



Estilo estructural y nuevo modelo de evolución tectónica del Cenozoico de la cuenca de antearco Pisco Este (*offshore*)

F. Daniel Peña, Kiko Valencia, Diego Timoteo, y Pedro Alarcón

Savia Perú S.A., Av. Rivera Navarrete 501, Piso 11, San Isidro, Lima, Perú (daniel.pena@saviaperu.com)

1. Introducción

La cuenca Pisco Este pertenece al conjunto de cuencas del antearco peruano, el cual está limitado al oeste por el alto estructural conocido como Cordillera de la Costa (OHS, por *outer shelf high*; Thornburg y Kulm, 1981) y por el Este por el bloque Continental Olmos-Marañón (Romero et al., 2009). Esta cuenca está caracterizada por tener una historia tectónica compleja y poco conocida, debido a los escasos afloramientos existentes a lo largo de la costa, aunque algunos autores (Vicente et al., 2000; León et al., 2008) evidenciaron rasgos de extensión y compresión que afectaron la cuenca a lo largo del Cenozoico.

Este trabajo integra la información obtenida de la interpretación sísmica 2D y 3D en el sector costa-afuera de la cuenca Pisco Este con los trabajos recientes de geología de superficie realizadas por Savia (2011 & 2012) y la información existente (Vicente et al., 2000; León et al., 2008), con el objetivo principal de mostrar una nueva interpretación de los estilos estructurales y la evolución tectónica del Cenozoico mediante un análisis estructural de fallas y los rasgos de deformación asociada tales como cuñas sedimentarias relacionadas a fallas de extensión, fallas de transferencia, pliegues por propagación de falla relacionados a inversión tectónica, etc. Además, este trabajo tiene como objetivo explicar como el entendimiento del estilo estructural y su evolución son un factor clave para caracterizar elementos del sistema petrolero-reservorio-sello-trampa.

La interpretación de 7 horizontes (reflectores sísmicos) en la sección costa afuera de la cuenca Pisco Este frente a

las localidades de Mala y la península de Paracas (grábenes Sarapampa y Chíncha; Fig. 1) nos ha permitido obtener 7 mapas estructurales (tiempo y profundidad) de los cuales 6 están relacionados a la historia tectónica del Cenozoico y que consideramos por estudios estratigráficos regionales representan a las siguientes unidades: pre-Cenozoico (sustrato cretáceo o jurásico o paleozoico según su posición en la cuenca), Fm Choros (Eoceno medio-superior), Fm Yumaque I-II (Eoceno superior-Oligoceno inferior), Fm Chilcatay (Oligoceno superior), Fms Pisco inferior (Mioceno superior) y Pisco superior (Mioceno superior) (León et al., 2008).

A partir de los 6 mapas estructurales se definieron 2 rasgos estructurales principales:

- 1) Un total de 80 fallas (entre principales y secundarias) y su características estructurales: dirección del buzamiento, buzamiento, longitud y rechazo. También se obtuvo el sentido del desplazamiento de las fallas.

- 2) Dos pliegues por propagación de falla, de los cuales se obtuvieron los buzamientos de los flancos y su respectivo *plunge* y se definieron los ejes respectivos.

Esta información estructural fue analizada e integrada a las unidades estratigráficas conocidas regionalmente con el objetivo de definir el comportamiento cinemático de las fallas y estructuras relacionadas, establecer una cronología y orientación del esfuerzo y la deformación, y finalmente establecer un nuevo modelo del estilo estructural y la evolución tectónica del Cenozoico de la cuenca Pisco Este.

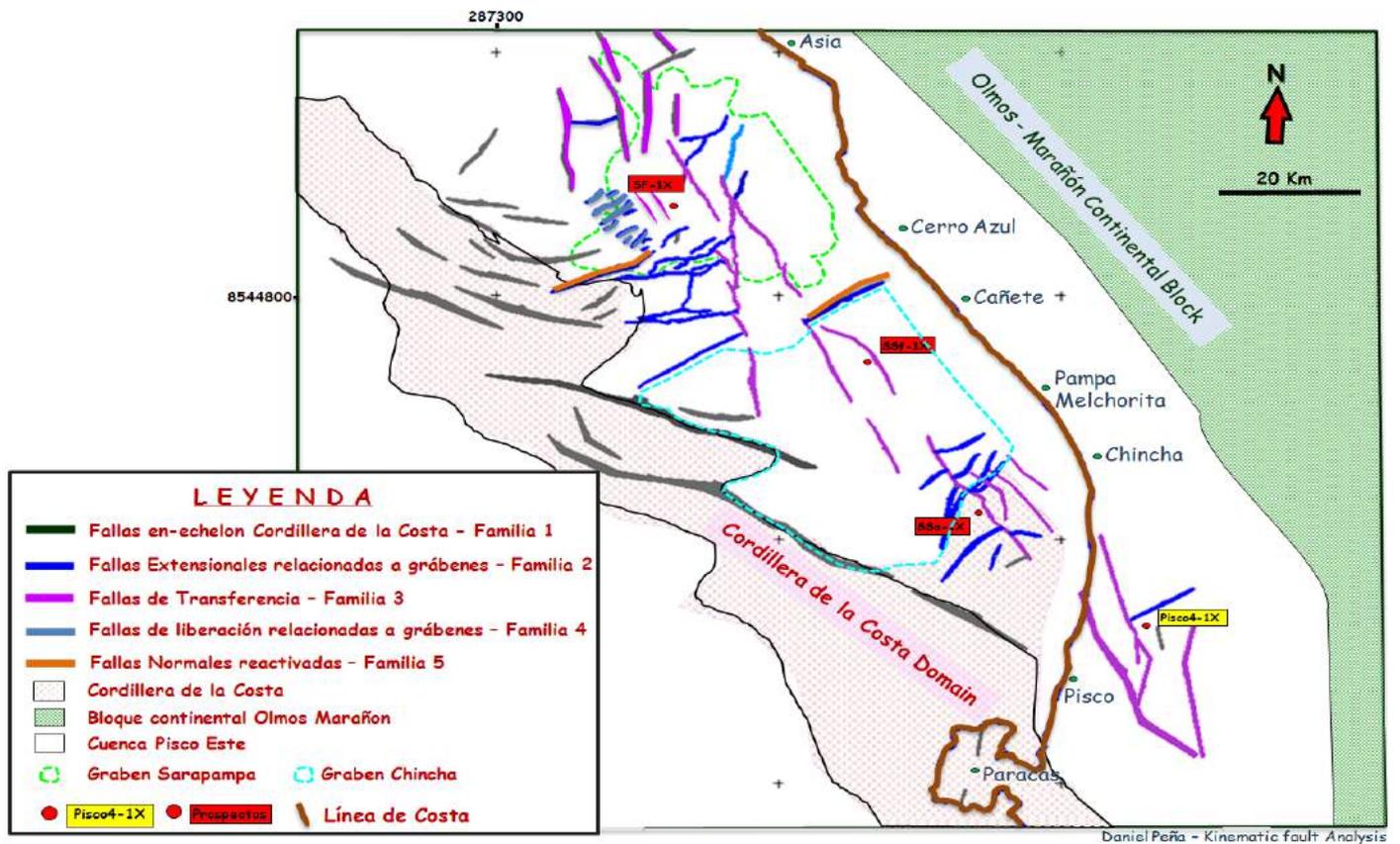


Figura 1. Mapa de ubicación de la parte sur y central de la cuenca Pisco Este, mostrando los principales elementos morfoestructurales y las principales de fallas.

2. Análisis y resultados

Luego de la definición de los dos rasgos estructurales más importantes — fallas y pliegues — se analizaron las fallas por el tipo de morfología, relación geográfica, y su influencia sobre relleno sedimentario de la cuenca, con lo cual se definieron 5 familias de fallas y 1 familia de pliegues (Fig. 1):

- Familia 1 : fallas extensionales *en-échelon* ~NO-SE relacionadas al borde oriental de la Cordillera de la Costa.
- Familia 2 : fallas normales ~SW-NE relacionadas a sistemas de grábenes y hemigrábenes.
- Familia 3 : conjunto de fallas de transferencia ~NNW-SSE (sinistral o dextral) y fallas relacionadas a las estructuras de inversión tectónica.
- Familia 4 : fallas de liberación ~SW-NE relacionadas a la formación de grábenes
- Familia 5 : fallas normales reactivadas ~SW-NE relacionadas al sistema de grábenes.

Mediante el análisis del registro sedimentario, tales como geometrías de tipo cuñas sedimentarias relacionados a fallas extensionales (p.e. grábenes en la península de Paracas — en afloramiento — o graben Sarapampa — en sísmica), u otras como terminaciones de reflectores (p.e. *onlap*, etc.), o geometrías relacionadas a estratos de crecimiento y pliegues por propagación de falla causados por compresión (p.e. complejo San Salvador — en sísmica — o pliegue por propagación de falla sellado por estratos horizontales del Mioceno superior observado en superficie en Pampa Chilcatay), hemos logrado

determinar la interacción entre el relleno sedimentario y el funcionamiento de las familias de fallas. Así hemos asociado a las familias de fallas cronológicamente, obteniéndose lo siguiente:

2.1. Asociación de familias 1, 2 & 3 (Fig. 2)

Estas tres familias están relacionadas a las fallas extensionales del borde oriental de la Cordillera de la Costa, las fallas extensionales de los grábenes Sarapampa y Chincha, y acopladas a las fallas de transferencia con componente dextral.

Esta asociación de fallas nos da como resultado una dirección de extensión principal ~N340. Se le atribuye una edad anterior al Eoceno medio (>~40–37 Ma)–Oligoceno inferior (~37–30 Ma).

2.2. Asociación de familia 3, y pliegues por propagación de fallas (Fig. 3)

Esta asociación relaciona las fallas de transferencia reactivadas e invertidas con componente sinistral y pliegues anticlinales (datos estructurales: flancos, *plunges* y ejes).

Esta asociación da como resultado una orientación principal de esfuerzo ~N50. Se le atribuye una edad Oligoceno superior (~28–23 Ma) a Mioceno inferior-medio (~23–11 Ma).

2.3. Asociación de familia 5 (Fig. 4)

Esta asociación corresponde a la reactivación de las fallas normales relacionada a los grábenes (reactivación

de Familia 2).

Esta asociación nos da como resultado una orientación principal de esfuerzo $\sim N330$. Se le atribuye una edad Mioceno superior terminal (~ 10 Ma?) a Reciente.

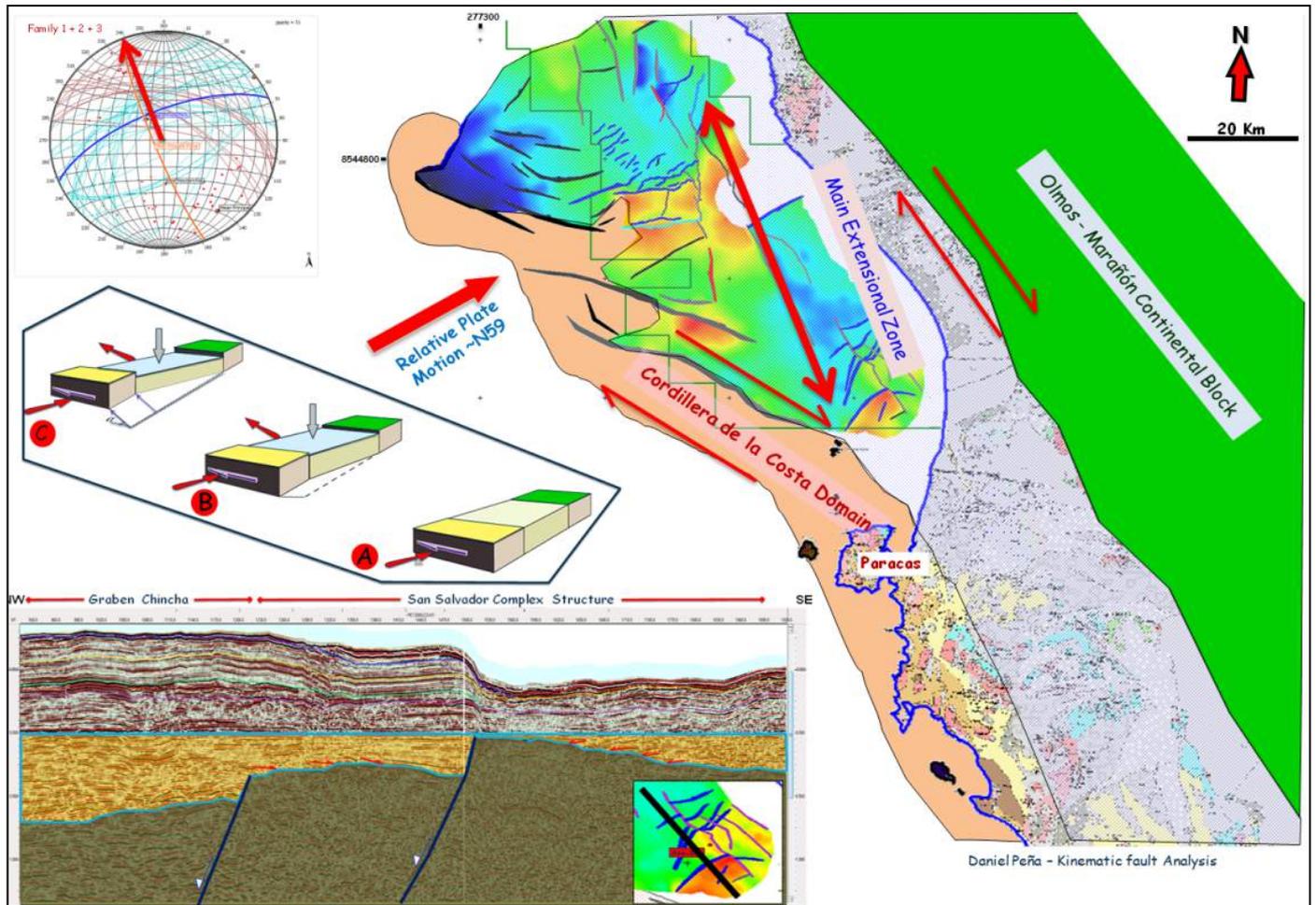


Figura 2. Mapa estructural del horizonte de la Fm Choros integrado al contexto regional de la cuenca Pisco Este. Análisis cinemático de la asociación de fallas 1, 2 & 3. Línea sísmica “flatenizada” al horizonte de la Fm Choros, mostrando la morfología de los grábenes con eje N-S. Y finalmente se ilustra un modelo simplificado del desarrollo de la zona principal de extensión de la cuenca (modelo adaptado de Fossen & Tikoff, 1998).

3. Estilo estructural y nuevo modelo de evolución tectónica

Estas tres asociaciones descritas líneas arriba nos permiten definir los diferentes estilos estructurales presentes en la cuenca:

1. Desarrollo de grábenes y hemigrábenes con familias de fallas $\sim SW-NE$ y fallas de transferencia dextral $\sim SW-NE$, asociados a una orientación principal de extensión $\sim N340$ y de edad $\sim >40-30$ Ma (Fig. 2).

2. Desarrollo de pliegues por propagación de falla relacionados a una inversión tectónica producto de la rotación de la componente de esfuerzos principal $\sim N050$ (Fig. 3).

3. Reactivación de los grábenes asociadas a fallas $\sim SW-NE$, que a su vez convive con la componente de esfuerzo

compresional $\sim N050$ (Fig. 4).

La definición de los estilos estructurales existentes nos permite mostrar un nuevo modelo de evolución tectónica. La cuenca Pisco Este se desarrolla entre la Cordillera de la Costa por el Oeste y el bloque continental Olmos-Maraón por el Este (Fig. 1), los cuales funcionan a manera de bloques rígidos y que a su vez están acoplados a una convergencia oblicua que varía su orientación de esfuerzos a lo largo de su historia (Figs. 2 a 4). Con esta breve introducción procedemos a describir nuestro modelo de evolución tectónica.

Nuestro modelo de evolución tectónica inicia con un periodo de extensión de edad Pre- Eoceno Medio ($\sim 40-37$ Ma) – Oligoceno Inferior ($\sim 37-30$ Ma) con un eje del componente principal de extensión $\sim N340$ (Asociación de familias de fallas 1), y que está estrechamente relacionada al movimiento dextral de los dos bloques rígidos mencionados (asociados a fallas transcurrentes en sus

bordes) y que producen un efecto “acortamiento” vertical y extensión horizontal intra-cuenca (Fig. 2) la cual denominamos una cuenca transpresional (según el modelo E de Fossen & Tikoff, 1998) que genera depositación en contexto extensivo. Este movimiento de

bloques rígidos a su vez estaría acoplado con la orientación de convergencia oblicua de las placas Nazca ~N059 (Pardo-Casas & Molnar, 1987; Somoza, 1998; Etherridge et al., 1991).

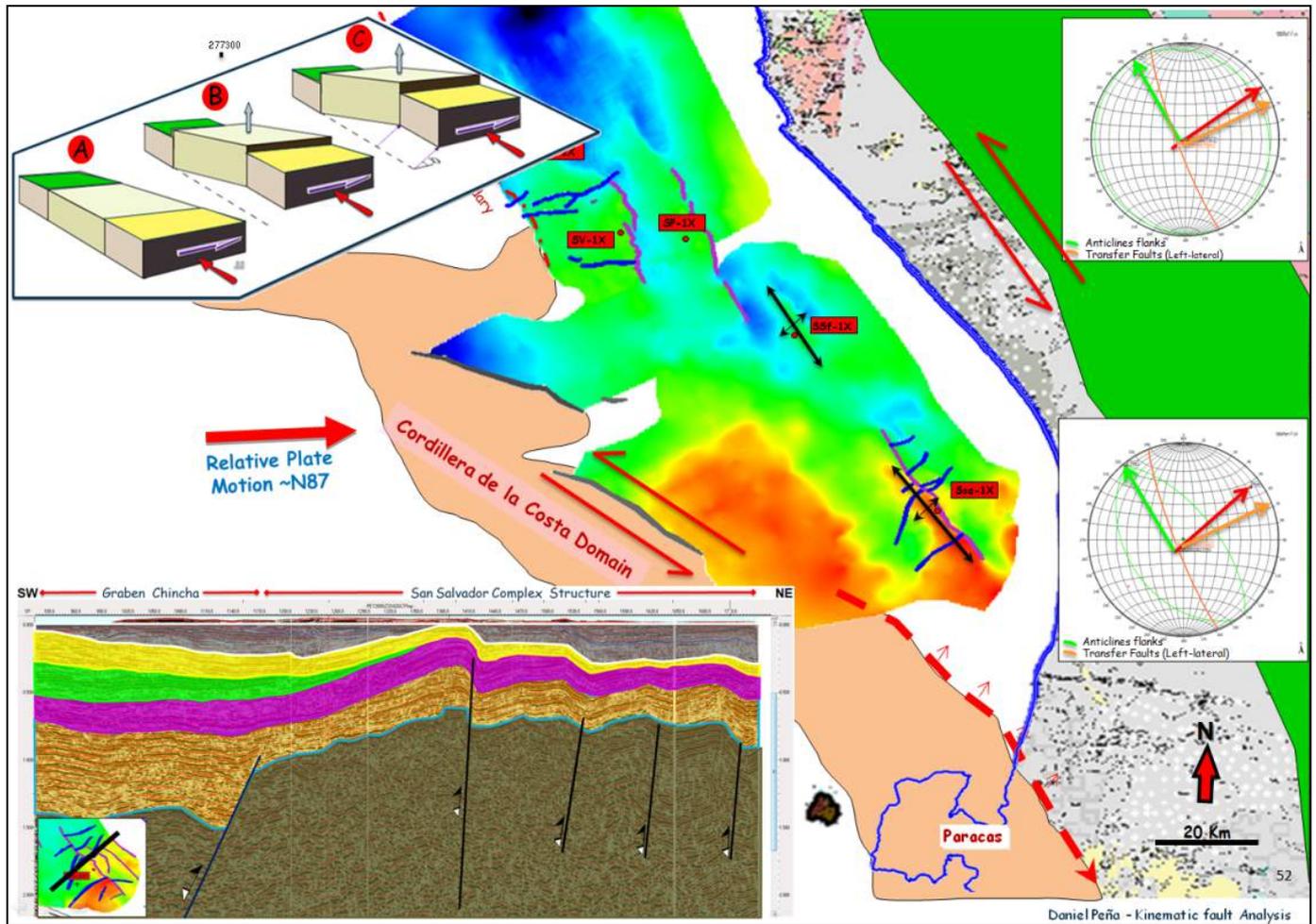


Figura 3. Mapa estructural del horizonte de la Fm Chilcatay integrado al contexto regional de la cuenca Pisco Este. Análisis cinemático de la asociación de fallas 3 y pliegues. Línea sísmica con el horizonte de la Fm Pisco Inferior casi subhorizontal. Observar los pliegues por propagación de falla. Finalmente se ilustra un modelo simplificado del desarrollo de la zona principal de compresión de la cuenca (modelo adaptado de Fossen & Tikoff, 1998).

Luego se observa que estas fallas extensionales dejan de actuar para dar paso al funcionamiento de las fallas que tienen una componente de esfuerzos principal ~N050 y dan como resultado la inversión tectónica de la asociación de fallas 2 y generan pliegues por propagación de falla. Esto también estaría asociado al movimiento de los bloques rígidos. Además postulamos que este movimiento tendría una componente sinistral y que respondería a una importante rotación de la orientación de estrés principal de la convergencia (~N087; Pardo-Casas & Molnar, 1987; Somoza, 1998). La cuenca seguiría siendo una cuenca transpresional, pero del tipo del modelo B de Fossen & Tikoff (1998) y se produce un efecto de acortamiento horizontal y extensión vertical (Fig. 3).

Por último, desde los ~10 Ma hasta la actualidad, la cuenca es afectada por la llegada de la Dorsal de Nazca y la migración hacia el sur de la misma. Esto causa un impacto importante ya que produce levantamiento (y erosión

tectónica) durante su subducción y migración hacia el sur (Clift & Petcher, 2003). Asimismo este efecto también causa extensión en los bordes de la influencia sobre el antearco de la dorsal además de subsidencia y reacomodo posterior a la migración de la dorsal. Este efecto de levantamiento y extensión, lo que llamamos convivencia, lo hemos evidenciado en la asociación de familia 5.

Esto da como resultado un continuum tectónico reconocido en otras cuencas del antearco peruano (Sempere et al., 2004). Asimismo es importante resaltar que este modelo de evolución tectónica ha tenido un impacto en varios aspectos desde el punto de vista de exploración petrolera de las cuales mencionaremos algunos factores claves:

- 1) El período de extensión entre ~40 y ~30 Ma permitió la depositación de las rocas reservorio y sello reconocidas en superficie, y el soterramiento de las potenciales rocas

madre (cretáceas y paleozoicas).

2) Durante la inversión tectónica se generaron trampas estructurales y estratigráficas-estructurales.

3) Durante la reactivación de la extensión (<~10 Ma), se produjo la subsidencia de los depocentros (grábenes) y un evento tardío de generación de hidrocarburos.

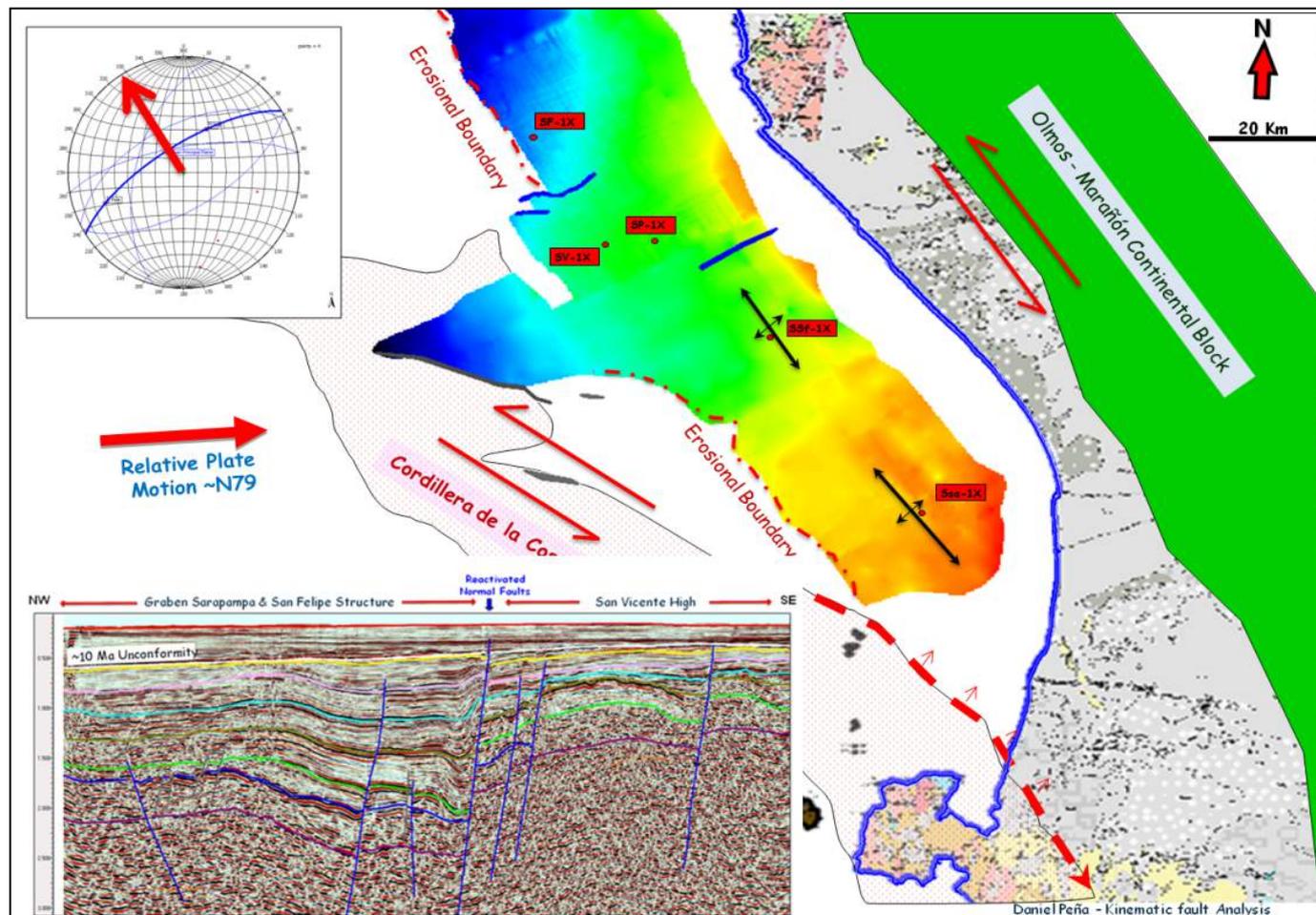


Figura 4. Mapa estructural del Horizonte de la Fm Pisco Inferior integrado al contexto regional de la cuenca Pisco Este. Análisis cinemático de la Asociación de fallas 5. Línea sísmica para observar la reactivación de falla normal del graben Sarapampa.

Referencias

- Clift & Petcher, 2003. Tectonic erosion of the Peruvian forearc, Lima Basin, by subduction and Nazca ridge collision. *Tectonics*, v. 22.
- Etherridge et al., 1991. The role of intraplate stress in Tertiary (and Mesozoic) deformation of the Australian continent and its margins: A key factor in petroleum trap formation. *Exploration Geophysics*.
- Fossen & Tikoff, 1998. Extended models of transpression and transtension, and application to tectonic settings. *Geol. Soc. of London Special Publication* 135.
- León et al., 2008. Estratigrafía, sedimentología y evolución tectónica de la cuenca Pisco oriental. INGEMMET, Estudios regionales, Serie D, Boletín 27.
- Pardo Casas & Molnar, 1987. Relative motion of Nazca (Farallón) and South American plates since Late Cretaceous Time. *Tectonics*, v. 6.
- Romero et al., 2009. Procesamiento digital de imágenes y cartografía digital del litoral entre Chiclayo y Paracas. Informe interno, Savia Perú.
- Savia, 2011 & 2012. Proyecto Geología del Cenozoico: geólogos Daniel Peña, Diego Timoteo, Kiko Valencia, Carlos Llerena.
- Sempere et al., 2004. Geología, geocronología, paleogeografía y paleotectónica de los depósitos de antearco del sur del Perú. XII Congreso Peruano de Geología.
- Somoza, 1998. Updated Nazca (Farallón)-South American relative motions during the last 40 My: Implications for mountain building in the central Andean Region. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 11.
- Thornburg & Kulm, 1981. Sedimentary basins of the Peru continental margin: Structure, stratigraphy, and Cenozoic tectonics from 6° to 16° S latitude. *Geological Society of America*.
- Vicente et al., 2000 Características de la extensión paleógena en el sector de Palpa (Ica): Enseñanzas del corte del curso del Rio Grande. *Sociedad Geológica del Perú, Boletín* 90.