	0	701	0	200	67	1034	9611
45	13 336	1436	274	8686	0	0	821	684	137	137	205	0	0	0	0	479	0	68	68	684	12 652
50	12 544	1499	237	7613	0	0	592	434	118	789	118	0	0	0	0	237	0	0	0	828	11 716
55	17 851	2550	268	11 375	0	34	604	638	101	604	101	134	0	0	67	168	0	168	34	872	16 979
60	14 942	2626	271	7769	0	54	1164	839	81	460	108	0	352	0	0	81	54	27	108	1272	13 670

Fuente: elaboración propia.

Figura 25

Fotografías de dinoquistes encontradas en el núcleo sedimentario ParP2, extraído en la bahía de Paracas, en microscopio de luz transmitida. a) *Echinidinium* spp., b) *Quinquecuspis concreta*, c) *Spiniferites* sp., d) Quistes de *Polykrikos kofoidii*, e) *Polykrikos schwartzii*, f) *Spiniferites pachydermus*, g) *Spiniferites ramosus*, h) *Spiniferites ramosus*.



Fuente: elaboración propia.

Se hizo una relación de las especies encontradas en el núcleo sedimentario (tabla 7), a partir de la cual se observa que las especies más abundantes observadas en el núcleo sedimentario son las especies heterótrofas *Echinidinium* spp. y *Quinquecuspis concreta* y le siguen en abundancia las especies de dinoquistes *Spiniferites* sp. 1, quistes de *Polykrikos kofoidii* y *Polykrikos schwartzii*.

Tabla 7

Ocurrencia de especies de dinoquistes en las muestras del núcleo sedimentario ParP2. Los números corresponden al ranking de las especies por abundancia en el núcleo sedimentario.

	<i>Archaeoperidinium</i> spp.	<i>Brigantedinium</i> simplex	<i>Echinidinium</i> spp.	<i>Impagidinium</i> spp.	<i>Lingulodinium</i> machaerophorum	Quistes de <i>Polykrikos</i> kofoidii	Quistes de <i>Polykrikos</i> schwartzii	<i>Protoperidinium</i> americanum	<i>Quinquecupis</i> concreta	<i>Selenopemphix</i> nephroides	<i>Spiniferites</i> membranaceus	<i>Spiniferites</i> pachydermus	<i>Spiniferites</i> ramosus	<i>Spiniferites</i> sp. 1	<i>Spiniferites</i> sp. 2	<i>Stelladinium</i> stellatum	<i>Votadinium</i> calvum	<i>Votadinium</i> spinosum
Núcleo sedimentario	9	16	1	13	18	4	5	11	2	15	17	7	8	3	10	6	14	12

Fuente: elaboración propia.

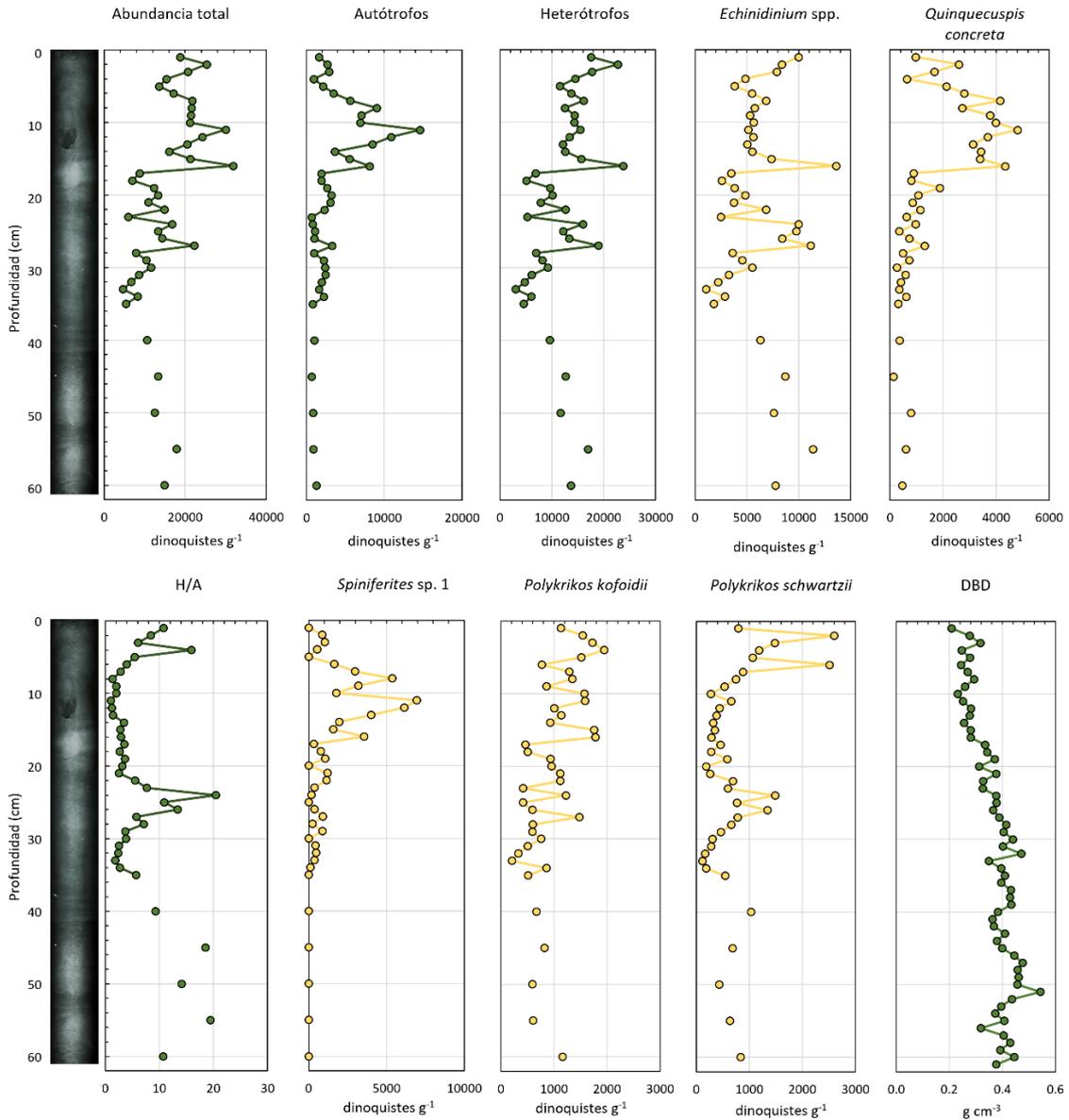
En cuanto a las series de tiempo de las abundancias de dinoquistes más importantes, se encontró una menor abundancia de dinoquistes en las muestras más antiguas, no obstante, existe una tendencia creciente en la abundancia y episodios de súbitos incrementos. Por ejemplo, desde 1960, que, según el modelo de edad, corresponde a una profundidad de 35 cm (figura 26), se observó un incremento en la abundancia de dinoquistes, este comportamiento fue identificado en la abundancia de las especies *Impagidinium* spp., quistes de *P. kofoidii* y *Echinidinium* spp.

Desde 1972, se observa mayor variabilidad en la abundancia total de dinoquistes y la abundancia de dinoquistes heterótrofos (*Echinidinium* spp., quistes de *P. kofoidii*, quistes de *P. schwartzii*), y la relación H/A. A partir de 1976, se observó un pico en la abundancia y una mayor variabilidad, entre ellas las especies *Echinidinium* spp., quistes de *P. kofoidii*, quistes de *P. schwartzii* e *Impagidinium* spp., otras presentaron un incremento gradual, tal como *Q. concreta* y *Spiniferites* sp. 1.

En 1997, según el modelo de edad, corresponde a una profundidad entre 15-16 cm, se observó un cambio en los patrones, puesto que la abundancia de autótrofos se incrementó y mostró una mayor variabilidad y la abundancia de dinoquistes heterótrofos se reduce y muestra una menor variabilidad. Además, se encontraron los menores valores en la abundancia de dinoquistes totales y un incremento pronunciado en la abundancia de todas las especies, mayor variabilidad que en cualquier otro periodo analizado, y una tendencia creciente de las especies *Echinidinium* spp. y *Polykrikos schwartzii*. Las series de tiempo de las abundancias totales y relativas de la comunidad, conforme al fechado geocronológico, se muestran en la figura 27 y figura 28.

Figura 26

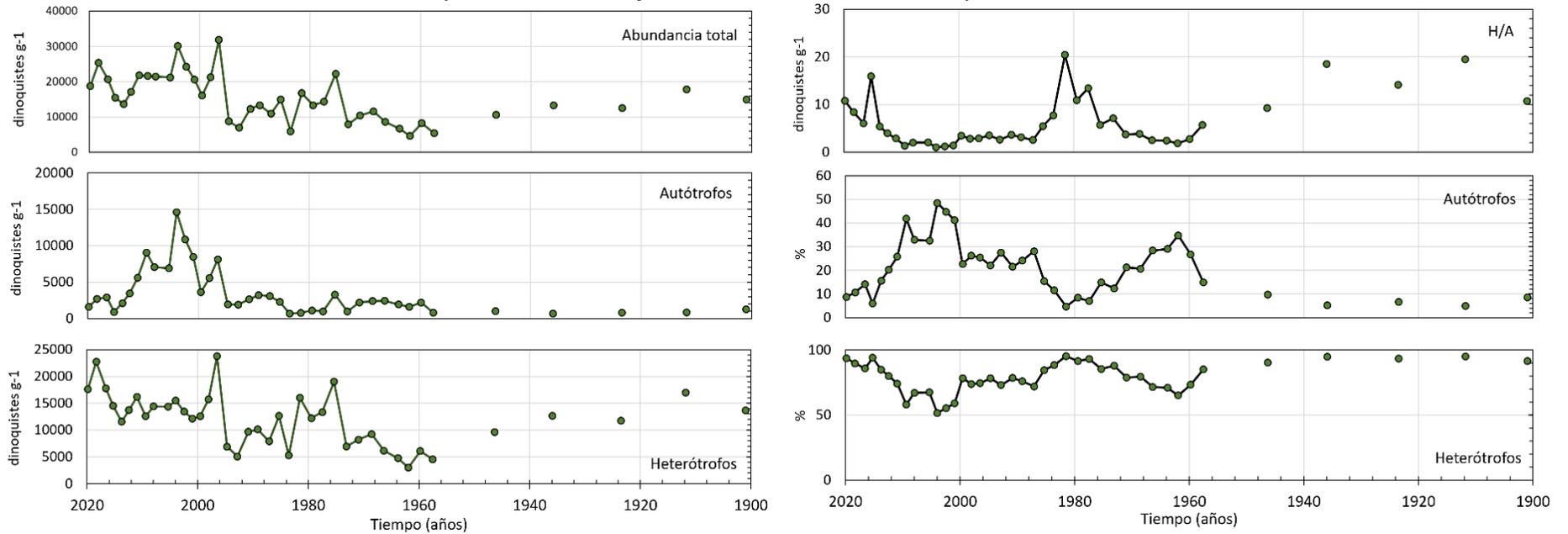
Perfiles de abundancia de los dinoquistes y de especies mayor al 4% en función a la profundidad a) Abundancia total, b) Heterótrofos c) Autótrofos, d) *Echinidinium* spp., e) *Quinquecuspis concreta*, f) *Spiniferites* sp.1 g) quistes de *Polykrikos kofoidii*, h) quistes de *Polykrikos schwartzii*, i) DBD (densidad seca aparente).



Fuente: elaboración propia.

Figura 27

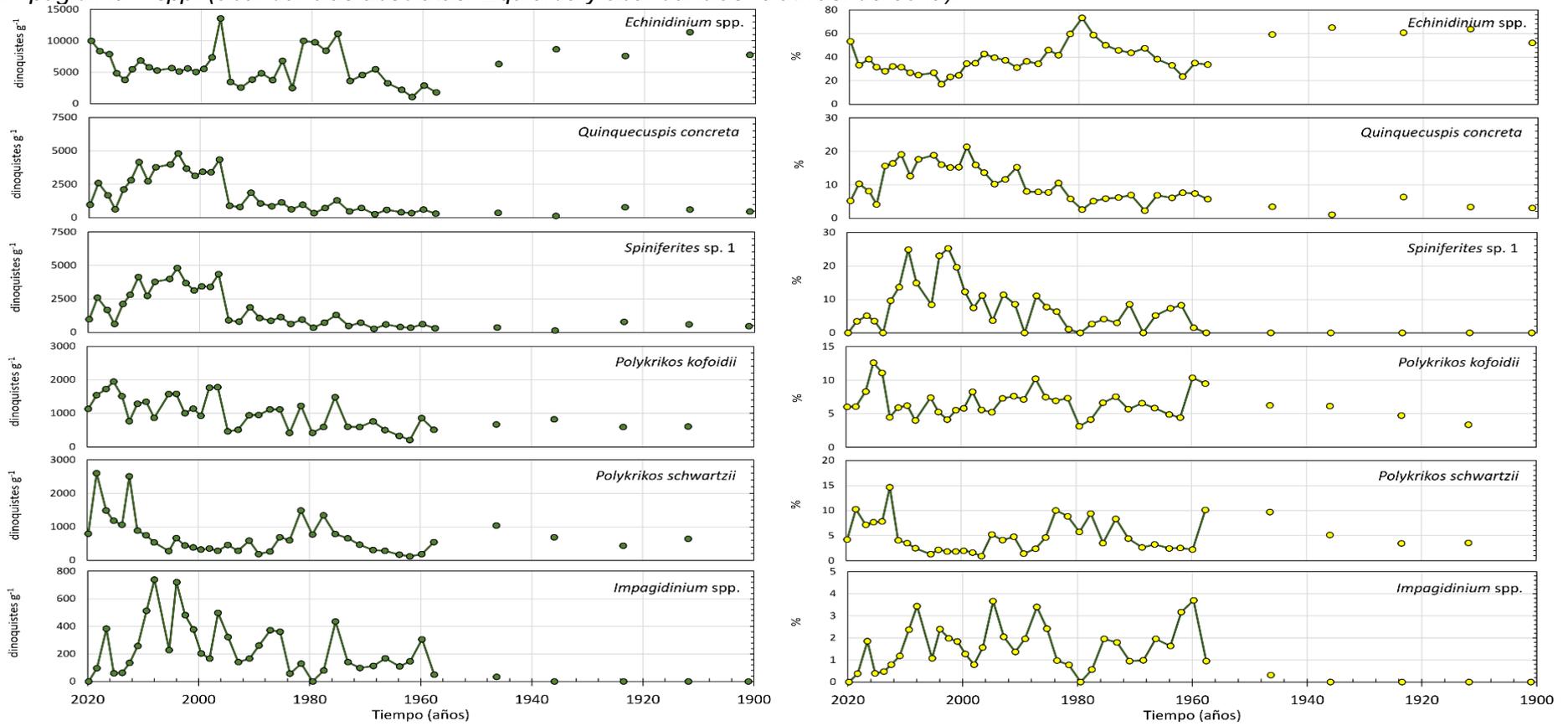
Series de tiempo de la abundancia total de dinoquistes, abundancia total de dinoquistes autótrofos, abundancia total de dinoquistes heterótrofos, relación H/A, abundancia relativa de dinoquistes autótrofos y abundancia relativa de dinoquistes heterótrofos.



Fuente: elaboración propia.

Figura 28

Series de tiempo de la abundancia de especies de dinoquistes más importantes que se obtuvieron de la matriz reducida de especies del núcleo sedimentario: *Echinidinium* spp., *Quinquecuspis concreta*, *Spiniferites* sp. 1, quistes de *Polykrikos kofoidii*, quistes de *Polykrikos schwartzii*, *Impagidinium* spp. (abundancias absolutas: izquierda y abundancias relativas: derecha).



Fuente: elaboración propia.

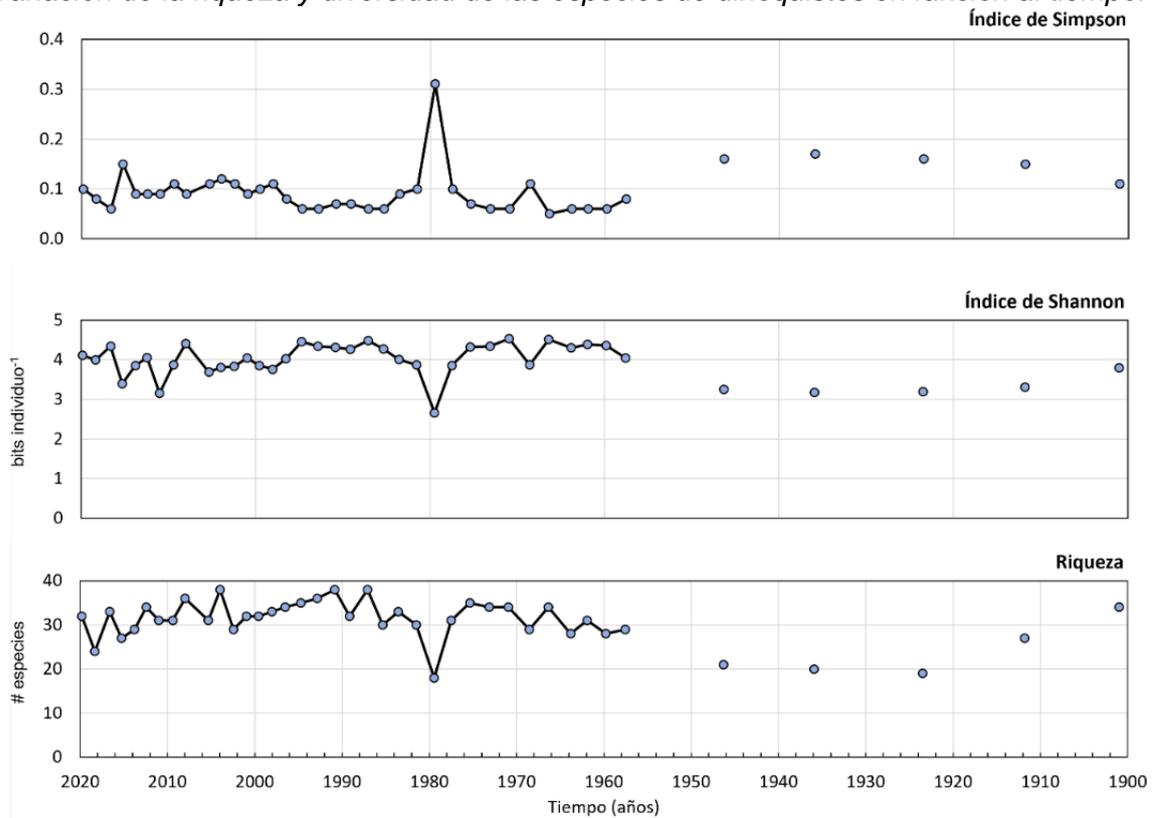
También se hizo el análisis de las abundancias relativas de las mismas especies y destacan episodios de máximas abundancias, tal como se puede observar en 1960 con la especie *Impagidinium* spp., en 1980 con la especie *Echinidinium* spp. y en el periodo 2000-2020, donde se observan máximas abundancias en las especies *Polykrikos schwartzii* y *Spiniferites* sp. 1 (figura 28).

3.4.3.2. Diversidad y riqueza. La riqueza de las especies de dinoquistes alcanzó sus máximos valores a una profundidad aproximada de 19 cm, disminuyendo hacia el tope y hacia una mayor profundidad. Asimismo, se observó una disminución abrupta a una profundidad aproximada de 24 cm, en la que se registraron 18 especies. El índice de Shannon varió entre 2.65 y 4.53 con un promedio de 4.03; y finalmente el valor del índice de Simpson varió entre 0.05 y 0.3 con un promedio 0.09. El índice de Shannon presentó un valor mínimo y el de Simpson un valor máximo a la profundidad de 24 cm (figura 29).

Además, se elaboró un gráfico de la riqueza y los índices de diversidad en función al tiempo (figura 30). A partir del comportamiento de las curvas, se observó que la riqueza varía del siguiente modo: disminución en 1900-1925, incremento en 1925-1968, disminución en 1968-1980, incremento en 1980-1990, disminución desde 1990 hasta la actualidad. Por otra parte, desde 1930, el índice de Shannon muestra una tendencia creciente y el índice de Simpson muestra una tendencia decreciente. En 1980, se identificó un episodio de caída de la riqueza y del índice de Shannon, así como un incremento en el índice de Simpson. En adelante se observó una tendencia decreciente del índice de Shannon y creciente del índice de Simpson con una baja variabilidad. En los últimos años, se mantiene esta tendencia, aunque con mayor variabilidad en los datos.

Figura 29

Variación de la riqueza y diversidad de las especies de dinoquistes en función al tiempo.

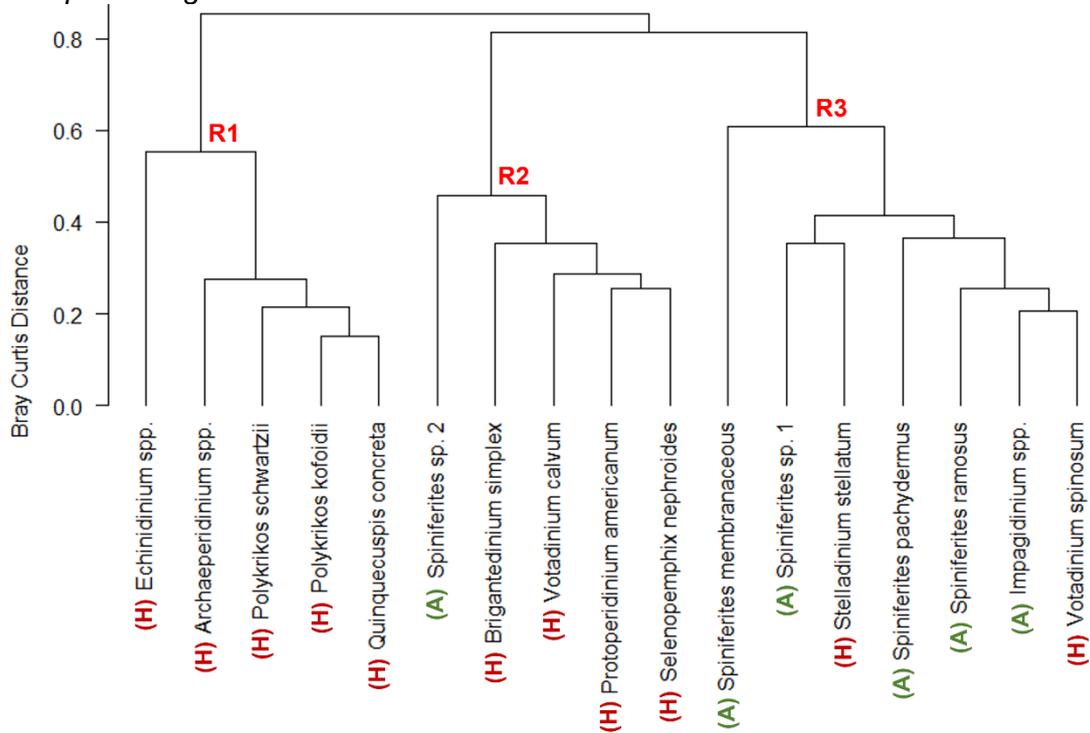


Fuente: elaboración propia.

3.4.3.3. Análisis de conglomerados. Se hizo el análisis de conglomerados en modo R. Se aplicó el “método del codo” (elbow method) para la selección del número de grupos, y como resultado se obtuvieron 3 grupos de dinoquistes, por lo que se fijó el valor de 0.6 de distancia de Bray Curtis como punto de corte. El grupo R1 está compuesto por quistes de *Polykrikos kofoidii*, *Stelladinium stellatum*, *Brigantedinium simplex*, *Votadinium spinosum*, *Quinquecuspis concreta*, *Spiniferites membranaceus*. El grupo R2 está compuesto por *Echinidinium* spp., *Archaeoperidinium* spp., *Protoperidinium americanum*, *Polykrikos schwartzii*, *Selenopemphix nephroides*. El grupo R3 está compuesto por *Spiniferites pachydermus*, *Spiniferites ramosus*, *Votadinium calvum*, *Spiniferites* sp. 1, *Spiniferites* sp. 2, *Impagidinium* spp. (figura 31).

Figura 30

Dendrograma resultante del análisis de conglomerados (modo R), de las especies de dinoquistes registradas en el núcleo sedimentario ParP2.

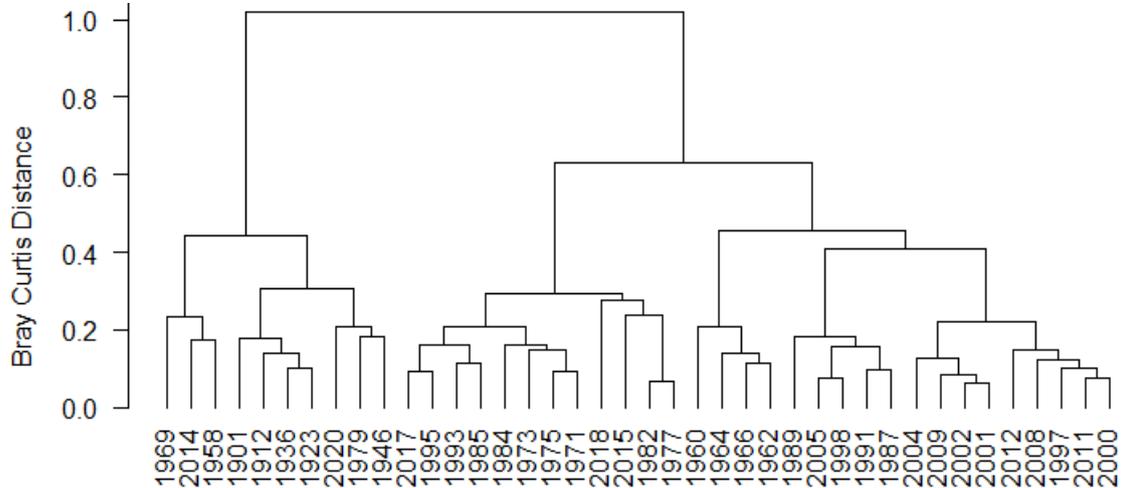


Fuente: elaboración propia.

Se procedió a realizar el análisis de conglomerados en modo Q y se aplicó el “método del codo” (*elbow method*) para la selección del número de grupos, como resultado se obtuvieron 2 grupos, por lo que usó el valor de 0.6 de distancia de Bray Curtis (figura 32).

Figura 31

Dendrograma resultante del análisis de conglomerados (modo Q), de las submuestras del núcleo sedimentario ParP2.



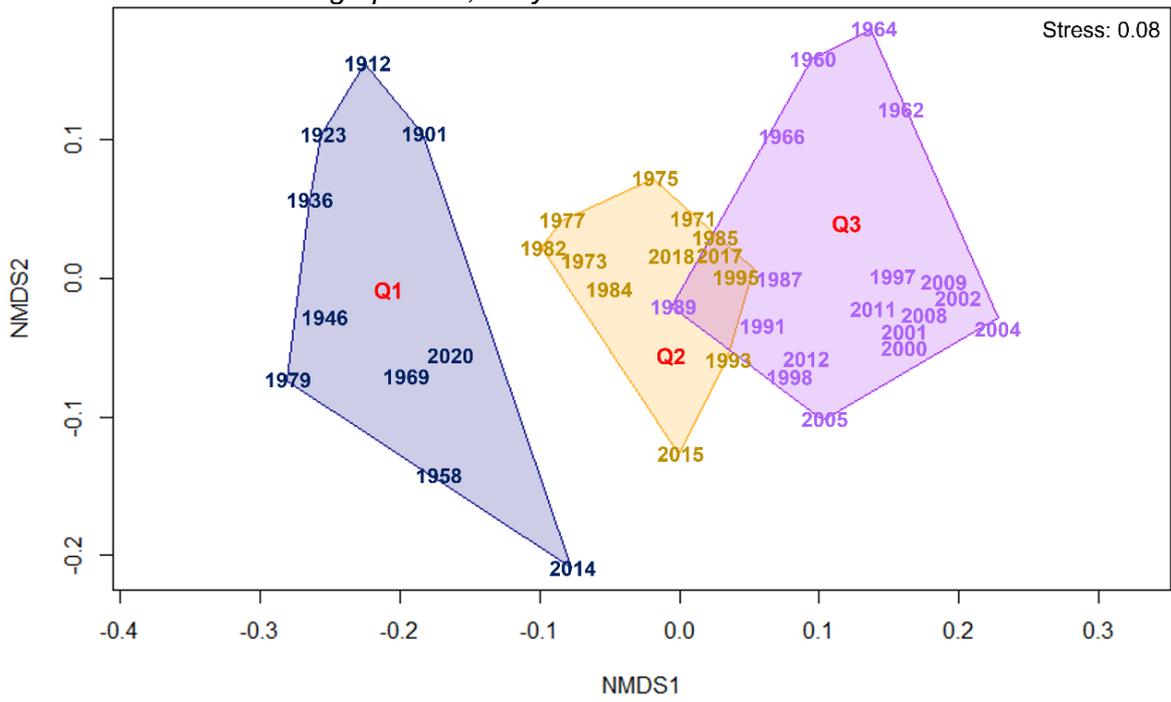
Fuente: elaboración propia.

El grupo Q1 está conformado por el intervalo más antiguo del núcleo hasta 1960, además de intervalos puntuales de la década de los 60 y 70 (1969, 1979), y también del periodo actual (2014 y 2020). El grupo Q2 consiste en intervalos de las décadas del 70 y 80, algunas fechas puntuales de la década del 90 (1993 y 1995) y el periodo reciente (2015, 2017 y 2018). Por último, el grupo Q3 comprende el periodo 1997-2012 e intervalos de la década del 60 (1960-1966) y fines de la década del 80 (1987-1989).

3.4.3.4. Análisis NMDS. Se hizo un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) con su representación gráfica (figura 33) que corrobora la presencia de los tres grupos Q1, Q2 y Q3. De acuerdo con los resultados, se resaltaron los grupos de fechas Q1 (azul), Q2 (amarillo) y Q3 (violeta). En la figura 34 se observan las series de tiempo de las variables más importantes, entre las que se encuentran la abundancia total de dinoquistes, abundancia de dinoquistes autótrofos y heterótrofos, la relación H/A y la abundancia de las especies *Echinidinium* spp., *Quinquecuspis concreta*, *Spiniferites* sp. 1, quistes de *Polykrikos kofoidii* y quistes de *Polykrikos schwartzii*. Se observó que el agrupamiento Q1 predominó durante la primera mitad del siglo XX. El agrupamiento Q3 predominó durante la década de los 60s, 90s, 2000 y en otros momentos particulares y el agrupamiento Q2 se presentó de manera más episódica y alternada con los periodos con predominio de agrupamiento Q3, entre los que se encuentran 1970-1985, 1990-1995 y 2012-2018.

Figura 32

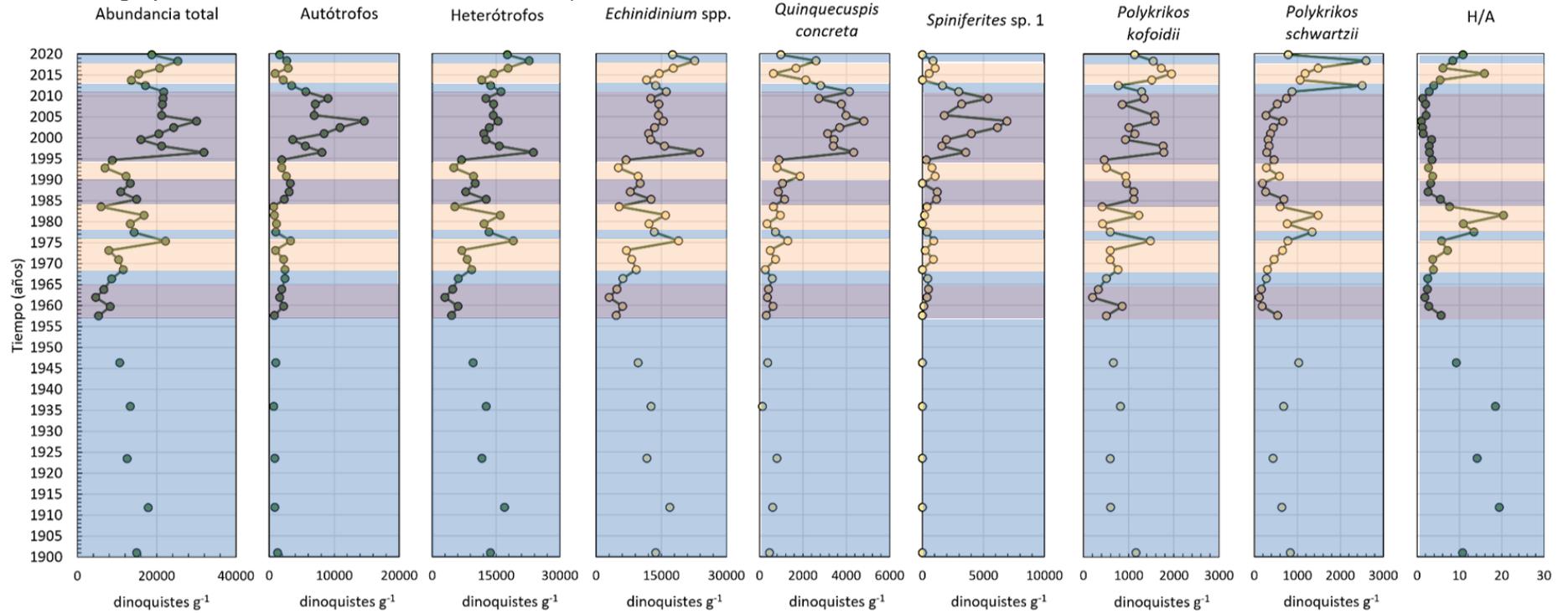
Análisis NMDS entre los grupos Q1, Q2 y Q3.



Fuente: elaboración propia.

Figura 33

Perfiles de abundancia de dinocistos y conglomerados formados en comparación con la radiografía del núcleo sedimentario ParP2 (grupo Q1: color azul, grupo Q2: color amarillo, Q3: color violeta).

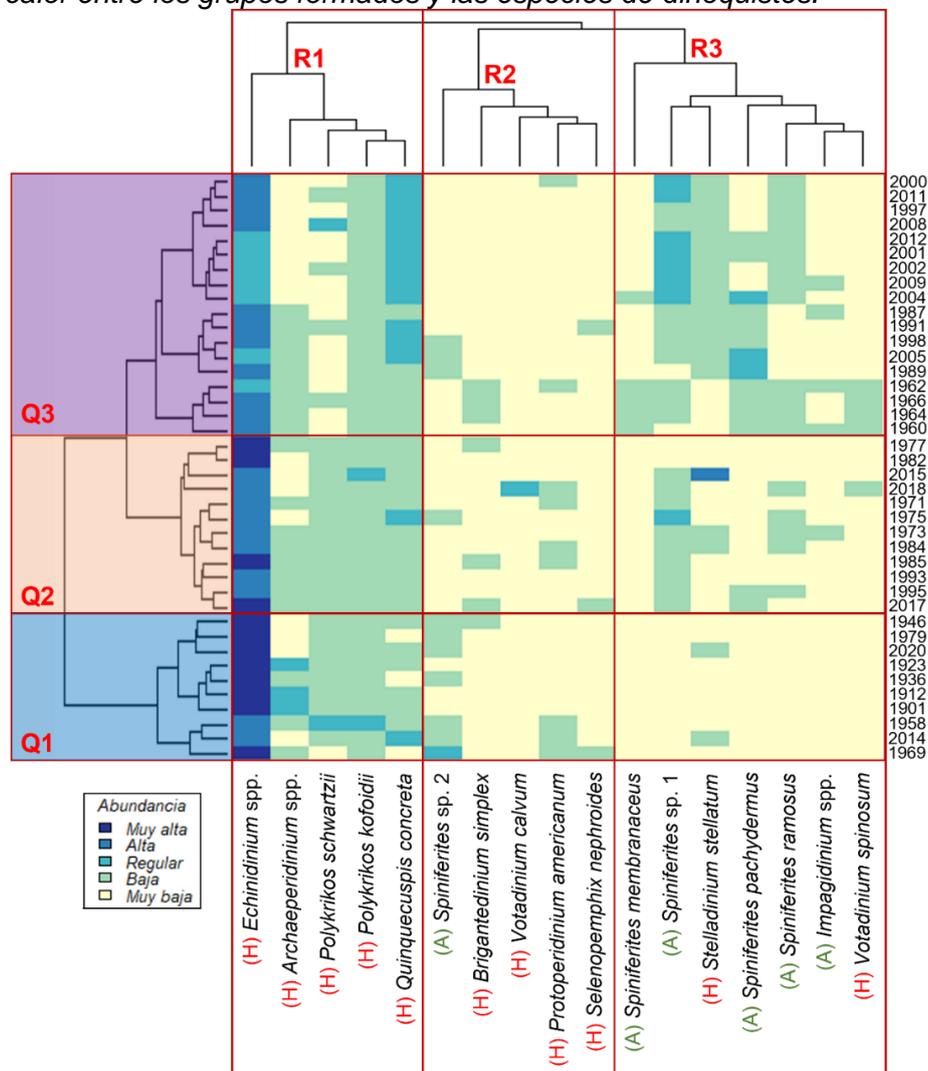


Fuente: elaboración propia.

3.4.3.5. Mapa de calor. Para la elaboración del mapa de calor se usaron los grupos resultantes que se obtuvieron de los análisis de conglomerados en modo Q y R (figura 35).

Figura 34

Mapa de calor entre los grupos formados y las especies de dinoquistes.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 35 se evidencia que las especies predominantes fueron los dinoquistes heterótrofos del grupo R1. El grupo Q1 está representado únicamente por las especies del grupo R1, a diferencia de los grupos Q2 y Q3 que son representados por el grupo R1 y en menor medida por las especies del grupo R3. Al estar presente en todos los grupos y con altas abundancias, se considera al grupo R1 como la asociación base. Los grupos R1 y R2 están compuestos mayormente por especies de dinoquistes heterótrofos y presentan mayor afinidad ecológica. Por otra parte, las especies de dinoquistes del grupo R2

presentan una muy baja abundancia en todos los grupos analizados. El grupo R3 consiste principalmente en especies de dinoquistes autótrofos y es la principal asociación que explica la diferencia entre los grupos Q1, Q2 y Q3

A nivel específico, las especies de dinoquistes que destacan en el grupo R1 son *Echinidinium* spp., *Quinquecuspis concreta*, quistes de *Polykrikos kofoidii*. En el grupo R3, las especies que destacan son *Spiniferites* sp. 1, *Spiniferites pachydermus*, *Spiniferites ramosus* y el dinoquiste heterótrofo *Stelladinium stellatum*, cabe mencionar que solo destacan en el grupo Q3.

3.4.3.6. Variación de proxys geoquímicos. A lo largo del núcleo sedimentario (tabla 8) se observó que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ varían entre -19.8‰ y -19.0‰, siendo el mínimo valor registrado a una profundidad de 14 cm. Por su parte, los valores de $\delta^{15}\text{N}$ variaron entre 7.61‰ y 9.62‰, Además, los porcentajes del carbono orgánico total (COT) y del nitrógeno total (NT) variaron de 2.62% a 5.83% y de 0.33% a 0.87%, respectivamente, ambos parámetros presentaron una disminución abrupta a una profundidad de 17 y 18 cm en el núcleo sedimentario a sus mínimos valores.

Tabla 8*Datos de proxys geoquímicos de muestras del núcleo ParP2.*

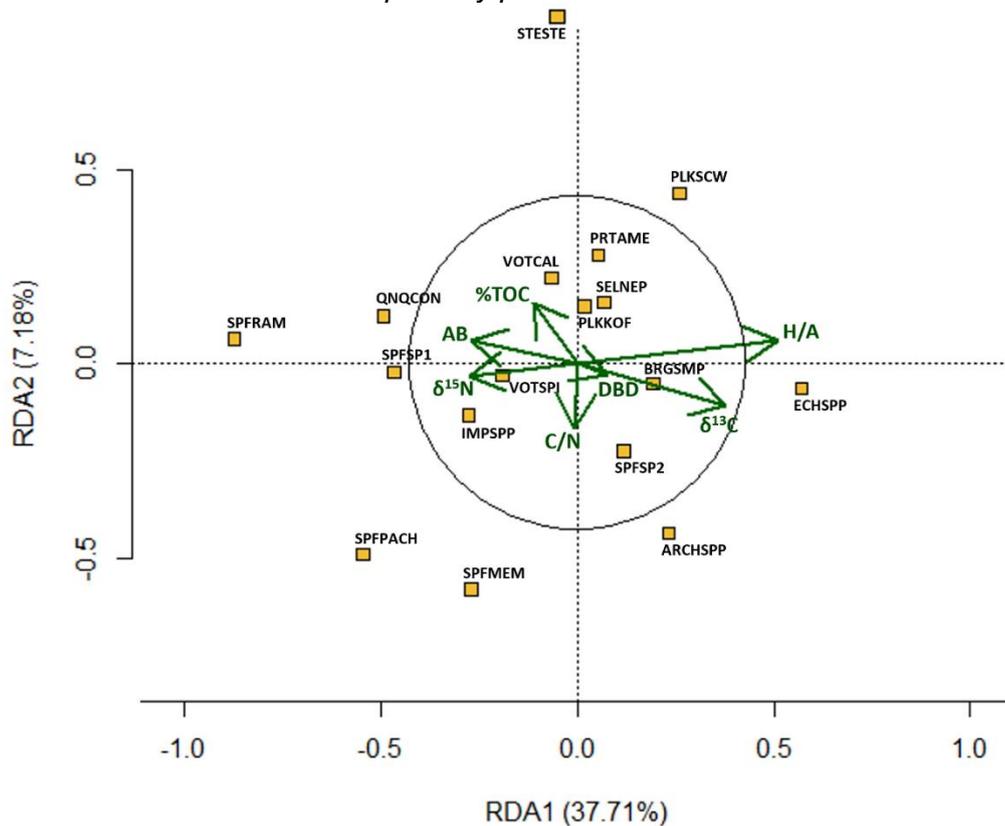
Profundidad (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	%COT	%NT	C/N
0 - 1	-19.0905	8.8904	5.6754	0.8246	6.8827
1 - 2	-19.2755	8.4744	5.8365	0.8696	6.7115
2 - 3	-19.3975	8.4284	5.6459	0.8330	6.7781
3 - 4	-19.4565	8.3974	5.0615	0.7298	6.9351
4 - 5	-19.3065	8.2004	4.6836	0.6353	7.3727
5 - 6	-19.5225	8.0404	4.5046	0.6032	7.4679
6 - 7	-19.6245	8.7144	4.2928	0.5720	7.5044
7 - 8	-19.5405	8.7144	4.0440	0.5274	7.6679
8 - 9	-19.4535	8.7864	3.8659	0.4929	7.8436
9 - 10	-19.5805	8.6944	3.8968	0.4884	7.9784
10 - 11	-19.4935	8.8434	3.9148	0.4917	7.9612
11 - 12	-19.5535	8.9034	3.9358	0.4921	7.9978
12 - 13	-19.5585	9.2964	3.9974	0.5090	7.8541
13 - 14	-19.5185	9.1154	4.0434	0.5164	7.8300
14 - 15	-19.4915	8.6934	4.0273	0.5086	7.9180
15 - 16	-19.8815	8.3444	2.8281	0.3537	7.9956
16 - 17	-19.7905	7.6154	2.6287	0.3286	7.9999
17 - 18	-19.8615	7.7164	2.6296	0.3269	8.0448
18 - 19	-19.5815	8.6314	3.5834	0.4460	8.0338
19 - 20	-19.5805	8.5084	3.7289	0.4606	8.0951
20 - 21	-19.5845	8.6804	3.8094	0.4686	8.1291
21 - 22	-19.6605	8.7604	3.5409	0.4371	8.1001
22 - 23	-19.4435	9.3254	3.2728	0.4073	8.0347
23 - 24	-19.4575	9.5094	3.2844	0.4104	8.0036
24 - 25	-19.3905	8.4234	3.3123	0.4044	8.1898
25 - 26	-19.4265	8.2964	3.3699	0.4069	8.2828
26 - 27	-19.5055	8.1794	3.4472	0.4102	8.4044
27 - 28	-19.3765	8.3114	3.3994	0.4057	8.3801
28 - 29	-19.4345	8.2184	3.4183	0.4046	8.4491
29 - 30	-19.3165	8.2894	3.4741	0.4150	8.3721
30 - 31	-19.3735	8.5074	3.4963	0.4147	8.4317
31 - 32	-19.1325	8.3254	3.4100	0.4103	8.3104
32 - 33	-19.2025	9.6254	3.4013	0.4095	8.3053
33 - 34	-19.0875	9.3844	3.3666	0.4049	8.3139
34 - 35	-19.1855	8.6584	3.4358	0.4073	8.4357
40 - 41	-18.9462	6.7408	3.4650	0.4282	8.0928
45 - 46	-18.8692	8.1128	3.3467	0.4171	8.0246
50 - 51	-19.1192	8.3378	2.9818	0.3768	7.9146
55 - 56	-19.4132	7.9668	2.8983	0.4231	6.8500

Fuente: elaboración propia.

3.4.3.7. Análisis de redundancia (RDA). Se analizó la relación existente entre las principales especies que determinan la variabilidad en la abundancia de dinoquistes y los factores abióticos mediante un análisis de redundancia (tabla 9 y figura 36). Los loadings correspondientes para las variables predictoras se muestran en la tabla 10 y los correspondientes a las variables predichas se muestran en la tabla 11. También se agregaron los p-valores correspondientes al modelo (tabla 12) y a las variables predictoras (tabla 13).

Figura 35

Análisis de redundancia entre dinoquistes y parámetros ambientales.



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados, el eje RDA1 está determinado positivamente por la relación H/A (heterótrofos/autótrofos), los valores de $\delta^{13}\text{C}$, y negativamente por los valores de $\delta^{15}\text{N}$. Esto quiere decir que el eje RDA1 se hace más negativo cuando $\delta^{15}\text{N}$ se hace mayor, lo que podría relacionarse con una mayor deficiencia de oxígeno en el ambiente y

se hace más positivo cuando los valores de la relación H/A y $\delta^{13}\text{C}$ alcanzan valores más positivos. Además, se observó que el eje RDA 2 estaría determinado positivamente por el contenido de carbono orgánico total y negativamente por la relación C/N y el DBD.

Tabla 9

Datos de proxys geoquímicos de muestras del núcleo ParP2.

Abreviatura	Descripción	Tipo de variable
ARCHSPP	<i>Archaeperdinium</i> spp.	Dinoquiste heterótrofo
BRGSMP	<i>Brigantedinium simplex</i>	Dinoquiste heterótrofo
ECHSPP	<i>Echinidinium</i> spp.	Dinoquiste heterótrofo
IMPSPP	<i>Impagidinium</i> spp.	Dinoquiste autótrofo
PLKKOF	Quistes de <i>Polykrikos kofoidii</i>	Dinoquiste heterótrofo
PLKSCW	Quistes de <i>Polykrikos schwartzii</i>	Dinoquiste heterótrofo
PRTAME	<i>Protoperdinium americanum</i>	Dinoquiste heterótrofo
QNQCON	<i>Quinquecuspis concreta</i>	Dinoquiste heterótrofo
SLNNEP	<i>Selenopemphix nephroides</i>	Dinoquiste heterótrofo
SPFMEM	<i>Spiniferites membranaceus</i>	Dinoquiste autótrofo
SPFPACH	<i>Spiniferites pachydermus</i>	Dinoquiste autótrofo
SPFRAM	<i>Spiniferites ramosus</i>	Dinoquiste autótrofo
SPFSP1	<i>Spiniferites</i> sp. 1	Dinoquiste autótrofo
SPFSP2	<i>Spiniferites</i> sp. 2	Dinoquiste autótrofo
STESTE	<i>Stelladinium stellatum</i>	Dinoquiste heterótrofo
VOTCAL	<i>Votadinium calvum</i>	Dinoquiste heterótrofo
VOTSPI	<i>Votadinium spinosum</i>	Dinoquiste heterótrofo
%COT	Carbono orgánico total (%)	Parámetro ambiental
C/N	Relación carbono-nitrógeno	Parámetro ambiental
$\delta^{13}\text{C}$	Concentración de ^{13}C (‰)	Parámetro ambiental
$\delta^{15}\text{N}$	Concentración de ^{15}N (‰)	Parámetro ambiental
H/A	Relación heterótrofos/autótrofos	Relación de quistes
AB	Abundancia de dinoquistes	Abundancia de dinoquistes

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10*Loadings de las variables predictoras.*

Variable predictora	Loadings	
	RDA1	RDA2
%COT	-0.184321	0.5888
C/N	-0.09803	-0.6113
$\delta^{13}\text{C}$	0.616154	-0.3931
$\delta^{15}\text{N}$	-0.447736	-0.1117
DBD	0.125148	-0.1103
H/A	0.828361	0.2218
AB	-0.438674	0.2199

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11*Loadings de las variables predichas (especies de dinoquistes).*

Variable predictora	Loadings	
	RDA1	RDA2
ARCHSPP	0.14277	-0.116404
BRGSMP	0.11782	-0.013457
ECHSPP	0.34999	-0.016857
IMPSPP	-0.16918	-0.035293
PLKKOF	0.01064	0.039390
PLKSCW	0.15948	0.117056
PRTAME	0.03235	0.074637
QNQCON	-0.30242	0.032795
SLNNEP	0.04214	0.042399
SPFMEM	-0.16642	-0.154531
SPFPACH	-0.33531	-0.130754
SPFRAM	-0.53580	0.017486
SPFSP1	-0.28551	-0.005821
SPFSP2	0.07215	-0.059793
STESTE	-0.18405	0.279060
VOTCAL	-0.03994	0.059009
VOTSPI	-0.11760	-0.007984

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12*Prueba ANOVA para la significancia del modelo RDA.*

	ANOVA			
	Grados de libertad	Varianza	Estadístico F	p valor
Modelo	7	0.073367	5.35	0.001

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13*Prueba ANOVA para evaluación de la significancia de variables predictoras.*

Variables predictoras	ANOVA			
	Grados de libertad	Varianza	Estadístico F	p valor
COT	1	0.006526	3.3341	0.018
C/N	1	0.004960	2.5337	0.039
$\delta^{13}\text{C}$	1	0.027815	14.2096	0.001
$\delta^{15}\text{N}$	1	0.006238	3.1866	0.021
DBD	1	0.005541	2.8305	0.027
H/A	1	0.018797	9.6027	0.001
AB	1	0.003490	1.7828	0.119

Fuente: elaboración propia.

Además, se observó que las especies con mayor influencia en la variabilidad de la abundancia de dinoquistes fueron las especies *Echinidinium* spp., *Quinquecuspis concreta*, *Stelladinium stellatum*, quistes de *Polykrikos schwartzii* y todas las especies del género *Spiniferites* registradas. Además, se observa que en el eje positivo de RDA1 se encuentran la mayoría de las especies de dinoquistes heterótrofos a excepción de *Quinquecuspis concreta* y en el eje negativo de RDA1 se concentran todas las especies de dinoquistes autótrofos.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Presencia antrópica y natural y su influencia en la composición de los dinoquistes en el registro sedimentario

En este subcapítulo se exploró la relación entre los diversos factores paleoambientales, incluyendo la concentración de isótopos estables de ^{13}C y ^{15}N , la concentración de carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (NT), así como la relación C/N, junto a la composición y abundancia de dinoquistes. A partir de este análisis, se determinó la relación entre las especies de dinoquistes heterótrofas y autótrofas (H/A). Dada la complejidad presentada por la interacción de numerosas variables, se optó por utilizar el análisis de redundancia. Este método estadístico multivariante permite evaluar el grado de influencia de unas variables sobre otras, facilitando una comprensión más profunda de las dinámicas paleoambientales estudiadas.

De acuerdo con los resultados del RDA (figura 36), se encontró que las variables relación H/A, $\delta^{13}\text{C}$, C/N, COT y $\delta^{15}\text{N}$ presentan una mayor influencia en la abundancia de dinoquistes (tabla 11). Además, se examinó la relación entre las variables y se encontró una relación positiva entre el índice H/A y los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en el eje RDA1, lo que sugiere que a mayores valores de RDA1, habría una mayor contribución del fitoplancton marino a la sedimentación de materia orgánica y una mayor abundancia de dinoquistes heterótrofos que podría estar relacionada a una mayor ocurrencia de productores primarios que servirían como alimento para los dinoflagelados heterótrofos.

Este mecanismo también explicaría la relación negativa que presentan el índice H/A y los valores de $\delta^{15}\text{N}$, ya que estos productores primarios podrían incrementar la concentración de oxígeno disuelto en la bahía de Paracas lo que repercutiría en una menor concentración de $\delta^{15}\text{N}$. Por lo tanto, se puede utilizar el eje RDA1 como un indicador de eutrofización en la bahía de Paracas al presentar valores negativos y como un indicador de oxigenación al presentar valores positivos. El eje RDA1 (-) también podría ser utilizado

para representar biofacies de especies de dinoquistes heterótrofos que prosperan ante un incremento en la concentración de la MO.

De acuerdo con los registros, se observó que las anomalías de la temperatura en la superficie del mar en la estación Chicama, en periodos posteriores al fenómeno del Niño 1982/1983 y 1996/1997, coincidieron con una menor intensidad en el indicador de eutrofización, que podrían haberse dado al recuperar los niveles de temperatura y oxígeno disuelto usuales. Asimismo, se observaron tendencias opuestas en el indicador de eutrofización y los desembarques industriales de anchoveta. Por ejemplo, en el periodo 1982/1983, al haber una menor cantidad de desembarques, se habría utilizado una menor cantidad de materia prima, en las fábricas de harina de pescado. Por consiguiente, habría un menor volumen de vertimientos de sanguaza hacia las aguas disminuyendo la concentración de materia orgánica, disminuyendo el impacto de la eutrofización en la bahía de Paracas.

De igual modo, se hizo un análisis de la relación entre el COT y C/N, encontrándose una relación negativa significativa (tabla 10). Los valores elevados de COT sugieren una mayor sedimentación de materia orgánica, y los menores valores de C/N sugieren un origen marino de la materia orgánica, por lo que eje RDA2 podría estar relacionado con el origen de la materia orgánica, vale decir, valores menores implicarían un origen terrígeno y valores mayores implicarían un origen marino (Lamb et al., 2006).

Dado que el río Pisco es la fuente principal de aporte terrígeno, se podría inferir que un menor caudal implica un menor aporte terrígeno, por lo que se esperaría un incremento en el indicador de origen de la materia orgánica marina. Se hizo una comparación entre los registros del indicador del origen de la materia orgánica y la anomalía del caudal del río Pisco, observándose que sólo en el periodo 1968-1980, predominó el origen marino de la materia orgánica en comparación con las anomalías negativas del caudal del río Pisco, durante ese periodo de tiempo.

También cabe señalar que la abundancia de la mayor parte de especies de dinoquistes heterótrofos presenta una mayor relación con el indicador de oxigenación,

específicamente, las especies *Echinidinium* spp., quistes de *Polykrikos schwartzii* y en menor medida *Protoperidinium americanum* (tabla 12) lo que sugeriría que los dinoquistes heterótrofos no están asociados a ambientes eutrofizados en la bahía de Paracas, a excepción de las especies *Quinquecuspis concreta* y en menor medida *Votadinium spinosum* que presentan mayores abundancias en ambientes eutrofizados y se asocian con dinoquistes autótrofos.

A su vez, se observó que la especie *Stelladinium stellatum* presenta una alta sensibilidad con el origen de la materia orgánica, por ejemplo, cuando el indicador de origen de la materia orgánica es marino, se incrementa la abundancia de *Stelladinium stellatum*. Por el contrario, cuando hay un mayor aporte terrígeno, hay una menor abundancia de esta especie. Otras especies que presentan una menor sensibilidad ante el origen de la materia orgánica son *Quinquecuspis concreta* y los quistes de *Polykrikos schwartzii*.

4.2 Influencia de los fenómenos naturales y las actividades antrópicas en la variabilidad de los dinoquistes en los sedimentos de la bahía de Paracas durante el Antropoceno

En este subcapítulo se discutió como los fenómenos naturales, tal como el fenómeno del Niño y la intensidad del afloramiento costero o las actividades antrópicas, como el funcionamiento de las fábricas de harina de pescado o inclusive la expansión demográfica, pueden afectar a los dinoflagelados a través del tiempo, hecho que se reflejaría en la abundancia y composición de los dinoquistes encontrados en cada una de las submuestras del núcleo sedimentario. También se agregó como los factores paleoambientales se ven afectados, a través de un análisis temporal del núcleo sedimentario ParP2 extraído en la parte central de la bahía de Paracas.

Pitcher et al. (2021) señaló diversas fuentes de enriquecimiento de materia orgánica en la bahía de Paracas, entre las que se encuentran: la acuicultura, con el cultivo de la especie *Argopecten purpuratus*, los vertimientos de aguas servidas de la ciudad de Pisco y San Andrés en el río Pisco, el transporte de altos contenidos de nutrientes,

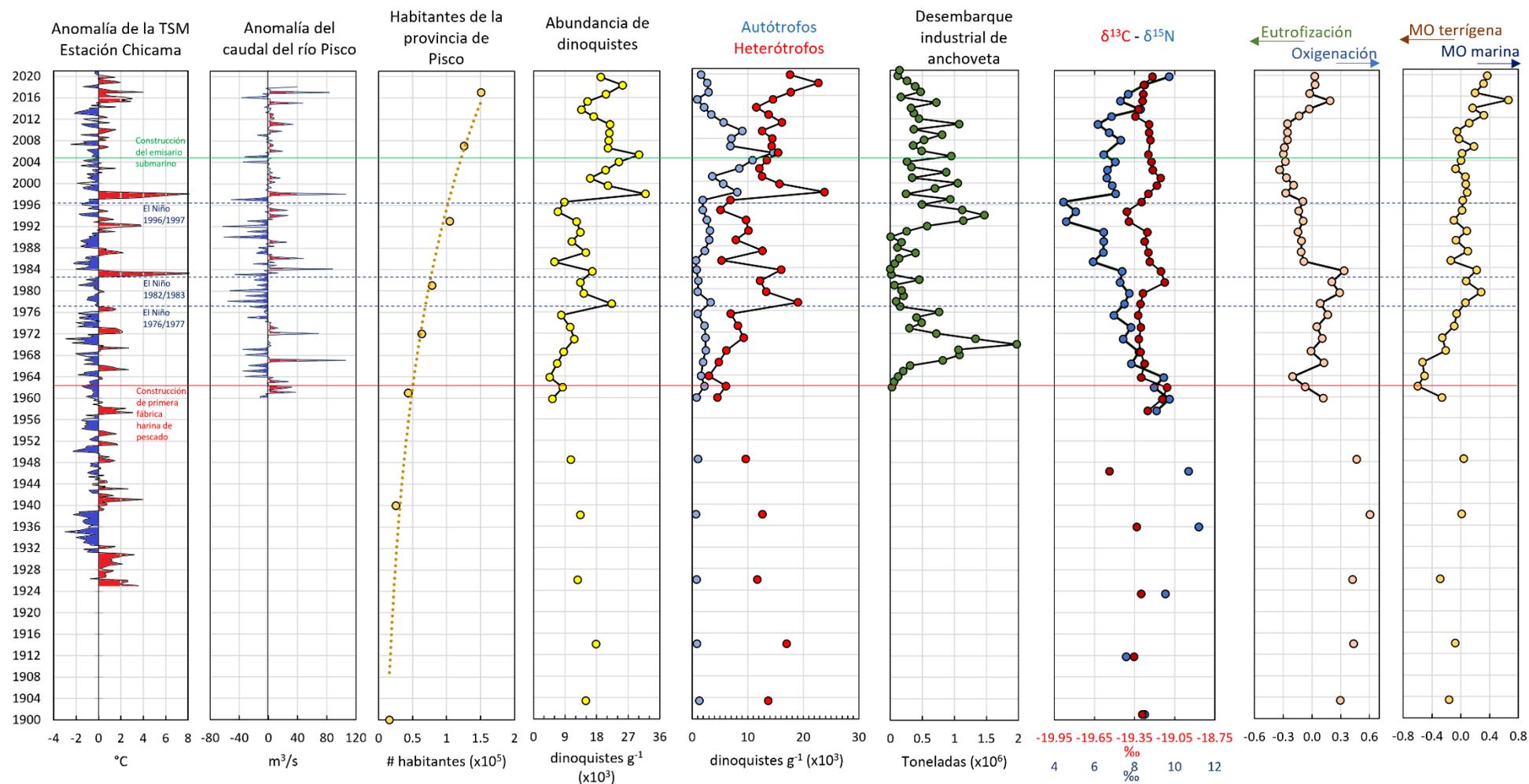
principalmente nitratos y nitritos derivados de la actividad agrícola, así como silicatos y los efluentes de las fábricas de harina de pescado, que son vertidas directamente a la bahía y la costa adyacente con un tratamiento mínimo.

Por consiguiente, para este estudio se tomaron en cuenta factores naturales tales como el afloramiento, los eventos El Niño y La Niña, para cuya detección se empleó la anomalía de la temperatura superficial del mar en la Estación Chicama (Fuente: IMARPE) y la anomalía del caudal del río Pisco (Fuente: ANA) y se consideraron factores antrópicos como los vertimientos de aguas residuales del proceso de elaboración de harina de pescado, cuyo proxy fue el desembarque industrial de anchoveta (Fuente: IMARPE), los efluentes de aguas residuales domésticas, cuyo proxy fue el número de habitantes de la provincia de Pisco, ya que el aumento de la población en una ciudad conlleva al incremento en el volumen de residuos o vertimientos, por lo que se puede establecer una relación y utilizar el número de habitantes como un indicador del volumen de vertimientos residuales de origen doméstico; y la construcción de obras de ingeniería como la planta de tratamiento y el emisario submarino, ubicadas en la costa norte adyacente a la bahía de Paracas, al norte de la zona de industrial (IMARPE, 2010) (figura 37).

Cabe señalar que en la figura 37, la variable RDA1 se interpretó como un indicador de eutrofización-oxigenación en la bahía de Paracas y la variable RDA2 se interpretó como la fuente de materia orgánica, de modo que, menores valores implicarían un origen más terrígeno de la materia orgánica y mayores valores implicarían un origen marino de la materia orgánica.

Figura 36

Parámetros ambientales geoquímicos y antrópicos en el área de estudio



Fuente: elaboración propia.

La construcción de la primera fábrica de harina de pescado en 1962, frente a las costas al norte de la bahía de Paracas, habría marcado un antes y un después en la influencia antropogénica. A partir del modelo de edad y el análisis de abundancias de dinoquistes aplicado a las muestras del núcleo sedimentario (figura 24 y figura 38, respectivamente), se encontró que durante el periodo 1900-1962, la abundancia total de dinoquistes presentó una tendencia decreciente en el tiempo, pasando de $14\ 942 \pm 1207$ a 5372 ± 426 dinoquistes gramo^{-1} .

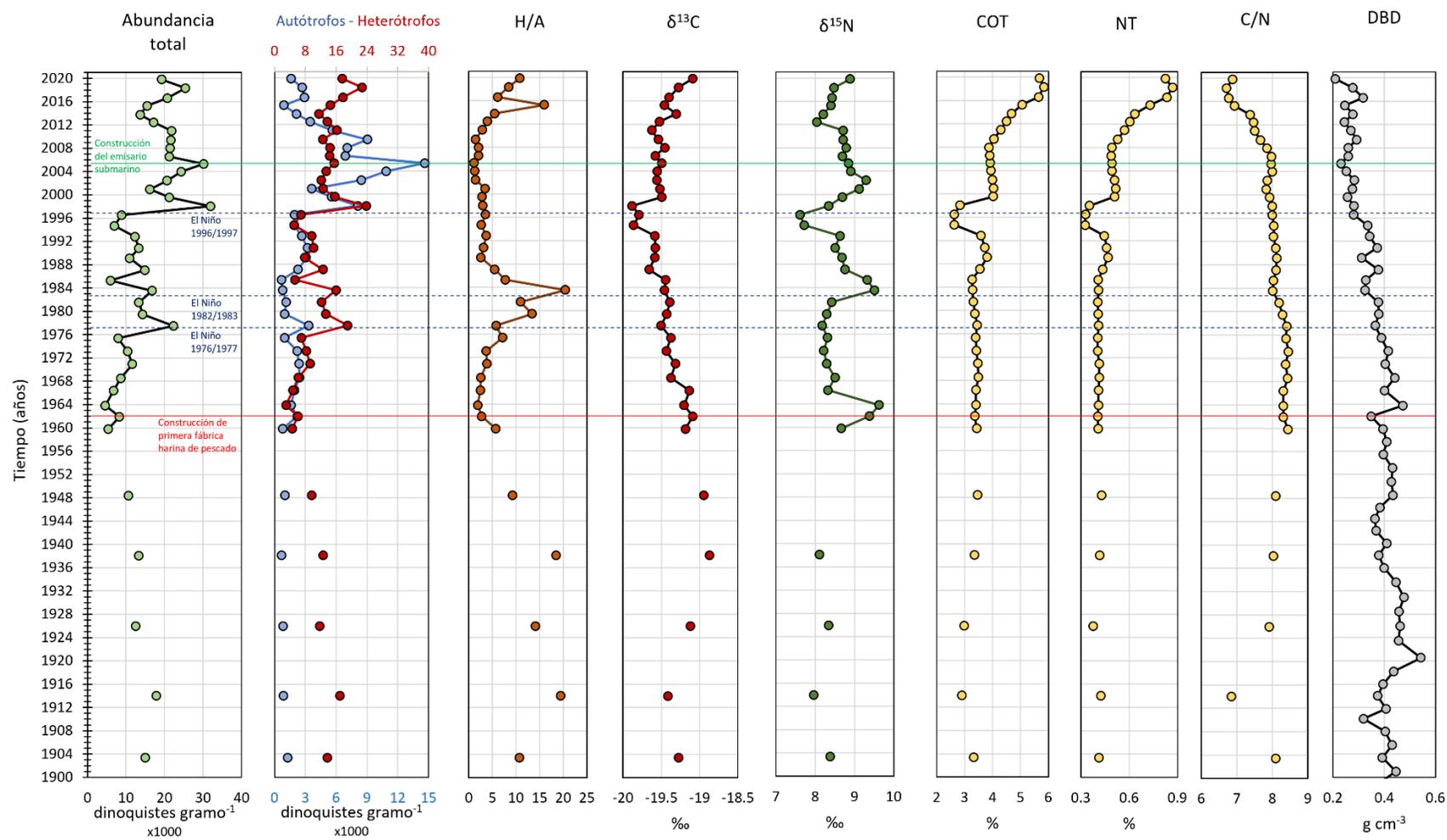
También se observó un comportamiento semejante en la abundancia total de dinoquistes heterótrofos, entre los que predominaron las especies *Echinidinium* spp., *Quinquecuspis concreta*, quistes de *Polykrikos kofoidii* y quistes de *Polykrikos schwartzii*. Por otra parte, la abundancia total de dinoquistes autótrofos presentó valores reducidos pero estables salvo al final del periodo donde tendieron a aumentar. Cabe mencionar que durante este periodo las actividades pesqueras en la bahía de Paracas se daban a escala local; no obstante, a finales de este periodo ya se habían edificado fábricas para la elaboración de harina y aceite de pescado en Callao, Chimbote y Huacho (Tilic, 1962), por consiguiente, se incrementó el número de embarcaciones y fábricas dedicadas a esta actividad en los puertos de las ciudades mencionadas (ACOREMA, 2009). En cambio, en Pisco aún no se construían plantas procesadoras de harina de pescado en dicho periodo.

Por otro lado, aumentó el número de habitantes de la provincia de Pisco de 25 289 (1940) a 43 645 (1961). En el departamento de Ica, el número de habitantes pasó de 60 225 (1876) a 140 898 (1940), y luego a 255 930 (1961). La proporción de habitantes de Pisco con respecto al total de habitantes del departamento de Ica para 1940 fue 17.85% y para 1961 fue 17.24%. Asumiendo que la misma proporción de 1940 existió en 1876, fecha en la cual se tiene información del censo de Ica (INEI, 2017), la población estimada de Pisco para tal fecha habría sido de alrededor de 10 565 habitantes, por lo cual una interpolación lineal indicaría que para 1900, el número de habitantes sería de alrededor de 16 000 habitantes.

La influencia antrópica se habría limitado principalmente al aumento en el vertimiento de los efluentes de origen doméstico, los cuales habrían sido transportados por el flujo del río Pisco. Por lo tanto, se puede interpretar que la disminución de la abundancia de dinoquistes habría sido conducida principalmente por la variabilidad natural (figura 38). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ presentaron valores menos negativos respecto al promedio entre aproximadamente 1930 y 1950, lo que sugiere una mayor contribución del fitoplancton marino a la sedimentación de materia orgánica en este último periodo. Hacia inicios de la década de 1960, se registró un incremento en los valores de $\delta^{15}\text{N}$. Cabe indicar que, según Gutiérrez et al. (2011) desde inicios del siglo XX ha predominado una tendencia al enfriamiento frente a las costas de Pisco, dado que, se observó una disminución de las anomalías de temperatura obtenidas con alquenonas. No obstante, desde 1955, se observó un aumento en los flujos de COT y alquenonas hacia los sedimentos, a esto se le suma un incremento en la clorofila-a, desde 1960. Estas observaciones fueron asociadas con una mayor productividad primaria, producto de la intensificación del afloramiento costero. (figura 39).

Figura 37

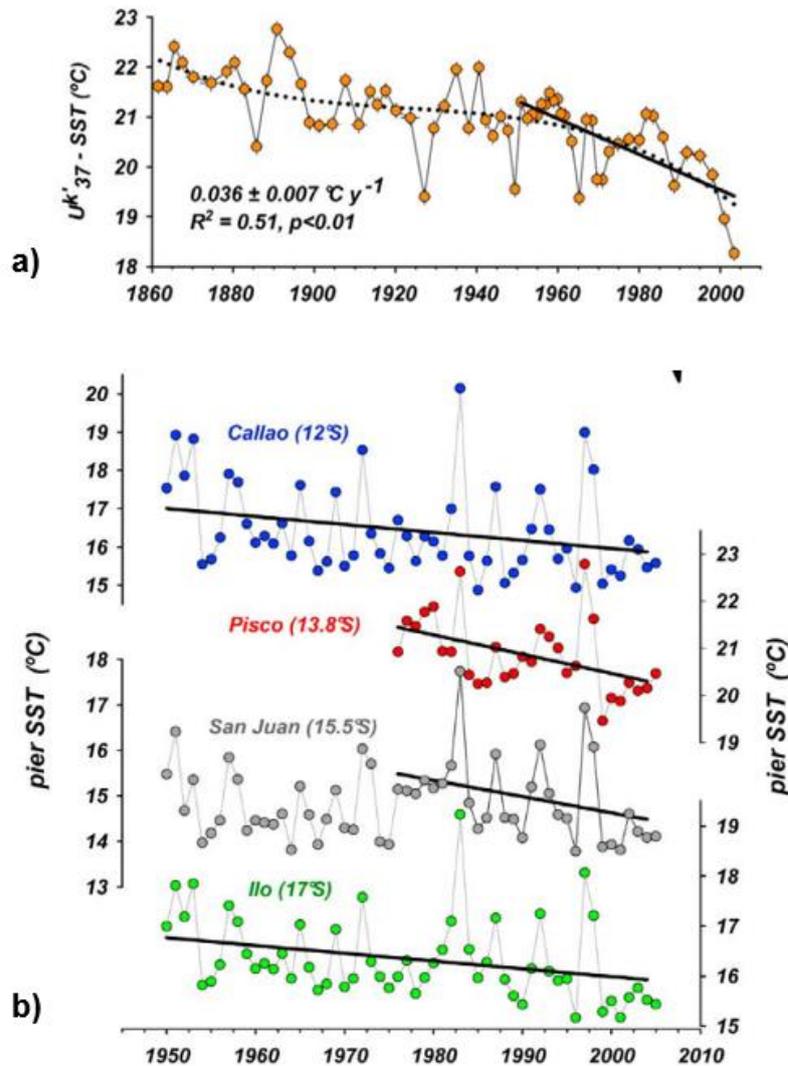
Variación de los parámetros ambientales del núcleo sedimentario ParP2.



Fuente: elaboración propia.

Figura 38

a) Temperaturas obtenidas con Uk37 del testigo B0406 recuperado frente a las costas de Pisco, la línea punteada es de polinomial de orden cúbico; la línea sólida muestra la tendencia negativa desde 1950. b) Temperaturas promedio anuales, medidas en los muelles. Las líneas sólidas describen la regresión lineal ajustada para Callao, Pisco, San Juan e Ilo. Tomado de Gutiérrez et al. (2011).



Fuente: elaboración propia.

La pesca de anchoveta aumentó rápidamente desde 1962 (23 943 Tm) hasta 1970 (1 973,086 Tm) que corresponde al máximo desembarque pesquero a nivel histórico, manteniéndose aún en niveles significativos hasta 1976 (761 793 Tm), coincidiendo con El Niño 1976/1977, para luego colapsar. Por consiguiente, se analizó la variabilidad en la abundancia de dinoquistes para el periodo 1962-1976 (PRODUCE, 2016).

Cabe mencionar que durante todo este periodo el agua residual de la elaboración de la harina de pescado era vertida hacia la bahía junto con restos de grasas, aceites y

combustibles de motores formando halos aceitosos con materiales suspendidos que modificaron la calidad del agua (Carranza, 1999). En principio, se observó que a medida que los desembarques de anchoveta aumentaron hubo un incremento en la abundancia de dinoquistes heterótrofos, principalmente las especies *Echinidinium* spp., quistes de *Polykrikos kofoidii*, quistes de *Polykrikos schwartzii* y *Selenopemphix nephroides* y un declive de dinoquistes autótrofos (desde 1964).

Esto podría ser explicado por una mayor abundancia de microalgas como diatomeas y otros productores fitoplanctónicos (Godhe & McQuoid, 2003) que son presas de los dinoflagelados heterótrofos (Cuellar-Martinez et al., 2018), que habrían aumentado debido al enriquecimiento de nutrientes en la bahía de Paracas. Deficiencias en el manejo, así como las condiciones climáticas habrían influido en el colapso de la industria pesquera. El número de habitantes continuó incrementándose en el tiempo (INEI, 2017), pasando de 43 645 (1961) a 63 665 (1972) (figura 37), por lo que se asume que también se dio un incremento en el volumen de vertimientos y residuos de origen doméstico e industrial, tanto por el incremento de la población como por la mayor actividad en las fábricas de harina de pescado en la bahía de Paracas.

Luego del colapso de los desembarques de anchoveta entre 1976 y 1977, que coincidió con un evento El Niño, se observó una disminución en la abundancia total de dinoquistes hasta inicios de la década de 1990, delimitando un tercer periodo para el análisis de la variabilidad de factores naturales y antrópicos. Esta reducción de la abundancia contrasta con su incremento entre 1962 y 1975 (figura 28 y figura 38). Esta variabilidad en la abundancia de dinoquistes coincide con la variabilidad del volumen de pesca en esos años, incrementándose entre 1960-1975 y disminuyendo abruptamente años después del colapso pesquero (figura 37).

Además, la ocurrencia del Niño 1982/1983, considerado como extraordinario, generó grandes impactos hidrológicos y biológicos en el ecosistema marino (Fahrbach et al., 1991). Cabe mencionar que González (2010), indicó que, desde El Niño de 1982/1983 hasta 1986 hubo un incremento considerable en la abundancia de la concha de abanico

en la región Pisco-Paracas. Estas especies fueron cultivadas principalmente en la caleta Laguna Grande, ubicada en la bahía Independencia, comprendiendo un 88.8% del total y en las caletas El Chaco-Lagunillas y San Andrés, ubicadas en la bahía de Paracas, comprendiendo un 7.1% y 4.1%, respectivamente. La mayor parte de estos cultivos se realizaba sobre el fondo marino (Alcázar y Mendo, 2008) , por lo cual, en este periodo estos podrían haber aumentado la concentración de materia orgánica, a través de la excreción, en los sedimentos contribuyendo a la hipoxia en el fondo marino y el aumento en los valores de $\delta^{15}\text{N}$. Asimismo, se registró un valor máximo de la relación H/A (figura 28 y figura 38), lo que sugiere condiciones más apropiadas para la proliferación de dinoflagelados heterótrofos, debido a una mayor producción microbológica en general (Jeong et al., 2010).

A partir de inicios de la década de 1990 se observó una recuperación de los desembarques de anchoveta en Pisco, sustentando la producción de harina de pescado en la zona. Sin embargo, en 2004, APROPISCO construyó la planta de tratamiento y el emisario submarino en la zona industrial, ubicada en las costas al norte de la bahía de Paracas (Pitcher et al., 2021) (figura 28 y figura 37), disminuyendo la carga orgánica de las aguas. Por lo tanto, la recuperación de la pesca como la construcción de la planta de tratamiento delimitan un nuevo periodo de estudio.

Entre 1991 y 1997, los valores en la abundancia de dinoquistes autótrofos y heterótrofos disminuyeron levemente en la misma proporción ya que la relación H/A no presentó mayores variaciones. Asimismo, entre 1997 y 1998 se dio la ocurrencia de un gran evento El Niño, en el que se registraron los valores muy negativos de $\delta^{13}\text{C}$, lo que se relacionaría con un mayor aporte terrígeno a causa de las precipitaciones y el aumento en el caudal del río Pisco. Además se registraron menores valores de $\delta^{15}\text{N}$, que se relacionaría con una mayor oxigenación en las aguas del fondo marino por efecto del evento (Gutiérrez et al., 2008). Cabe señalar que la ocurrencia del evento coincidió con el incremento temporal de los valores de abundancia total de dinoquistes autótrofos y heterótrofos entre los que se encuentran los dinoquistes heterótrofos *Echinidinium* spp. y los quistes de

Polykrikos kofoidii. Inclusive especies poco abundantes en los periodos anteriores aumentaron su presencia en las aguas, tal como las especies de dinoquistes autótrofos *Spiniferites* sp. 1, *Spiniferites membranaceus*, *Spiniferites pachydermus*, *Spiniferites ramosus*, y en menor medida las especies de dinoquistes heterótrofos *Stelladinium stellatum* y *Votadinium spinosum*. Es posible que el aumento de la temperatura y oxigenación asociado a El Niño haya promovido el desarrollo y el metabolismo de bacterias aeróbicas y protozoarios con la capacidad de degradar y remineralizar la materia orgánica, favoreciendo la producción de fitoplancton en la columna de agua (Morán et al., 2022).

Durante el periodo 1999-2004 se observó una variabilidad regular en la abundancia de dinoquistes autótrofos y heterótrofos. Dado que este es un periodo posterior a un evento El Niño de gran magnitud, es posible que, el aporte de sedimento terrígeno por el incremento del caudal del río Pisco y el empobrecimiento de nutrientes de las aguas superficiales haya causado la disminución de la abundancia de dinoflagelados. Además, en este periodo se registraron anomalías negativas sucesivas de la temperatura superficial del mar en la estación Chicama, lo que indicaría una mayor influencia del afloramiento, lo que explicaría el incremento de la abundancia de dinoquistes autótrofos y heterótrofos a mediados de este periodo.

Posteriormente, con la construcción de la planta de tratamiento se observó un cambio en la tendencia del $\delta^{15}\text{N}$ y la abundancia de dinoquistes, lo cual marca un nuevo periodo de la variabilidad de las condiciones ambientales de la bahía, que fue delimitado entre 2005 y 2010. En este periodo se observó que la abundancia de dinoquistes autótrofos y los valores de $\delta^{15}\text{N}$ disminuyeron, (figura 28 y figura 38), lo que sugiere una mayor oxigenación de las aguas, posiblemente como consecuencia de la disminución de la eutrofización de la bahía a raíz del pretratamiento de los productos residuales de sanguaza y un menor volumen de vertimientos debido a la puesta en funcionamiento de la planta de tratamiento y el emisario submarino. Por otra parte, se observó variabilidad en los datos de los desembarques pesqueros y una disminución en la abundancia de dinoquistes heterótrofos (figura 37 y figura 38). La relación se puede explicar considerando que un

mayor desembarque de pesqueras se relaciona con un mayor volumen de vertimientos de residuos, por consiguiente, un mayor aporte de materia orgánica en la bahía de Paracas. No obstante, habría una disminución en la abundancia de dinoquistes heterótrofos por la planta de tratamiento que redujo la carga orgánica de los residuos y el emisario que condujo estos residuos pretratados fuera de la bahía de Paracas. Esta reducción en la carga orgánica se reflejó en la disminución de la relación C/N. Un menor aporte de materia orgánica implica una reducción en la cantidad de nutrientes utilizados por estos organismos, lo que también habría conllevado a una disminución en la abundancia de dinoflagelados autótrofos.

Entre 2011 y 2021, se observó un incremento en la abundancia de dinoquistes de especies heterótrofas que coincidió con un incremento en los valores de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ (presentó cambio de tendencia), COT, NT y la disminución en la relación C/N lo que sugiere un incremento en la cantidad de materia orgánica fitoplanctónica y una mayor intensificación de la hipoxia que pudo ser causada por la eutrofización o el afloramiento costero. El afloramiento costero es el principal factor que controla la producción de fitoplancton frente a la costa peruana y depende de la intensidad de los vientos paralelos a la costa del sudeste (Gutiérrez et al., 2016). Sin embargo, en las últimas décadas del siglo XX, se viene registrando un enfriamiento costero frente al litoral centro y sur de la costa peruana (figura 39), lo que sugeriría que con el pasar del tiempo hay una mayor intensidad del afloramiento (Gutiérrez et al., 2011; Pitcher et al., 2021), lo que causaría una somerización de la oxiclina, termoclina y nutriclina, lo que conllevaría a un incremento en las poblaciones de diatomeas formadoras de cadenas (Gutiérrez et al., 2016) y de dinoflagelados heterótrofos, al ser las primeras presas de estas. No obstante, también ocurriría una disminución en la abundancia de dinoflagelados autótrofos (Smayda & Trainer, 2010) debido a la turbulencia que afecta su integridad celular y reproducción.

Conclusiones

A partir del análisis estadístico de redundancia (RDA) se encontró que los principales factores que presentaron impactos significativos en la abundancia de dinoquistes fueron los isótopos estables $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y la relación H/A de los que derivó un indicador de oxigenación-eutrofización. Otros factores que causaron impactos significativos fueron la relación C/N y el %COT de los que derivó un indicador de origen de la materia orgánica (terrestre o marina).

A partir del submuestreo, identificación y conteo de dinoquistes en el núcleo sedimentario ParP2, se observó un aumento en la abundancia de dinoquistes con el transcurrir de los años, específicamente en las especies de dinoquistes heterótrofos.

A partir del análisis temporal de los dinoquistes en el núcleo sedimentario ParP2, se identificaron cuatro periodos con diferentes tendencias: antes de la influencia industrial (1900-1962), impacto de la industria pesquera (1962-1976), efectos del Niño y recuperación pesquera (1976-2004), y cambios postratamiento de aguas residuales (2005-2021). El análisis evidenció que la construcción del emisario submarino en la bahía de Paracas provocó una disminución en la abundancia de especies de dinoquistes indicadoras de eutrofización, debido a que habría una disminución de los nutrientes derivados de los vertimientos de las fábricas de harina de pescado.

El análisis de los dinoquistes de la bahía de Paracas se encuentra íntimamente relacionado con la economía del lugar, dado que, la ocurrencia de especies indicadoras de eutrofización en un tiempo determinado podría relacionarse con eventos de hipoxia que conllevaría a la mortandad de recursos pesqueros y a pérdidas económicas en la región.

Recomendaciones

Extraer un núcleo sedimentario adicional en la parte central de la bahía de Paracas con una mayor cobertura temporal de las reconstrucciones para analizar la variabilidad natural y su influencia en los dinoquistes.

Extraer un núcleo sedimentario en la parte externa de la bahía de Paracas para analizar la influencia del río Pisco en la abundancia de los dinoquistes.

Incorporar el análisis del contenido de sílice biogénico o diatomeas en los núcleos sedimentarios con miras a explorar una relación trófica entre las diatomeas y los dinoflagelados o utilizarlos como indicadores de productividad.

Recopilar información de cambios en la extensión de las zonas agrícolas que podrían estar influenciando en los procesos de eutrofización, debido al uso de fertilizantes.

Elaborar un modelo de circulación que considere periodos con la mayor intensidad de los vientos para analizar el grado de resuspensión de los dinoquistes por un incremento en la velocidad de las corrientes en el fondo marino.

Referencias bibliográficas

- ACOREMA. (2009). Paracas, nuestra reserva. Información básica sobre la Reserva Nacional de Paracas.
- Aguirre-Velarde, A., Thouzeau, G., Jean, F., Mendo, J., Cueto-Vega, R., Kawazo-Delgado, M., . . . Flye-Sainte-Marie, J. (2019). Chronic and severe hypoxic conditions in Paracas Bay, Pisco, Peru. *Acquaculture*, 512. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734259>
- Alcázar, J., & Mendo, J. (2008). Crecimiento y supervivencia de juveniles de *Argopecten purpuratus* en sistemas de fondo y suspendido en la zona de Casma, Perú. *Ecología aplicada*, 7(1-2), 71-80.
- Alkarkhi, A., & Alqaraghuli, W. (2020). Clustering Approaches. In applied statistics for environmental science with R. 191-204. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818622-0.00011-3>
- Al-Rousan, S., Pätzold, J., Al-Moghrabi, S., & Wefer, G. (2004). Invasion of anthropogenic CO₂ recorded in planktonic foraminifera from the northern Gulf of Aqaba. 93, 1066-1076.
- ANA. (1999). *Delimitación de la faja marginal del río Pisco*. Autoridad Nacional del Agua.
- ANA. (2013). *Monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Pisco*.
- Anderson, D. (1980). Effects of temperature conditioning on development and germination of *Gonyaulax Tamarensis* (dinophyceae) hypnozygotes. *Woods Hole Oceanographic Institution*, 16, 166-172.
- Anderson, D. (1989). Toxic Algal Blooms and Red tides: a Global Perspective. In Biology, environmental science, and toxicology. 11-16.
- Anderson, D. (2009). Approaches to monitoring, control, and management of harmful algal blooms (HABs). 52(7), 342-347. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.04.006>

- Anderson, D., Cembella, A., & Hallegraeff, G. (2012). Progress in understanding harmful algal blooms: Paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management. *Annual Review of Marine Science*, 4, 143-176. Obtenido de <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081121>
- Andriyono, S., Rukminasari, N., Hidayani, A., Zakaria, I., Alam, M., & Kim, H. (2023). Diversity of dinoflagellate cysts isolated from estuarine sediments of the Bengawan Solo and Brantas rivers. 24(2), 1083-1091. Obtenido de <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240248>
- Appleby, P., & Oldfield, F. (1978). The calculation of ²¹⁰Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to the sediment. *Catena*, 5(1). Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(78\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2)
- Arellano, C., Echevin, V., Merma-Mora, L., Chamorro, A., Gutiérrez, D., Aguirre-Velarde, A., . . . Colas, F. (2023). Circulation and stratification drivers during the summer season in the upwelling bay of Paracas (Peru): A modelling study. *Continental Shelf Research*, 254. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104923>
- Armstrong, M., & Kudela, R. (s.f.). Evaluation of California isolates of *Lingulodinium polyedrum* for the production of yessotoxin. *African Journal of Marine Science*, 28(2), 399-401. Obtenido de <https://doi.org/10.2989/18142320609504186>
- Avramidis, P., Geraga, M., Lazarova, M., & Kontopoulos, N. (2013). Holocene record of environmental changes and palaeoclimatic implications in Alykes Lagoon, Zakynthos Island, western Greece, Mediterranean Sea. *Quaternary International*, 293, 184-195. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.04.026>
- Avramidis, P., Iliopoulos, G., Panagiotaras, D., Papoulis, D., Lambropoulou, P., Kontopoulos, N., . . . Christanis, K. (2014). Tracking Mid- to Late Holocene depositional environments by applying sedimentological, palaeontological and geochemical proxies, Amvrakikos coastal lagoon sediments, Western Greece, Mediterranean Sea. *Quaternary International*, 332, 19-36. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.09.006>

- Avramidis, P., Nikolaou, K., & Bekiari, V. (2015). Total Organic Carbon and Total Nitrogen in Sediments and Soils: A Comparison of the Wet Oxidation – Titration Method with the Combustion-infrared Method. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 425-430. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.048>
- Bernal, J., Beramendi, L., Lugo-Ibarra, K., & Daesslé, L. (2010). Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 305–323. Obtenido de <https://doi.org/10.18268/BSGM2010v62n3a1>
- Bonanse, M., Rodríguez, C., & Pinotti, L. (2018). Assessing the potential of integrating Landsat sensors for estimating chlorophyll-a concentration in a reservoir. *Hydrologya Research*, 49(5), 1608-1617.
- Bravo, I., & Figueroa, R. (2014). Towards an Ecological Understanding of Dinoflagellate Cyst Functions. *Microorganisms*, 2(1), 11-32. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/microorganisms2010011>
- Bray, J., & Curtis, J. (1957). An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, 27(4), 325-349.
- Bruel, R., & Sabatier, P. (2020). serac: A R package for short-lived radionuclide chronology of recent sediment cores. *Journal of Environmental Radioactivity*, 225. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106449>
- Burkholder, J., & Glasgow, H. (1997). Pfiesteria piscicida and other Pfiesteria-like dinoflagellates: Behavior, impacts, and environmental controls. *Limnology and Oceanography*, 42(5), 1052-175. Obtenido de https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.5_part_2.1052
- Cabello, R., Tam, J., & Jacinto, M. (2002). Procesos naturales y antropogénicos asociados al evento de mortalidad de conchas de abanico ocurrido en la bahía de Paracas (Pisco, Perú) en junio del 2000. *Revista Peruana de Biología*, 9(2), 94-110. Obtenido de <https://doi.org/10.15381/rpb.v9i2.2528>

- Cardich, J., Sifeddine, A., Salvattecí, R., Romero, D., Briceño-Zuluaga, F., Graco, M., . . . Gutiérrez, D. (2019). Multidecadal Changes in Marine Subsurface Oxygenation Off Central Peru During the Last ca. 170 Years. *Frontiers in Marine Science*, 6, 1-16. Obtenido de <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00270>
- Carranza, C. (1999). Compatibilidad Ambiental De La Industria De Harina De Pescado En Paracas - Pisco. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 2(3), 119–134.
- Chira, J., Vargas, L., Cangalaya, L., Palomino, C., Vásquez, R., & Rodríguez, H. (2011). Geoquímica Ambiental de la Cuenca del Río Pisco.
- Colwell, R. (2009). Biodiversity: Concepts, Patterns, and Measurement. *Princeton Guide to Ecology*, 257-263. Obtenido de <https://doi.org/10.1515/9781400833023.257>
- Crutzen, P. (2016). Geology of mankind. Paul J. Crutzen: A pioneer on atmospheric chemistry and climate change in the Anthropocene. 211-215.
- Cuellar-Martinez, T. A.-R.-F., de Vernal, A., Morquecho, L., Limoges, A., Henry, M., & Sanchez-Cabeza, J. (2018). Environmental forcing on the flux of organic-walled dinoflagellate cysts in recent sediments from a subtropical lagoon in the Gulf of California. *Science of the Total Environment*, 621, 548-557. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(76\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0034-6667(76)90010-5)
- Dale, B. (1976). Cyst formation, sedimentation, and preservation: Factors affecting dinoflagellate assemblages in recent sediments from trondheimsfjord, Norway. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 22(1), 39-60. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(76\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0034-6667(76)90010-5)
- Dale, B. (1983). Dinoflagellate resting cysts: "benthic plankton". In Survival strategies of the algae.
- Dale, B. (1996). Dinoflagellate cyst ecology: modeling and geological applications. En *Palynology: principles and applications*.

- Dale, B. (2001). Marine dinoflagellate cysts as indicators of eutrophication and industrial pollution: A discussion. *Science of the Total Environment*, 264(3), 235-240. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00719-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00719-1)
- Dale, B. (2001). The sedimentary record of dinoflagellate cysts: Looking back into the future of phytoplankton blooms. *Scientia Marina*, 65(2), 257-272. Obtenido de <https://doi.org/10.3989/scimar.2001.65s2257>
- DeSarbo, W. (1981). Canonical/redundancy factoring analysis. *Psychometrika*, 46(3), 307-329. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/BF02293738>
- Edwards, K. (2019). Mixotrophy in nanoflagellates across environmental gradients in the ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(13), 6211-6220.
- Egger, L., Bahr, A., Friedrich, O., Wilson, P., Norris, R., Peer, T., . . . & Pross, J. (2018). Marine Micropaleontology Sea-level and surface-water change in the western North Atlantic across the Oligocene – Miocene Transition: A palynological perspective from IODP Site U1406 (Newfoundland margin). *Marine Micropaleontology*, 139, 57–71. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2017.11.003>
- Emery, K., & Hülsemann, J. (1961). The relationships of sediments, life, and water in a marine basin. *Deep Sea Research*, 8, 165-180. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0146-6313\(61\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0146-6313(61)90019-3)
- Escobar-Briones, E., & García-Villalobos, F. (2009). Distribution of total organic carbon and total nitrogen in deep-sea sediments from the southwestern Gulf of Mexico. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 61(1), 73-86. Obtenido de <https://doi.org/10.18268/BSGM2009v61n1a7>
- Eszergár-Kiss, D., & Caesar, B. (2017). Definition of user groups applying Ward's method. *Transportation Research Procedia*, 22, 25-34. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.004>
- Fahrbach, E., Trillmich, F., & Arntz, W. (1991). The time sequence and magnitude of physical effects of El Niño in the Eastern Pacific. *Ecological Studies*, 88, 14.

- Faust, M. (1990). Cysts of *Prorocentrum marinum* (Dinophyceae) in floating detritus at Twon Cays, Belize mangrove habitats. *Toxic Marine Phytoplankton*, 138-143.
- Faust, M., Larsen, J., & Moestrup, O. (1999). ICES identification leaflets for plankton, Leaflet no. 184. *Potentially toxic phytoplankton*, 3, 24.
- Fensome, R. (1993). A classification of living and fossil dinoflagellates. *Micropalaeontology*.
- Fensome, R., MacRae, R., Moldowan, J., Taylor, F., & Williams, G. (1996). The early Mesozoic radiation of dinoflagellates. *Paleobiology*, 22(3), 329-338. Obtenido de <https://doi.org/10.1017/S0094837300016316>
- Finney, S., & Edwards, L. (2016). The “Anthropocene” epoch: Scientific decision or political statement. *GSA Today*, 26(3), 4-10.
- Flores, R., Gutiérrez, D., Tam, J., Sánchez-Ramírez, S., & Cabello, R. (2004). *Informe Técnico sobre la dinámica de la Bahía Paracas y recomendaciones para su manejo*.
- Ford, J., Price, S., Cooper, A., & Waters, C. (2014). An assessment of lithostratigraphy for anthropogenic deposits. *The Geological Society of London*.
- Frieling, J., Roij, L., Kleij, I., Reichart, G., & Sluijs, A. (2022). Single-species dinoflagellate cyst carbon isotope fractionation in from coretop sediments: environmental controls, CO₂-dependency and proxy potential. 1-25.
- Froelich, P., Klinkhammer, G., Bender, M., Luedtke, N., Heath, G., Cullen, D., . . . Maynard, V. (1979). Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(7), 1075–1090. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90095-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90095-4)
- Fuentes, A., Cuéllar-Martínez, T., & Alonso-Rodríguez, R. (2018). *Técnica Palinológica para el Análisis de Quistes de Dinoflagelados*.
- García Muñoz, M. (2006). *Distribución, transporte y remineralización de la materia orgánica en la región de Canarias*.
- Gauch, H., & Gauch Jr, H. (1982). Multivariate analysis in community ecology. *Cambridge University Press*, 1.

- Godhe, A., & McQuoid, M. (2003). Influence of benthic and pelagic environmental factors on the distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments along the Swedish west coast. *Aquatic Microbial Ecology*, 32(2), 185–201. Obtenido de <https://doi.org/10.3354/ame032185>
- González, R. (2010). Auge y crisis: la pesquería de la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en la región Pisco-Paracas, costa sur del Perú. *Espacio y Desarrollo*, 1(22), 25-51.
- Gray, D., Zonneveld, K., & Versteegh, G. (2017). Species-specific sensitivity of dinoflagellate cysts to aerobic degradation: A five-year natural exposure experiment. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 247, 175–187. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2017.09.002>
- Gunther, E. (1936). A report on oceanographical investigations in the Peru coastal current. *Discovery*.
- Gutierrez, D., & Sanchez, S. (2019). *An overview of HABs and coastal hypoxia in peruvian waters with focus in Paracas Bay (13.8°S)*. Instituto del Mar del Perú. GEOHAB.
- Gutiérrez, D., Akester, M., & Naranjo, L. (2016). Productivity and sustainable management of the Humboldt current large marine ecosystem under climate change. *Environmental Development*, 17, 126-144. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.11.004>
- Gutiérrez, D., Bouloubassi, I., Sifeddine, A., Purca, S., Goubanova, K., Graco, M., . . . Ortlieb, L. (2011). Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century. *Geophysical Research Letters*, 38(7), 1–6. Obtenido de <https://doi.org/10.1029/2010GL046324>
- Gutiérrez, D., Enríquez, E., Purca, S., Quipúzcoa, L., Marquina, R., Flores, G., & Graco, M. (2008). Oxygenation episodes on the continental shelf of central Peru: Remote forcing and benthic ecosystem response. *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 177–189. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.025>

- Hallegraeff, G. (1993). A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 32(2), 79-99. Obtenido de <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-32-2-79.1>
- Haq, B., Hardenbohl, J., & Vail, P. (1987). Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present). *Science*, 235(4), 1156–1167.
- Harland, R., Asteman, I., & Nordberg, K. (2019). Dinoflagellate cysts from the ‘Anthropocene’ of Gullmar Fjord, west coast of Sweden and their potential for monitoring climate change. *Review of Paleobotany and Palynology*, 261, 31-40.
- Hartnett, H., Keil, R., Hedges, J., & Devol, A. (1998). Influence of oxygen exposure time on organic carbon preservation in continental margin sediments. *Nature*, 391(6667), 572–574. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/35351>
- Heisler, J., Glibert, P., Burkholder, J., Anderson, D., Cochlan, W., Dennison, W., . . . Suddleson, M. (2008). Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus. *Harmful Algae*, 8(1), 3-13. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.hal.2008.08.006>
- Hjulstrom, F. (1935). *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris*. University of Upsala.
- Hoppenrath, M., Chomérat, N., Horiguchi, T., Schweikert, M., Nagahama, Y., & Murray, S. (2013). Taxonomy and phylogeny of the benthic *Prorocentrum* species (Dinophyceae) - A proposal and review. *Harmful Algae*, 27, 1-28. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.hal.2013.03.006>
- IMARPE. (2010). Informe nacional sobre el estado del ambiente marino del Perú. (I. d. Perú, Ed.) 106(11), 1323-1330.
- IMARPE. (2022). *Desembarques mensuales de anchoveta. Reporte Interno*.
- INEI. (2017). *Compendio Estadístico: Ica 2017*. Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- Ismael, A., El-Masry, E., & Khadr, A. (2014). Dinoflagellate cyst as signals for eutrophication in the eastern harbor of Alexandria-Egypt.

- Ivanovich, M., & Harmon, R. (1992). Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences. (2).
- Jacinto, M. (2014). Propuesta de un sistema de indicadores ambientales y socio económicos en la zona marino costera de Pisco - Paracas. *Universidad Nacional de Ingeniería*.
- Jacobson, D., & Anderson, D. (1996). Widespread phagocytosis of ciliates and other protists by marine mixotrophic and heterotrophic thecate dinoflagellates. *Journal of Phycology*, 32(2), 279–285. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1996.00279.x>
- Jeong, H., du Yoo, Y., Kim, J., Seong, K., Kang, N., & Kim, T. (2010). Growth, feeding and ecological roles of the mixotrophic and heterotrophic dinoflagellates in marine planktonic food webs. *Ocean Science Journal*, 45(2), 65–91. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s12601-010-0007-2>
- Johnston, D., & Fischer, W. (2012). Stable Isotope Geobiology. *Fundamentals of Geobiology*.
- Kahru, M., Mitchell, B., Diaz, A., & Miura, M. (2004). MODIS detects a devastating algal bloom in Paracas Bay, Peru. *Eos*, 85(45). Obtenido de <https://doi.org/10.1029/2004EO450002>
- Kemp, A., & Baldauf, J. (1993). Vast Neogene laminated diatom mat deposits from the eastern equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 362, 141–144.
- Kim, J., Park, B., Wang, P., Kim, J., Youn, S., & Han, M. (2015). Cyst morphology and germination in *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae). *Phycologia*, 54(5), 435–439. Obtenido de <https://doi.org/10.2216/15-26.1>
- Kolpa. (2021). Obtenido de Compañía minera Kolpa: Línea de tiempo: <https://www.kolpa.com.pe/nosotros#linea-de-tiempo>
- Kudela, R., Berdalet, E., Bernard, S., Burford, M., Fernand, L., Lu, S., . . . Enevoldsen, H. (2015). Harmful Algal Blooms: A scientific summary for policy makers. (UNESCO, Ed.) Obtenido de <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002334/233419e.pdf>

- Lamb, A., Wilson, G., & Leng, M. (2006). A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material. *Earth-Science Reviews*, 75(1-4), 29–57. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.003>
- Latham, K. (2013). Human health and the Neolithic revolution: An overview of impacts of the agricultural transition on oral health, epidemiology, and the human body.
- Legendre, P., & Gallagher, E. (2001). Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129(2), 271–280. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s004420100716>
- Leorri, E., Mitra, S., Irabien, M., Zimmerman, A., Blake, W., & Cearreta, A. (2014). A 700-year record of combustion-derived pollution in northern Spain: Tools to identify the Holocene/Anthropocene transition in coastal environments. *Science of the Total Environment*, 470, 240-247.
- Lewis, J. (1988). Cysts and sediments: Gonyaulax Polyedra (Lingulodinium Machaerophorum) in Loch Creran. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 68(4), 701–714. Obtenido de <https://doi.org/10.1017/S0025315400028812>
- Likumahua, S., Sangiorgi, F., de Boer, M., Tatipatta, W., Pelasula, D., Polnaya, D., . . . Buma, A. (2021). Dinoflagellate cyst distribution in surface sediments of Ambon Bay (eastern Indonesia): Environmental conditions and harmful blooms. *Marine Pollution Bulletin*, 166. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112269>
- Limoges, A., Londeix, L., Mertens, K., Rochon, A., Pospelova, V., Cuéllar-Martinez, T., & de Vernal, A. (2018). Identification key for Pliocene and Quaternary Spiniferites taxa bearing intergonal processes based on observations from estuarine and coastal environments. *Palynology*, 45(2), 72–88. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/01916122.2018.1465733>

- Limoges, A., Van Nieuwenhove, N., Head, M., Mertens, K., Pospelova, V., & Rochon, A. (2020). A review of rare and less well known extant marine organic-walled dinoflagellate cyst taxa of the orders Gonyaulacales and Suessiales from the Northern Hemisphere. *Marine Micropaleontology*, 159. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2019.101801>
- Liu, D., Shi, Y., Di, B., Sun, Q., Wang, Y., Dong, Z., & Shao, H. (2012). The impact of different pollution sources on modern dinoflagellate cysts in Sishili Bay, Yellow Sea, China. *Marine Micropaleontology*, 84–85, 1-13. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2011.11.001>
- López, H. (2008). *Variación estacional de especies productoras de floraciones algales nocivas y su relación con algunos factores físicos y químicos en la playa de Atenas, Bahía de Paracas, Pisco, durante setiembre 2004 - agosto 2005*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Macharé, J., Sébrier, M., Huaman, D., & Mercier, J. (1986). Tectónica cenozoica de la margen continental peruana. *Boletín de La Sociedad Geológica Del Perú*.
- MacRae, R., Fensome, R., & Williams, G. (1996). Fossil dinoflagellate diversity, originations, and extinctions and their significance. *Canadian Journal of Botany*, 74(11), 1687–1694. Obtenido de <https://doi.org/10.1139/b96-205>
- MarcadorDePosición2*. (s.f.).
- MarcadordePosición3*. (s.f.). Obtenido de https://www.dhn.mil.pe/files/cnat/pdf/cartas-inundacion/CIT_CENTRO_ANCON_LIMA.pdf
- Martinez, E. (2017). Variación estacional del fitoplancton potencialmente tóxico frente a los parámetros ambientales y oceanográficos en el área de Atenas - Bahía de Paracas. 69.
- Matsuoka, K. (1999). Eutrophication process recorded in dinoflagellate cyst assemblages - A case of Yokohama Port, Tokyo Bay, Japan. *Science of the Total Environment*, 231(1), 17–35. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00087-X)

- Merma, L. (2023). *Evaluación de la calidad ecológica de la bahía de Paracas (Peru, 14°S) usando bioindicadores de los sedimentos: los foraminíferos bentónicos*. Universidad Peruana Cayetano Heredia.
- Mertens, K., Gu, H., Gurdebeke, P., Takano, Y., Clarke, D., Aydin, H., . . . Head, M. (2020). A review of rare, poorly known, and morphologically problematic extant marine organic-walled dinoflagellate cyst taxa of the orders Gymnodiniales and Peridinales from the Northern Hemisphere. *Marine Micropaleontology*, 159. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2019.101773>
- Mertens, K., Price, A., & Pospelova, V. (2012). Determining the absolute abundance of dinoflagellate cysts in recent marine sediments II: Further tests of the Lycopodium marker-grain method. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 184, 74–81. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.06.012>
- Mertens, K., Verhoeven, K., Verleye, T., Louwye, S., Amorim, A., Ribeiro, S., . . . Chitolie, J. (2009). Determining the absolute abundance of dinoflagellate cysts in recent marine sediments: The Lycopodium marker-grain method put to the test. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 157(3-4), 238–252. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2009.05.004>
- Meyers, P. (1994). Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114, 289–302.
- Monroy, L. (2013). De los primeros homínidos al Homo sapiens. *Revista colombiana de bioética*, 8(2), 49-63.
- Moore, W. (1984). Radium isotope measurements using germanium detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 223(2-3), 407-411. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(84\)90683-5](https://doi.org/10.1016/0167-5087(84)90683-5)
- Morán, X., Arandia-Gorostidi, N., Huete-Stauffer, T., & Alonso-Sáez, L. (2022). Temperature enhances the functional diversity of dissolved organic matter utilization by coastal marine bacteria. *Environmental Microbiology Reports*, 15(1), 31-37. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/1758-2229.13123>

- Nehring, S. (1993). Dinoflagellate resting cysts in recent sediments of the western Baltic Sea as indicators for the occurrence of non-indigenous species in the water column. *Proc. 13th BMP Symp. Riga Jurmala*.
- Nickerson, D. (1940). History of the Munsell Color System and Its Scientific Application. *Journal of the Optical Society of America*, 30(12). Obtenido de <https://doi.org/10.1364/josa.30.000575>
- Nippon-Koei. (2012). Programa de protección de valles y poblaciones rurales y vulnerables ante inundaciones en la República del Perú. 1-190. Obtenido de https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12124475_04.pdf
- Paerl, H. (1988). Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. *Limnology and Oceanography*, 33, 823–843. Obtenido de <https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.4part2.0823>
- Penaud, A., Hardy, W., Lambert, C., Marret, F., Masure, E., Servais, T., & Mertens, K. (2018). Dinoflagellate fossils: Geological and biological applications. *Revue de Micropaléontologie*, 61(3-4), 235-254.
- Peña, C. (2019). *Eventos El Niño y su impacto en la pesquería de anchoveta en Perú*. Universidad de Alicante.
- Pitcher, G., Aguirre-Velarde, A., Breitbart, D., Cardich, J., Carstensen, J., Conley, D., . . . Huang, H. (2021). System controls of coastal and open ocean oxygen depletion. *Progress in Oceanography*, 197. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102613>
- PNUMA-COMAN. (2007). *Informe sobre el Estado de Ambiente: Geo Bahía Paracas-Pisco*.
- Pospelova, V., & Kim, S. (2010). Dinoflagellate cysts in recent estuarine sediments from aquaculture sites of southern South Korea. *Marine Micropaleontology*, 76(1-2), 37-51. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2010.04.003>
- Pospelova, V., Chmura, G., Boothman, W., & Latimer, J. (2002). Dinoflagellate cyst records and human disturbance in two neighboring estuaries, New Bedford Harbor and

- Apponagansett Bay, Massachusetts (USA). *Science of the Total Environment*, 298(1-3), 81-102. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00195-X)
- Pospelova, V., Chmura, G., Boothman, W., & Latimer, J. (2005). Spatial distribution of modern dinoflagellate cysts in polluted estuarine sediments from Buzzards Bay (Massachusetts, USA) embayments. *Marine Ecology Progress Series*, 292, 23-40. Obtenido de <https://doi.org/10.3354/meps292023>
- Price, A., Baustian, M., Turner, R., Rabalais, N., & Chmura, G. (2018). Dinoflagellate cysts track eutrophication in the Northern Gulf of Mexico. *Estuaries and Coasts*, 41, 1322-1336.
- Price, A., Gurdebeke, P., Mertens, K., & Pospelova, V. (2016). Determining the absolute abundance of dinoflagellate cysts in recent marine sediments III: Identifying the source of Lycopodium loss during palynological processing and further testing of the Lycopodium marker-grain method. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 226, 78–90. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.12.009>
- PRODUCE. (2016). *Diagnóstico de vulnerabilidad actual del sector pesquero y acuícola frente al cambio climático*. Ministerio de La Producción.
- Pross, J., Pletsch, T., Shillington, D., Ligouis, B., Schellenberg, F., & Kus, J. (2007). Thermal alteration of terrestrial palynomorphs in mid-Cretaceous organic-rich mudstones intruded by an igneous sill (Newfoundland Margin, ODP Hole 1276A). *International Journal of Coal Geology*, 70(4), 277-291.
- Quispe, D. G., Correa, D., Tam, J., Gutiérrez, D., Morón, O., Flores, G., & Yamashiro, C. (2010). Variabilidad espacio-temporal de condiciones hidrofísicas en bahía Independencia, Pisco – Perú, Desde 1995 a 2004. *Ecología Aplicada*, 9(1-2), 9. Obtenido de <https://doi.org/10.21704/rea.v9i1-2.390>
- Raiswell, R., Buckley, F., Berner, R., & Anderson, T. (1988). Degree of pyritization of iron as a paleoenvironmental indicator of bottom-water oxygenation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(5), 812–819.

- Ruiz-Fernández, A., & Hillaire-Marcel, C. (2009). 210Pb derived ages for the reconstruction of terrestrial contaminant history into the Mexican Pacific coast: Potential and limitations. *Marine Pollution Bulletin*, 59(4-7), 134-145.
- Ryther, J. (1967). Occurrence of Red Water off Peru. *Nature Publishing Group*, 214, 615–616.
- Sætre, M., Dale, B., Abdullah, M., & Sætre, G. (1997). Dinoflagellate cysts as potential indicators of industrial pollution in a Norwegian fjord. *Marine Environmental Research*, 44(2), 167–189. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(96\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(96)00109-2)
- Sánchez, S., & Delgado, E. (1996). Mareas rojas en el área del Callao (12° S) 1980-1995. (44).
- Sanchez-Cabeza, J. (2012). Radiocronología de Sedimentos Costeros Utilizando 210Pb: Modelos, Validación y Aplicaciones.
- Santander, H., & Ochoa, N. (1981). *Mareas rojas en el plancton del Pacífico Oriental*. UNESCO.
- Schleyer, G., & Vardi, A. (2020). Algal blooms. *Current Biology*, 30(19), 1116-1118.
- Schnepf, E., & Elbrächter, M. (1992). Nutritional strategies in dinoflagellates: A review with emphasis on cell biological aspects. *European Journal of Protistology*, 28(1), 3–24. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0932-4739\(11\)80315-9](https://doi.org/10.1016/S0932-4739(11)80315-9)
- Sears, M. (1954). Notes on the Peruvian coastal current. An introduction to the ecology of Pisco Bay. *Deep Sea Research*, 1(3), 141-169. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0146-6313\(54\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0146-6313(54)90045-3)
- Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423.
- Shin, H., Mizushima, K., Oh, S., Park, J., Noh, I., Iwataki, M., & Yoon, Y. (2010). Reconstruction of historical nutrient levels in Korean and Japanese coastal areas based on dinoflagellate cyst assemblages. *Marine Pollution Bulletin*, 60(8), 1243-1258.

- Simpson, E. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163.
- Sluijs, A., Pross, J., & Brinkhuis, H. (2005). From greenhouse to icehouse; organic-walled dinoflagellate cysts as paleoenvironmental indicators in the Paleogene. *Earth-Science Reviews*, 68(3-4), 281-315. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.06.001>
- Smayda, T. (1997). What is a bloom? A commentary. *Limnology and Oceanography*, 42, 1132–1136. Obtenido de https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.5_part_2.1132
- Smayda, T., & Reynolds, C. (2002). Strategies of marine dinoflagellate survival and some rules of assembly. *Journal of Sea Research*, 49(2), 95-106. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(02\)00219-8](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(02)00219-8)
- Smayda, T., & T. V. (2010). Dinoflagellate blooms in upwelling systems: Seeding, variability, and contrasts with diatom bloom behaviour. *Progress in Oceanography*, 85(1-2), 92-107. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.02.006>
- Smilauer, P., & Leps, J. (2014). Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO 5. 1–362. Obtenido de <https://doi.org/10.1017/CBO9781139627061>
- Snowball, I., Hounslow, M., & Nilsson, A. (2014). Geomagnetic and mineral magnetic characterization of the Anthropocene. *London Geological Society*, 395(1), 119-141.
- Sorgente, D., Frignani, M., Langone, L., & Ravaioli, M. (1999). Chronology of marine sediments—interpretation of activity-depth profiles of ²¹⁰Pb and other radioactive tracers. *Consiglio Nazionale delle Ricerche*.
- Steffen, W., Crutzen, P. J., & McNeill, J. (2007). The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature. *Ambio-Journal of Human Environment Research and Management*, 36(8), 614-621.
- Stiglich, G. (1931). *El fenómeno marítimo del aguaje*. Boletín de la Compañía Administradora del Guano.
- Stockmarr, J. (1971). Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et Spores*, 13(4), 615-621.

- Strickland, J., Eppley, R., & de Mendiola, B. (1969). Poblaciones de fitoplancton, nutrientes y fotosíntesis en aguas costeras peruanas. Obtenido de <https://biblioimarpe.imarpe.gob.pe/bitstream/123456789/939/1/BOL2%281%29.pdf>
- Tang, Y., & Gobler, C. (2015). Sexual resting cyst production by the dinoflagellate *Akashiwo sanguinea*: a potential mechanism contributing toward the ubiquitous distribution of a harmful algae. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/jpy.12274-14-075>
- Thibodeau, B., de Vernal, A., & Mucci, A. (2006). Recent eutrophication and consequent hypoxia in the bottom waters of the Lower St. Lawrence Estuary: Micropaleontological and geochemical evidence. *Marine Geology*, 231(1-4), 37-50.
- Tilic, I. (1962). Capacidad de producción de la industria de harina de pescado en el Perú.
- Torres, I., Inglett, P., Brenner, M., Kenney, W., & Reddy, K. (2012). Stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) values of sediment organic matter in subtropical lakes of different trophic status. *Journal of Paleolimnology*, 47(4), 693–706. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10933-012-9593-6>
- Tracey, G. (1988). Feeding reduction, reproductive failure, and mortality in *Mytilus edulis* during the 1985 'brown tide' in Narragansett Bay, Rhode Island. *Marine Ecology Progress Series*, 50, 73-81.
- Traverse, A. (2007). *Paleopalynology* (Vol. 28). Springer Science & Business Media.
- Trischler, H. (2017). El Antropoceno, ¿un concepto geológico o cultural, o ambos? Desacatos. *Revista de Ciencias Sociales*, 54(40). Obtenido de <https://doi.org/10.29340/54.1739>
- Uddandam, P., Prasad, V., & Manoj, M. (2020). New dinoflagellate cysts from the recent sediments of northern Indian ocean. *Journal of the Paleontological Society of India*, 65(1), 15-26.
- Umasangaji, H., & Ramili, Y. (2021). Mini review: Characteristics of upwelling in several coastal areas in the world. *Earth and Environmental Science*, 890(1).

- Urey, H. (1946). The thermodynamic properties of isotopic substances. In Institute of Nuclear Studies. *University of Chicago*.
- Usup, G., Ahmad, A., Matsuoka, K., Lim, P., & Leaw, C. (2012). Biology, ecology, and bloom dynamics of the toxic marine dinoflagellate *Pyrodinium bahamense*. *Harmful Algae*, 14, 301-312. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.10.026>
- Van Nieuwenhove, N., Head, M., Limoges, A., Pospelova, V., Mertens, K., Matthiessen, J., . . . Rochon, A. (2020). An overview and brief description of common marine organic-walled dinoflagellate cyst taxa occurring in surface sediments of the Northern Hemisphere. *Marine Micropaleontology*, 159. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2019.101814>
- Velazco, F., & Solís, J. (2000). Estudio sedimentológico de la bahía de Paracas.
- Versteegh, G. (1994). Recognition of cyclic and non-cyclic environmental changes in the Mediterranean Pliocene: A palynological approach. *Marine Micropalaeontology*, 23(2), 147-183. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0377-8398(94)90005-1)
- Vogt, W. (1942). Informe elevado a la Compañía Administradora del Guano. *Compañía Administradora Del Guano*, 18(3), 1-132.
- Wikfors, G., & Smolowitz, R. (1995). Experimental and histological studies of four life-history stages of the eastern oyster, *Crassostrea virginica*, exposed to a cultured strain of the dinoflagellate *Prorocentrum minimum*. *Biological Bulletin*, 188(3), 313-328. Obtenido de <https://doi.org/10.2307/1542308>
- Wolfe, A., Hobbs, W., Birks, H., Briner, J., Holmgren, S., & Vinebrooke, R. (2013). Stratigraphic expressions of the Holocene–Anthropocene transition revealed in sediments from remote lakes. *Earth-Science Reviews*, 116, 17-34.
- Wrenn, J. (1988). Differentiating species of the dinoflagellate cyst genus *Nematosphaeropsis* Defalndre & Cookson 1955. *Palynology*, 12(1), 129–150.
- Zalasiewicz, J. W., Williams, M., Barnosky, A., Cearreta, A., Crutzen, P., & Oreskes, N. (2015). When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. *Quaternary international*, 383, 196-203.

Zonneveld, K., & Pospelova, V. (2015). A determination key for modern dinoflagellate cysts.

Palynology, 39(3), 387-409. Obtenido de

<https://doi.org/10.1080/01916122.2014.990115>

Zonneveld, K., Marret, F., Versteegh, G., Bogus, K., Bonnet, S., Bouimetarhan, I., . . . Ledu,

D. (2013). Atlas of modern dinoflagellate cyst distribution based on 2405 data points. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 191, 1-197. Obtenido de

<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.08.003>

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Peso de sedimentos del núcleo ParP2 en dinoquistes y DBD.....	1
Anexo 2: Peso de sedimentos del núcleo ParP2 para la actividad de radioisótopos.....	3
Anexo 3: Modelo de edad – CFCS (constant flux, constant supply).....	5
Anexo 4: Abundancia de dinoquistes en muestras del núcleo sedimentario (parte 1).....	7
Anexo 5: Abundancia de dinoquistes en muestras del núcleo sedimentario (parte 2).....	9
Anexo 6: Posibles líneas de investigación a futuro.....	11
Anexo 7: Financiamiento del proyecto de investigación.....	12

Anexo 1: Peso de sedimentos del núcleo ParP2 en dinoquistes y DBD

Código	Masa	Z	% Agua	% Seco	Densidad de agua	Densidad mineral	Densidad de sólidos	Densidad húmeda aparente calculada	Densidad seca aparente calculada	Densidad seca aparente acumulada	Densidad seca aparente estimada	Densidad seca aparente estimada acumulada
	[g]	[cm]	[0-1]	[0-1]	[g cm ⁻³]	[g cm ⁻³]	[g cm ⁻²]	[g cm ⁻³]	[g cm ⁻²]			
ParP2-01	4.30	1	0.8117	0.1883	1.02	2.65	2.65	1.1536	0.2172	0.2172	0.2172	0.2172
ParP2-02	5.22	2	0.8089	0.1911	1.02	2.65	2.65	1.1559	0.2209	0.4362	0.2209	0.4381
ParP2-03	6.66	3	0.8048	0.1952	1.02	2.65	2.65	1.1592	0.2263	0.6598	0.2263	0.6644
ParP2-04	7.52	4	0.7895	0.2105	1.02	2.65	2.65	1.1717	0.2467	0.8962	0.2466	0.9110
ParP2-05	7.22	5	0.759	0.241	1.02	2.65	2.65	1.1975	0.2885	1.1639	0.2886	1.1996
ParP2-06	8.29	6	0.7491	0.2509	1.02	2.65	2.65	1.2061	0.3026	1.4594	0.3026	1.5023
ParP2-07	8.87	7	0.7527	0.2473	1.02	2.65	2.65	1.2030	0.2975	1.7595	0.2975	1.7997
ParP2-08	8.25	8	0.7515	0.2485	1.02	2.65	2.65	1.2040	0.2992	2.0578	0.2992	2.0990
ParP2-09	8.50	9	0.7586	0.2414	1.02	2.65	2.65	1.1979	0.2892	2.3520	0.2892	2.3881
ParP2-10	10.14	10	0.7612	0.2388	1.02	2.65	2.65	1.1956	0.2856	2.6394	0.2855	2.6736
ParP2-11	6.50	11	0.7619	0.2381	1.02	2.65	2.65	1.1950	0.2845	2.9244	0.2845	2.9582
ParP2-12	7.26	12	0.7607	0.2393	1.02	2.65	2.65	1.1961	0.2863	3.2099	0.2862	3.2444
ParP2-13	7.10	13	0.7625	0.2375	1.02	2.65	2.65	1.1945	0.2838	3.4949	0.2837	3.5281
ParP2-14	6.19	14	0.7604	0.2396	1.02	2.65	2.65	1.1963	0.2866	3.7801	0.2866	3.8147
ParP2-15	7.44	15	0.7527	0.2473	1.02	2.65	2.65	1.2030	0.2975	4.0722	0.2975	4.1122
ParP2-16	8.25	16	0.7197	0.2803	1.02	2.65	2.65	1.2325	0.3455	4.3937	0.3455	4.4577
ParP2-17	8.49	17	0.7143	0.2857	1.02	2.65	2.65	1.2374	0.3535	4.7432	0.3535	4.8112
ParP2-18	10.40	18	0.7093	0.2907	1.02	2.65	2.65	1.2421	0.3611	5.1005	0.3611	5.1723

ParP2-19	9.31	19	0.7395	0.2605	1.02	2.65	2.65	1.2146	0.3164	5.4393	0.3164	5.4887
ParP2-20	8.31	20	0.7414	0.2586	1.02	2.65	2.65	1.2129	0.3137	5.7543	0.3137	5.8024
ParP2-21	8.13	21	0.7442	0.2558	1.02	2.65	2.65	1.2104	0.3096	6.0660	0.3096	6.1120
ParP2-22	9.43	22	0.735	0.265	1.02	2.65	2.65	1.2186	0.3229	6.3822	0.3229	6.4349
ParP2-23	9.23	23	0.7219	0.2781	1.02	2.65	2.65	1.2305	0.3422	6.7148	0.3422	6.7771
ParP2-24	10.16	24	0.7165	0.2835	1.02	2.65	2.65	1.2354	0.3502	7.0610	0.3502	7.1274
ParP2-25	10.17	25	0.7101	0.2899	1.02	2.65	2.65	1.2413	0.3598	7.4160	0.3599	7.4873
ParP2-26	10.81	26	0.7032	0.2968	1.02	2.65	2.65	1.2478	0.3704	7.7811	0.3703	7.8576
ParP2-27	10.95	27	0.693	0.307	1.02	2.65	2.65	1.2574	0.386	8.1592	0.3860	8.2436
ParP2-28	10.89	28	0.6894	0.3106	1.02	2.65	2.65	1.2609	0.3916	8.5481	0.3916	8.6353
ParP2-29	12.18	29	0.688	0.312	1.02	2.65	2.65	1.2622	0.3938	8.9408	0.3938	9.0291
ParP2-30	10.12	30	0.6914	0.3086	1.02	2.65	2.65	1.2590	0.3885	9.3319	0.3885	9.4176
ParP2-31	11.46	31	0.6935	0.3065	1.02	2.65	2.65	1.2570	0.3853	9.7188	0.3853	9.8029
ParP2-32	10.10	32	0.6971	0.3029	1.02	2.65	2.65	1.2535	0.3797	10.1013	0.3797	10.1826
ParP2-33	10.79	33	0.7002	0.2998	1.02	2.65	2.65	1.2507	0.375	10.4786	0.3749	10.5575
ParP2-34	11.46	34	0.6949	0.3051	1.02	2.65	2.65	1.2556	0.3831	10.8577	0.3831	10.9406
ParP2-35	10.84	35	0.6931	0.3069	1.02	2.65	2.65	1.2573	0.3858	11.2421	0.3859	11.3265
ParP2-36	9.91	36	0.6799	0.3201	1.02	2.65	2.65	1.2701	0.4066	11.6383	0.4065	11.7330
ParP2-37	10.02	37	0.683	0.317	1.02	2.65	2.65	1.2670	0.4016	12.0424	0.4017	12.1347
ParP2-38	10.40	38	0.6881	0.3119	1.02	2.65	2.65	1.2622	0.3937	12.4401	0.3937	12.5283
ParP2-39	10.31	39	0.6875	0.3125	1.02	2.65	2.65	1.2627	0.3945	12.8342	0.3946	12.9229
ParP2-40	10.15	40	0.6964	0.3036	1.02	2.65	2.65	1.2543	0.3809	13.2219	0.3808	13.3037
ParP2-41	10.10	41	0.6935	0.3065	1.02	2.65	2.65	1.2570	0.3852	13.6050	0.3853	13.6890
ParP2-42	10.21	42	0.6884	0.3116	1.02	2.65	2.65	1.2618	0.3932	13.9942	0.3932	14.0822
ParP2-43	9.94	44	0.683	0.317	1.02	2.65	2.65	1.2670	0.4016	14.7890	0.4017	14.4838
ParP2-45	9.99	45	0.6777	0.3223	1.02	2.65	2.65	1.2722	0.4100	15.1948	0.4100	14.8939

Fuente: elaboración propia.

Anexo 2: Peso de sedimentos del núcleo ParP2 para la actividad de radioisótopos

Profundidad	Masa húmeda	Masa seca	Humedad	Volumen de masa húmeda	Densidad de masa húmeda	Corrección por sal	DBD
(cm)	(g)	(g)	(%)	(g cm ⁻³)	(g cm ⁻³)	(g)	(g cm ⁻³)
1	7.2830	1.4709	79.8037	6.0306	1.2077	6.0263	0.2084
2	7.7329	1.8882	75.5823	6.0306	1.2823	6.0601	0.2774
3	8.4503	2.1423	74.6482	6.0306	1.4012	6.5405	0.3167
4	6.6771	1.6712	74.9712	6.0306	1.1072	5.1904	0.2465
5	7.5174	1.8828	74.9541	6.0306	1.2465	5.8423	0.2778
6	7.0665	1.6716	76.3447	6.0306	1.1718	5.5938	0.2442
7	7.5183	1.8358	75.5822	6.0306	1.2467	5.8920	0.2697
8	8.1681	1.9924	75.6075	6.0306	1.3544	6.4033	0.2926
9	7.3001	1.7678	75.7839	6.0306	1.2105	5.7362	0.2593
10	6.6261	1.5779	76.1866	6.0306	1.0987	5.2343	0.2308
11	7.0548	1.7117	75.7371	6.0306	1.1698	5.5400	0.2512
12	7.5381	1.9106	74.6541	6.0306	1.2500	5.8349	0.2824
13	7.7440	1.8824	75.6921	6.0306	1.2841	6.0777	0.2763
14	7.1401	1.7401	75.6292	6.0306	1.1840	5.5990	0.2555
15	7.6221	1.9047	75.0108	6.0306	1.2639	5.9281	0.2809
16	7.4046	1.8939	74.4227	6.0306	1.2278	5.7138	0.2804
17	7.3575	2.2078	69.9925	6.0306	1.2200	5.3395	0.3346
18	7.5458	2.2589	70.0641	6.0306	1.2512	5.4818	0.3423
19	8.4437	2.4631	70.8291	6.0306	1.4001	6.2010	0.3719
20	7.8331	2.0933	73.2762	6.0306	1.2989	5.9514	0.3120
21	9.2529	2.5227	72.7361	6.0306	1.5343	6.9783	0.3772

22	8.0533	2.1914	72.7888	6.0306	1.3354	6.0780	0.3275
23	7.5904	2.1630	71.5035	6.0306	1.2586	5.6275	0.3255
24	8.4537	2.4948	70.4887	6.0306	1.4018	6.1785	0.3773
25	8.1892	2.4881	69.6173	6.0306	1.3579	5.9112	0.3777
26	8.0304	2.4107	69.9803	6.0306	1.3316	5.8268	0.3654
27	8.1379	2.5483	68.6860	6.0306	1.3494	5.7956	0.3884
28	8.5371	2.7186	68.1555	6.0306	1.4156	6.0330	0.4152
29	8.2864	2.6467	68.0597	6.0306	1.3741	5.8476	0.4044
30	9.1303	2.8865	68.3855	6.0306	1.5140	6.4739	0.4405
31	8.2660	2.6293	68.1914	6.0306	1.3707	5.8445	0.4015
32	9.8642	3.0967	68.6067	6.0306	1.6357	7.0170	0.4721
33	7.3096	2.2886	68.6905	6.0306	1.2121	5.2061	0.3488
34	8.1935	2.5918	68.3676	6.0306	1.3586	5.8082	0.3955
35	8.4143	2.6841	68.1007	6.0306	1.3953	5.9414	0.4101

Fuente: elaboración propia.

Anexo 3: Modelo de edad – CFCS (constant flux, constant supply)

Muestra	Profundidad media (cm)	DBD medido (g cm ⁻²)	Masa seca acumulada (g cm ⁻²)	Actividad de ²¹⁰ Pb precedida	Actividad de ¹³⁷ Cs	Actividad de ²⁴¹ Am	Año (relativo) con DBD medido	Año
-	-	-	0.00	201.8178	-	-	0.0	2020.9
1	0.5	0.2084	0.21	194.6173	0.0	0.0	1.1	2019.8
2	1.5	0.2774	0.49	187.6157	1.6	0.0	2.6	2018.2
3	2.5	0.3167	0.80	180.7285	1.6	0.0	4.3	2016.2
4	3.5	0.2465	1.05	173.7184	0.0	0.0	5.7	2014.7
5	4.5	0.2778	1.33	166.1126	0.9	0.0	7.2	2012.9
6	5.5	0.2442	1.57	158.0991	1.3	0.0	8.5	2011.3
7	6.5	0.2697	1.84	150.3591	1.1	0.0	10.0	2009.7
8	7.5	0.2926	2.13	143.0385	0.0	0.0	11.6	2008.1
9	8.5	0.2593	2.39	136.1693	2.2	0.0	13.0	2006.8
9	8.5	0.2593	2.65	136.1693	1.1	0.0	14.4	2005.7
10	9.5	0.2308	2.88	129.7778	1.4	0.0	15.6	2004.4
11	10.5	0.2512	3.13	123.7346	1.9	0.0	17.0	2002.7
12	11.5	0.2824	3.42	117.9656	0.9	0.0	18.5	2000.9
13	12.5	0.2763	3.69	112.4730	0.0	0.0	20.0	1999.2
14	13.5	0.2555	3.95	107.2327	0.0	0.0	21.4	1997.4
15	14.5	0.2809	4.23	102.1188	1.3	0.0	22.9	1995.9
16	15.5	0.2804	4.51	96.7710	1.7	0.0	24.4	1994.4
17	16.5	0.3346	4.84	91.2752	1.7	0.0	26.3	1992.8
18	17.5	0.3423	5.19	85.9794	1.2	0.0	28.1	1990.7

19	18.5	0.3719	5.56	81.2424	1.1	0.0	30.1	1988.5
20	19.5	0.3120	5.87	77.0715	1.1	0.0	31.8	1985.7
21	20.5	0.3772	6.25	73.1562	1.2	0.0	33.9	1983.2
22	21.5	0.3275	6.57	69.3864	1.2	0.0	35.6	1981.1
23	22.5	0.3255	6.90	65.6318	1.3	0.0	37.4	1979.1
24	23.5	0.3773	7.28	61.9387	1.0	0.0	39.4	1977.0
25	24.5	0.3777	7.66	58.3673	0.0	0.8	41.5	1975.0
26	25.5	0.3654	8.02	54.9092	0.0	0.0	43.5	1972.8
27	26.5	0.3884	8.41	51.5430	1.5	1.0	45.6	1970.0
28	27.5	0.4152	8.82	48.2970	1.2	0.9	47.8	1967.2
29	28.5	0.4044	9.23	45.2262	0.8	1.0	50.0	1963.7
30	29.5	0.4405	9.67	42.3616	0.9	0.0	52.4	1960.4
31	30.5	0.4015	10.07	39.7065	0.0	0.9	54.6	1956.8
32	31.5	0.4721	10.54	37.2455	1.0	0.0	57.1	1954.2
33	32.5	0.3488	10.89	34.9670	0.0	0.0	59.0	1950.6
34	33.5	0.3955	11.29	32.8187	0.8	0.8	61.2	1946.2
35	34.5	0.4101	11.70	30.7744	0.0	0.0	63.4	1941.6

Fuente: elaboración propia.

Anexo 4: Abundancia de dinoficistas en muestras del núcleo sedimentario (parte 1)

Muestra	Fecha	Profundidad (cm)	Índice de Shannon (H')	Riqueza (# especies de dinoficistas)	Error en concentraciones (Stockmarr, 1971)	Heterótrofos (dinoficistas g ⁻¹)	Autótrofos (dinoficistas g ⁻¹)	H/A	<i>Archaeoperidinium</i> spp.	<i>Bifetodinium</i> spp.	<i>Brigantedinium cariacense</i>	<i>Brigantedinium simplex</i>	<i>Brigantedinium</i> spp.	<i>Echinidinium</i> spp.	<i>Impagidinium</i> spp.	<i>Lingulodinium machaerophorum</i>	<i>Nematosphaeropsis labyrinthus</i>	<i>Operculodinium</i> spp.
MUCBX1-Q-1	2020.4	1	4.11	32	1220	17 603	1629	10.8	475	0	91	272	475	10 000	0	113	45	226
MUCBX1-Q-2	2019.2	2	3.99	24	2251	22 737	2698	8.4	578	0	0	193	0	8382	96	0	0	96
MUCBX1-Q-3	2018.0	3	4.34	33	1949	17 768	2921	6.1	958	0	96	527	96	7902	383	144	48	0
MUCBX1-Q-4	2016.8	4	3.39	27	1426	14 527	912	15.9	152	0	0	152	0	4863	61	30	30	30
MUCBX1-Q-5	2015.4	5	3.85	29	1123	11 566	2126	5.4	161	0	97	64	193	3802	64	0	0	387
MUCBX1-Q-6	2013.9	6	4.05	34	1150	13 738	3463	4.0	475	0	0	45	0	5500	136	23	136	45
MUCBX1-Q-7	2012.3	7	3.15	31	1601	16 170	5623	2.9	368	147	74	184	0	6872	257	0	110	0
MUCBX1-Q-8	2010.7	8	3.87	31	1711	12 564	9048	1.4	237	0	0	0	0	5769	514	0	79	79
MUCBX1-Q-9	2009.2	9	4.41	36	1785	14 409	7061	2.0	369	41	41	164	41	5296	739	82	123	0
MUCBX1-Q-10	2007.6	10	3.69	31	1355	14 335	6905	2.1	638	0	23	23	91	5652	228	0	46	0
MUCBX1-Q-11	2006.1	11	3.80	38	2059	15 495	14 602	1.1	317	58	58	144	173	5127	720	0	86	86
MUCBX1-Q-12	2004.6	12	3.83	29	1998	13 443	10 875	1.2	401	201	0	0	0	5618	482	0	201	0
MUCBX1-Q-13	2003.0	13	4.04	32	1631	12 117	8468	1.4	551	103	34	103	0	5060	379	0	138	0
MUCBX1-Q-14	2001.5	14	3.85	32	1213	12 585	3633	3.5	203	58	0	0	0	5522	203	29	58	0

MUCBX1-Q-15	2000.0	15	3.76	33	1094	15 715	5559	2.8	964	56	0	28	112	7389	168	28	112	0
MUCBX1-Q-16	1998.3	16	4.02	34	3297	23 790	8120	2.9	142	71	0	142	0	13 604	499	71	214	71
MUCBX1-Q-17	1996.5	17	4.45	35	709	6894	1937	3.6	277	646	23	69	0	3482	323	23	23	23
MUCBX1-Q-18	1994.6	18	4.34	36	506	5078	1908	2.7	158	284	47	32	0	2586	142	63	16	16
MUCBX1-Q-19	1992.8	19	4.31	38	838	9679	2646	3.7	536	134	84	167	17	3818	167	17	50	33
MUCBX1-Q-20	1991.0	20	4.26	32	903	10 130	3215	3.2	1140	112	56	56	336	4859	262	0	0	56
MUCBX1-Q-21	1989.4	21	4.48	38	795	7889	3070	2.6	335	56	112	167	74	3740	372	74	19	19
MUCBX1-Q-22	1987.7	22	4.27	30	1374	12 636	2297	5.5	722	98	131	197	0	6860	361	66	66	0
MUCBX1-Q-23	1985.9	23	4.00	33	402	5284	686	7.7	541	58	135	87	0	2492	58	29	0	0
MUCBX1-Q-24	1984.1	24	3.87	30	1266	16 002	783	20.4	313	78	287	418	209	9998	131	26	0	104
MUCBX1-Q-25	1982.3	25	2.66	18	1212	12 207	1116	10.9	70	70	0	0	70	9766	0	0	0	419
MUCBX1-Q-26	1980.3	26	3.85	31	1152	13 346	996	13.4	592	108	0	511	27	8422	81	27	27	0
MUCBX1-Q-27	1978.3	27	4.32	35	1951	19 019	3308	5.8	1132	131	566	740	0	11 141	435	131	131	0
MUCBX1-Q-28	1976.3	28	4.34	34	577	6958	974	7.1	236	94	204	298	79	3613	141	0	0	0
MUCBX1-Q-29	1974.2	29	4.53	34	988	8221	2212	3.7	726	198	0	264	99	4556	99	0	132	0
MUCBX1-Q-30	1972.1	30	3.87	29	1099	9245	2397	3.9	457	380	114	0	266	5517	114	76	0	76
MUCBX1-Q-31	1970.0	31	4.51	34	767	6166	2438	2.5	280	224	112	336	0	3279	168	28	28	0
MUCBX1-Q-32	1968.0	32	4.30	28	458	4776	1949	2.5	604	27	55	412	0	2223	110	27	27	0
MUCBX1-Q-33	1965.9	33	4.39	31	360	3012	1608	1.9	175	58	29	175	0	1082	146	29	29	0
MUCBX1-Q-34	1963.9	34	4.36	28	590	6075	2209	2.8	614	61	0	0	61	2884	307	61	0	0
MUCBX1-Q-35	1961.9	35	4.04	29	426	4573	799	5.7	136	85	102	34	680	1802	51	51	0	119
MUCBX1-Q-40	1946.0	40	3.25	21	999	9611	1035	9.3	133	167	33	0	400	6307	33	0	0	100
MUCBX1-Q-45	1936.0	45	3.17	20	1160	12 652	684	18.5	1436	68	0	0	274	8685	0	0	0	68
MUCBX1-Q-50	1923.0	50	3.19	19	946	11 716	828	14.1	1499	197	0	39	237	7613	0	0	0	0
MUCBX1-Q-55	1912.0	55	3.31	27	1498	16 979	872	19.5	2550	268	0	67	201	11 375	0	34	0	201
MUCBX1-Q-60	1901.0	60	3.79	34	1207	13 670	1272	10.7	2626	27	0	0	271	7769	0	54	27	244

Fuente: elaboración propia.

Anexo 5: Abundancia de dinoquistes en muestras del núcleo sedimentario (parte 2)

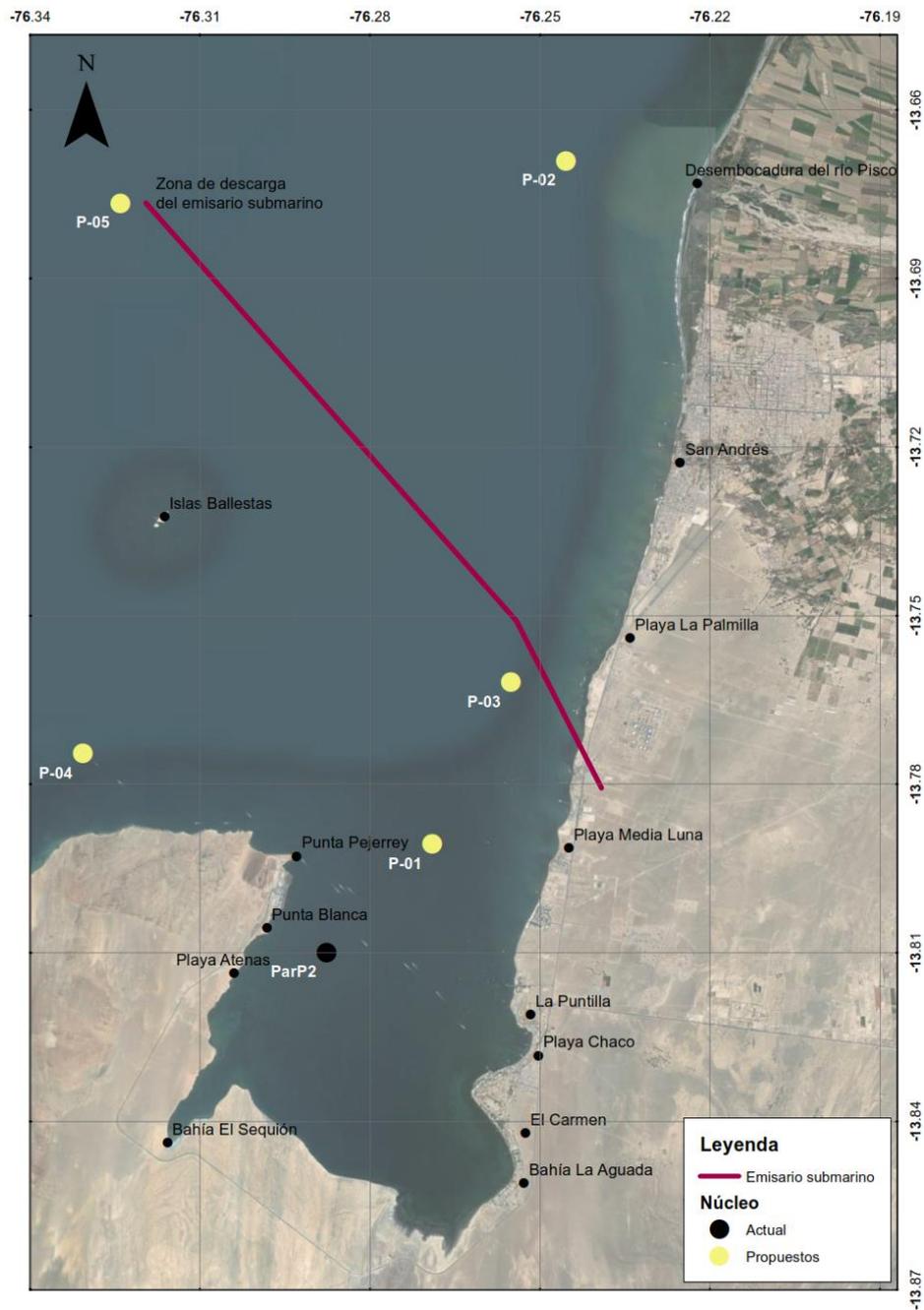
Muestra	Quietes de <i>Polykrikos kofoidii</i>	Quietes de <i>P. schwartzii</i>	<i>Polykrikos</i> sp. 1	<i>Protoperidinium americanum</i>	<i>Quinquecupis concreta</i>	<i>Selenopemphix nephroides</i>	<i>Selenopemphix quanta</i>	<i>Selenopemphix undulata</i>	<i>Spiniferites delicatus</i>	<i>Spiniferites membranaceus</i>	<i>Spiniferites pachydermus</i>	<i>Spiniferites</i> sp. 1	<i>Spiniferites ramosus</i>	<i>Spiniferites</i> sp. 2	<i>Spiniferites</i> spp.	<i>Stelladinium stellatum</i>	<i>Trinovantedinium applanatum</i>	<i>Votadinium calvum</i>	<i>Votadinium spinosum</i>
MUCBX1-Q-1	1131	792	181	226	973	91	45	0	294	0	23	0	0	701	226	1901	0	249	249
MUCBX1-Q-2	1541	2601	193	1349	2601	482	0	193	0	0	0	867	1445	0	96	0	0	3565	1060
MUCBX1-Q-3	1724	1485	239	671	1676	335	48	96	48	0	383	1054	814	48	0	1341	0	48	527
MUCBX1-Q-4	1945	1185	122	243	638	152	0	0	0	30	0	547	152	30	0	4711	0	122	243
MUCBX1-Q-5	1514	1063	64	1031	2126	226	32	0	161	0	0	0	0	1450	64	838	0	32	258
MUCBX1-Q-6	770	2512	68	249	2806	136	91	181	0	91	475	1652	543	339	0	566	0	113	204
MUCBX1-Q-7	1286	882	74	478	4153	37	74	147	74	294	404	2977	1323	37	0	992	0	257	294
MUCBX1-Q-8	1343	751	158	79	2726	158	40	79	0	593	435	5373	1462	395	119	790	0	119	316
MUCBX1-Q-9	862	534	123	369	3777	82	287	82	287	534	575	3202	1026	411	41	1560	0	287	534
MUCBX1-Q-10	1572	273	23	23	3988	273	46	137	0	0	2735	1778	160	1960	0	1139	23	182	205
MUCBX1-Q-11	1584	662	29	144	4810	202	86	202	144	950	4407	6941	979	144	86	1526	0	173	259
MUCBX1-Q-12	1003	441	80	241	3692	120	0	201	0	361	1284	6140	1685	522	0	1003	0	201	401
MUCBX1-Q-13	1136	379	69	34	3133	138	0	69	654	138	1205	4028	1274	551	0	757	0	275	344
MUCBX1-Q-14	930	320	116	610	3430	87	116	87	0	203	349	1976	698	29	0	610	0	87	320
MUCBX1-Q-15	1760	349	112	14	3394	196	98	14	56	0	2389	1592	237	922	0	922	0	70	279

MUCBX1-Q-16	1781	285	71	499	4345	285	71	142	0	641	855	3561	2066	71	0	1496	0	214	712
MUCBX1-Q-17	461	461	46	138	899	208	23	0	0	0	115	323	438	0	0	484	69	69	184
MUCBX1-Q-18	505	284	32	173	804	95	16	16	0	0	0	788	284	237	47	189	0	95	32
MUCBX1-Q-19	938	586	117	50	1876	435	17	33	0	0	603	1055	151	352	67	603	67	117	218
MUCBX1-Q-20	953	187	0	93	1065	374	75	112	0	0	1701	0	206	878	0	430	37	75	280
MUCBX1-Q-21	1116	261	112	74	856	130	93	19	130	0	819	1209	167	186	0	465	37	93	205
MUCBX1-Q-22	1116	689	33	591	1149	131	197	0	0	33	0	1149	427	0	98	427	0	197	197
MUCBX1-Q-23	415	599	10	97	628	68	0	10	0	0	58	377	0	97	10	145	19	10	29
MUCBX1-Q-24	1227	1488	0	392	966	78	52	26	0	0	0	183	261	0	0	339	26	26	157
MUCBX1-Q-25	419	767	0	279	349	209	0	0	0	0	0	0	0	628	0	140	0	70	70
MUCBX1-Q-26	592	1345	54	296	726	135	0	27	0	0	0	377	242	0	108	377	54	81	108
MUCBX1-Q-27	1480	783	218	174	1306	653	131	44	0	0	783	914	435	44	218	218	87	174	174
MUCBX1-Q-28	597	660	31	377	487	126	47	63	16	0	31	236	157	141	126	31	63	16	31
MUCBX1-Q-29	594	462	132	99	726	132	0	99	33	0	363	891	330	132	33	132	33	66	99
MUCBX1-Q-30	761	304	304	723	266	342	38	38	152	0	152	0	0	1408	38	0	0	38	38
MUCBX1-Q-31	504	280	112	56	589	56	28	84	56	448	336	448	336	56	308	56	28	28	336
MUCBX1-Q-32	329	165	0	0	412	0	27	82	0	357	192	494	384	0	329	137	0	0	329
MUCBX1-Q-33	205	117	29	175	351	58	58	29	0	234	292	380	263	0	175	29	29	29	439
MUCBX1-Q-34	859	184	123	61	614	0	0	245	0	307	368	123	552	61	368	0	61	123	245
MUCBX1-Q-35	510	544	34	255	306	34	17	0	17	0	0	0	0	425	51	17	51	51	0
MUCBX1-Q-40	667	1035	67	33	367	300	0	33	0	0	0	0	0	0	701	0	0	200	67
MUCBX1-Q-45	821	684	68	137	137	205	0	0	0	0	0	0	0	0	547	0	68	68	68
MUCBX1-Q-50	592	434	39	118	789	118	0	118	0	0	0	0	0	0	631	0	118	0	0
MUCBX1-Q-55	604	638	336	101	604	101	101	101	0	134	0	0	67	0	168	0	0	168	34
MUCBX1-Q-60	1164	839	54	81	460	108	27	27	27	0	352	0	0	0	541	54	54	27	108

Fuente: elaboración propia.

Anexo 6: Posibles líneas de investigación a futuro

Este estudio puede ser utilizado como base para una investigación más detallada de la variabilidad climática en la bahía de Paracas en función a la abundancia y composición de dinoquistes, para ello, se recomienda la extracción de cinco núcleos sedimentarios adicionales. La ubicación de estos núcleos sedimentarios se muestra en la imagen. El núcleo P-01 aportaría más información de lo que ocurre en una zona menos protegida de la bahía, con una mayor influencia oceánica y más dinámica. El núcleo P-02 aportaría más información sobre la influencia del río Pisco y el desarrollo de las actividades agrícolas en la bahía de Paracas. El núcleo P-03 aportaría más información de la actividad antrópica, más relacionada a las fábricas de harina de pescado y como esta ha cambiado en el tiempo. El núcleo P-04 aportaría información de solo la influencia oceánica en la parte externa de la bahía de Paracas y el núcleo P-05 aportaría información de las condiciones ambientales en la zona de descarga del emisario submarino y como esta ha cambiado en el tiempo. En general, esta información conjunta brindaría un mayor entendimiento de la variabilidad ambiental en la bahía de Paracas y su respuesta ante las actividades antrópicas.



Anexo 7: Financiamiento del proyecto de investigación

El desarrollo de este proyecto contó con el financiamiento del Programa de Incorporación de Investigadores (Nº E038-2019-02-FONDECYT-BM) – proyecto UPCH “Sostenibilidad económica del ecosistema marino-costero frente a los riesgos climáticos” y recibió la asesoría constante de los especialistas de la Universidad Peruana Cayetano Heredia: Dr. Dimitri Alexey Gutiérrez Aguilar y Dra. Tomasa del Carmen Cuellar Martínez. El detalle del financiamiento se muestra a continuación:

Elemento	Cantidad	Costo (S/.)
Fase de campo		
Alquiler de embarcación	1 día	850.00
Honorarios de buzo profesional	1 día	300.00
Fase de laboratorio		
Piseta de boca ancha de 500 ml	3 unidades	25.50
Probeta graduada de 100 ml	12 unidades	168.00
Tubo cónico de 15 ml	100 unidades	77.00
Tubo cónico de 50 ml	100 unidades	120.00
Varilla de agitación magnética 60x9 mm	1 paquete	250.00
Cubre-objetos 7.5 x 2.4 cm	100 unidades	5.00
Porta-objetos 7.5 x 2.4 cm	100 unidades	20.00
Etanol	1 litro	37.50
Fenol de grado reactivo	500 gramos	370.50
Glicerina de grado reactivo	1 litro	69.00
Ácido clorhídrico fumante 37%	1 litro	21.35
Ácido fluorhídrico 40%	1 litro	84.92
Pastillas de <i>Lycopodium clavatum</i> (marcador)	250 unidades	1020.50
Agitador magnético de 10 espacios	1 unidad	3900.00
Alquiler de campana extractora	10 días	5203.00
		Total S/. 12522.27

Fuente: elaboración propia.