

# Estilo estructural y modelo de evolución tectónica, cuenca Pisco Este, costa afuera - Perú

## Structural style and tectonic evolution model, Pisco Este Basin, offshore - Peru

Fernando Daniel Peña Sierra<sup>1</sup>, Carlos Del Valle Jurado<sup>2,b</sup>, Javier Pablo Jacay Huarache<sup>2,c</sup>

Recibido: 15/04/2023 - Aprobado: 29/06/2023 – Publicado: 06/10/2023

### RESUMEN

La cuenca Pisco Este pertenece al conjunto de cuencas del antearco peruano. Lo que se conoce de esta cuenca proviene de la descripción e interpretación de excelentes afloramientos a lo largo de la costa. El sector costa afuera de la cuenca Pisco Este se caracteriza por tener una historia tectónica compleja la cual ha sido interpretada en este estudio basado en la información de subsuelo (sísmica 2D-3D) e integrada con la información geológica del sector costero. Se interpretaron horizontes sísmicos correspondientes a unidades estratigráficas, los principales sistemas de fallas y plegamiento. Se interpretan principalmente 3 intervalos de deformación de la cuenca, se determinan los principales estilos estructurales y se propone un modelo de evolución tectónica.

**Palabras claves:** Cuenca Pisco Este, costa afuera, sísmica 2D y 3D, estilo estructural, evolución tectónica, fallas, pliegues.

### ABSTRACT

The East Pisco basin belongs to the group of basins of the Peruvian forearc. This basin has been studied based on the description and interpretation of excellent outcrops along the coast. The East Pisco basin in its offshore area is characterized by a complex tectonic history which has been interpreted in this study with subsurface information (2D-3D seismic) and integrated with the geological information of the coastal sector. This paper shows the interpretation of seismic horizons corresponding to stratigraphic units, the main fault, and folding systems. The main structural styles of the basin are determined, and a model of tectonic evolution is proposed.

**Keywords:** Pisco Este Basin offshore area, seismic 2D y 3D, structural style, tectonic evolution, faults, folding.

1 Repsol Services Co., 2455 Technology Forrest Blvd. The Woodlands, TX 77381, USA.

Autor para correspondencia: [daniel.pena@repsol.com](mailto:daniel.pena@repsol.com) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3005-2111>

2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.

a E-mail: [codelvallej@unmsm.edu.pe](mailto:codelvallej@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3040-1396>

b E-mail: [jjacayh@unmsm.edu.pe](mailto:jjacayh@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9642-9028>

## I. INTRODUCCIÓN

La cuenca Pisco Este (Figura 1) pertenece al conjunto de cuencas del antearco peruano, que limita por el oeste con el alto estructural conocido como cordillera de la Costa (Outer Shelf High: OHS and Upper Slope Ridge USR según Thornburg y Kulm, 1981) y por el este con la cordillera Occidental. Este sector costa afuera de la cuenca Pisco Este se caracteriza por tener una historia tectónica compleja y poco conocida. Lo que se conoce de esta cuenca proviene de la descripción e interpretación de los afloramientos a lo largo de la costa (Vicente et al. 2000, León et al. 2008, Viveen et al. 2021, Ochoa et al. 2021 entre otros) que evidenciaron rasgos de extensión y compresión que afectaron la cuenca a lo largo del Cenozoico.

Este trabajo integra dos tipos de información clave: 1) Información sísmica 2D y 3D (Figura 2) y su respectiva interpretación geológica en el sector costa afuera principalmente y, 2) los trabajos recientes de geología de superficie realizadas por compañías petroleras privadas y estatales y la información técnica existente.

El objetivo principal fue realizar un análisis del estilo estructural para generar un modelo de evolución tectónica para el Cenozoico en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica. Lima. Perú. Adicionalmente, se determinó el estilo estructural dominante durante diferentes periodos y edades, así como la cinemática de los rasgos estructurales principales tales como fallas y pliegues del Cenozoico en la cuenca.

## II. MÉTODOS

### 2.1. Tipo y diseño de la investigación

En este proyecto las variables no son manipuladas, razón por la cual es considerada como “tipo no experimental”.

**Observacional:** El proyecto se basa principalmente en la interpretación geológica de información sísmica. También se integrará información geológica de superficie, por ende, el diseño es transversal – causal.

**Analítica:** Se basa en la interpretación de la información sísmica de la que se obtienen los horizontes (unidades estratigráficas) y rasgos estructurales (fallas y pliegues). Finalmente, se define el estilo estructural y se genera un modelo de evolución tectónica

### 2.2. Unidad de análisis

En este estudio se recopiló de diferentes fuentes, según IEs el grupo de horizontes, unidades estratigráficas, fallas y pliegues interpretados de la información sísmica de la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica. Lima. Perú.

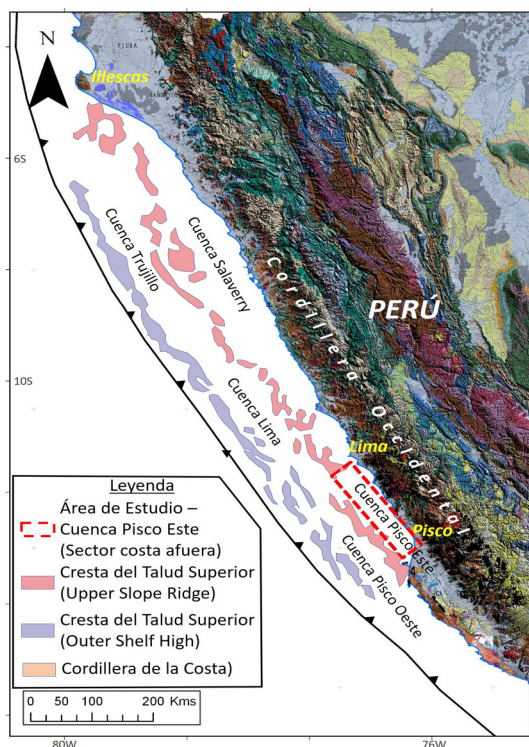
### 2.3. Población de estudio

Para el estudio se utilizó principalmente la información sísmica siguiente (Figura 2):

- 2,496 km de líneas sísmicas 2D.
- 1429 km<sup>2</sup> de cubos sísmicos.

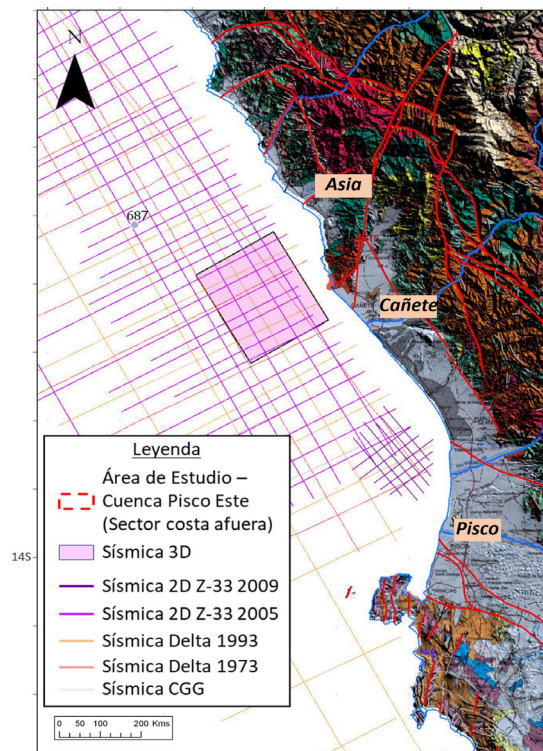
**Figura 1**

Mapa de altos estructurales de la cuenca del antearco peruano (representan los arcos externos de la cuña exterior de la cuenca según Thornburg y Kulm, 1981). Figura modificada de Romero et al 2013



**Figura 2**

Mapa base de información sísmica 2D y 3D



**Tamaño de la muestra**

La muestra está determinada de la siguiente manera:

- Horizontes sísmicos que corresponden a las unidades estratigráficas del Cenozoico (Tabla 1 y Figura 3).
- Mapas estructurales (Tabla 1).
- Setenta y uno fallas correspondientes a fallas normales, inversas y transcurrentes (Figura 4).
- Tres pliegues por propagación de falla (Figura 4).

**2.4. Técnicas de recolección de datos**

La recopilación de información y el análisis bibliográfico se realizó de la siguiente manera:

1. La información técnica geológica (reportes técnicos de estudio y pozos) y geofísica (sísmica 2D y 3D) fue proporcionada por la compañía estatal Perupetro S.A.
2. La bibliografía fue obtenida de diferentes fuentes tales como: Sistema de Bibliotecas y Biblioteca Central de la UNMSM: <https://sisbib.unmsm.edu.pe/> y recursos electrónicos como: Web of Science, Scielo, Scopus Science Direct, AAPG Datapages/Archives.

**2.5. Tipo de datos y fuentes**

*Primera etapa: Construcción del proyecto*

El manejo de la información geológica-geofísica se realizó principalmente utilizando un software técnico, que nos permitió construir un proyecto con el que se pudo realizar el control de calidad de la información técnica, que será utilizada, integrada e interpretada de la siguiente manera: 1. Información Sísmica 2D y 3D. 2. Información geológica del sector costero de la cuenca.

*Segunda etapa: Interpretación de la información sísmica*

El instrumento de la investigación es la información del subsuelo denominada como información sísmica. De la interpretación de la información sísmica se obtuvieron dos elementos importantes, tales como estratigráficos y estructurales: 1) Horizontes o consideradas aquí como unidades estratigráficas. 2) Fallas y pliegues.

Se interpretaron 6 reflectores sísmicos con clara continuidad lateral que corresponden a horizontes o unidades estratigráficas identificadas, correlacionadas con la geología de superficie del sector costero correspondientes a la cuenca Cenozoica (Figura 3, Figura 4 y Tabla 1).

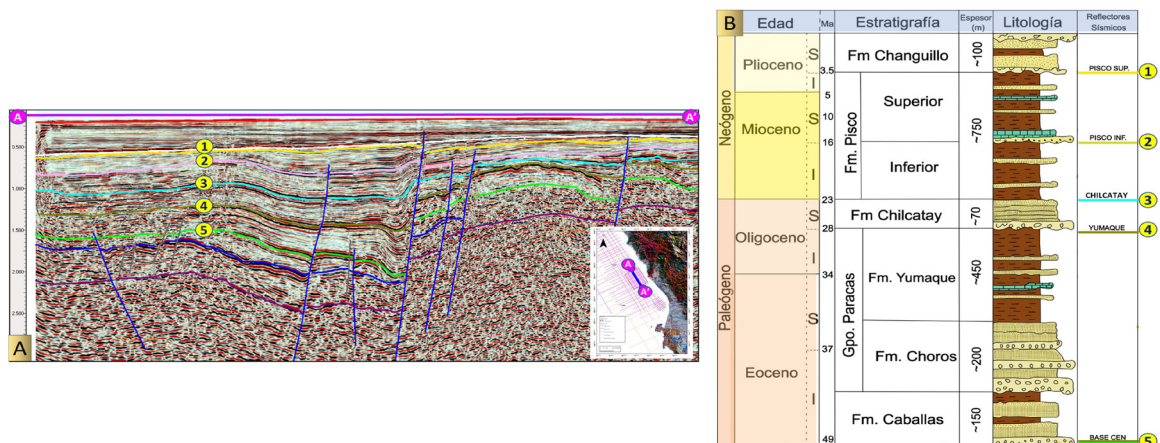
**Tabla 1**

*Horizontes interpretados, integrados con unidades estratigráficas reconocidas y sus correspondientes mapas estructurales de la cuenca Pisco Este - Sector costa adentro.*

ID	Horizonte interpretado	Edad	Ma	Tipo de mapa
1	Fm. Pisco Superior - Changuillo y Cañete	Mioceno superior al reciente	~16 - 0 Ma	Mapa estructural en profundidad
2	Fm. Pisco Inferior	Mioceno inferior	~30 - 16 Ma	Mapa estructural en profundidad
3	Fm. Chilcatay	Oligoceno superior - Mioceno inferior		
4	Fm Yumaque	Eoceno superior tardío - Oligoceno temprano	~47 - 30 Ma	Mapa estructural en profundidad
	Fms. Choros y Caballas	Eoceno superior		
5	Base Cenozoico (Tope Cretáceo)	Eoceno inferior (~47 Ma)		

**Figura 3**

*Interpretación de horizontes y sus correspondientes unidades estratigráficas.*



*Nota:* (Izquierda) Horizontes clave del 1 – 5 interpretados en la sísmica. Para referencia de la numeración ver Tabla 1. Formaciones estratigráficas del Cenozoico de la cuenca de Pisco Este y reflectores y horizontes interpretados (numeración asignada en la Tabla 1). Columna estratigráfica modificada de Savia 2011 (estratigrafía en León et al., 2008)

En base a esta interpretación se seleccionaron 3 intervalos clave (Tabla 1) correspondientes a:

- Intervalo I: entre ~47/~30 Ma (Eoceno medio – Oligoceno inferior. formaciones Caballas, Choros y Yumaque).
- Intervalo II: entre ~30 - ~16 Ma (Oligoceno superior – Mioceno inferior, formaciones Chilcatay y Pisco Inferior).
- Intervalo III: entre ~16 - 0 Ma (Mioceno superior al reciente, formaciones Pisco Superior – Changuillo).

El segundo set de datos importantes obtenidos de la interpretación de la sismica fueron las fallas (tipo normal, inversa y rumbo sinistral y dextral) y plegamiento (tipo anticlinal).

El análisis de las fallas y pliegues se realizó mediante el uso de estereogramas, que nos permitió representar la geometría de las estructuras y obtener los esfuerzos principales  $\sigma_1$  – compresivo “P”,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  - tensional “T” (tensional). El software utilizado para el análisis estructural es el Tensor Co.

*Tercera etapa: Elaboración de mapas estructurales, determinación del estilo estructural e interpretación del modelo de evolución tectónica*

Como resultado de la interpretación sísmica de los horizontes, fallas y pliegues y sus características se elaboraron tres mapas estructurales para los tres intervalos mencionados anteriormente (Tabla 1). Con esta información se determinó el estilo estructural, la cronología y se generó un modelo de evolución tectónica.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La información sísmica se analizó y se interpretaron tres características principales: 1) Sistema de fallas y pliegues, 2) Intervalo y, 3) finalmente su respectiva asociación de fallas. Estas características se describirán y discutirán a continuación.

##### *Sistemas de fallas*

Se definieron 5 sistemas de fallas y 1 sistema de pliegues anticlinales (Figura 4):

Sistema 1 – Fallas normales (extensionales/en-echelón) - ~NO-SE. Correspondientes al borde oriental de la cordillera de la Costa.

Sistema 2 – Fallas normales ~SO-NE. Correspondientes al sistema de grábenes y hemigrábenes.

Sistema 3 – Fallas de rumbo ~NNO-SSE (dextral y sinistral). Corresponden al sistema de fallas inicialmente dextral y posteriormente sufren “inversión tectónica o reactivación” en sentido sinistral.

Sistema 4 – Fallas de liberación ~SO-NE relacionadas a la formación de grábenes.

Sistema 5 – Fallas normales reactivadas ~SO-NE relacionadas al sistema de grábenes.

Sistema I – Pliegues anticlinales por propagación de fallas con la orientación del eje de sus charnelas semi-paralelas al sistema 3 de fallas de rumbo (Sistema 3).

##### *Intervalos*

Los intervalos están basados en la información que proveen los mapas estructurales, que permitieron reconocer los sistemas de fallas activos y cómo interactúan estos sistemas en un periodo de edad. Adicionalmente, esta información permitió proponer la cronología de la deformación de esta parte de la cuenca.

Los tres “intervalos” se definen de la siguiente manera (Tabla 1):

##### **1. Intervalo I: entre ~47/~30 Ma (Eoceno medio – Oligoceno inferior (formaciones Caballas, Choros y Yumaque))**

Este mapa (Figura 5A) permite observar especialmente zonas de altos y bajos estructurales con lo cual se puede deducir la geometría de la cuenca.

La Figura 5A, muestra también dos rasgos morfoestructurales regionales importantes, ya que se convierten en los límites de la cuenca. Por el oeste se tiene la cordillera de la Costa y por el este se tiene la cordillera Occidental de los Andes.

Los rasgos estructurales identificados que afectan a este primer intervalo corresponden principalmente a fallas normales y de rumbo principalmente.

##### *Sistema de fallas del Intervalo I*

En el mapa estructural de la Figura 5A, se registran los siguientes sistemas de fallas que afectaron este Intervalo I:

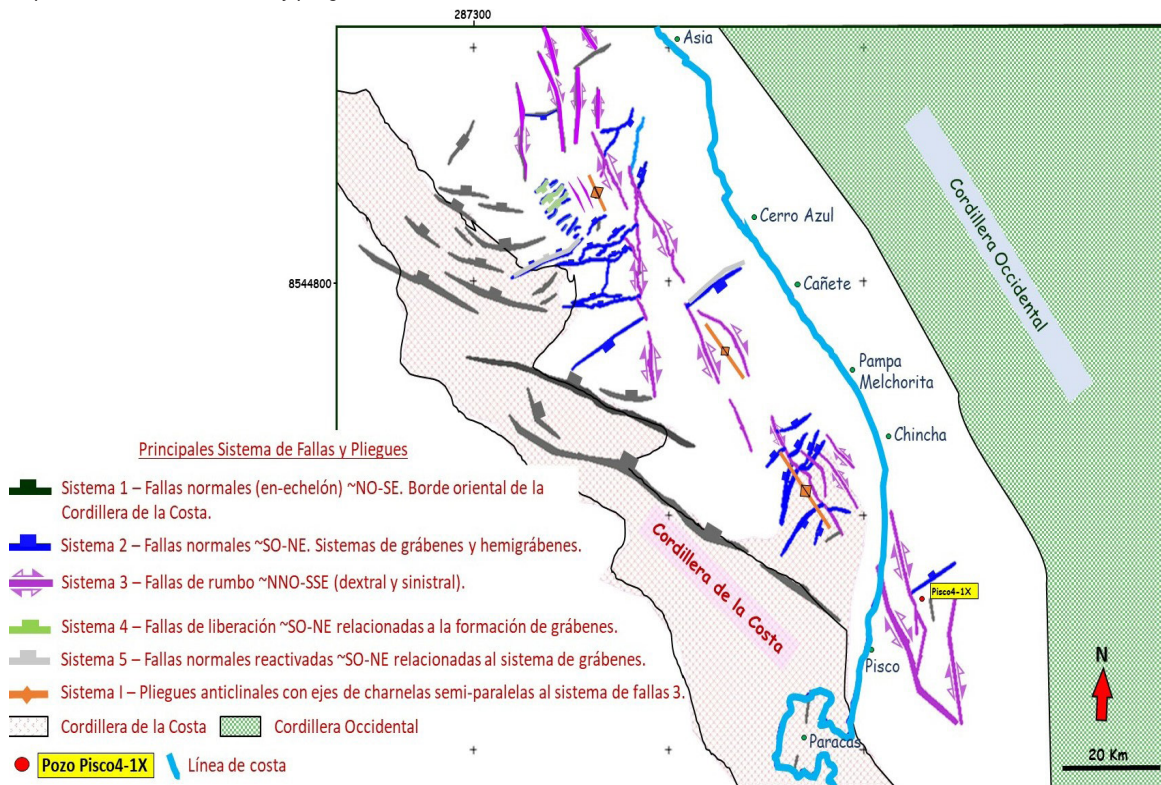
Sistema 1 – Fallas normales en-echelón ~NO-SE relacionadas al borde oriental de la cordillera de la Costa (Figura 5A, fallas grises). Estas fallas tienen una dirección de buzamiento promedio de  $139^\circ$  con buzamientos promedios de hasta  $65^\circ$ , en su mayoría orientados al noreste.

Sistema 2 – Fallas normales ~SO-NE (Figura 5A, fallas azules). Estas fallas tienen una dirección de buzamiento en un rango  $300-25^\circ$  con buzamientos promedios de hasta  $65^\circ$ , en su mayoría orientados al noroeste o sureste. Estas fallas son fácilmente visualizadas en secciones o líneas sísmicas que tienen una orientación NOO-SEE (perpendiculares a las fallas) y están relacionadas a un conjunto de grábenes y hemigrábenes.

Sistema 3 – Fallas de rumbo dextral ~NNO-SSE (Figura 5A, fallas magenta). Estas fallas en su mayoría tienen una dirección de buzamiento promedio de  $330^\circ$  con buzamientos altos de  $80^\circ$ SW en promedio y moderados hasta  $65^\circ$ SW, en su mayoría orientados al suroeste. Existe un grupo subordinado a este sistema con un rumbo promedio de S  $65^\circ$ E con buzamientos altos de hasta  $80^\circ$ SW en promedio.

Finalmente, con la agrupación del sistema de fallas de este intervalo se definió la primera asociación de fallas.

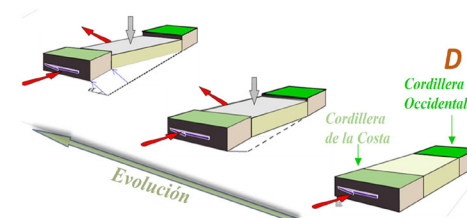
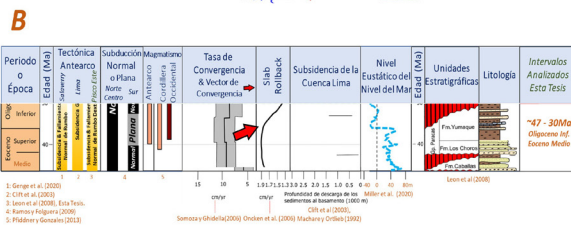
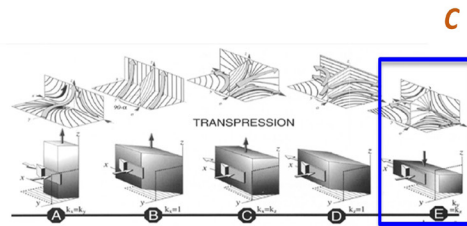
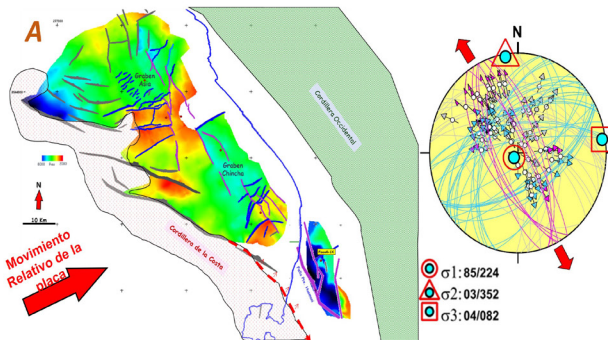
**Figura 4**  
 Mapa de los sistemas de fallas y pliegues del área de estudio



**Figura 5**  
 Intervalo I

- Asociación I de sistemas de fallas.
- Interpretación – Intervalo ~47 -- ~30Ma (Eoceno Medio – Oligoceno Inferior)

- Tectónica:**
- Dominio y acoplamiento de fallas normales y de rumbo Dextral.
  - Convergencia de placas con alta oblicuidad generando una deformación transpresional entre dos bloques rígidos (Cordilleras de la Costa y la Occidental) resultando en subsidencia de la cuenca Pisco Este.
  - Como resultado del patrón de fallamiento de la cuenca se tiene un vector de extensión de ~N340°.



Nota: A): Mapa estructural de Asociación I (explicación en la Figura 18); la flecha roja representa el movimiento relativo de la convergencia de la placa oceánica Farallón. B) fragmento de la Figura 2 del intervalo ~47-30 Ma con los factores más importantes que delinean la geometría final de una cuenca Pisco Este. C) El polígono azul resalta el tipo E (según Fossen y Tikoff, 1998) del espectro de deformación por transpresión

### ***Asociación I de sistemas de fallas***

Asociación I (Figura 5A): interpretada en base a la integración de: 1) Los sistemas de fallas 1, 2, 3 y 4. 2) Mapa estructural.

Estos tres sistemas corresponden a las fallas normales del borde oriental de la cordillera de la Costa, las fallas normales de los grábenes Sarapampa y Chíncha y fallas de rumbo.

Se interpreta que esta Asociación I tiene un componente principalmente extensional con un acople de fallas de rumbo dextral (Figura 5A).

Cronológicamente se le asigna una edad Pre-Eoceno medio (>~47Ma) – Oligoceno inferior (~ 37- 30 Ma) involucrando a las formaciones Caballas, Choros y Yumaque.

### ***Interpretación y discusión***

La Asociación I, está conformado por un patrón de fallamiento con un dominio de fallas normales y acopladas con fallas de rumbo dextral, que tiene como resultado una dirección de paleo-esfuerzo extensional principal ~N340 (Figura 5A) entre ~47 a 30 Ma.

Noda et al. (2016) considera que los factores más importantes que delimitan la geometría final de una cuenca de antearco son la configuración de la convergencia de placas, la cinemática de convergencia (tasa de velocidad, inclinación y oblicuidad).

En este periodo de tiempo (~47 a 30 Ma) (Figura 5B, Figura 8) la margen peruana experimentó una convergencia entre la placa Farallón y Sudamérica (Pardo-Casas y Molnar, 1987 y Somoza y Ghidella, 2006) con una orientación de convergencia oblicua alta de la placa oceánica (ángulo ~N24°) (Pardo-Casas y Molnar, 1987 y Somoza y Ghidella, 2006). La tasa de convergencia tuvo una velocidad en promedio de 10 cm/año (Somoza y Ghidella, 2006), un retroceso (rollback) positivo (Oncken et al. 2006; Encinas et al. 2021), una importante subsidencia generando un importante espacio de acomodación (Clift et al. 2003) y según Ramos y Folguera (2009) la placa subductada habría experimentado “subducción normal”.

Principalmente, la convergencia de placas tuvo una importante oblicuidad sumado a otros factores descritos en el párrafo anterior que generaron una deformación transpresional entre dos bloques rígidos (cordilleras de la Costa y la Occidental) de acuerdo con el modelo Tipo E según Fossen y Tikoff (1998), resultando un acortamiento vertical ( $\sigma_1$ ) y un estiramiento horizontal ( $\sigma_3$ ). El estiramiento horizontal da como resultado las fallas normales y las fallas de rumbo permitiendo explicar el régimen extensional y subsidencia de la cuenca Pisco Este (Figura 5A-D).

Regionalmente, este régimen extensional ha sido observado y descrito en la parte continental o costera de esta cuenca (Vicente et al. 2000; León et al. 2008, Viveen y Schlunegger F, 2018 y Di Celma et al. 2022) así como

en otras cuencas del antearco peruano (Calderón, 2007 – cuenca Pisco oeste sector sur; Genge et al. 2020 – cuenca Salaverry).

### **2. Intervalo II: entre ~30 - ~16 Ma (Oligoceno superior – Mioceno inferior, formaciones Chilcatay y Pisco Inferior).**

El mapa estructural de la Figura 6A corresponde al intervalo de edad entre ~30 y ~16 Ma.

Los rasgos estructurales identificados que afectan a este segundo intervalo corresponden principalmente a fallas y pliegues.

Los altos estructurales en el mapa, corresponden principalmente a los anticlinales y a áreas que sufren levantamiento en el sector oeste y sur de la cuenca.

### ***Sistema de fallas y plegamiento del Intervalo II***

En el mapa estructural de la Figura 6A, se observan los siguientes sistemas de fallas y pliegues.

Sistema 3 – Fallas de rumbo sinistral ~NNO-SSE (Figura 6A). Estas fallas en su mayoría tienen una dirección de buzamiento promedio de 240° con buzamientos altos de 80° en promedio y moderados hasta 65°, en su mayoría orientados al suroeste. Existe un grupo subordinado a este sistema con una dirección de buzamiento promedio 155°, con buzamientos altos de hasta 80°SW en promedio.

Sistema I – Se identificaron 3 pliegues anticlinales (Figura 6A): por el sur se ubica el anticlinal San Salvador caracterizado por tener la inclinación del flanco dorsal más suave que el flanco frontal (40°SO y 64°NE, respectivamente) y un plunge resultante con una orientación hacia 321°. En la parte central se identificaron dos pliegues. El pliegue ubicado en el sector centro sur es el anticlinal Santa Sofía, también caracterizado por tener la inclinación del flanco dorsal más suave que el flanco frontal (5°SO y 14°NE, respectivamente). El tercer pliegue ubicado en el sector centro norte es el anticlinal San Felipe. Este último, caracterizado por tener la inclinación del flanco dorsal más suave que el flanco frontal (36°NE y 60°SO, respectivamente).

### ***Asociación II del sistema de fallas y pliegues***

Asociación II (Figura 6A) se interpreta en base a la integración de: 1) el Sistema de fallas 3 y el Sistema I de pliegues, 2) el mapa estructural.

Este sistema de Fallas 3 corresponden a las fallas de rumbo.

Se interpreta que esta Asociación II tiene una componente principalmente compresiva. Esta compresión es producto de “reactivación” en sentido sinistral de las fallas de rumbo (inversión tectónica de las fallas de rumbo dextral descritas en el “Intervalo I” correspondiente la base del Cenozoico). Además, está la reactivación o inversión tectónica de las fallas de rumbo, que dan como origen a los pliegues anticlinales.

Esta Asociación II de fallas tienen como resultado una dirección de paleo-esfuerzo compresivo principal ~N52 (Figura 6A).

Cronológicamente se le ha asignado a este intervalo un rango de edad Oligoceno superior (~30 Ma – 16 Ma) involucrando principalmente a las formaciones Chilcatay y Pisco Inferior.

**Interpretación y discusión**

La Asociación II, está conformada por un patrón que tiene un dominio de estructuras compresivas tipo pliegues anticlinales. Estos pliegues son formados como resultado de la “reactivación o inversión” de las fallas de rumbo dextral a un sentido sinistral (para este intervalo de tiempo). Además, estas fallas de rumbo sinistral tienen también un fuerte componente de falla tipo inversa (Figura 6A).

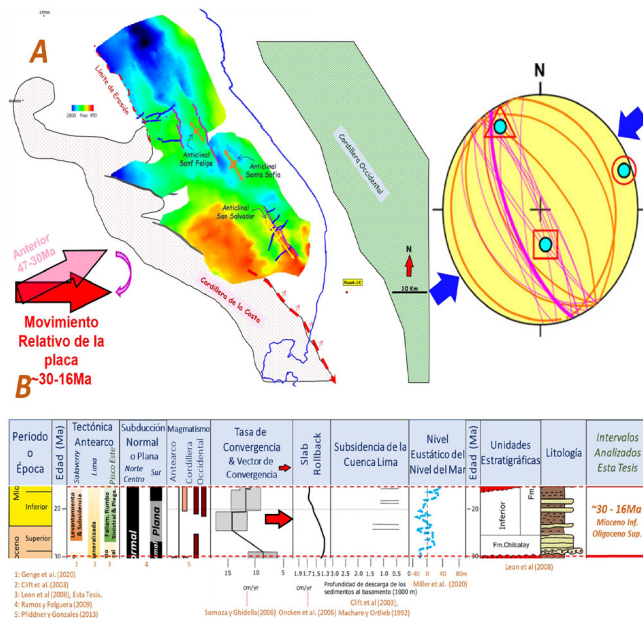
El patrón de fallamiento y plegamiento que experimenta la cuenca genera un vector de deformación predominante de ~N52° (Figura 6A y Figura 8). Tal como se mencionó anteriormente (de acuerdo con Noda et al. 2016) los factores más importantes que delimitan la geometría de la cuenca de antearco son la configuración y cinemática de la

convergencia. Consideramos que el vector de deformación es el resultado principalmente de un cambio en el ángulo de convergencia de las placas (de aproximadamente ~20° hacia el sureste con respecto al intervalo anterior ~47-30 Ma. Ver flechas rojas en la Figura 6A) y a un incremento en la tasa de velocidad de convergencia (la tasa de velocidad pasa de ~10 cm/año entre ~47-30 Ma a ~12-15 cm/año entre ~30 -16 Ma) (Pardo-Casas y Molnar, 1987 y Somoza y Ghidella 2006) (Figura 6). Estos dos últimos factores tuvieron un importante impacto en la cuenca y a nivel de toda la margen peruana, principalmente la convergencia de placas experimenta un cambio en la oblicuidad y junto con el incremento de la tasa de velocidad de convergencia generó una deformación transpresional compresivo entre dos bloques rígidos (cordilleras de la Costa y la Occidental) que nos permite plantear un modelo Tipo B según Fossen y Tikoff (1998), resultando un acortamiento horizontal ( $\sigma_1$ ) y un estiramiento vertical ( $\sigma_3$ ). El estiramiento vertical da como resultado la componente inversa de las fallas de rumbo sinistral permitiendo explicar el régimen compresivo y levantamiento de la cuenca Pisco este (Figura 6A-D y Figura 8).

Este cambio de régimen extensional a régimen compresivo fue gradual y puede ser identificado mediante

**Figura 6**  
Intervalo II

- Asociación II del sistema de fallas y pliegues.
- Intervalo entre ~30 - ~16 Ma (Oligoceno superior – Mioceno Inferior, Formaciones Chilcatay y Pisco Inferior). León también



**Tectónica:**

- Dominio de estructuras compresivas como resultado de la reactivación de las fallas de rumbo (antes dextral y para este intervalo sinistral) y estas mismas fallas con componente inverso.
- Debido a una modificación en el ángulo de convergencia de las placas (~20°) y el incremento en la velocidad de convergencia generó un cambio importante a un régimen de deformación transpresional compresivo.
- Como resultado del patrón de fallamiento y plegamiento de la cuenca se tiene un vector de deformación de ~N52°.

**Nota:** A) Mapa estructural de Asociación II, la flecha roja representa el movimiento relativo de la convergencia de la placa oceánica de Nazca. La flecha rosada indica la vergencia del intervalo previo y la flecha curva magenta representa el sentido de la rotación de la vergencia de las placas. B) fragmento de la Figura 2 del intervalo ~30-16 Ma con los factores más importantes que delimitan la geometría final de la cuenca Pisco Este. C) El polígono azul resalta el tipo B del espectro de deformación por transpresión (según Fossen y Tikoff 1998). D) Esquema evolutivo de la deformación del modelo tipo B aplicado a la cuenca Pisco Este

estratos de crecimiento en los anticlinales de San Salvador y Santa Sofía.

Regionalmente, este periodo de levantamiento ha sido identificado por varios autores, Vicente et al. (2000) evidencia rasgos de inversión tectónica con relieves positivos que estuvieron sujetos a erosión en el Mioceno medio. Mientras León et al. (2008) identifica en la parte continental de la cuenca Pisco Este, periodos de levantamiento y posterior extensión en el Mioceno medio. Di Celma et al. (2022) propone una erosión parcial o disección de la “mega-secuencia P” por un proceso de levantamiento en el Oligoceno tardío, Mioceno medio en la parte continental de la cuenca Pisco Este.

A nivel de la margen peruana, Calderón (2007) interpretó una “Secuencia II” de edad Mioceno medio, principalmente conformado por una secuencia transgresiva con una importante superficie de erosión por acción de olas hacia el oeste de la cuenca. Es importante mencionar que el autor principalmente atribuye esta secuencia a un evento estratigráfico (dominado por eustatismo) más que estructural. Dentro de nuestra área de estudio hemos considerado para nuestra interpretación la curva de nivel eustático (Miller et al. 2020) (Figura 8) e identificamos que durante la inversión tectónica o reactivación de las fallas de rumbo sinistral y su plegamiento asociado se observan estratos de crecimiento al inicio de levantamiento de la estructura, con un predominio de levantamiento de la estructura. Asimismo, durante esta deformación se puede observar estratos que sobrepasan a la estructura depositando sedimentos sobre los anticlinales, lo que interpretamos como sedimentación durante eventos transgresivos y por ende predominio de sedimentación sobre la deformación (pe. Mioceno inferior temprano y Mioceno inferior tardío) (ver concepto en Burbank y Verges, 1994) (Figura 6A-D).

En otras cuencas como Salaverry, Lima y también Pisco Este (Viveen y Schlunegger, 2018) identifican periodos de transtensión en combinación con levantamiento. En el caso del estudio de Genge et al. (2020) evidencia que durante el Mioceno inferior tardío acontecieron levantamientos episódicos de “corredores” dispuestos paralelos a la fosa y a la zona de deformación principal.

### **3. Intervalo III: entre ~16 - 0 Ma (Mioceno superior al reciente, formaciones Pisco Superior - Changuillo)**

El mapa estructural de la Figura 7A corresponde al intervalo de edad entre ~16 y ~0 Ma.

Los rasgos estructurales identificados que afectan en menor grado a este tercer intervalo corresponden a fallas.

Los altos en el mapa Figura 7A principalmente corresponden a la zona sur y a zonas que sufren levantamiento continuo en el sector oeste de la cuenca de este sector costa afuera.

Otro rasgo importante observado en la Figura 7A, es el límite erosional denotado en el sector noroeste y

sureste del mapa. Como se describió en el párrafo anterior corresponde al levantamiento y erosión de la cuenca.

### **Sistema de fallas III y pliegues del Intervalo III**

En el mapa estructural de la Figura 7A, se registran los siguientes sistemas de fallas:

Sistema 5 – Fallas normales reactivadas ~SO-NE relacionadas al sistema de grábenes. Estas fallas en su mayoría tienen una dirección de buzamiento promedio 330° con buzamientos moderados hasta 64° orientados al noroeste.

#### **Asociación I del sistema de fallas III y pliegues**

Asociación III (Figura 7A) interpretado en base a la integración de:

- 1) Sistema de fallas 5. 2) Mapa estructural.

Este sistema 5 corresponde a las fallas normales que reactivan el sistema 2 de fallas normales, principalmente ubicadas en el sector norte del área de estudio. Esta asociación da como resultado una orientación principal de esfuerzo ~N330.

En la parte sur del mapa estructural del área de estudio se puede visualizar la expresión del anticlinal de San Salvador (Figura 7A y Figura 8).

Cronológicamente se le ha designado una edad Mioceno superior terminal (~16Ma?) al reciente.

### **Interpretación y discusión**

Esta Asociación III, es particularmente complejo debido a que existe una “convivencia” o diacronismo en la deformación, es decir que existen dos estilos de deformación: 1) Extensional debido a la reactivación de fallas normales SSO-NEE y subsidencia en la parte norte de la cuenca y; 2) compresiva evidenciada por levantamiento hacia el sur de la cuenca (Figura 7A-D).

Los factores que impactan en la geometría del antearco (Noda et al. 2016) en este Intervalo III está principalmente relacionado a la subducción plana de la dorsal de Nazca (Ramos y Folguera, 2009, Gutscher et al. 1999; Rosenbaum et al. 2005) (Figura 7B-D y Figura 8).

La parte más antigua de este intervalo (~16 a 4 Ma) la cuenca estuvo principalmente dominado por subsidencia, mientras que a partir de los ~4 Ma, la deformación de la cuenca está directamente relacionado a la migración hacia el SE de la dorsal de Nazca (Gutscher et al. 1999; Clift et al. 2003 y Rosenbaum et al. 2005) (Figura 7B-D y Figura 8) la cual según Macharé y Ortlieb, (1992) genera levantamiento en la posición del eje de la dorsal (radio de ~100km al norte y sur y ~60 km hacia el oeste) y subsidencia hacia afuera de ese radio de impacto y por consecuencia reactivación de las fallas normales tal como se puede observar en el mapa estructural (Figura 7A).

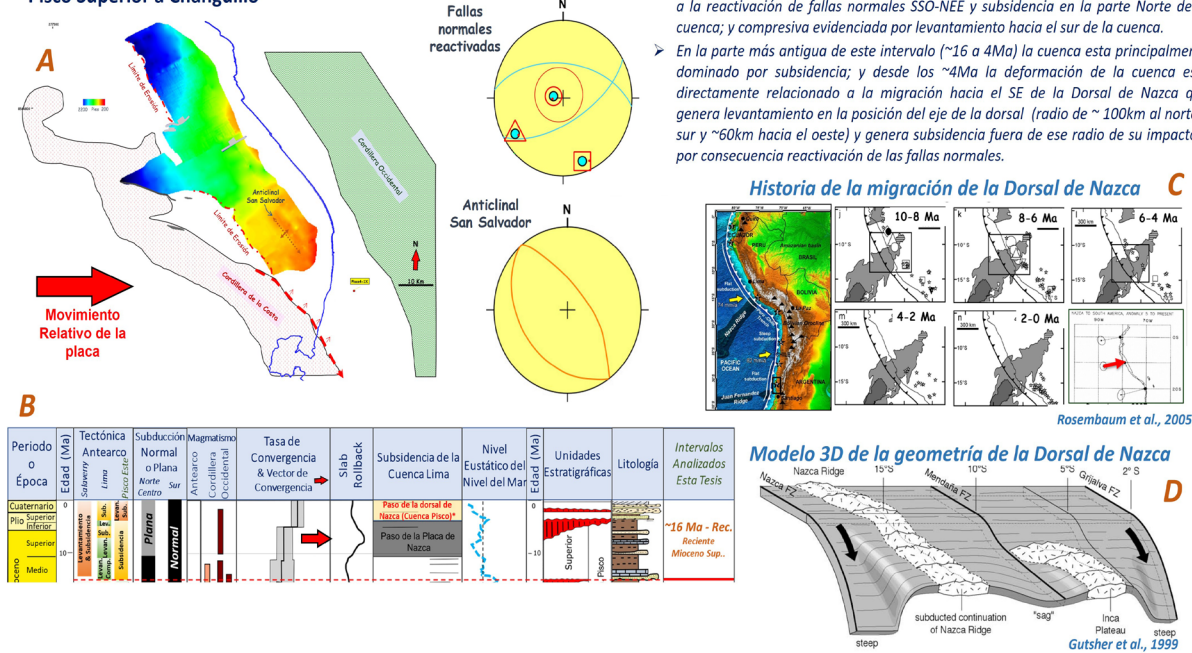


**Figura 7**  
Intervalo III

➤ Intervalo III: Convivencia de la Subsistencia (extensión) y compresión  
➤ Intervalo entre ~16 - 0Ma (Mioceno Superior al Reciente – Formaciones Pisco Superior a Changuillo

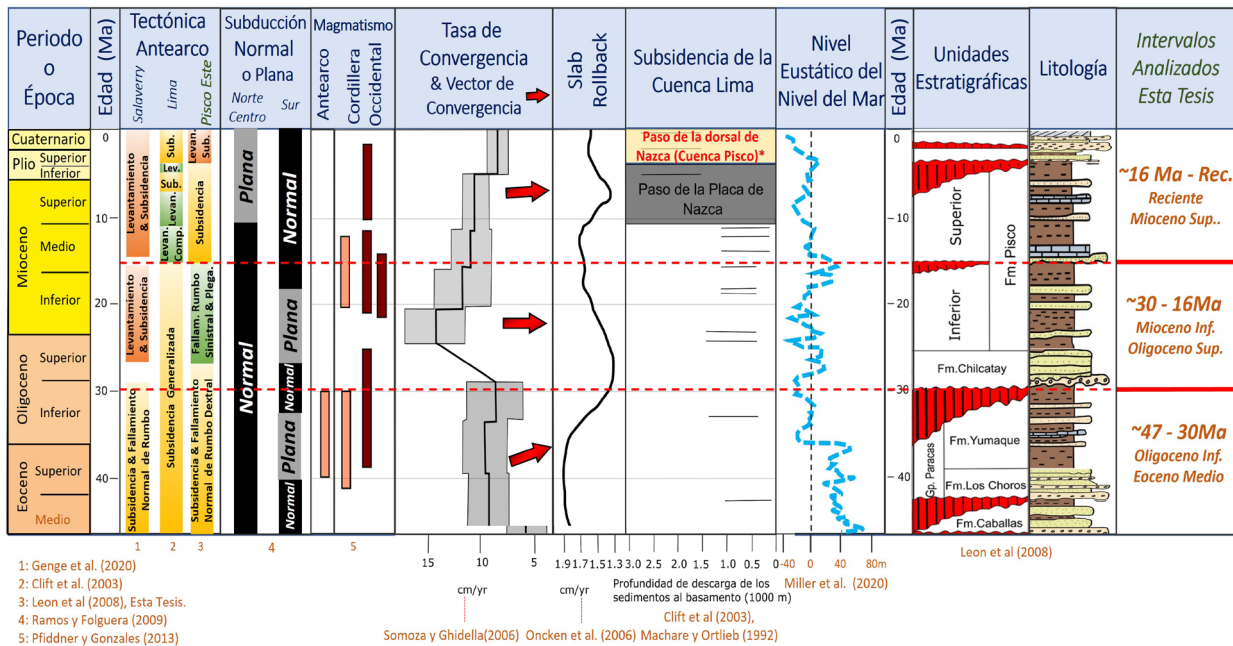
**Tectónica:**

➤ Este intervalo es un particular debido a que existe una "convivencia" o diacronismo en la deformación es decir que existen dos estilos de deformación extensional debido a la reactivación de fallas normales SSO-NEE y subsidencia en la parte Norte de la cuenca; y compresiva evidenciada por levantamiento hacia el sur de la cuenca.  
➤ En la parte más antigua de este intervalo (~16 a 4Ma) la cuenca esta principalmente dominado por subsidencia; y desde los ~4Ma la deformación de la cuenca esta directamente relacionado a la migración hacia el SE de la Dorsal de Nazca que genera levantamiento en la posición del eje de la dorsal (radio de ~100km al norte y sur y ~60km hacia el oeste) y genera subsidencia fuera de ese radio de su impacto y por consecuencia reactivación de las fallas normales.



Nota: A) Mapa estructural de Asociación III, la flecha roja representa el movimiento relativo de la convergencia de la placa oceánica de Nazca. B) fragmento de la Figura 2 del intervalo ~16 Ma al reciente con los factores más importantes que delinear la geometría final de una cuenca Pisco Este. C) historia de la migración de la dorsal de Nazca. D) Modelo 3D de la geometría de la subducción plana dorsal de Nazca

**Figura 8.**  
Diagrama Tectono-Estratigráfico



Nota: Diagrama resumen de las diferentes etapas de levantamiento, subsidencia, compresión, extensión de las cuencas de antearco Salaverry, Lima y Pisco Este y su relación con el tipo de subducción, magmatismo, velocidad y oblicuidad (flechas rojas) de convergencia, Slab "rollback" de la placa subductada, subsidencia de la cuenca Lima y la edad del paso de la dorsal de Nazca en la latitud de las cuencas Lima y Pisco Este, nivel eustático del mar, unidades estratigráficas, litología e intervalos analizados en esta tesis. (las referencias bibliográficas están descritas en la figura en color naranja claro)

## IV. CONCLUSIONES

Se determinó el estilo estructural de la cuenca Pisco Este en tres intervalos:

Intervalo I entre ~47 - ~30 Ma (Eoceno medio – Oligoceno inferior, formaciones Caballas, Choros y Yumaque): Principalmente extensional con dominio de un sistema de fallas normales acoplada con un sistema de fallas de rumbo dextral.

Intervalo II entre ~30 - ~16 Ma (Oligoceno superior – Mioceno inferior, formaciones Chilcatay y Pisco Inferior): principalmente compresivo con un dominio de un sistema de fallas de rumbo reactivadas (previamente dextrales a sinistralas) y con componente inverso. Este componente inverso de las fallas de rumbo generó plegamiento por la propagación de estas fallas.

Intervalo III entre ~16 - 0 Ma (Mioceno superior al reciente – Formaciones Pisco Superior a Changuillo): “Convivencia” de fallas normales subsidencia y levantamiento.

Se reconstruyó la cinemática e historia de la deformación: En el primer intervalo la cuenca experimentó subsidencia muy activa dominado por el sistema extensional y transcurrente permitiendo formar un complejo de hemigrábenes compartimentalizadas fallas transcurrentes.

Posteriormente en el segundo intervalo la cuenca experimentó un cambio importante con la inversión o reactivación del sistema transcurrente produciendo estructuras compresivas tipo anticlinales con ejes NNO-SSE denotando un levantamiento gradual de la cuenca.

Finalmente, la cuenca dejó de experimentar la compresión ocurrida a finales del Mioceno medio y reactivándose la subsidencia nuevamente. Sin embargo, al final de este intervalo después ~4 Ma la cuenca Pisco Este fue impactada por la subducción y migración de la dorsal de Nazca, que produjo un sincronismo entre levantamiento y subsidencia.

## V. AGRADECIMIENTOS

A la compañía Perupetro S.A. por proporcionarnos la información técnica necesaria para elaborar este artículo. Nuestro agradecimiento al revisor anónimo por sus comentarios

## VI. REFERENCIAS

Burbank D. & Vergés J. (1994). Reconstruction of topography and related depositional systems during active thrusting, *Journal of Geophysical Research*. 99 (B10), P. 20281–20297. doi:10.1029/94JB00463.

Calderón Y. (2007). Arquitectura estructural y estratigráfica de la cuenca de antearco Neógena de Pisco (Perú) sobre la subducción de la dorsal de Nazca. Máster 2 en Sciences de la Terre et de l’Univers. Memoria de Máster II 2003-2007. Universidad Paul Sabatier, Francia. 34p.

Clift P., Petcher I., Kukowski N., Hampel A. (2003). Tectonic erosion of the Peruvian forearc, Lima Basin, by subduction

and Nazca Ridge collision. *Tectonics*, vol. 22, no. 3, 1023, P. 1-7. doi:10.1029/2002TC001386, 2003.

- Di Celma C., Pierantoni P., Volatili T., Molli G., Mazzoli S., Sarti G., Ciattoni S., Bosio G., Malinverno E., Collareta A., Gariboldi K., Gioncada A., Jablonska D., Landini W., Urbina M., Bianucci G. (2022). Towards deciphering the Cenozoic evolution of the East Pisco Basin (southern Peru), *Journal of Maps*. 16p. doi/10.1080/17445647.2022.2072780.
- Fossen H. & Tikoff B. (1998). Extended models of transpression and transtension, and application to tectonic settings, *Journal Geological Society, London, Special Publications*, volume 135, P. 15 – 33. //doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.135.01.23.
- Genge M., Witt C., Chanier F., Reynaud J., Calderon Y. (2020). Outer forearc high control in an erosional subduction regime: The case of the central Peruvian forearc (6–10°S), *Tectonophysics*, Volume 789, ISSN 0040-1951, 15p. //doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228546.
- Gutscher M., Olivet J., Aslanian D., Eissen J., Maury R. (1999). The “lost inca plateau”: cause of flat subduction beneath Peru? *Earth and Planetary Science Letters*, volume 171, issue 3, P. 335-341, ISSN 0012-821X, //doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00153-3.
- León W., Rosell W., Antenor A., Torres V., De La Cruz O. (2008). Estratigrafía, sedimentología y evolución tectónica de la cuenca Pisco Oriental. *Boletín N° 27, Serie D, Estudios Regionales*, Dirección de Geología Regional, INGEMMET, Lima-Perú. 161p.
- Macharé J. & Ortlieb L. (1992). Plio-Quaternary vertical motions and the subduction of the Nazca Ridge, central coast of Peru, *Tectonophysics*, Volume 205, Issues 1–3, 1992, Pages 97-108, ISSN 0040-1951, https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90420-B.
- Miller K., Browning J., Schmelz W., Kopp R., Mountain G. y Wright J. (2020). Cenozoic sea-level and cryospheric evolution from deep-sea geochemical and continental margin records. *Sci. Adv.* 6, eaaz1346(2020). https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz1346
- Noda A. (2016). Forearc basins: Types, geometries, and relationships to subduction zone dynamics. *GSA Bulletin* 2016; 128 (5-6): 879–895. https://doi.org/10.1130/B31345.1
- Oncken O., Hindle D., Kley J., Elger K., Pia V.y Shemmam K. (2006). Deformation of the Central Andean Upper Plate System — Facts, Fiction, and Constraints for Plateau Models. In: , et al. *The Andes. Frontiers in Earth Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg . https://doi.org/10.1007/978-3-540-48684-8\_1
- Pardo-Casas, F. & Molnar, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American Plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, Volume 6, Issue 3, P. 233-248.
- Ramos, V. & Folguera, A. (2009). Andean flat-slab subduction through time. *Geological Society, London, Special Publications*. Volume 327. Pages 31 – 54. https://doi.org/10.1144/SP327.3.
- Rosenbaum G., Giles D., Saxon M., Betts P., Weinberg R. Duboz C. (2005). Subduction of the Nazca Ridge and the Inca Plateau: Insights into the formation of ore deposits in Peru.

---

Earth and Planetary Science Letters, 239(1-2), P. 18–32. // doi/10.1016/j.epsl.2005.08.003

Somoza R. & Ghidella M. (2005). Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico: subducción de las placas de Nazca, Farallón y Aluk. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(4); P. 797-809.

Viveen W. & Schlunegger F. (2018). Prolonged extension and subsidence of the Peruvian forearc during the Cenozoic, *Tectonophysics*, Volume 730, ISSN 0040-1951, P. 48-62 // doi.org/10.1016/j.tecto.2018.02.018.

Vicente J., Zuloaga A., Hure F. (2000). Características de la extensión paleógena en el sector costero de Palpa (provincia de Ica): Enseñanzas del corte del curso inferior del río Grande. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, V. 90. P. 95-106.

#### **Contribución de autoría:**

Conceptualización – Ideas: Daniel Peña; Curación de datos: Daniel Peña; Análisis formal: Daniel Peña; Adquisición de fondos: Daniel Peña; Investigación: Daniel Peña; Metodología: Daniel Peña, Carlos del Valle y Javier Jacay; Administración del proyecto: Daniel Peña; Recursos: Daniel Peña; Software: Daniel Peña; Supervisión: Carlos del Valle y Javier Jacay; Validación: Daniel Peña; Visualización: Daniel Peña; Redacción: Daniel Peña; Redacción - revisión y edición: Carlos del Valle y Javier Jacay.

#### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.