



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**Análisis del estilo estructural para la generación
de un modelo de evolución tectónica del Cenozoico,
Cuenca Pisco Este – Costa Afuera, Ica – Lima**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geología con
Mención en Tectónica y Geología Regional

AUTOR

Fernando Daniel PEÑA SIERRA

ASESOR

Dr. Carlos DEL VALLE JURADO

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Peña, F. (2023). *Análisis del estilo estructural para la generación de un modelo de evolución tectónica del Cenozoico, Cuenca Pisco Este – Costa Afuera, Ica – Lima*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica/Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Fernando Daniel Peña Sierra
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10813386
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3005-2111
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Carlos Del Valle Jurado
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10266187
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3040-1396
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jaime César Mayorga Rojas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10369482
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Ciro Sergio Bedia Guillen
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06130412
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Andrés Yparraguirre Calderón
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10293400
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.1.10. Recursos Energéticos

Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Cuenca Pisco, Departamento de Lima e Ica Coordenadas geográficas (13° 5'22"S; 76° 35'47"O)
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021-2022
URL de disciplinas OCDE	Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 Geofísica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.04



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los veintiocho días del mes de noviembre del año dos mil veintitres, siendo las diez horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000640-2023-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 23 de noviembre del 2023, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

**«ANÁLISIS DEL ESTILO ESTRUCTURAL PARA LA GENERACIÓN DE UN MODELO DE EVOLUCIÓN
TECTÓNICA DEL CENOZOICO, CUENCA PISCO ESTE - COSTA AFUERA, ICA - LIMA»**

Presentado por el Bach. **FERNANDO DANIEL PEÑA SIERRA**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOLOGÍA** con mención en **TECTÓNICA Y GEOLOGÍA REGIONAL**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° UNMSM-20220039034, de fecha 17 de mayo del 2022, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

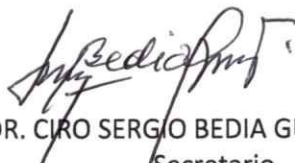
Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

----- *May Bueno (18)* -----

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOLOGÍA** con mención en **TECTÓNICA Y GEOLOGÍA REGIONAL** al Bach. **FERNANDO DANIEL PEÑA SIERRA**.

Siendo las 11:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. JAIME CÉSAR MAYORGA ROJAS
Presidente


DR. CIRO SERGIO BEDIA GUILLEN
Secretario


MG. JOSÉ ANDRÉS YPARRAGUIRRE CALDERÓN
Miembro


DR. CARLOS DEL VALLE JURADO
Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Dr. Carlos Del Valle Jurado en mi condición de asesor acreditado con el Número de Dictamen N°000340-2023-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es «ANÁLISIS DEL ESTILO ESTRUCTURAL PARA LA GENERACIÓN DE UN MODELO DE EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL CENOZOICO, CUENCA PISCO ESTE - COSTA AFUERA, ICA - LIMA» presentado por el Bachiller Fernando Daniel Peña Sierra, para optar el Grado Académico de Magister en Geología con mención en Tectónica Y Geología Regional CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de investigación y producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 07% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.

Firma del Asesor:
DNI: 10266187
Nombres y apellidos del asesor:
Carlos del Valle Jurado



DEDICATORIA

A mi familia Haymé, Zoe y Aarón.

AGRADECIMIENTO

Agradezco al Señor por todo!!!

A todos aquellos geocientistas que han trabajado y trabajan aportando conocimiento a la geología de las cuencas de antearco, a la geología de la cuenca Pisco y a la geología del Perú.

A la empresa estatal Perupetro S.A. por brindarme la información y los datos utilizados en esta tesis.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Situación problemática	17
1.2 Formulación del problema.....	18
1.2.1 Problema general.....	18
1.2.2 Problemas específicos	19
1.3 Justificación	19
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 Objetivo general	19
1.4.2 Objetivos específicos.....	20
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	21
2.1 Antecedentes de la investigación.....	21
2.1.1 Antecedentes Internacionales	22
2.1.2 Antecedentes Nacionales.....	23
2.2 Bases teóricas	27
2.2.1 Evolución Tectónica.....	27
2.2.2 Tipo de Fallas	30
2.2.2.1 Fallamiento extensional	30

2.2.2.2	Fallamiento transcurrente o de rumbo	30
2.2.2.3	Inversión tectónica o inversión o reactivación del sentido de desplazamiento de las fallas de rumbo.....	30
2.2.3	Modelo de evolución tectónica	31
2.2.4	Sistemas de fallas y pliegues y su asociación	31
2.2.4.1	Deformación progresiva.....	31
2.2.4.2	Interpretación estructural	31
2.2.4.3	Estilo estructural	32
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA		35
3.1	Tipo y diseño de la investigación	35
3.2	Unidad de análisis.....	35
3.3	Población de estudio	35
3.4	Tamaño de la muestra.....	37
3.5	Selección de la muestra	39
3.6	Técnicas de recolección de datos.....	39
3.6.1	Recolección de datos	39
3.6.1.1	Recopilación de datos e información	39
3.6.1.2	Recopilación de información técnica.....	40
3.6.1.3	Adquisición de dato sísmico	40
3.7	Análisis e interpretación de la información.....	43
3.7.1	Construcción del proyecto.....	43

3.7.2	Interpretación de la información sísmica	43
3.7.2.1	Interpretación sísmica de horizontes - unidades estratigráficas clave: 43	
3.7.2.2	Interpretación estructural de las fallas y pliegues	45
3.7.3	Conversión de dominio tiempo (ms – milisegundos) a dominio profundidad (pies)	47
3.8	Variables	49
3.8.1	Identificación de variables	49
3.9	Matriz de consistencia	49
3.10	Operacionalización de variables	49
CAPÍTULO 4: Marco Geológico		50
4.1	Estratigrafía y elementos del sistema petrolero	50
4.1.1	Estratigrafía pre-Cenozoico	50
4.1.2	Estratigrafía del Cenozoico	51
4.2	Estilo estructural de la cuenca Pisco Este	56
CAPITULO 5: Resultados y Discusión		57
5.1	Análisis, interpretación y discusión de resultados	57
5.1.1	Definición de los sistemas de falla y horizontes estratigráficos clave de la cuenca Pisco Este sector costa afuera	57
5.1.2	Intervalo I entre ~40/~30Ma (Eoceno Medio – Oligoceno Inferior. Formaciones Caballas, Choros y Yumaque)	60
5.1.2.1	Sistema de fallas del Intervalo I	60
5.1.2.2	Asociación I de sistemas de fallas	61

5.1.2.3	Interpretación y Discusión	62
5.1.2.4	Ejemplos del régimen extensional en la cuenca Pisco Este – costa afuera	63
5.1.3	Intervalo II entre ~30 - ~16 Ma (Oligoceno superior, Formaciones Chilcatay y Pisco Inferior)	73
5.1.3.1	Sistema de fallas y plegamiento del Intervalo II.....	73
5.1.3.2	Asociación II del sistema de fallas y pliegues.	74
5.1.3.3	Interpretación y discusión	74
5.1.3.4	Ejemplos de tectónica compresional en la cuenca Pisco Este – costa afuera	77
5.1.4	Intervalo III entre ~16 - 0Ma (Mioceno Superior al Reciente, Formaciones Pisco Superior y Changuillo).....	86
5.1.4.1	Sistema de fallas III y pliegues del Intervalo III.....	86
5.1.4.2	Asociación del sistema de fallas III y pliegues	86
5.1.4.3	Interpretación y discusión	87
5.1.4.4	Ejemplos de Convivencia de tectónica y compresional en la cuenca Pisco Este – costa afuera.	88
CONCLUSIONES		94
RECOMENDACIONES		98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		99
ANEXOS.....		106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de altos estructurales de la cuenca de Antearco Peruana (Thornburg y Kulm, 1981).	21
Figura 2. 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 esta descriptas en la figura en color naranja claro).....	29
Figura 3. Diagramas esquemáticos de los diferentes estilos tectónicos presentes en la cuenca Pisco Este.	33
Figura 4. Ejemplos de estilos tectónicos presentes en el área estudio de la tesis, en la parte superior el estilo dominante es extensional mientras que en la imagen inferior es compresivo.	34
Figura 5. Mapa base de información sísmica 2D y 3D.	36
Figura 6. Horizontes clave del 1 – 5 interpretados en la sísmica. Para referencia de la numeración ver Tabla 1.....	44
Figura 7. Formaciones estratigráficas del cenozoico de la cuenca de Pisco Este y reflectores y Horizontes interpretados (numeración asignada en la Tabla 1).	45
Figura 8. Relación de la orientación de los esfuerzos principales y los regímenes tectónicos de acuerdo con Anderson (1951). Estereogramas mostrando el campo de σ_1 – compresivo “P”, σ_2 y σ_3 - tensional “T” (tensional).	46
Figura 9. Pozos de referencia (Morsa 1X y Lobos1X) usados para generar la gráfica Tiempo-profundidad y generar la ley de velocidad utilizados para la conversión de los mapas estructurales de tiempo a profundidad.	48

Figura 10. Columna estratigráfica de la Cuenca Pisco Este y elementos del sistema petrolero.	54
Figura 11. Estratigrafía del Cenozoico. Para este estudio se ha utilizado la nomenclatura estratigráfica de León et al., 2008.	55
Figura 12. Mapa los sistemas de fallas y pliegues del área de estudio.	59
Figura 13. Mapa estructural representativo del Intervalo Base del Cenozoico entre ~49/~30Ma	65
Figura 14. A) Mapa del Sistema 1 – Fallas normales en-echelón ~NO-SE (color gris) relacionadas al borde oriental de la Cordillera de la Costa; B) Proyección estereográfica del Sistema 1; C) Diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden a fallas normales; D) Block diagrama esquemático de falla normal.	66
Figura 15. A) Mapa del Sistema 2 – Fallas normales principales ~SO-NE (color azul). ; B) Proyección estereográfica del Sistema 2; C) Diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden a fallas normales; D) Block diagrama esquemático de falla normal.....	67
Figura 16. A) Mapa del Sistema 3 – Fallas de rumbo dextral ~NNO-SSE (color magenta); B) Proyección estereográfica del Sistema 3; C) Diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden a fallas de rumbo sinistral principalmente con componente normal; D) Block diagrama esquemático de falla..	68
Figura 17. Asociación I basado en la integración de las Sistemas de fallas 1, 2, 3 & 4. Se interpreta que esta Asociación I tiene una componente principalmente extensional con un acople de fallas de rumbo dextral. Dirección de paleo-esfuerzo extensional principal fue ~N340 (flecha Roja). Adicionalmente el diagrama triangular de Frohlich mostrando el dominio de esta asociación de fallas normales y un sistema de rumbo dextral.....	69
Figura 18. A) Mapa estructural de Asociación I (explicación en la Figura 17); Flecha roja representa el movimiento relativo de la convergencia de la placa oceánica	

Farallón. B) fragmento de la Figura 2 del intervalo ~47-30Ma con los factores más importantes que delinean la geometría final de una cuenca Pisco Este. C) Polígono azul resalta el tipo E (de Fossen y Tikoff, 1998) del espectro de deformación por transpresión. D) Esquema evolutivo de la deformación del Modelo tipo E aplicado a la cuenca Pisco Este. 70

Figura 19. Imagen sísmica del graben Asia y del horst Santa Patricia. El cuadro azul sobre el mapa estructural muestra la ubicación del graben Asia. El polígono amarillo transparente representa a los reservorios de las Formaciones Caballas, y Choros y el polígono verde transparente representa la roca generadora de hidrocarburos de la Formación Ambo..... 71

Figura 20. La imagen de la parte inferior izquierda corresponde al mapa estructural de este intervalo con la ubicación de: la línea negra dentro del cuadro azul corresponde a la línea sísmica ubicada en la parte superior izquierda de esta imagen y que muestra las fallas normales en dominó. Esta línea sísmica ha sido a propósito horizontalizada a nivel del reservorio Fm Choros para resaltar el régimen extensivo y graficar los grábenes. En la parte superior derecha de esta imagen se observa el esquema 3D del complejo del graben de Chíncha. El cuadro rojo corresponde sobre el mapa representa la ubicación del esquema 3D del complejo de graben de Pisco con el concepto exploratorio del pozo Pisco 4-X1 (el esquema 3D fue idealizado por el autor de esta tesis basado en el mapa de IPC, 1955). 72

Figura 21. Mapa estructural del Intervalo Oligoceno superior (Formaciones Chilcatay y Pisco Inferior; entre ~30 - ~16 Ma)..... 79

Figura 22. A) Mapa del Sistema I de Pliegues anticlinales San Felipe, Santa Sofía y San Salvador (color naranja) y del Sistema 3 – Fallas de rumbo sinistral ~NNO-SSE (color magenta); B) Proyección estereográfica de los pliegues anticlinales San Felipe, Santa Sofía y San Salvador; C) Proyección estereográfica del Sistema 3 de fallas de rumbo sinistral; adicionalmente el diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden principalmente a fallas de rumbo sinistral con componente normal; D) Block diagrama esquemático de una falla de rumbo. 80

Figura 23. Asociación II basado en la integración de las Sistemas de fallas 3 de las fallas de rumbo sinistral “reactivadas o invertidas” y el Sistema de Pliegues anticlinales generados por compresión. Se interpreta que esta Asociación II tiene una componente principalmente compresional. Dirección de paleo-esfuerzo extensional principal ~N52 (flechas azules). Adicionalmente el diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden principalmente a fallas de rumbo sinistral con componente inversa..... 81

Figura 24. A) Mapa estructural de Asociación II (explicación en la Figura 23), Flecha roja representa el movimiento relativo de la convergencia de la placa oceánica de Nazca. 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 delinear la geometría final de una cuenca Pisco Este. C) Polígono azul resalta el tipo B del espectro de deformación por transpresión (Fossen y Tikoff 1998). D) Esquema evolutivo de la deformación del Modelo tipo B aplicado a la cuenca Pisco Este..... 82

Figura 25. Ejemplo de evolución de la deformación del pliegue San Salvador. Columna estratigráfica señalando los dos intervalos principales afectados por la deformación. Mapa de ubicación del pliegue. Esquema ilustrativo de la comparación entre levantamiento y depositación (modelo de Burbank y Verges, 1994). 83

Figura 26. Pliegue San Felipe como resultado de la inversión de las fallas de rumbo sinistral con fuerte componente inverso ubicado en el graben de Asia 84

Figura 27. Afloramiento del pliegue por propagación producto de la inversión de las fallas de rumbo sinistral dentro del complejo de graben de Pampa Chilcatay (cerca de la bahía de Independencia - Ica). 85

Figura 28. Mapa estructural del Intervalo Mioceno Superior al Reciente (Formaciones Pisco Superior y Changuillo; entre ~16 - 0Ma). 89

Figura 29. A) Mapa del Sistema 5 de la asociación III que corresponde a la reactivación de las fallas normales del Sistema 2 (color gris claro); B) Proyección estereográfica del Sistema 5. C) Diagrama triangular de Frohlich mostrando que las

fallas mayormente corresponden a fallas normales; D) proyección estereográfica del anticlinal San Salvador..... 90

Figura 30. A) Mapa estructural de Asociación III (explicación en la Figura 29), 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 delinean 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..... 91

Figura 31. Historia de la migración de la Dorsal de Nazca y su relación con la cuenca Pisco Este (adaptado de Machare y Ortlieb, 1992). 92

Figura 32. La imagen de la derecha se observa el mapa estructural del Intervalo III. La imagen sísmica de arriba muestra un ejemplo de una de las fallas normales reactivada afectando niveles estratigráficos muy someros (incluso casi alcanzando el fondo marino actual). La imagen sísmica inferior muestra a escala de toda la cuenca Pisco Este este efecto de “convivencia” subsidencia (por el norte) y levantamiento por el sur) generado por el del paso de la Dorsal de Nazca..... 93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Horizontes interpretados integrados con unidades estratigráficas reconocidas en la cuenca Pisco Este - Sector Costa adentro y 3 mapas estructurales seleccionados para la interpretación de esta tesis.....	38
Tabla 2. Especificaciones de adquisición de cada uno los proyectos (surveys) de la sísmica 3D.	41
Tabla 3. Especificaciones de adquisición de cada uno los 3 proyectos (surveys) de la sísmica 2D.....	42

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 estudiada e interpretada en esta Tesis basado en la información de subsuelo (sísmica 2D-3D) e integrada con la información geológica y técnica del sector costa adentro de esta cuenca y cuencas aledañas. Principalmente la información técnica analizada proviene de la sísmica, de la cual se interpretaron horizontes que corresponden a unidades estratigráficas regionales y se interpretaron los principales sistemas de fallas y plegamientos.

Se determinaron principalmente 3 Intervalos de deformación y su respectivo estilo estructural. Intervalo I: entre ~47/~30 Ma. 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. Principalmente compresivo con un dominio de un sistema de fallas de rumbo sinistral (reactivación o inversión del sistema de fallas de rumbos dextrales) 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. “Convivencia” de fallas normales subsidencia y levantamiento.

Finalmente se generó un modelo de evolución de tectónica. En el *Intervalo I* la cuenca experimentó subsidencia dominado por el sistema extensional que generó grábenes y hemigrábenes. En el *Intervalo II* ocurre inversión o reactivación del sistema transcurrente produciendo estructuras compresivas tipo anticlinales. Finalmente, la cuenca dejó de experimentar compresión ocurrida a finales del Mioceno medio y se reactivó la subsidencia nuevamente. Sin embargo, al final de este intervalo después ~4 Ma la cuenca fue afectada por la subducción y migración de la Dorsal de Nazca, lo cual produjo un sincronismo de levantamiento y subsidencia.

Esta deformación de la cuenca genera estructuras geológicas con potencial exploratorio por hidrocarburos.

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 Thesis shows the interpretation of seismic horizons corresponding to stratigraphic units, the main fault, and folding systems.

Three main deformation intervals and their respective structural style were determined, and a tectonic basin evolution model was generated.

Interval I: between ~47/~30Ma; mainly extensional with dominance of a normal fault system coupled with a right-lateral strike-slip fault system. Interval II: between ~30 - ~16; mainly compressional with a dominance of a reactivated strike-slip fault system (reactivated to left-lateral) and reverse component. This reverse component of strike-slip faults generated fault-propagation folds. Interval III: between ~16 - 0Ma. "Coexistence" of subsidence and uplift normal faults.

Finally, a tectonic evolution model was generated. In the first Interval the basin underwent subsidence dominated by the extensional system that generated grabens. In the second Interval, inversion (or reactivation) of the transcurrent system occurred, producing anticline-like compressional structures. Finally, the basin stopped undergoing compression at the end of the middle Miocene and subsidence was reactivated again. However, at the end of this interval after ~4Ma the basin was impacted by subduction and migration of the Nazca Ridge which produced a synchronism between uplift and subsidence.

This basin deformation mainly produces geological structures that have hydrocarbon exploration potential.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Situación problemática

El territorio peruano está conformado por 18 cuencas sedimentarias, 10 de las cuales están ubicadas en la costa y corresponden a cuencas del tipo antearco. De estas 10 cuencas sólo 3, localizadas en el noroeste peruano, cuentan con producción de petróleo, condensado y gas. Estas cuencas por lo tanto se consideran como “sistemas petrolero-activos”. Por otro lado, las otras 7 cuencas son consideradas cuencas frontera o subexploradas debido a su poca actividad exploratoria. Estas áreas cuentan con importante información geofísica de subsuelo (información sísmica), pero con muy escasa o nula perforación de pozos petroleros. Cabe mencionar que los pozos son la información más tangible del subsuelo, con la que se confirma la geología existente y se puede demostrar finalmente la presencia o no de hidrocarburos. Es importante resaltar que tanto la adquisición sísmica como la perforación de pozos exploratorios llegan a ser las actividades con mayor costo en la exploración, por ende, realizar actividades de exploración implican un alto riesgo económico que debe ser considerado y evaluado a partir de estudios geológicos y geofísicos robustos.

Para comprender la exploración de una cuenca, el geocientista (geólogo y geofísico de exploración) puede seguir una flujo de trabajo de exploración o una guía como la de la Royal Dutch Shell Company (2014) la cual está enfocada en tres pasos fundamentales: A) Conocimiento geológico de la cuenca, B) Conocimiento del concepto exploratorio (“play”) y, C) Conocimiento del prospecto. Esta tesis, está basado en el primer paso de la guía mencionada, “Conocimiento geológico de la Cuenca”, la cual conforma la base fundamental del proceso de exploración que nos permitirá comprender, el tipo de cuenca, su relleno sedimentario y el tipo de deformación (fallas y pliegues). Estos elementos críticos nos permitirán comprender e interpretar el estilo estructural, la historia de la evolución tectónica de la cuenca y también definir los elementos del sistema petrolero asociado.

La cuenca Pisco Este es una cuenca de antearco ubicada entre el sur de la ciudad de Lima y el norte de la localidad de Marcona. Para fines de esta tesis esta cuenca ha sido

separada en dos sectores: Sector costa adentro y costa afuera. Siendo la parte de la cuenca costa adentro la más estudiada geológicamente debido a la fácil accesibilidad a los diversos afloramientos rocosos. Estos estudios han permitido entender el marco estratigráfico y estructural de la Cuenca. A pesar del gran valor que aporta la geología de superficie de este sector de la cuenca, estos estudios están restringidos a la información de superficie, limitando así las observaciones, descripciones e interpretaciones. Esta tesis tiene el propósito de realizar una revisión de toda la información geológica existente e integrar principalmente la información de subsuelo (correspondiente al sector costa afuera de esta cuenca) que no se había incorporado en estudios previos a esta investigación. Esta información consta de la interpretación geológica de 2,496 km de líneas sísmicas 2D y 1,429 km² de líneas sísmicas 3D.

El sector costa afuera de la cuenca Pisco Este, por lo expresado anteriormente, no tiene en la actualidad un modelo de evolución tectónica y por consiguiente esta tesis permite proponer un modelo en este sector de la cuenca.

Finalmente, con la interpretación de las líneas sísmicas disponibles, la integración de la información geológica recientemente adquirida durante este trabajo de tesis y su integración con la información geológica existente del sector costa adentro nos permitió realizar un análisis del estilo estructural y generar un modelo de evolución tectónica regional del cenozoico del sector costa afuera.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

- ¿De qué manera con el análisis del estilo estructural se generará un modelo de evolución tectónica para el Cenozoico en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima - Perú?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es estilo estructural dominante durante diferentes periodos y edades del Cenozoico en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú?
- ¿De qué modo el análisis del estilo estructural puede ayudar a reconstruir la cinemática de fallas, pliegues e historia de deformación de la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú?
- ¿El análisis de estructural y el modelo de evolución tectónica podrán demostrar la formación de estructuras (trampas) con potencial exploratorio por hidrocarburos y la formación de un sistema petrolero en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú?

1.3 Justificación

La cuenca Pisco Este solo cuenta con información geológica de superficie en el sector costa adentro, sin embargo, esta información es muy limitada en términos de información de subsuelo (no hay información sísmica). Asimismo, el sector costa afuera de la Cuenca cuenta con mucha información de subsuelo y no existe a la fecha un modelo de evolución tectónica e historia de la cuenca del Cenozoico. Por ende, este estudio pretende integrar tanto la interpretación de la información de subsuelo y como la de geología de superficie realizada por el autor de esta tesis e información preexistente, basándose primero en analizar el estilo estructural y posteriormente generar un modelo de evolución tectónica y plantear una historia de evolución tectónica Cenozoica en la cuenca Pisco Este sector mar afuera; contribuyendo de este modo a identificar nuevas áreas potenciales para la exploración de hidrocarburos en el país.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- 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 y Lima – Perú.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el estilo estructural dominante durante diferentes periodos y edades del Cenozoico en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú.
- Realizar el análisis del estilo estructural para reconstruir la cinemática de fallas, pliegues e historia de deformación de la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú.
- Mediante el análisis de estructural y el modelo de evolución tectónica determinar la formación de estructuras (trampas) con potencial exploratorio por hidrocarburos y la identificación de un sistema petrolero en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

La cuenca Pisco Este (Figura 1) pertenece al conjunto de cuencas del antearco peruano, la cual está limitada por el oeste por el alto estructural conocido como Cordillera de la Costa (Outer Shelf High: OHS según Thornburg y Kulm, 1981) y por el Este la Cordillera Occidental. Esta parte de la cuenca está caracterizada por tener una historia tectónica muy compleja y poco conocida, por lo tanto, es la información sísmica (información de subsuelo) y los afloramientos existentes a lo largo de la costa lo que ayudan a entender mejor su geología.

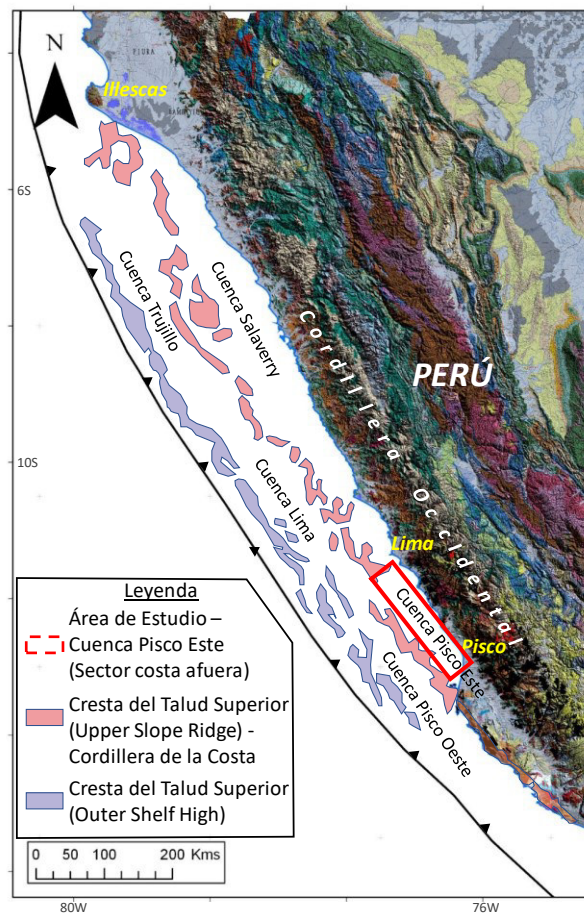


Figura 1. Mapa de altos estructurales de la cuenca de Antearco Peruana (Thornburg y Kulm, 1981).

Fuente: Figura modificada de Romero et al 2013.

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Bishop y Mann, 2019 en su trabajo, *hydrocarbon prospectivity of the Sandino forearc basin of Nicaragua and Costa Rica inferred from seismic mapping, seismic facies analysis, and 2d basin modeling*, describen una cuenca análoga a la Cuenca Pisco Este. La cuenca de antearco Sandino se encuentra ubicada entre Nicaragua y Costa Rica, la cual es el resultado de la subducción de la corteza oceánica denominada Placa de Cocos por debajo de la placa Caribe. El estudio está basado en la interpretación de la información de subsuelo (sísmica). Como resultado de esta interpretación se identificaron 4 tectono-secuencias asociadas con 1) formación de la cuenca relacionada al inicio de la subducción en el Cretáceo superior y la formación de un antearco estable y finalmente, la formación de un alto estructural en el Eoceno temprano; 2) formación de una plataforma carbonatada durante el Mioceno medio al Oligoceno superior temprano, la cual finaliza con plegamiento y truncación por erosión de unidades antiguas del antearco; 3) continuación del plegamiento y levantamiento durante el Oligoceno superior al Mioceno Temprano. Este último afectó la parte central y sur de la cuenca, pero no afectó la parte norte de la cuenca la cual estuvo experimentó subsidencia sin plegamiento; 4) por último, la continuación del plegamiento y levantamiento desde el Mioceno medio hasta el Presente afectando principalmente el sector central y sur de la cuenca.

En el estudio “*Tectonosedimentary evolution of the Coastal Cordillera and Central Depression of south-Central Chile (36°30'-42°S)*” de Encinas et al. (2021) realizó un estudio sobre la Cordillera de la Costa y la Depresión Central en el sector sur central de Chile. Este trabajo ha sido multidisciplinario, integrando diversas disciplinas como estratigrafía, sedimentología, geocronología, geología estructural y geomorfología y obteniendo como resultado una interpretación de la evolución tectono-sedimentaria del antearco sur-central de Chile durante el Cenozoico descrita como sigue: 1) extensión tectónica en el Oligoceno y Mioceno Temprano causado por “rollback” de la placa subducida (“slab rollback”) con cuencas rellenas de depósitos volcánicos, continentales y marinos. 2) inversión tectónica de las cuencas extensionales durante el Mioceno Temprano-tardío lo cual generó que importantes áreas del antearco llegaran a ser un relieve positivo que estuvieron sujetos a erosión fluvial. 3) durante el Plioceno-

Pleistoceno hacia el oeste, la Falla del Oeste Andino, la cual es una falla inversa regional con vergencia al oeste la cual es el límite oriental entre la Depresión Central y la Cordillera de los Andes, causó un importante levantamiento del flanco oeste de los Andes. El mecanismo de deformación permite observar que el autor plantea un estilo similar a la de una cuenca de antepaís durante este el Plio-Pleistoceno disparando una subsidencia flexural y la acumulación de depósitos marinos y continentales.

Evidencias de la interacción entre fallas normales con inversión y fallas inversas se describen en el artículo *“Interaction between inverted normal and reverse faults in the inner forearc of the Central Andes: an example from the Salar de Atacama Basin”* (Martínez et al., 2022). Este estudio fue realizado en la parte interna del antearco del norte de Chile en la cuenca Salar de Atacama. La interpretación de la información sísmica permitió Martínez et al. (2022) realizar observaciones del subsuelo dando como primera propuesta que el mecanismo principal de deformación de la cuenca y una visión de la deformación a escala regional resulta de la contracción de la corteza superior. Adicionalmente, el autor reconoce la existencia de la interacción de fallas normales invertidas con fallas de rumbo en un proceso complejo. El autor afirma que esta interacción es frecuentemente reconocida en un sistema de faja plegada y corrida de piel delgada. Las unidades tectonoestratigráficas que están involucradas en la cuenca las describe de la siguiente manera: 1) grábenes y hemigrábenes heredados de la deformación por la extensión del Permo-Triásico que recibe importante depositación sin-extensional; 2) durante el Cretáceo tardío las fallas normales fueron parcialmente invertidas y los depósitos sin-extensionales del Permo-Triásico fueron plegados asimétricamente y; 3) durante los estados finales de inversión tectónica, algunas de las fallas normales fueron totalmente invertidas produciendo la verticalización de la parte superior de esta fallas permitiendo finalmente la generación de nuevas fallas inversas y su propagación, la cuales afectan los bloques piso de las fallas invertidas, creando estrechas zonas triangulares.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Los antecedentes nacionales corresponden a las cuencas de antearco relacionadas a la Margen Peruana y antecedentes relacionados a la cuenca Pisco Este.

Desde el punto de vista de evolución tectónica de la cuenca Pisco Este Vicente et al. (2000) en el artículo “*Características de la extensión Paleógena en el sector costero de Palpa (provincia de Ica): enseñanzas del corte inferior del río Grande*”, menciona la evolución tectónica poco entendida de la cuenca, debido a la complejidad de bloques estructurales involucrados y al escaso control estratigráfico. Sin embargo para esta etapa del conocimiento de la cuenca ya mencionaba un estilo tectónico extensional cuando solo se consideraba tectónica compresiva en las cuencas de antearco. Además, el autor reconoció periodos de inversión tectónica. Vicente et al. (2000) separa la evolución de la cuenca Pisco en 3 periodos: 1) Periodo 1 (Eoceno inferior), dividido en una etapa de extensión I, desarrollado en un sistema de fallas normales en dominó con la inclinación de los bloques hacia el NE y la formación de hemigrábenes intermedios en un régimen de cizalla simple intracortical siniestral, seguido por una etapa extensión II que dio origen a un sistema simétrico de fallas normales conjugadas responsable de formación de grábenes importantes (como por ejemplo el graben de Parcana Mainsa que se rellenó con depósitos aluviales sin-tectónicos); 2) Periodo 2, considera que durante el Eoceno superior una trasgresión marina (Formación Paracas equivalente a Grupo Paracas en León et al., 2008, Figura 11) sella claramente este sistema y se produce una erosión agresiva de las crestas de las rocas más antiguas. Durante este Periodo, el autor menciona que hubo reactivación de fallas extensionales anteriores, además, de su migración hacia el este; 3) Periodo 3, un punto importante que resalta el autor es la evidencia de inversión tectónica antes de la transgresión del Mioceno medio (Formación Pisco equivalente a Formación Pisco inferior en León et al., 2008, Figura 11). Un aspecto clave que reconoce el autor es que se evidencia inversión tectónica y extensión previo a la subducción de Dorsal de Nazca (durante Plioceno - Cuaternario).

Calderón (2007) en la tesis “*Arquitectura Estructural y Estratigráfica de la Cuenca de Antearco Neógena de Pisco (Perú) sobre la subducción de la Dorsal de Nazca*”, estudió la cuenca Pisco Oeste (ubicada al oeste de la Cordillera de la Costa), en el sector costa afuera, utilizó principalmente líneas sísmicas 2D para realizar la interpretación de subsuelo. Como resultado de la investigación de la relación entre la tectónica y sedimentación, Calderón (2007) separó principalmente esta parte de la cuenca en tres “secuencias” de la siguiente manera: 1) Secuencia I (Oligoceno) como

resultado de la actividad de fallas normales (perpendiculares a la línea costa actual). Durante este periodo se depositó un cotejo sedimentario de bajo nivel; 2) Secuencia II (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 Calderón (2007) principalmente atribuye esta secuencia a un evento estratigráfico dominado por eustatismo, más que por el dominio tectónico – estructural; 3) Secuencia III (Mio-Plioceno) es contemporánea al comienzo de la subducción de la Dorsal de Nazca y a su migración hacia el sur. Esta Secuencia esta atribuida estratigráficamente a un cotejo sedimentario del tipo transgresivo.

De acuerdo con el Boletín 27 de estudios regionales de INGEMMET denominado *“Estratigrafía, sedimentología y evolución tectónica de la cuenca Pisco Oriental”*, León et al. (2008) plantean que el Eoceno medio experimentó una reorganización global de placas tectónicas generando en la margen peruana una convergencia oblicua que tienen como resultado la generación de fallas de rumbo la cuales dieron origen a las cuencas de antearco. Este trabajo fue realizado principalmente en el sector costero de la cuenca Pisco Este y es uno de los trabajos pioneros en términos de integración de evolución tectónica. León et al. (2008) propone cuatro etapas de evolución tectónica del modo siguiente: 1) Extensión en el Eoceno medio generando formación de hemigrábenes; 2) Durante el Oligoceno tardío, extensión y cambio de polaridad tectónica y por consiguiente la formación completa de grábenes; 3) Levantamiento en el Mioceno medio y una reactivación de la extensión; 4) inversión de cuenca y su levantamiento durante el Plioceno tardío al Pleistoceno.

Un importante aporte sobre el entendimiento de la subsidencia de la cuenca Lima, la cual estaría controlado principalmente por el mecanismo de erosión tectónica debido a la subducción de la placa de Nazca desde el Eoceno es mencionado en Clift et al. (2003) en la publicación *“Tectonic erosion of the Peruvian forearc, Lima Basin, by subduction and Nazca Ridge collision”*. Un periodo de erosión importante, desde 47 Ma y 11 Ma, fue registrado mediante la datación de horizontes clave. El periodo de erosión de 11 Ma sería producido por la subducción de la dorsal de Nazca. Esto es particularmente clave para nuestra área de estudio.

De acuerdo con el trabajo *“Slow rates of subduction erosion and coastal underplating along the Andean margin of Chile and Peru”* de Clift y Hartley (2007) sugieren un retroceso de la fosa y erosión tectónica de la Margen Andina desde al menos 20 Ma. Además, plantea que el sector continental de la costa experimentó un considerable levantamiento desde aproximadamente 2 Ma. Esto permite al autor identificar un periodo de erosión tectónica lento. El antearco levantado indica “underplating (colocar bajo la placa)” del material subductado por debajo de la base del antearco sincrónico con erosión tectónica por debajo el sector hacia la fosa del antearco.

En el artículo *“Prolonged extension and subsidence of the Peruvian forearc during the Cenozoic”*, Viveen y Schlunegger (2018) basado en nuevas observaciones estructurales y geomórficas sugiere que el antearco central y norte peruano (6° - 15°S latitud) está bajo extensión con una ligera tendencia a la transtensión en vez de compresión. Además, esta parte del antearco habría experimentado prolongados periodos de subsidencia desde el Eoceno medio al tardío interrumpido por periodos cortos de levantamiento. Por otra parte, el antearco sur (15° - 18° S latitud) experimentó transtensión en combinación con levantamiento. Adicionalmente, el autor menciona que el sector central y sur del antearco fue influenciado por el paso de la dorsal de Nazca experimentando transtensión y subsidencia hasta el Mioceno medio y tardío y alternándose con periodos de tectónica compresional y transtensional respectivamente. El autor propone que estos nuevos hallazgos geodinámicos del antearco peruano deben ser considerados para reconstrucciones de los mecanismos en zonas de subducción.

Según el trabajo, *“Outer forearc high control in an erosional subduction regime: The case of the central Peruvian forearc (6–10°S)”* realizado por Genge et al. (2020), la parte norte del antearco norte y centro del Perú aporta de excepcional información para entender procesos largos a través del tiempo geológico. Estos dos procesos son los siguientes: A) subsidencia de larga duración, superposición e individualización de depocentros y; B) margen erosiva mayormente extensional y regiones con levantamiento. Estos dos procesos pueden ser divididos en cuatro episodios tectónicos principales: 1) deformación más antigua en la cuenca Cenozoica (pre-Mioceno) está dominada por estructuras tipo horst y grábenes del basamento dispuestos en una geometría compleja paralelos a la una zona denominada Zona de Deformación

Principal relacionada posiblemente a tectónica transcurrente como resultado de una convergencia oblicua de placas; 2) en el Mioceno inferior un periodo de larga duración dominado por subsidencia, acompañado de una sedimentación relacionada a la transgresión sobre el sustrato y que además coincidió con un aumento significativo de la velocidad de convergencia de placas; 3) durante el Mioceno inferior tardío acontecieron levantamientos episódicos de “corredores” dispuestos paralelamente a la fosa y a la Zona de Deformación Principal. El levantamiento cesó durante el Mioceno superior; 4) reinicio de la subsidencia regional en el Plio-Cuaternario que tuvo como consecuencia la creación de espacio de acomodación debido al levantamiento de los bordes de la cuenca caracterizado por los estratos basculados hacia continente.

Existe otro estudio reciente en la cuenca Pisco Este. La publicación *“Towards deciphering the Cenozoic evolution of the East Pisco Basin (southern Peru)”* de Di Celma et al. (2022) establece dos mega-secuencias de primer orden tectonoestratigráfico. La primera mega-secuencia denominada en su trabajo como “P” durante Eoceno medio – Oligoceno inferior dominada por régimen extensional. Al final de esta primera mega-secuencia “P” indica el autor un levantamiento durante el Oligoceno. Asimismo, esta mega-secuencia “P” fue disectada o parcialmente erosionada por la segunda mega-secuencia denominada como “N”, la cual fue depositada durante el Oligoceno tardío a Mioceno superior. Además, el autor menciona que en esta segunda mega-secuencia “N” se observan periodos de extensión asociados con subsidencia en el Mioceno temprano seguido por eventos de contracción en el Mioceno tardío.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Evolución Tectónica

La evolución tectónica de una cuenca es el resultado de la integración del estilo tectónico y la reconstrucción del movimiento de las estructuras principales (fallas, pliegues, etc.), tomando en cuenta los esfuerzos que las formaron, los procesos tectónicos que las generaron y además su relación con el relleno sedimentario de las cuencas a lo largo de su historia geológica. A escala de cuenca y placas, según Noda

et al. (2016), los factores más importantes que delinear la geometría final de una cuenca de antearco son: la configuración de la convergencia de placas, cinemática de convergencia (tasa de velocidad, inclinación y oblicuidad), mecanismo de deformación, y material transferido a lo largo del límite de placa (a la fosa) sea frontal o basal que determinarán, si la cuenca será dominada por acreción (formación de un prisma de acreción) o erosión tectónica. Aplicando los criterios citados en las líneas precedentes se considera que la cuenca de Antearco Pisco está dominada por una frecuente erosión tectónica (Clift y Hartley, 2007 y Noda et al., 2016).

Para este proyecto se ha considerado diferentes factores que determinan la geometría de la cuenca a diferentes escalas geológicas. 1) Factores a escala de placa (Figura 2): historia del movimiento las placas (por ejemplo: Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza y Ghidella, 2005, Horton. 2018), evolución tectónica cenozoica del antearco (Genge et al., 2020; Viveen y Schlunegger, 2018; Sempere y Jacay, 2006; Clift et al., 2003; Machare. 1987), interacción, dirección y velocidades de las placas (Horton, 2018, Decou et al., 2013, Benavente, 2009). 2) Factores a escala de cuenca y local; se consideran la geometría de las estructuras y su cinemática, los sistemas de fallas y pliegues asociados y su deformación progresiva (McClay, 2000).

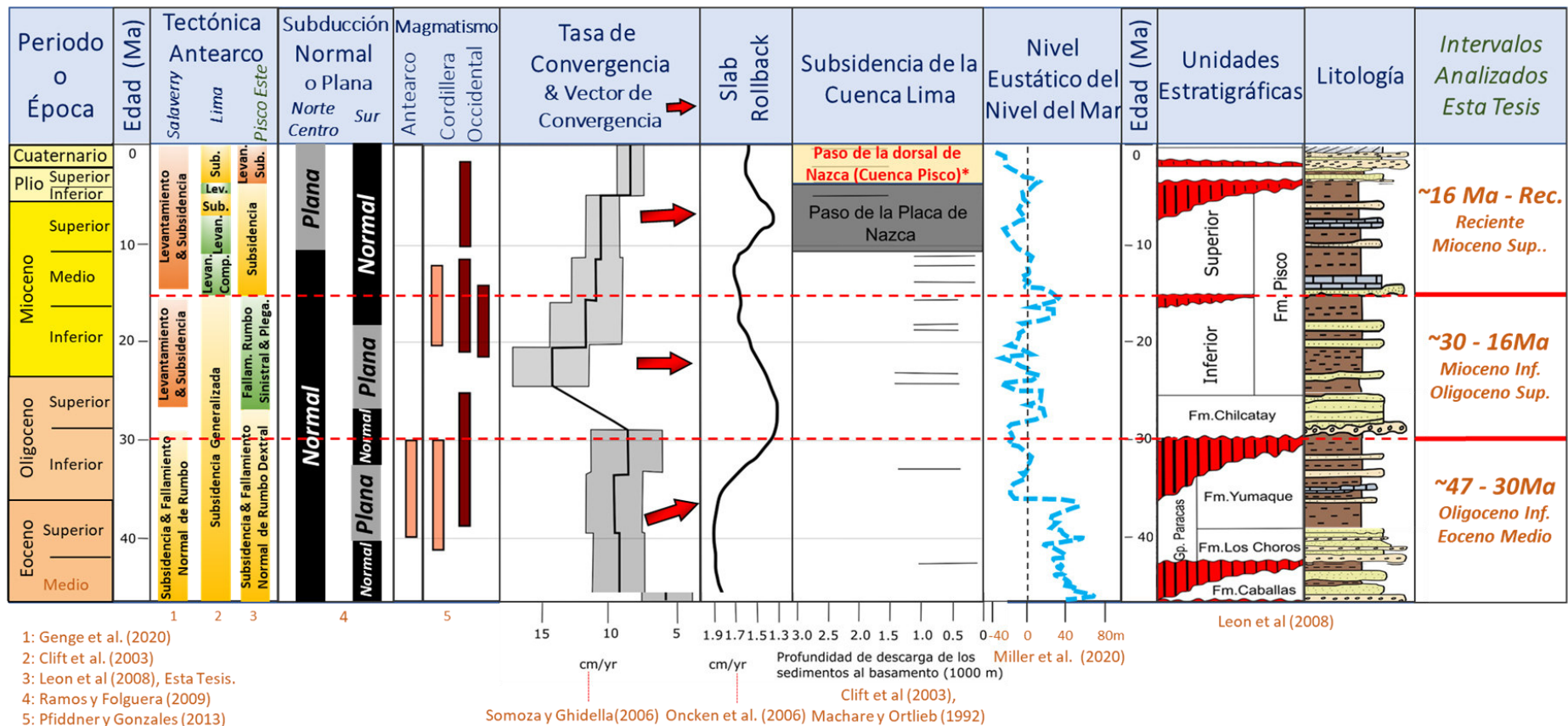


Figura 2. Diagrama resumen de las diferentes etapas de levantamiento, subsidencia, comprensión, extensión de las cuencas de antearco Salaverry, Lima y Pisco Este y su relación con el tipo de subducción, magmatismo, velocidad y oblicuidad (flechas rojas) de convergencia, Slab “rollback” de la placa subductada, 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 esta descriptas en la figura en color naranja claro).

Fuente: Esta imagen es una modificación y adaptación de Viveen y Schlunegger (2018).

2.2.2 Tipo de Fallas

En el área de estudio se demostrará la presencia y coexistencia en tiempo y espacio de tres tipos de fallas principalmente: 1) Fallamiento extensionales; 2) Fallamiento transcurrente o de rumbo y; 3) fallamiento por inversión tectónica.

2.2.2.1 Fallamiento extensional

Las fallas extensionales acomodan la extensión a partir del movimiento relativo descendente de las rocas del bloque techo con respecto a las rocas de bloque piso. Se desarrollan principalmente en ambientes extensionales, pero también se pueden desarrollar en ambientes compresionales, generalmente para acomodar esfuerzos tensionales por curvatura de capas, y en ambientes transcurrentes (Barredo et al. 2010).

2.2.2.2 Fallamiento transcurrente o de rumbo

De acuerdo con Fossen (2010) Las fallas transcurrentes o de rumbo son fallas donde el vector de desplazamiento es paralelo al rumbo de la falla y por ende paralelo a la superficie de la tierra. La zona de cizalla de este tipo de fallas está dominada en profundidad por mecanismos de deformación plástica. Estas fallas son típicamente de alto ángulo en comparación con otros tipos de fallas, y muchas de estas parecen ser muy rectilíneas en vista de planta. Las curvaturas e irregularidades geométricas también ocurren al largo de las fallas de rumbo, pero más comúnmente en la vertical que en la sección horizontal, perpendiculares al vector de desplazamiento.

2.2.2.3 Inversión tectónica o inversión o reactivación del sentido de desplazamiento de las fallas de rumbo.

De acuerdo con Buchanan y Buchanan (1995), La inversión tectónica involucra un cambio en el modo de estilo tectónico. Por ejemplo, de extensión a contracción. En cuencas extensionales que se invierten a cuencas compresionales llegan a formar regiones de relieves estructurales positivos. Este proceso de inversión tectónica genera la reactivación de fallas normales que pasan a ser fallas inversas (Cooper y Williams, 1989; en McClay, 2000).

En este proyecto se plantea un modelo de inversión tectónica que principalmente afecta el sentido de desplazamiento de las fallas de rumbo (o reactivación de fallas de rumbo como lo describe Maruyama y Lin, 2004). En el área de estudio se interpreta que las fallas de rumbo dextrales (con componente normal) se invierten (o reactivan) como fallas de rumbo sinistral (con componente inversa).

2.2.3 Modelo de evolución tectónica

2.2.4 Sistemas de fallas y pliegues y su asociación

De acuerdo con McClay (2000) en la mayoría de los regímenes tectónicos se ha reconocido que las estructuras no se forman aisladamente, sino que las estructuras se asocian (o “*linquean*”) unas a otras. Estas son: 1) asociaciones *geométricas* (p.e. formas y modos de las estructuras), b) asociación *cinemática* (p.e. patrones de los desplazamientos y movimientos que forman las estructuras) y, 3) asociación *dinámica* (p.e. esfuerzos que forman las estructuras). En muchos casos los sistemas de fallas, o sistema de pliegues se pueden asociar en un determinado periodo de tiempo y espacio.

2.2.4.1 Deformación progresiva

En muchos regímenes tectónicos puede ocurrir múltiple deformación y se ha reconocido que esta deformación no necesariamente indica eventos tectónicos separados, sino que en realidad puede ser el resultado de una evolución progresiva de las estructuras a través del tiempo durante eventos de deformación (McClay, 2000).

2.2.4.2 Interpretación estructural

Se entiende como el estudio de las características estructurales (fallas y pliegues) como resultado de la deformación frágil de la corteza.

El análisis cuantitativo de las fallas permite la caracterización de la deformación en la corteza superior. Además, se realiza un estudio de la población de fallas y se las agrupa en sistemas según su geometría, características intrínsecas y su cinemática (Fossen, 2010; Barredo et al., 2010).

2.2.4.3 Estilo estructural

De acuerdo con Harding y Lowell (1979), los estilos estructurales son asociaciones de estructuras tipo fallas y pliegues, que a menudo se generan al mismo tiempo y estas asociaciones se repiten generalmente en regiones con deformación similar. Harding y Lowell (1979) también menciona que los estilos estructurales se diferencian dependiendo de la participación en la deformación del basamento o al despegue a la base de la cobertura sedimentaria. Los estilos que involucran el basamento pueden incluir asociaciones estructurales de fallas de transurrencia o de rumbo, bloques con fallas inversas (compresivas) o bloques de fallas normales (extensionales). El estilo estructural tipo compresivo es una asociación de fallas inversas por corrimiento y plegamiento. El estilo extensivo está relacionado a asociaciones de fallas normales con un nivel de despegue específico (Lowell, 1985; McClay, 2000). Finalmente, el estilo estructural tipo transcurrente o de fallas de rumbo está asociado con fallas de alto ángulo. En esta tesis se logró identificar en la cuenca Pisco Este sector costa afuera la combinación de estos estilos tres estilos estructurales en tiempo y espacio.

Los estilos tectónicos son el resultado de la cinemática a escala tectónica de placas y a la historia depositacional de las cuencas. Según Harding y Lowell (1979), los estilos estructurales son el resultado del tipo de ambiente tectónico y límites de placas (Figura 3) y se puede simplificar de la siguiente manera: 1) Fallas de rumbo desarrollados en límites de placas convergentes (cuencas de antearco) o transformantes; 2) Fallas inversas con basamento involucrado, o sistemas de piel gruesa o delgada (thin-skin o thick-skin) desarrollados predominantemente en límites convergentes particularmente en cuencas de antepaís o fajas orogénica; 3) bloque de fallas extensionales desarrollados en límites de placas divergentes y en ciertos límites convergentes.

El área de estudio corresponde a una cuenca antearco ubicada en un límite de placas convergentes. Mediante esta tesis se ha identificado los diferentes estilos estructurales asociados a fallas normales, transcurrentes e inversas (Figura 4). Adicionalmente Noda et al. (2016) menciona que los factores más importantes que delinean la geometría final de una cuenca de antearco es la configuración de la convergencia de placas, la cinemática de convergencia (tasa de velocidad, inclinación y oblicuidad).

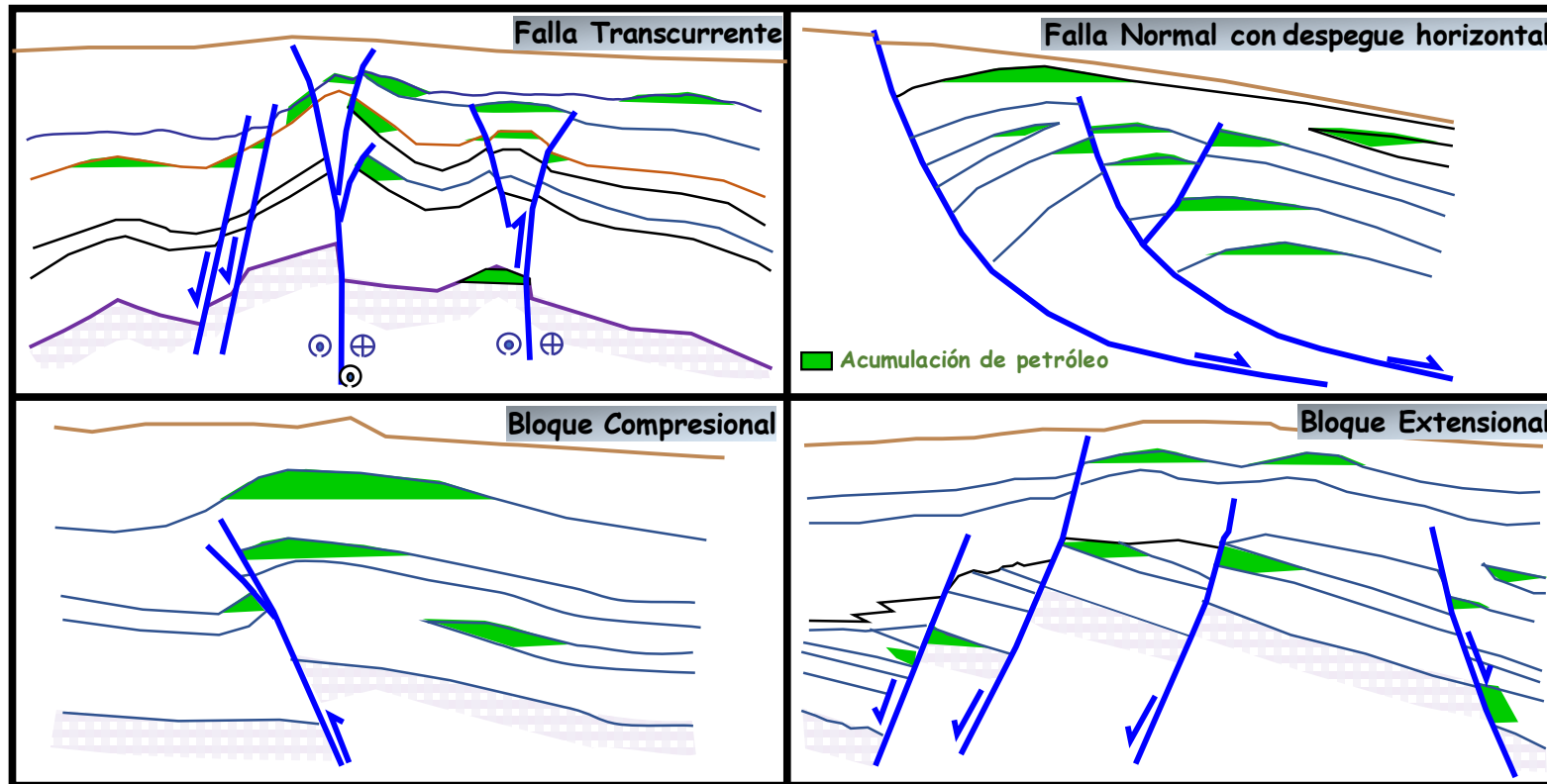


Figura 3. Diagramas esquemáticos de los diferentes estilos tectónicos presentes en la cuenca Pisco Este.

Fuente: Figura modificada de Harding y Lowell, 1979.

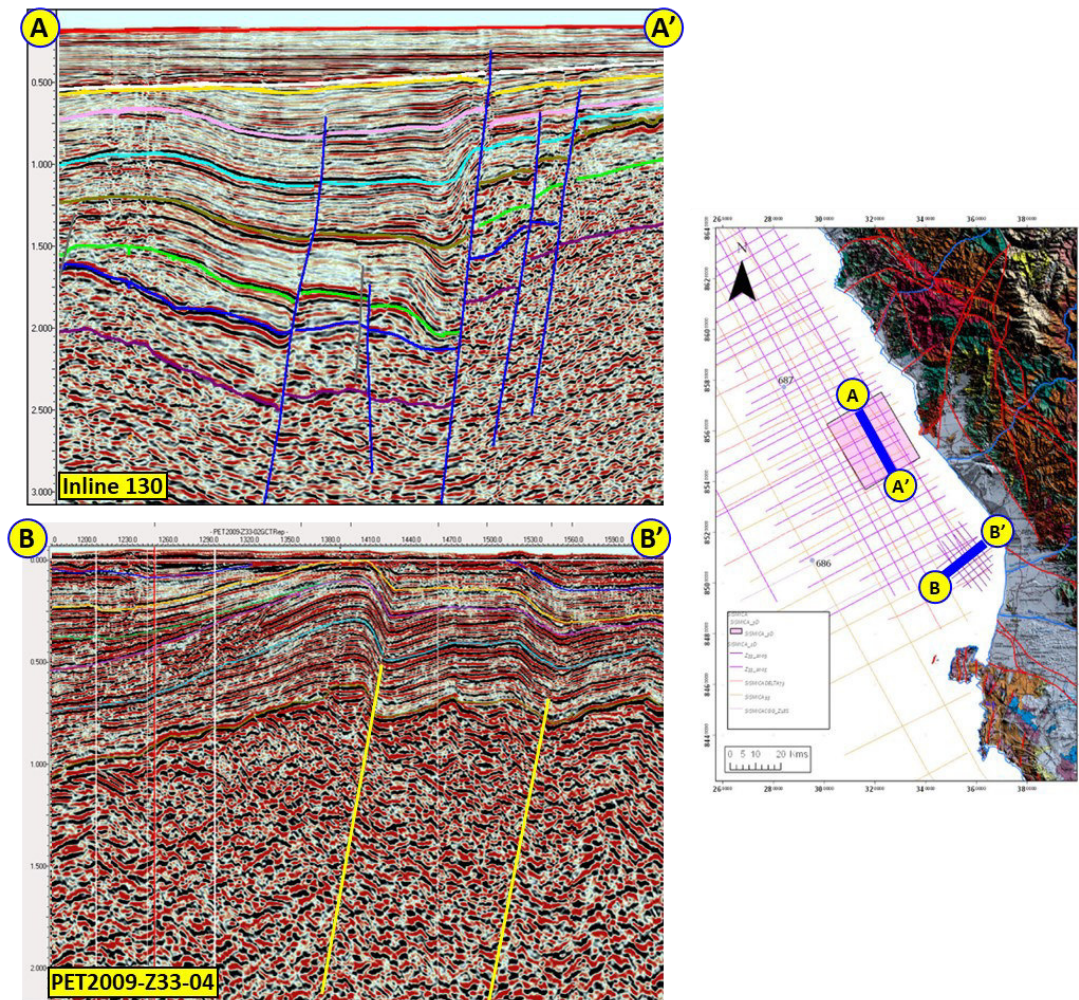


Figura 4. Ejemplos de estilos tectónicos presentes en el área estudio de la tesis, en la parte superior el estilo dominante es extensional mientras que en la imagen inferior es compresivo.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de la investigación

En este proyecto las variables no son manipuladas, por lo que es considerada como “tipo no experimental”.

Observacional: El proyecto es basado principalmente en la interpretación geológica de la información sísmica e integración de la información geológica de superficie existente, por ende, el diseño es transversal – causal.

Analítica: En base a la interpretación geológica de la sísmica se obtiene horizontes (unidades estratigráficas) y rasgos estructurales (fallas y pliegues). Se analiza el estilo estructural y se genera un modelo de evolución tectónica.

3.2 Unidad de análisis

Es 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 y Lima – Perú.

3.3 Población de estudio

Para el estudio se utilizó principalmente la información sísmica siguiente (Figura 5 y Anexo 1):

- 2,496 km de líneas sísmicas 2D.
- 1429 Km² cubos sísmicos.

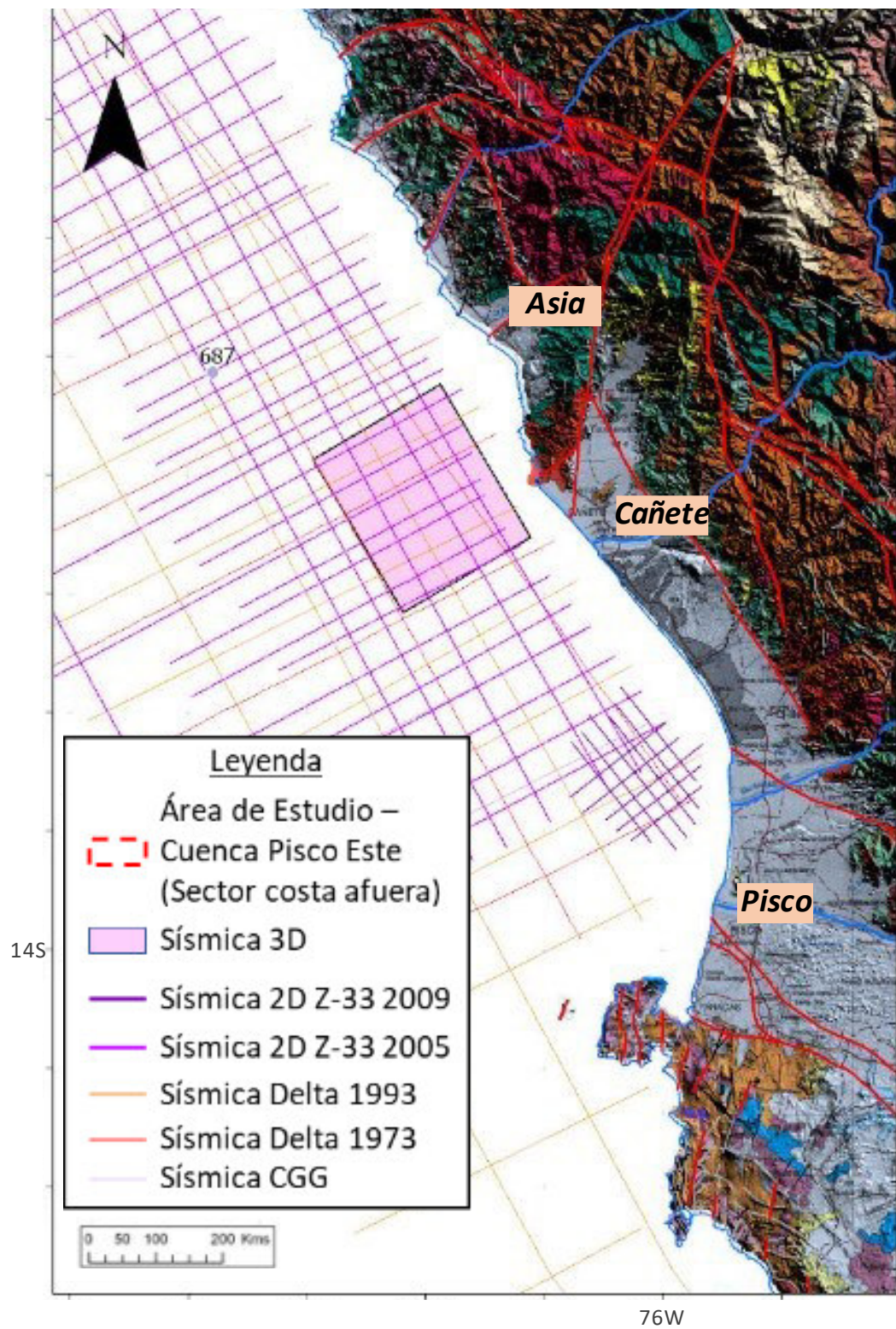


Figura 5. Mapa base de información sísmica 2D y 3D.

3.4 Tamaño de la muestra

La muestra está determinada como sigue:

- Horizontes sísmicos que corresponden a las unidades estratigráficas del Cenozoico (Tabla 1, Figura 6 y Figura 7).
- Mapas estructurales (Tabla 1).
- 71 fallas correspondientes a fallas normales, inversas y transcurrentes (Anexo 2 y Figura 12).
- 2 pliegues por propagación de falla (Anexo 2 y Figura 12).

Tabla 1. Horizontes interpretados integrados con unidades estratigráficas reconocidas en la cuenca Pisco Este - Sector Costa adentro y 3 mapas estructurales seleccionados para la interpretación de esta tesis.

ID	Horizonte Interpretado	Edad	Ma	Tipo de Mapa
1	Tope Formación Pisco Superior - Changuillo y Cañete	Mioceno Superior al Reciente	~16 - 0 Ma	Mapa Estructural en profundidad
2	Tope Formación Pisco Inferior	Mioceno Inferior	~30 - 16 Ma	Mapa Estructural en profundidad
3	Tope Formación Chilcatay	Oligoceno superior - Mioceno inferior		
4	Tope Formación Yumaque	Eoceno superior tardío - Oligoceno temprano	~47 - 30 Ma	Mapa Estructural en profundidad
	Tope Formaciones Choros y Caballas	Eoceno superior		
5	Base Cenozoico (Tope Cretáceo)	Eoceno inferior (~47 Ma)		

3.5 Selección de la muestra

No es necesario seleccionar las muestras debido a que la población y el tamaño de muestras son iguales.

3.6 Técnicas de recolección de datos

3.6.1 *Recolección de datos*

3.6.1.1 *Recopilación de datos e información*

Obtención de información bibliográfica de las siguientes bases de datos:

Sistema de bibliotecas y Biblioteca central: <https://sisbib.unmsm.edu.pe/>.

Recursos electrónicos:

Web of Science (<https://www.webofscience.com>).

Scielo (<https://scielo.org/es/>),

Scopus (<https://www.scopus.com>).

Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>).

AAPG Datapages/Archives (<https://archives.datapages.com/>).

Revisión bibliográfica de boletines geológicos del INGEMMET, congresos geológicos del Perú y libros temáticos.

Revisión de tesis de maestría y doctorado de diferentes universidades internacionales.

Mapa geológico y cuadrángulos del servicio geológico nacional - INGEMMET.

3.6.1.2 Recopilación de información técnica

La Empresa Estatal de Derecho Privado Perupetro S.A. ha sido la fuente más importante de información técnica y bibliográfica existente en la cuenca:

Información sísmica 2D y 3D.

Información de pozos (reportes y registros eléctricos).

Reportes de actividades exploratorias realizadas por las compañías que operaron en el área.

3.6.1.3 Adquisición de dato sísmico

La información más relevante utilizada en esta tesis es la información geofísica – líneas sísmicas 3D y 2D de diferentes proyectos de adquisición.

En las Tabla 2 y Tabla 3 se pueden observar en detalle las especificaciones de adquisición de cada uno los proyectos (surveys) de la sísmica 3D y 2D utilizada en este proyecto.

Esta información también fue provista por la Empresa Estatal de Derecho Privado Perupetro S.A.

Tabla 2. Especificaciones de adquisición de cada uno los proyectos (surveys) de la sísmica 3D.

Proyecto (Survey) sísmico 3D	3DPETOSS06LZ33PISA	3DSAVGMM14LZ33-SOFIA
Adquirido para	PETRO-TECH PERUANA	SAVIA PERU S.A.
Adquirido por	Offshore Seismic Survey	Geo Marine Management S.A.C.
fecha	Abril a Setiembre 2006	Mayo a Julio 2014
Tipo	3D	3D
Tamaño del Bin	6.25m * 25m	25 m x 25 m
Longitud de los registros (segundos - s)	6	6.05
Intervalo de muestreo (milisegundos - ms)	2	2
Numero de canales	480	720
Intervalo punto de tiro (metros - m)	12.5 /25 inline	12.5
Fold (%)	Full	12000
Intervalo de grupo (metros - m)	12.5	12.5
Fuente de los arreglos	2	2
Separación de la fuente (metros - m)	50	50
Profundidad de la fuente (metros - m)	7 +/-1	6 +/- 0.5
Profundidad del cable (metros - m)	9 +/- 1	8 +/-1
Numero de cables	2	3
Longitud de cable (metros - m)	3000	3000
Espaciado de los cables (metros - m)	NR	100

Esta tabla creada por el autor de la presente Tesis tomando los datos de: Petrotech Peruana S.A. 2008. Reporte final del segundo periodo exploratorio, Adquisición Pisco "A" 3D, Lote Z-33, TomoII.1.

Tabla 3. Especificaciones de adquisición de cada uno los 3 proyectos (surveys) de la sísmica 2D.

Survey	RIBDGC93LZ ¹	PETOSS09LZ33-SLVDR	PPSDU7374LLAGPIS
Adquirido para	RIBIANA	PETRO-TECH PERUANA	PETROPERU S.A
Adquirido por	Digicon -Vessel Explorer	Offshore Seismic Survey	Delta Exploration Company, Inc.
Fecha	30-mayo a 04-Sep-1993	03 Abril a 06 Abril 2009	09-Mar-1973 a 08-Feb-1974
Tipo	2D	2D	2D
Líneas	88	11	102
Longitud de los registros (segundos - s)	8	8	6 10
Intervalo de muestreo (milisegundos - ms)	2	2	4
Numero de canales	180	360	24
Intervalo punto de tiro (metros - m)	37.5	25	70 100
Fold (%)	5300	9000	2400
Intervalo de grupo (metros - m)	25	12.5	70 100
Profundidad de la fuente (metros - m)	9 +/- 1	6	NR
Profundidad del cable (metros - m)	7.6 +/- 1	8	15 +/- 3
Longitud de cable (metros - m)	4500	4500	2300

Esta tabla creada por el autor de la presente Tesis tomando los datos de: ¹ Digicon Geophysical Corporación 1993. Continental shelf offshore Peru. ²Petrotech Peruana S.A. 2009. Final seismic acquisition report, 2D seismic survey, Block Z33, Project: PET0SS09Z33- San Salvador. ³Seiscom Delta INC. 1973. Joint venture seismic survey. Peruvian continental shelf, Lagunitos Pisco, for Petróleos del Peru and Delta Exploration Co. INC. Houston Texas.

3.7 Análisis e interpretación de la información

3.7.1 Construcción del proyecto

El manejo de la información geológica-geofísica se realizó principalmente utilizando un software técnico. El software nos permitió construir un proyecto con el que se pudo realizar la carga y el control de calidad de la información técnica. Esta información utilizada, integrada e interpretada principalmente fue la siguiente:

- Información Sísmica 2D y 3D (Anexo 1).
- Información geológica del sector de la cuenca Pisco Este del sector costero.

3.7.2 Interpretación de la información sísmica

El instrumento de la investigación principalmente proviene de la interpretación de la información de subsuelo denominada como información sísmica.

Como resultado de la interpretación de la información sísmica, geológica - geofísica, se obtuvieron dos elementos importantes que son: 1) Horizontes o consideradas aquí como unidades estratigráficas (Tabla 1). 2) Fallas y pliegues (Anexo 2).

3.7.2.1 Interpretación sísmica de horizontes - unidades estratigráficas clave:

Se interpretaron 6 reflectores sísmicos con clara continuidad lateral que corresponden a horizontes o unidades estratigráficas identificadas (Figura 6, Figura 7 y Tabla 1.) y correlacionadas con la geología de superficie del sector costero correspondientes a la cuenca cenozoica (Tabla 1 y Figura 11). En base a esta interpretación se seleccionaron solo 3 horizontes clave de los 5 interpretados con los cuales se elaboraron tres mapas estructurales. Estos horizontes y sus correspondientes mapas son: 1) Mapa Estructural I correspondiente a las Formaciones Caballas Choros y Yumaque (~47 - ~30Ma; horizonte 4); 2) Mapa Estructural II correspondiente a las Formaciones Chilcatay y Pisco Inferior (~30 - ~16 Ma; horizontes 2); 3) Mapa Estructural III (Formaciones Pisco Superior y Changuillo; entre ~16 Ma al reciente; horizontes 1).

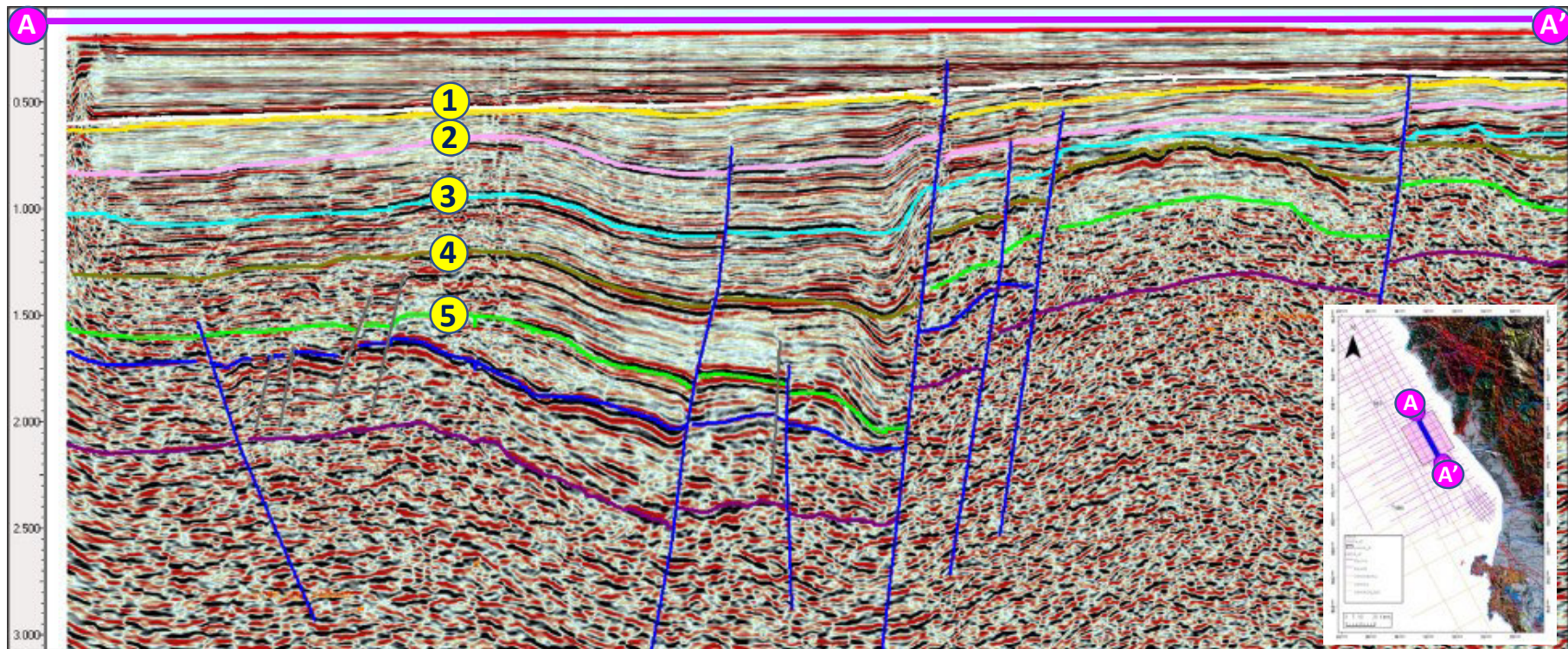


Figura 6. Horizontes clave del 1 – 5 interpretados en la sísmica. Para referencia de la numeración ver Tabla 1.

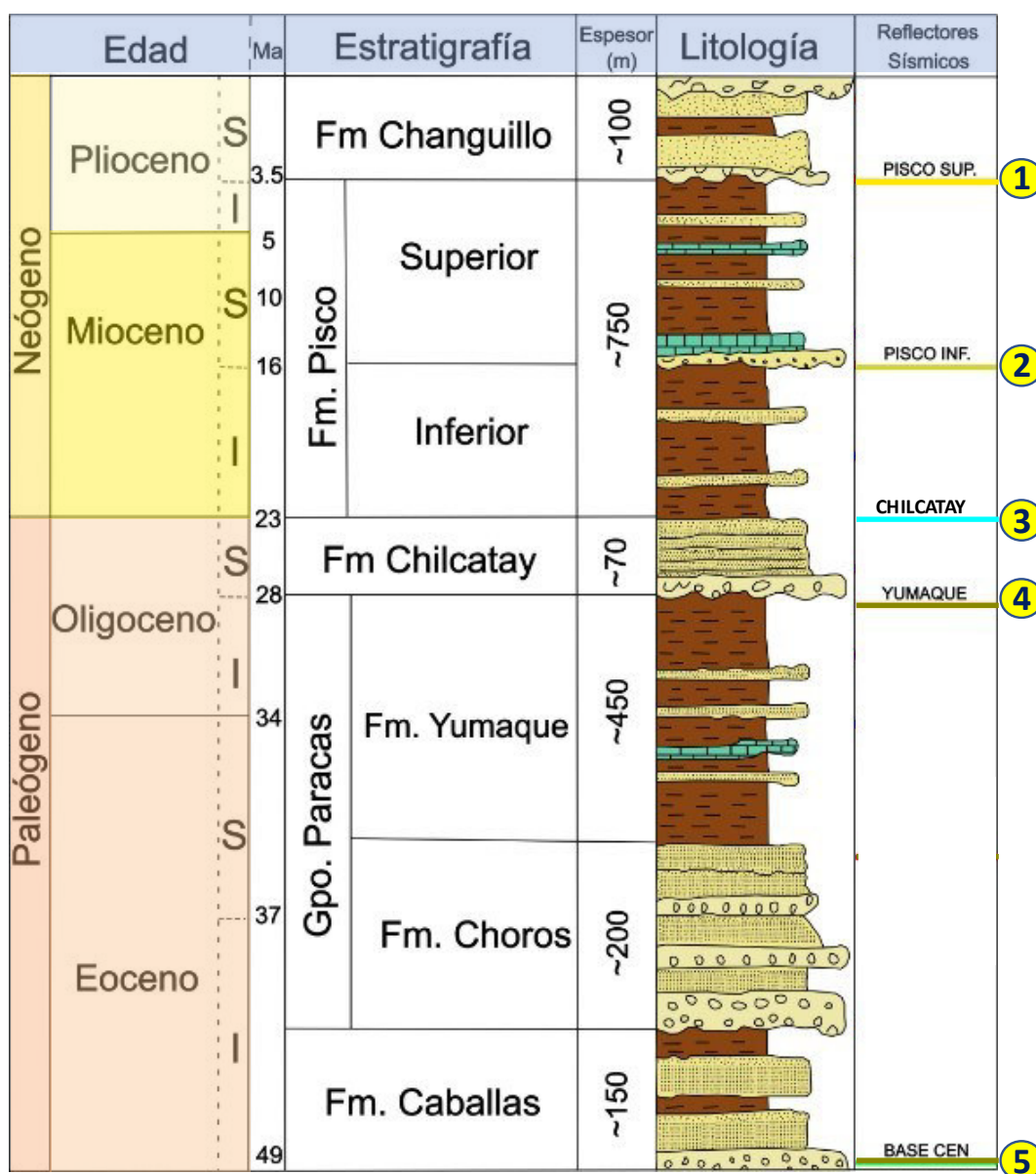


Figura 7. Formaciones estratigráficas del cenozoico de la cuenca de Pisco Este y reflectores y Horizontes interpretados (numeración asignada en la Tabla 1).

Fuente: Columna estratigráfica modificada de Savia 2011 (estratigrafía en León et al., 2008)

3.7.2.2 Interpretación estructural de las fallas y pliegues

Uno de los principales resultados que se presentan en esta tesis está basado en el análisis estructural de las fallas. Los datos obtenidos de la interpretación de las fallas fueron longitud, desplazamiento, rumbo, inclinación, definición del tipo de falla

(normal, inversa y rumbo sinistral y dextral; Figura 8) y pliegues tipo anticlinal (Anexo 2).

El análisis de las fallas y pliegues se realizó mediante el uso de estereogramas, permitiendo representar la geometría de las estructuras lográndose obtener los esfuerzos principales σ_1 – compresivo “P”, σ_2 y σ_3 - tensional “T” (tensional) (Figura 8). El software utilizado para el análisis estructural fue Tensor Co.

La asociación de las fallas y pliegues y determinación de la cronología se interpretó a través de las observaciones geológicas durante la interpretación sísmica, identificando de esta manera su geometría, tipo de falla, y el horizonte (o unidad estratigráfica) deformado o fallado. También se identificaron otros rasgos específicos identificados en la sísmica tales como estratos de crecimiento, terminaciones denominadas onlap, downlap, toplap y superficies tales como discordancias.

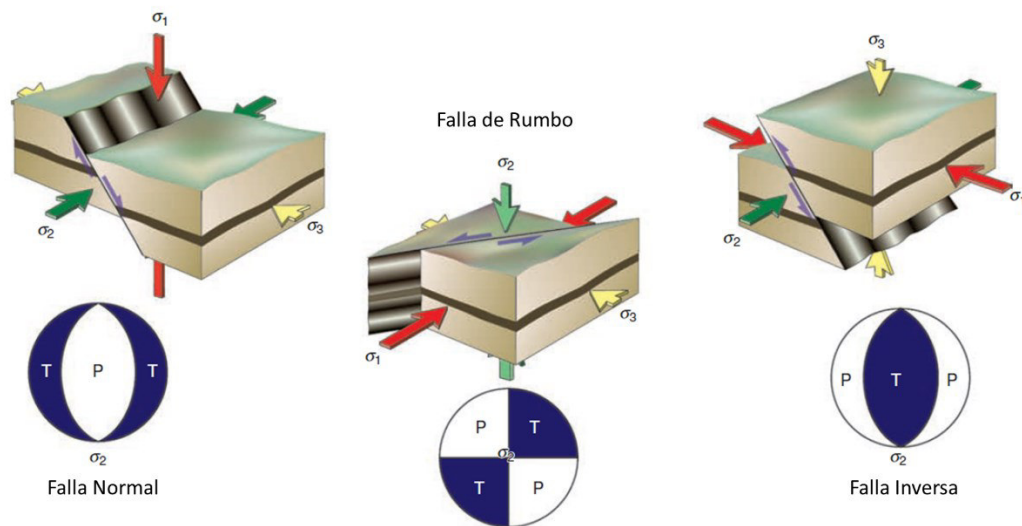


Figura 8. Relación de la orientación de los esfuerzos principales y los regímenes tectónicos de acuerdo con Anderson (1951). Estereogramas mostrando el campo de σ_1 – compresivo “P”, σ_2 y σ_3 - tensional “T” (tensional).

3.7.3 *Conversión de dominio tiempo (ms – milisegundos) a dominio profundidad (pies)*

Es importante mencionar que toda la información sísmica interpretada en este proyecto está en dominio de tiempo (milisegundos). Por ende, luego de realizar la interpretación y la elaboración de los mapas estructurales se procedió a convertirlos al dominio de profundidad (en pies).

Para realizar la conversión del dominio de tiempo a profundidad de los mapas elaborados se utilizaron los pozos petroleros perforados en las cuencas aledañas debido a que en la cuenca Pisco Este no existen pozos.

Se recolectó la información de velocidades de los registros *check-shot* de los pozos Morsa 1X y Lobos 1X y se obtuvo una ley de velocidad (función vertical de velocidad) la cual se utilizó para la conversión de tiempo a profundidad de los mapas (Figura 9 y Tabla 1.).

Lobos 1X Check Shot		Morsa 1X Check Shot	
Profundidad del Receptor desde el Datum (rz') (pies)	Tiempo (miliseg.) TWT	Profundidad del Receptor desde el Datum (rz') (pies)	Tiempo (miliseg.) TWT
Profundidad del Agua 143 m (469.1 pies)		Profundidad del Agua 203m (629.9 pies)	
0.00	0.00	0.00	0.00
784.12	0.00	1276.25	242.72
964.57	0.00	1594.49	297.41
1243.44	0.00	1735.56	318.90
1473.10	0.00	1873.36	341.06
1696.19	0.00	1965.22	353.93
1873.36	0.00	2063.65	368.58
2263.78	0.00	2260.50	398.35
2726.38	0.00	2375.33	414.96
2834.65	0.00	2424.54	422.38
2919.95	0.00	2496.72	433.06
3047.90	0.00	2637.80	454.99
3121.72	0.00	2736.22	469.95
3329.07	0.00	2933.07	498.32
3549.87	0.00	3015.09	511.12
3736.88	0.00	3129.92	527.46
3933.73	0.00	3277.56	543.52
4097.77	0.00	3375.98	555.24
4229.00	0.00	3566.27	582.77
4311.02	0.00	3654.86	594.05
4442.26	0.00	3736.88	603.57
4557.09	0.00	3832.02	610.68
4721.13	0.00	3871.39	613.53
4917.98	0.00	3999.34	621.62
5082.02	0.00		
5229.66	0.00		

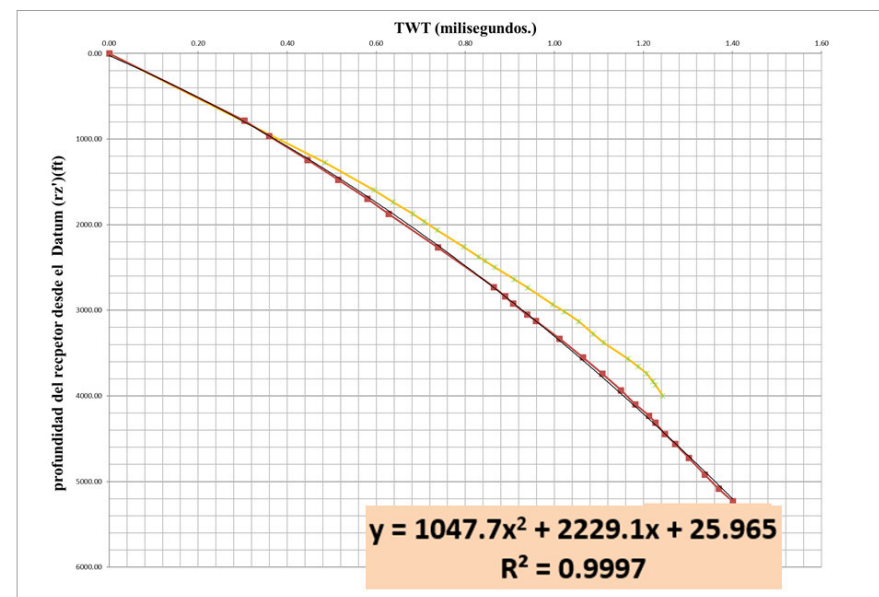


Figura 9. Pozos de referencia (Morsa 1X y Lobos 1X) usados para generar la gráfica Tiempo-profundidad y generar la ley de velocidad utilizados para la conversión de los mapas estructurales de tiempo a profundidad.

3.8 Variables

3.8.1 *Identificación de variables*

Independiente

Análisis del estilo estructural.

Dependiente

Generación de un modelo de evolución tectónica.

3.9 Matriz de consistencia

Anexo 3.

3.10 Operacionalización de variables

Anexo 4.

CAPÍTULO 4: Marco Geológico

4.1 Estratigrafía y elementos del sistema petrolero.

La estratigrafía de la Cuenca Pisco Este (Figura 10), para el propósito de esta tesis, ha sido dividida en dos unidades: Pre-Cenozoico y Cenozoico.

4.1.1 *Estratigrafía pre-Cenozoico*

Se presenta una descripción sucinta de la estratigrafía pre-Cenozoico según León et al. (2008):

Proterozoico (Figura 10): Esta unidad esta compuestas por rocas tipo gneis, granitos gneissificados y esquistos micáceos. Esta unidad se la define como Complejo Basal de la Costa conformado por las Formaciones Chiquerío y San Juan (Bellido y Narváez, 1960).

Neoproterozoico – Ordovícico temprano (Figura 10): esta unidad compuesta por rocas sedimentarias y metasedimentarias originalmente compuestas por conglomerados, cuarcitas, calizas y pelitas (Grupo Marcona de Loewy et al., 2004).

Silúrico tardío – Devónico (Figura 10): Esta unidad esta compuestas por pulsos magmáticos perteneciente al batolito de San Nicolas (Mukasa y Henry, 1990).

Carbonífero (Mississipiano) (Figura 10): Unidad compuesta por areniscas y arcillas de ambiente costero transicional pertenecientes al Grupo Ambo (Newell et al., 1953). Esta Grupo tiene una importancia en el sistema petrolero de la cuenca ya que es considerada como la principal roca generadora de hidrocarburos con valores excelentes de cantidad, calidad y madurez, basado en los valores del contenido de carbón orgánico total y de la reflectancia de vitrinita respectivamente (Alarcón et al., 2005, Peña et al., 2020).

Jurásico medio – superior (Figura 10): Unidad principalmente compuesta de rocas volcanoclásticas y flujos de lava relacionados al arco volcánico calco-alcalino presente el norte peruano y norte de Chile (formaciones Pucusana Bosc, 1963 y Romero et al., 2005 y de Tambo Inga, Puente Inga y Ventanilla. Ramos y Alemán, 2000; Jaillard et al., 2000).

Cretáceo inferior – superior (Figura 10): Pertenecientes al Grupo Morro Solar – Formación Hualhuani (desarrollado durante el Berrasiano - Hauteriviano) principalmente conformado por rocas siliciclásticas (Caldas, 1978), Grupo Lima (desarrollado durante el Barremiano – Albiano inferior) compuesta por rocas carbonatadas intercaladas con rocas siliciclásticas. Dentro de este Grupo se encuentra la Formación Pariatambo (Fernández, 1993, Caldas J., 1978) la cual es considerada como una roca generadora secundaria de hidrocarburos (Valencia 2011, Peña et al., 2020) Grupo Casma (desarrollado durante el Albiano superior – Cenomaniano) compuesto por rocas volcanoclásticas reportadas principalmente al borde este de la cuenca Pisco Este.

4.1.2 Estratigrafía del Cenozoico

León et al. (2008) describe una síntesis comparativa y evolución de la definición en las últimas décadas de la estratigrafía Cenozoica de la cuenca Pisco Este basado en la interpretación de los siguientes autores: Machare (1987), Dumbar et al., (1988), Dávila (1989) De Vries (1998) (Figura 11).

Eoceno medio (Figura 7, Figura 10 y Figura 11): Formación Caballas compuestas principalmente por areniscas fluviales (localidad de puertos Caballas) (León et al., 2008), abanicos aluviales y depósitos gravitacionales subacuáticos (localidad de Pampa Chilcatay). Esta unidad litoestratigráfica cumple el papel de roca reservorio de hidrocarburos (Peña et al., 2020).

Eoceno medio tardío (Figura 7, Figura 10 y Figura 11): Separado por una discordancia de la Formación Caballas se encuentra sobreyaciendo la Formación Choros conformada por areniscas de ambiente playero (León et al., 2008). Esta formación aflora en las márgenes

este y oeste de la cuenca con diferentes características sedimentológicas. La Formación Choros por sus características petrofísicas de porosidad con un rango entre ~8 a 35% y permeabilidad con valores en un rango entre 10 a ~1000 milidarcys [mD] en muestra de afloramiento, es considerada una de las principales roca reservorio de hidrocarburos (Peña et al., 2020 y Valencia 2011).

Tanto la Formación Chilcatay como la Formación Los Choros son consideradas depósitos sin-extensionales desarrolladas en un ambiente de actividad tectónica extensional y asociadas al relleno de grábenes y hemigrábenes.

Eoceno superior – Oligoceno inferior (Figura 7, Figura 10 y Figura 11): relacionada a una importante transgresión marina se depositó la Formación Yumaque la cual está compuesta principalmente de lodolitas biogénicas (León et al., 2008). La Formación Yumaque es considerada la principal roca sello, por su posición estratigráfica y sus características litológicas y petrofísicas. En base al resultado del análisis de la presión capilar de esta formación se observó que esta unidad tiene un umbral de presión de hasta ~2500 psi. Este valor sugiere que esta formación sería una potencial roca sello teniendo inclusive la capacidad de albergar una columna de hidrocarburos en un rango de 4900 a 5250 pies (Peña et al., 2020 y Valencia 2011).

Oligoceno superior (Figura 7, Figura 10 y Figura 11): La Formación Chilcatay se separa de la formación infrayacente por una discordancia. Esta Formación está compuesta por areniscas fosilíferas y con presencia importante bioturbación (León et al., 2008) depositadas en un ambiente playero. Esta Formación está relacionada a una importante transgresión marina (León et al., 2008) y de acuerdo con este estudio esta formación adicionalmente a la transgresión está muy relacionada a un pulso de inversión (Calderón, 2007). Este proceso será analizado y discutido en el siguiente capítulo.

Mioceno inferior (Figura 7, Figura 10 y Figura 11): Sobreyaciendo a la Formación Chilcatay se deposita la Formación Pisco inferior, la cual está compuesta de sedimentos rico en diatomeas y sedimentos siliciclásticas (León et al., 2008).

Sobreyaciendo a la Formación Chilcatay se deposita la Formación Pisco inferior, la cual está compuesta de sedimentos rico en diatomeas y sedimentos siliciclásticas (León et al., 2008).

Mioceno superior - Plioceno inferior (Figura 7, Figura 10 y Figura 11): Existe una discordancia importante que separa la Formación Pisco Inferior de la Formación Pisco Superior. La Formación Pisco superior está compuesta por conglomerados, areniscas y lodolitas (León et al., 2008). Esta Formación corresponde a depósitos de ambientes costeros a transicionales (Ochoa et al., 2021).

Esta unidad litoestratigráfica adicionalmente está relacionada a una transgresión marina importante y afectado por extensión y compresión. Este proceso será analizado y discutido en el siguiente capítulo.

Plioceno superior (Figura 7, Figura 10 y Figura 11): La Formación Changuillo separado por una discordancia de la Formación Pisco superior (León et al., 2008). Esta formación está compuesta por arenas y conglomerados fluviales.

Pleistoceno (Figura 7, Figura 10 y Figura 11): la Formación Cañete separado por una discordancia de la Formación Changuillo. Esta formación está compuesta principalmente por conglomerados depositados en un ambiente fluvial y abanicos aluviales (León et al., 2008).



Fuente: Columna estratigráfica modificada de Savia 2011 (estratigrafía de León et al., 2008)

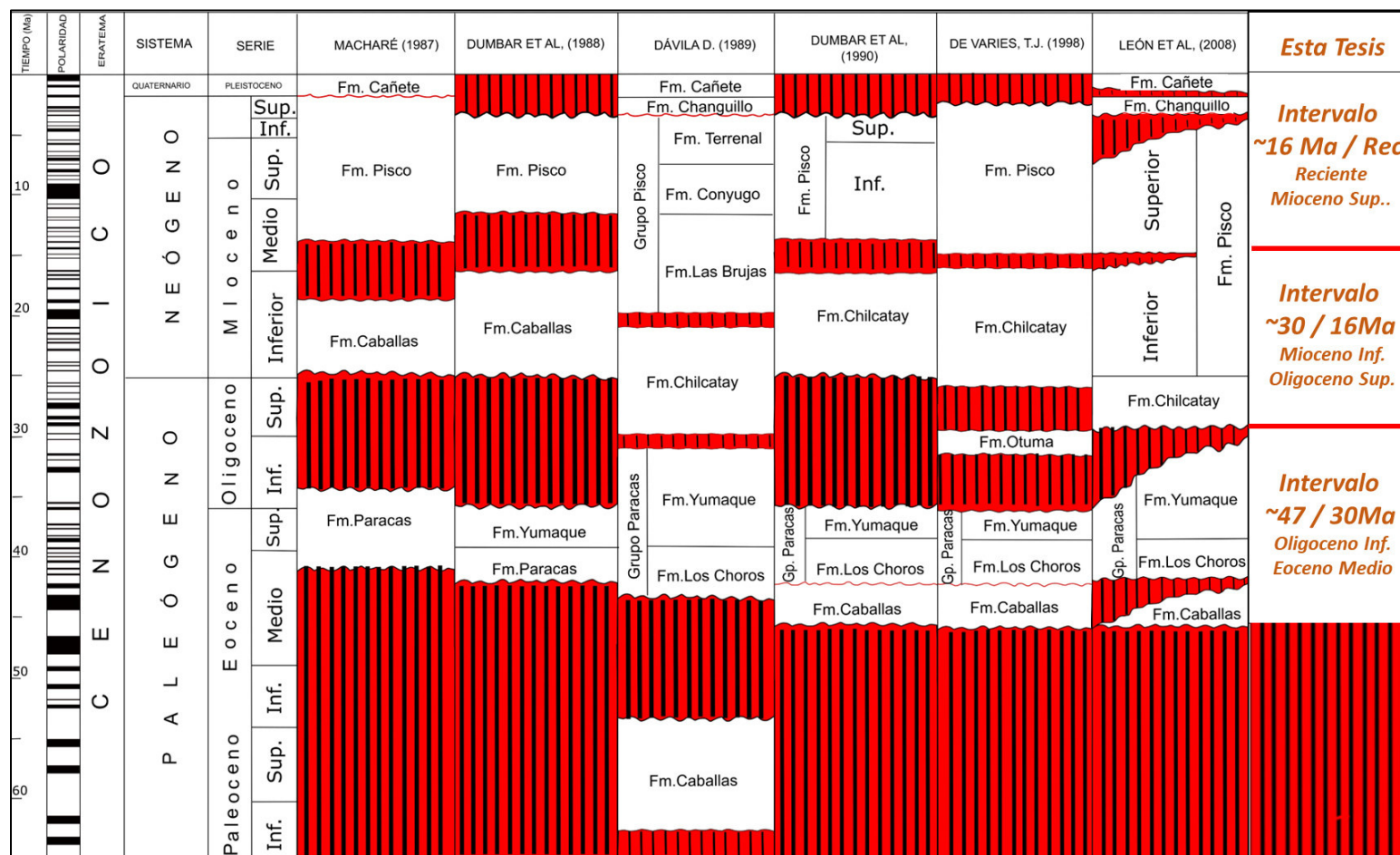


Figura 11. Estratigrafía del Cenozoico. Para este estudio se ha utilizado la nomenclatura estratigráfica de León et al., 2008.

Fuente: León W., Rosell W., Antenor A., Torres V. y 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.

4.2 Estilo estructural de la cuenca Pisco Este

El estilo estructural de la cuenca responde principalmente a la reorganización placas tectónicas, siendo los factores más significativos la dirección y la velocidad de convergencia de la placa Sudamericana y Placa Farallón (entre 60 Ma y 28 Ma aproximadamente) y la subsecuente Placa de Nazca (desde 28 Ma hasta la actualidad) (Pardo-Casas y Molnar, 1987; y Somoza y Giandhella, 2005). Otro factor importante que delinea el estilo estructural es la subducción de la Dorsal de Nazca la cual tiene un impacto en la cuenca Pisco Este desde los ~6 Ma (Machare y Ortlieb, 1992) (Figura 2). En el siguiente capítulo se explicará en detalle el impacto de estos factores para cada etapa de su deformación.

En el sector costero de la cuenca Pisco, León et al. (2008) propone cuatro etapas de evolución tectónica. 1) Fallamiento Normal - Extensión en el Eoceno medio y formación de hemigrábenes (Formaciones Caballas y Los Choros). 2) Durante el Oligoceno tardío (Formación Chilcatay), Fallamiento Normal - extensión, cambio de polaridad y por consiguiente la formación completa de grábenes. 3) Fallamiento Inverso y Normal - Levantamiento en el Mioceno medio y una reactivación de la extensión (Formación Pisco inferior). 4) Fallamiento Inverso. inversión de cuenca y su levantamiento durante el Plioceno tardío al Pleistoceno (Formaciones Pisco superior, Changuillo y Cañete) (Figura 2).

Como parte de los objetivos de este proyecto se detallarán los estilos tectónicos, la cinemática de fallas, y se describirán los procesos y su cronología.

CAPITULO 5: Resultados y Discusión

5.1 Análisis, interpretación y discusión de resultados

5.1.1 Definición de los sistemas de falla y horizontes estratigráficos clave de la cuenca Pisco Este sector costa afuera

Basado en la interpretación sísmica de los dos rasgos estructurales más importantes – fallas y pliegues – se definió a las fallas por su tipo (es decir falla tipo normal, inversa y rumbo), su morfología, su geometría, su ubicación geográfica, el nivel estratigráfico afectado por el fallamiento y plegamiento y su influencia sobre el relleno sedimentario.

Finalmente se definieron 5 sistemas de fallas y 1 sistema de pliegues anticlinales (Figura 12 y Anexo 2):

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

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

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

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

Sistema 5 – Fallas normales reactivadas con orientación ~SO-NE relacionadas al Sistema 2 de fallas correspondiente a los grábenes y hemigrábenes.

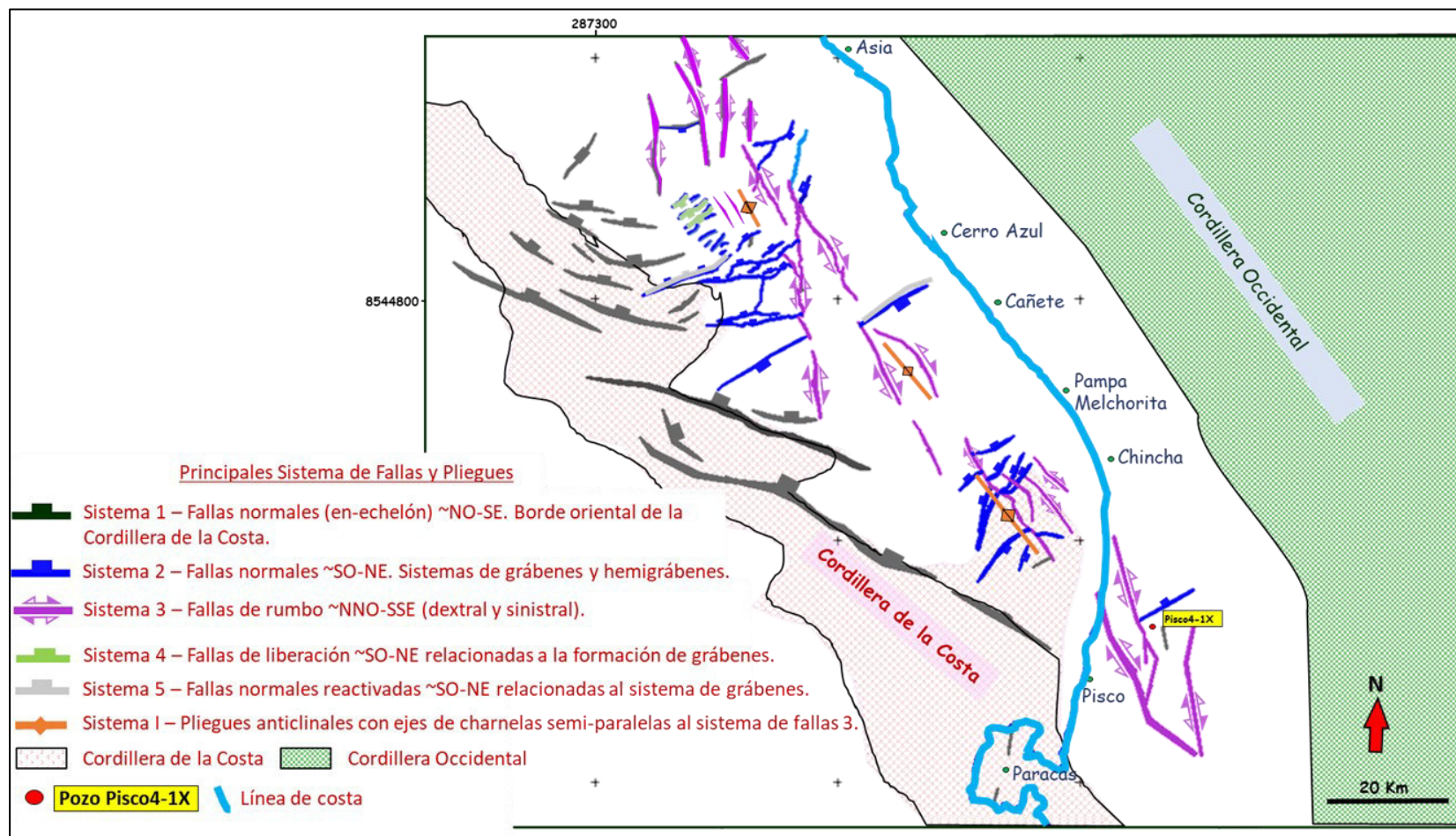
Sistema I – Pliegues anticlinales por propagación de fallas con la orientación del eje de sus charnelas semi-paralelas al Sistema 3 de fallas de rumbo.

Un segundo resultado de la interpretación sísmica geológica consistió en la elaboración de mapas estructurales de tres horizontes clave (Tabla 1) los cuales corresponden a unidades estratigráficas reconocidas del Cenozoico de la geología del sector costa adentro de la cuenca.

Los mapas estructurales permitieron reconocer que sistema de fallas estuvo activa y como interactuaron estos sistemas para cada tiempo o rango edad determinada. Esto permitió proponer la cronología de la deformación de esta parte de la cuenca.

Los tres horizontes clave han sido agrupados de la siguiente manera (Figura 11 y Tabla 1):

- 1) Intervalo I entre ~47/~30Ma (Eoceno Medio – Oligoceno Inferior. Formaciones Caballas, Choros y Yumaque)
- 2) Intervalo II entre ~30 - ~16 Ma (Oligoceno superior – Mioceno Inferior, Formaciones Chilcatay y Pisco Inferior).
- 3) Intervalo III entre ~16 - 0Ma (Mioceno Superior al Reciente, Formaciones Pisco Superior - Changuillo).



5.1.2 Intervalo I entre ~40/~30Ma (Eoceno Medio – Oligoceno Inferior. Formaciones Caballas, Choros y Yumaque)

El mapa estructural de la Figura 13, corresponde al intervalo de edad ~47-30 Ma. Este mapa permite observar especialmente zonas de altos y bajos estructurales con lo cual se puede deducir la geometría de la cuenca. Adicionalmente se ha incluido en la Figura 13, un mapa estructural en el sector costa adentro (IPC, 1955), correspondiente a este mismo intervalo de tiempo (~40Ma).

Los rasgos estructurales identificados que afectan a este primer intervalo corresponden principalmente a fallas.

La Figura 13, 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.

5.1.2.1 Sistema de fallas del Intervalo I

En el mapa estructural de la Figura 13, se registran los siguientes sistemas de fallas (Anexo 2):

Sistema 1 – Fallas normales en-echelón con orientación ~NO-SE relacionadas al borde oriental de la Cordillera de la Costa (

Figura 14). Estas fallas tienen una dirección de buzamiento promedio de 139° con buzamientos promedios de hasta 65° en su mayoría orientados al noreste.

Sistema 2 – Fallas normales con orientación ~SO-NE (Figura 15). Estas fallas tienen una dirección de buzamiento promedio en un rango de $330-25^\circ$ con buzamientos promedios de hasta 65° en orientados al noroeste o sureste. Estas fallas están relacionadas a un conjunto de grábenes y hemigrábenes. Estas fallas son fácilmente visualizadas en líneas

sísmicas que tienen orientación de adquisición NOO-SEE perpendiculares a este sistema de fallas.

Sistema 3 – Fallas de rumbo dextral con orientación ~NNO-SSE (Figura 16). 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 un rumbo promedio de $S65^\circ E$ con buzamientos altos de hasta $80^\circ SO$ en promedio.

Sistema 4 – Fallas normales (de liberación según McClay, 2000) con orientación ~SO-NE relacionadas a la formación de grábenes. Este sistema de fallas este subordinado al Sistema 2 de fallas normales.

5.1.2.2 Asociación I de sistemas de fallas

La Asociación I fue interpretada en base a la integración de los siguientes sistemas de fallas (Figura 17): 1) Sistemas de fallas 1, 2, 3 & 4; 2) mapa estructural y; 3) la interpretación sísmica geológica (Figura 6, Figura 14, Figura 15 y Figura 16). Estos tres sistemas de fallas corresponden a fallas normales del borde oriental de la Cordillera de la Costa, fallas normales de los grábenes Sarapampa y Chíncha y fallas de rumbo.

Se interpreta que esta Asociación I tiene una componente principalmente extensional con un acople de fallas de rumbo dextral (Figura 17).

Cronológicamente se le asigna una edad Pre- Eoceno Medio ($>\sim 47\text{Ma}$) – Oligoceno Inferior ($\sim 37\text{-}30\text{Ma}$) involucrando a las Formaciones Caballas, Choros y Yumaque.

5.1.2.3 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, teniendo como resultado una dirección de paleo-esfuerzo extensional principal $\sim N340$ entre ~ 47 a 30 Ma (Figura 18).

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

En este intervalo de tiempo (~ 47 a 30 Ma) (Figura 2) existía una convergencia entre la placa Farallón y la placa Sudamérica (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza y Ghidella, 2006) con una orientación relativa de convergencia oblicua de la placa oceánica (con un ángulo de convergencia de $\sim N24^\circ$) (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza y Ghidella, 2006). La tasa de convergencia tuvo una velocidad en promedio de 10cm/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, además según Ramos y Folguera (2009) la placa subductada habría experimentado “subducción normal”.

La convergencia de placas tuvo un importante ángulo de oblicuidad, este factor sumado a otros factores descritos en el párrafo anterior, generaron una deformación transpresional entre dos bloques rígidos (Cordillera de la Costa y cordillera Occidental) de acuerdo con el modelo Tipo E de Fossen y Tikoff (1998), que da como resultado un acortamiento vertical (σ_1) y un estiramiento horizontal (σ_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 2 y Figura 18).

Regionalmente, este régimen extensional ha sido observado y descrito en el sector continental o costero 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) y también a nivel de la margen pacífica central (Bishop y Mann, 2019 – cuenca Sandino en Nicaragua y Costa Rica; Encinas et al. 2021 y por Martínez et al., 2022 – Cordillera de la Costa y la Depresión Central y la cuenca Atacama en Chile).

5.1.2.4 Ejemplos del régimen extensional en la cuenca Pisco Este – costa afuera

A continuación, se ilustran algunos ejemplos del régimen extensional en el área de estudio, sus análogos identificados en la parte continental de la cuenca Pisco Este, se describe el potencial exploratorio por hidrocarburos y los elementos del sistema petrolero que representa este intervalo de tiempo.

En la Figura 19, se identificó en la línea sísmica uno de los grábenes más importantes de la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera correspondiente al graben Asia y al horst Santa Patricia. Esta línea sísmica tiene una orientación noroeste – sureste permitiendo apreciar en detalle las fallas normales (líneas azules) debido a que la línea sísmica corta las fallas de forma perpendicular. En la Figura 19, se aprecia también el graben de Asia. En este graben se identificó tres elementos principales del sistema petrolero, la roca generadora paleozoica (Grupo. Ambo - polígono verde), la roca reservorio (Formaciones Caballas y Choros – polígono amarillo) y la estructura o trampa correspondiente al anticlinal San Felipe. Otro rasgo estructural importante para resaltar en esta figura es el horst Santa Patricia que constituye otro elemento del sistema petrolero, considerada otra trampa para hidrocarburos, la cual por su geometría se convierte en un objetivo y en un prospecto exploratorio.

Otros dos grábenes importantes son el graben Chíncha (costa afuera, sector sur del área de estudio de esta tesis) y el graben Pisco (costa adentro) (Figura 20).

El graben Chíncha, definido principalmente a partir de la interpretación sísmica en esta tesis, muestra claramente el sistema de fallas normales en dominó que está acoplado con

un sistema de fallas de rumbo dextral (esquema 3D parte superior derecha de la Figura 20).

El graben de Pisco es un análogo en continente. En la parte inferior derecha de la Figura 20 se presenta un block diagrama con el concepto exploratorio del pozo Pisco 4X-1 basado en el mapa estructural del Eoceno elaborado por la IPC (1955). El block diagrama fue generado por el autor de esta tesis con el fin de mostrar en detalle la geometría final del complejo estructural y la relación entre los tipos de fallas y otras estructuras asociadas al régimen extensional.

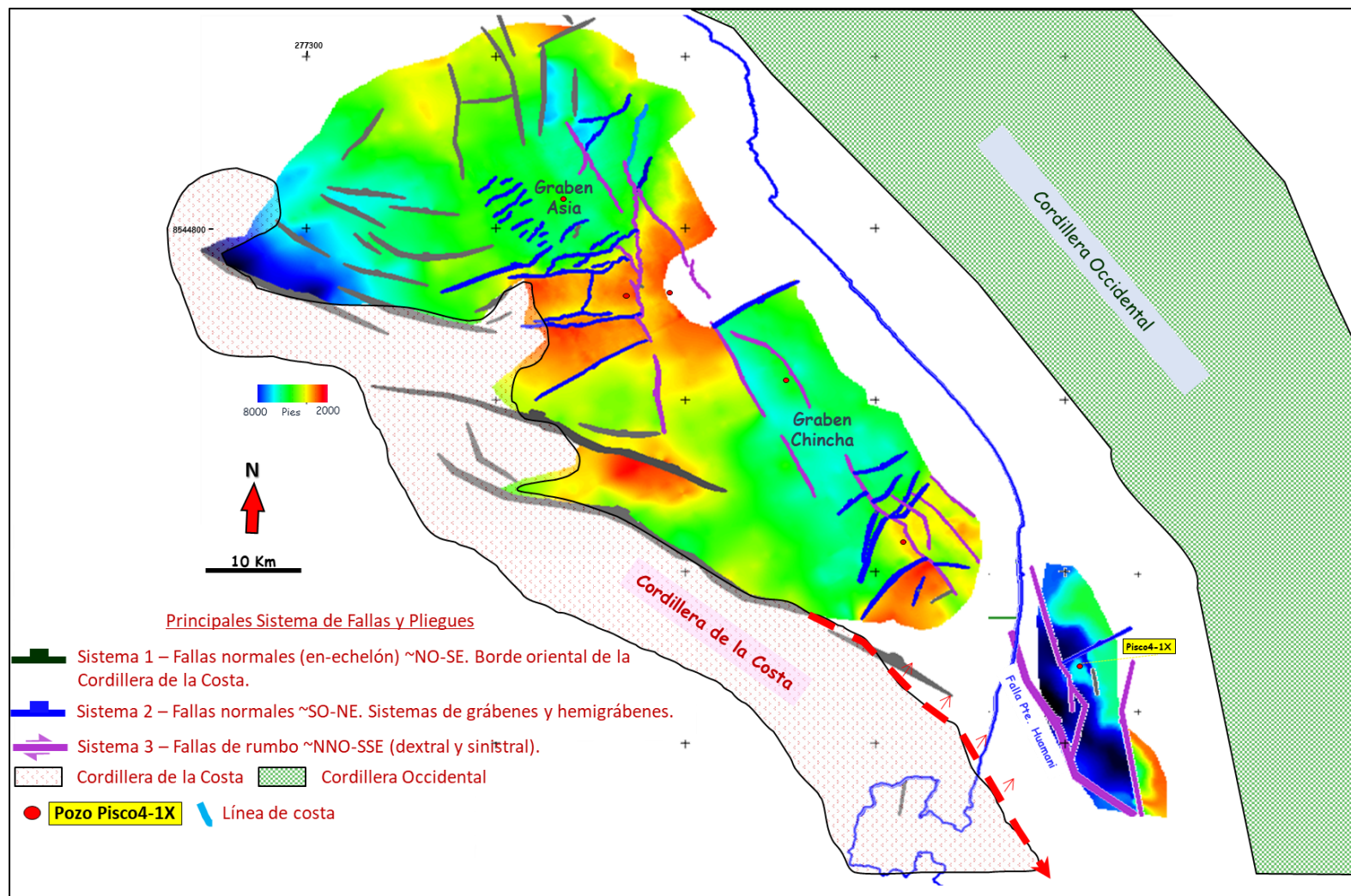


Figura 13. Mapa estructural representativo del Intervalo Base del Cenozoico entre ~49/~30Ma

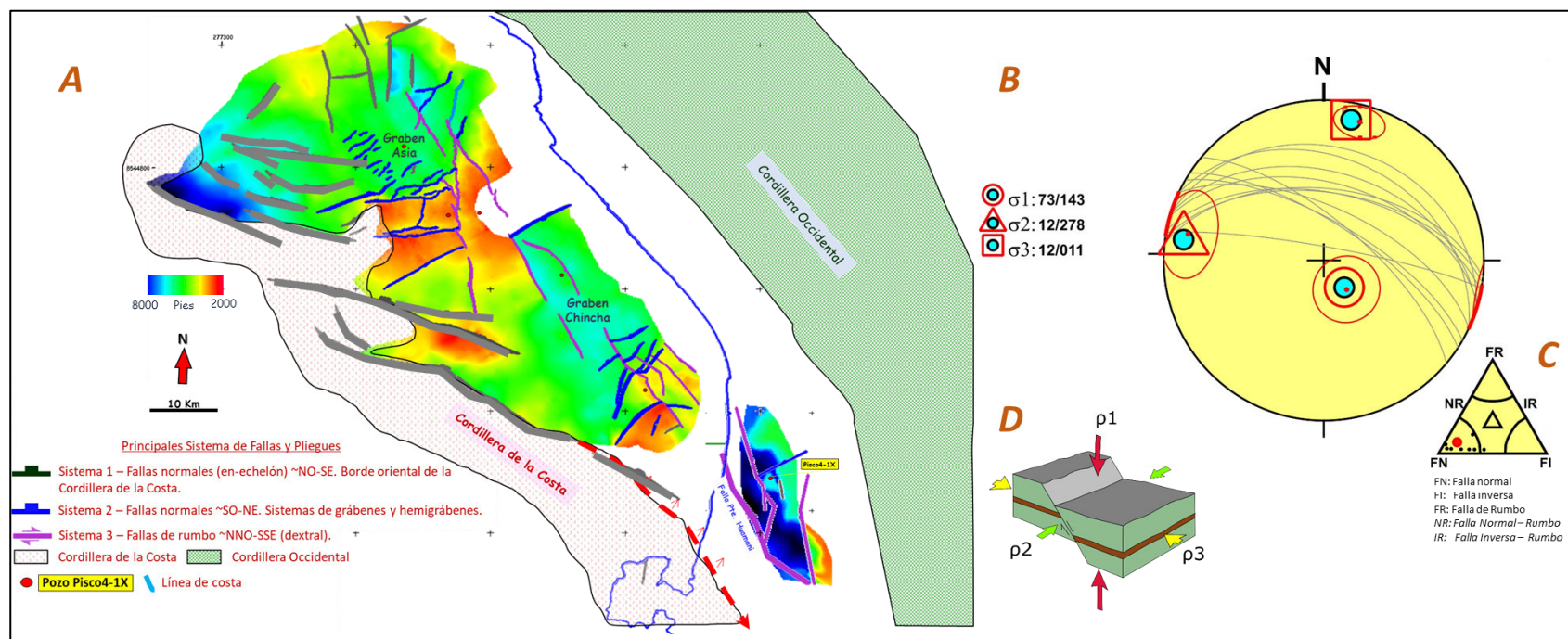


Figura 14. A) Mapa del Sistema 1 – Fallas normales en-echelón ~NO-SE (color gris) relacionadas al borde oriental de la Cordillera de la Costa; B) Proyección estereográfica del Sistema 1; C) Diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden a fallas normales; D) Block diagrama esquemático de falla normal.

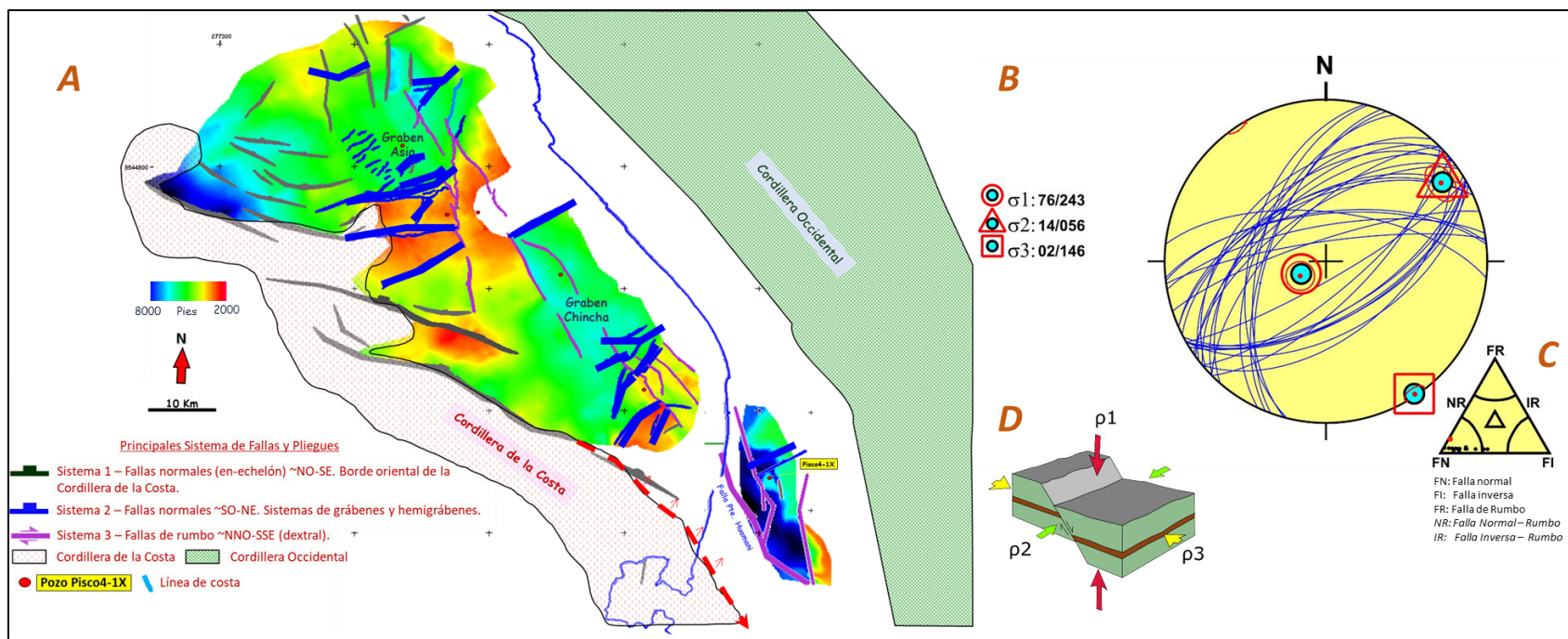


Figura 15. A) Mapa del Sistema 2 – Fallas normales principales ~SO-NE (color azul). ; B) Proyección estereográfica del Sistema 2; C) Diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden a fallas normales; D) Block diagrama esquemático de falla normal.

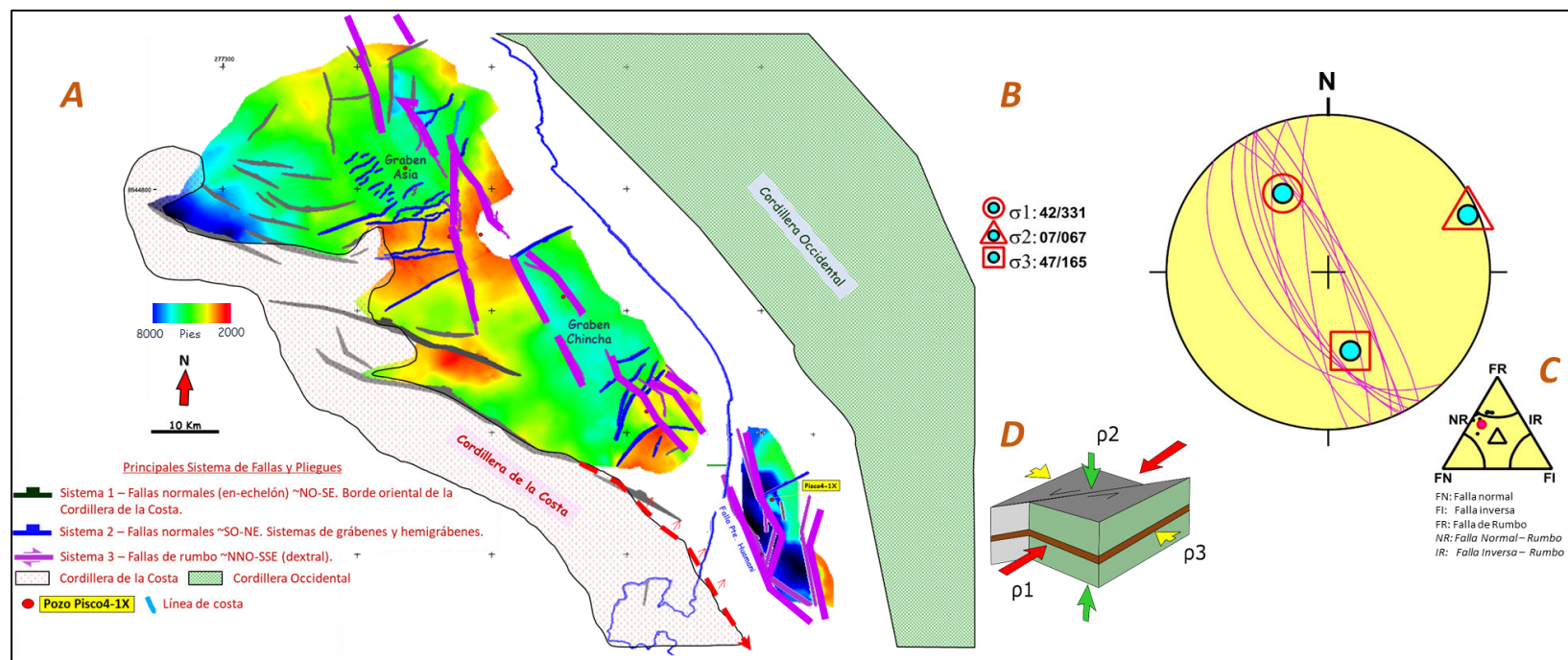


Figura 16. A) Mapa del Sistema 3 – Fallas de rumbo dextral ~NNO-SSE (color magenta); B) Proyección estereográfica del Sistema 3; C) Diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden a fallas de rumbo sinistral principalmente con componente normal; D) Block diagrama esquemático de falla.

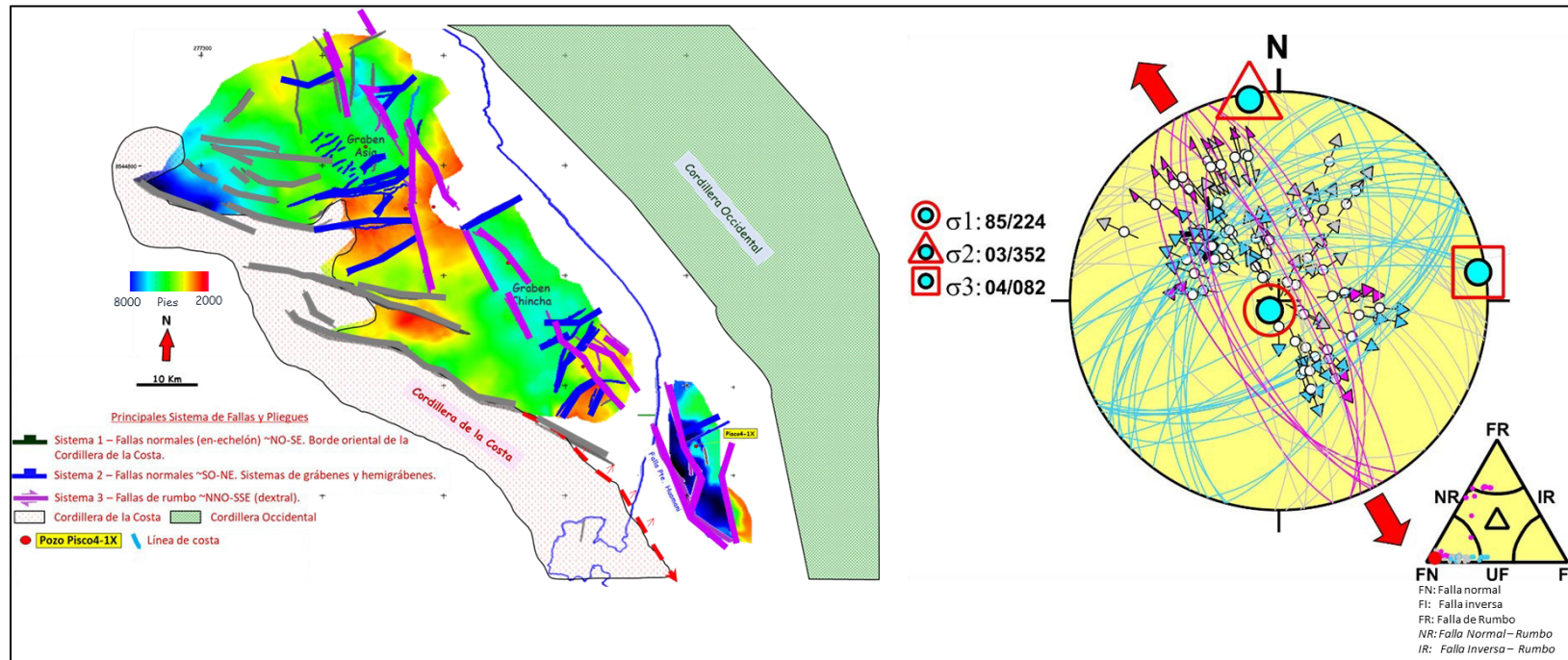


Figura 17. Asociación I basado en la integración de las Sistemas de fallas 1, 2, 3 & 4. Se interpreta que esta Asociación I tiene una componente principalmente extensional con un acople de fallas de rumbo dextral. Dirección de paleo-esfuerzo extensional principal fue ~N340 (flecha Roja). Adicionalmente el diagrama triangular de Frohlich mostrando el dominio de esta asociación de fallas normales y un sistema de rumbo dextral.

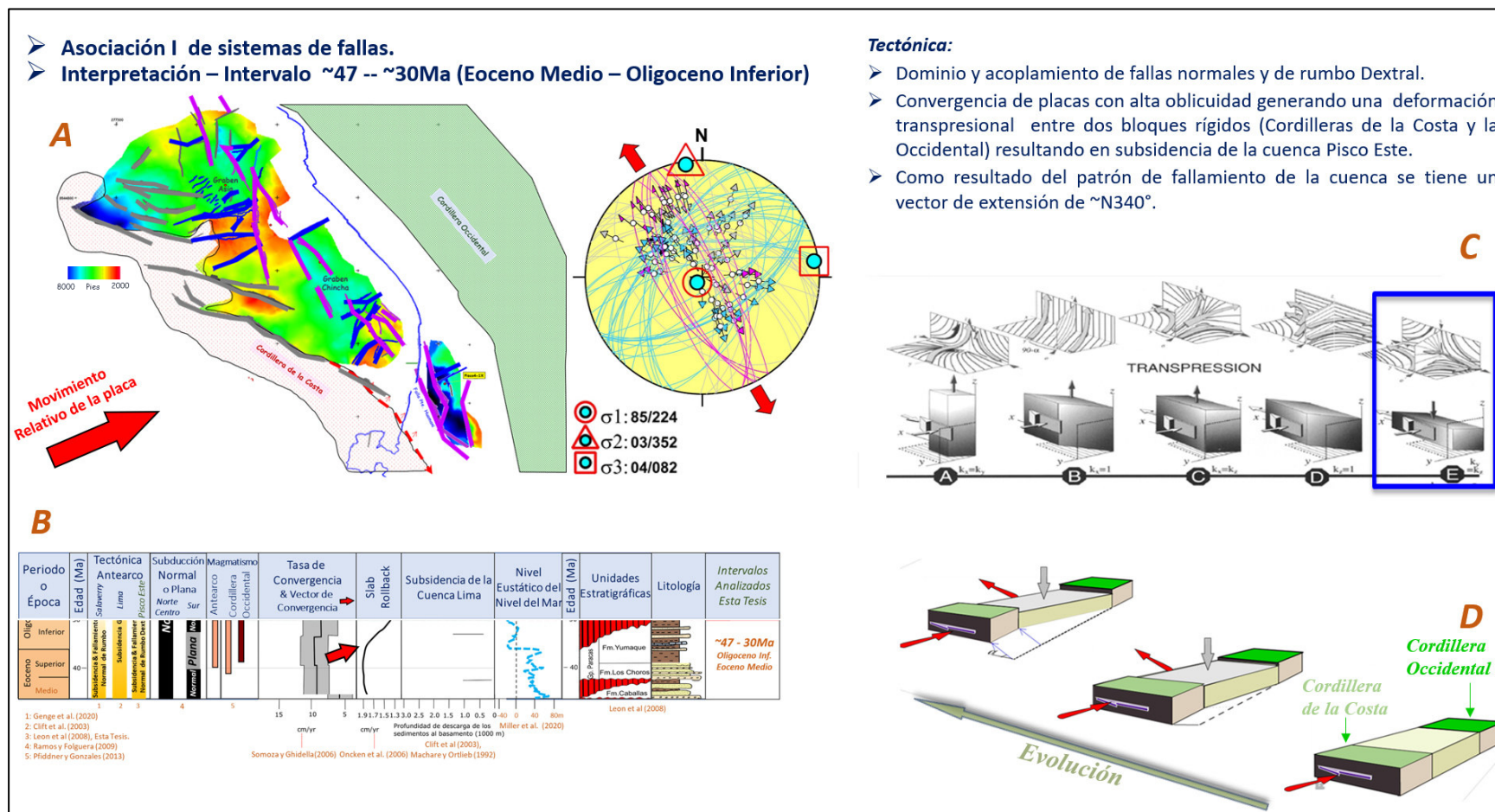


Figura 18. A) Mapa estructural de Asociación I (explicación en la Figura 17); Flecha roja representa el movimiento relativo de la convergencia de la placa oceánica Farallón. B) fragmento de la Figura 2 del intervalo ~47-30Ma con los factores más importantes que delinean la geometría final de una cuenca Pisco Este. C) Polígono azul resalta el tipo E (de Fossen y Tikoff, 1998) del espectro de deformación por transpresión. D) Esquema evolutivo de la deformación del Modelo tipo E aplicado a la cuenca Pisco Este.

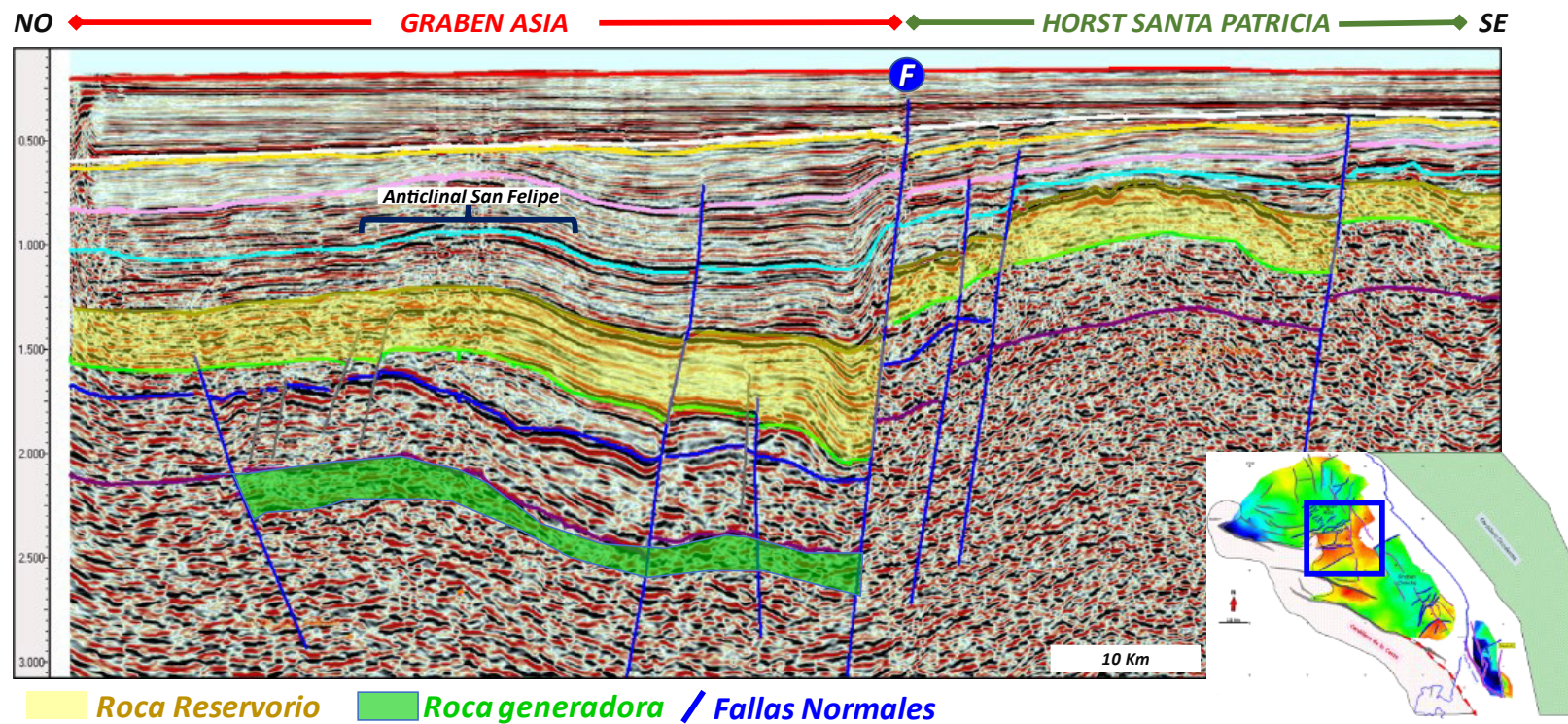


Figura 19. Imagen sísmica del graben Asia y del horst Santa Patricia. El cuadro azul sobre el mapa estructural muestra la ubicación del graben Asia. El polígono amarillo transparente representa a los reservorios de las Formaciones Caballas, y Choros y el polígono verde transparente representa la roca generadora de hidrocarburos de la Formación Ambo.

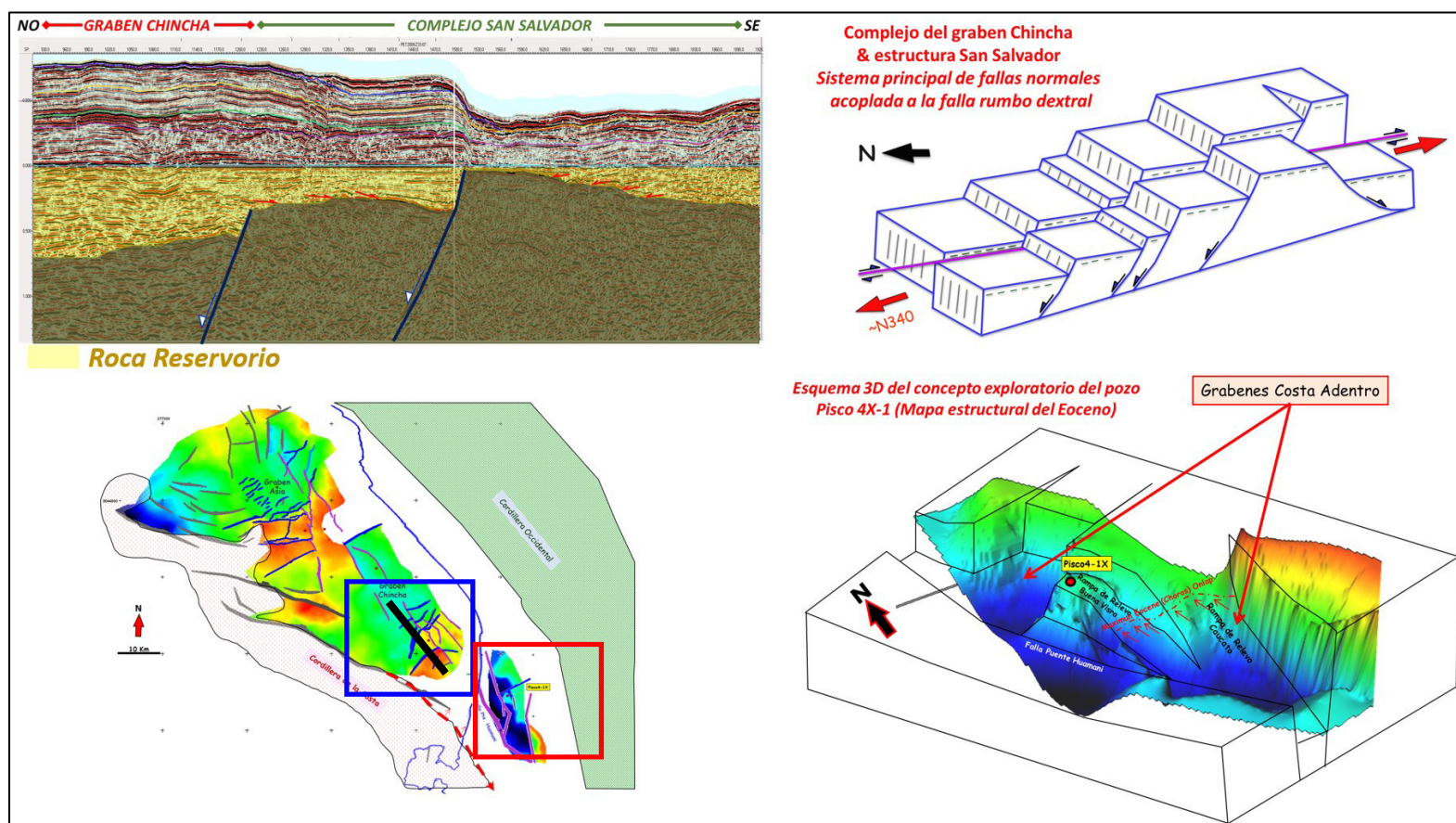


Figura 20. La imagen de la parte inferior izquierda corresponde al mapa estructural de este intervalo con la ubicación de: la línea negra dentro del cuadro azul corresponde a la línea sísmica ubicada en la parte superior izquierda de esta imagen y que muestra las fallas normales en dominó. Esta línea sísmica ha sido a propósito horizontalizada a nivel del reservorio Fm Choros para resaltar el régimen extensivo y graficar los grábenes. En la parte superior derecha de esta imagen se observa el esquema 3D del complejo del graben de Chíncha. El cuadro rojo corresponde sobre el mapa representa la ubicación del esquema 3D del complejo de graben de Pisco con el concepto exploratorio del pozo Pisco 4-X1 (el esquema 3D fue idealizado por el autor de esta tesis basado en el mapa de IPC, 1955).

5.1.3 Intervalo II entre ~30 - ~16 Ma (Oligoceno superior, Formaciones Chilcatay y Pisco Inferior)

El mapa estructural de la Figura 21 corresponde al intervalo de edad entre ~30 y ~16 Ma.

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

Este mapa permite observar especialmente zonas de altos y bajos estructurales. Los altos estructurales en el mapa principalmente corresponden a los anticlinales y a zonas que experimentan levantamiento en el sector oeste y sur de la cuenca.

La Figura 21, ilustra 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. Otro rasgo importante observado en este mapa es el límite erosional denotado en el sector noroeste del mapa.

5.1.3.1 Sistema de fallas y plegamiento del Intervalo II

En el mapa estructural de la Figura 22, se observan los siguientes sistemas de fallas y pliegues (Anexo 2):

Sistema 3 – Fallas de rumbo sinistral con orientación ~NNO-SSE (Figura 22). 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°SO en promedio.

Sistema I – Se identificaron 3 pliegues anticlinales (Figura 21 y Figura 22). 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. Igualmente, caracterizado por tener la inclinación del flanco dorsal más suave que el flanco frontal (36°NE y 60°SO respectivamente).

5.1.3.2 Asociación II del sistema de fallas y pliegues.

Asociación II (Figura 23) está interpretado en base a la integración de los siguientes sistemas: 1) el Sistema de fallas 3 y el Sistema I de pliegues; 2) el mapa estructural y; 3) la interpretación sísmica geológica (Figura 6, Figura 21 y Figura 23). Este sistema de fallas 3 corresponden a las fallas de rumbo.

Se interpreta que esta Asociación I tiene una componente principalmente compresiva. Esta compresión es producto de la “reactivación” en sentido sinistral de las fallas de rumbo (inversión tectónica de las fallas de rumbo dextral descritas en el “Intervalo I ~40/30 Ma”). Además, esta reactivación o inversión tectónica de las fallas de rumbo dan como origen a los pliegues anticlinales (pliegues por propagación de fallas).

Esta Asociación I de fallas dieron como resultado una dirección de paleo-esfuerzo compresivo principal de $\sim\text{N}52$ (Figura 23).

Cronológicamente se le ha asignado a este intervalo un rango de edad Oligoceno Superior ($\sim 30\text{Ma} - 16\text{Ma}$) involucrando principalmente a las Formaciones Chilcatay y Pisco Inferior.

5.1.3.3 Interpretación y discusión

La Asociación II, está conformado 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). Estas fallas de rumbo sinistral tienen además una fuerte componente de falla tipo inversa y la propagación de estas fallas producen el plegamiento (Figura 21 y Figura 22).

El patrón de fallamiento y plegamiento que experimentó la cuenca generó un vector de deformación predominante de $\sim N52^\circ$ (Figura 2 y Figura 23). Tal como se mencionó anteriormente (de acuerdo con Noda et al., 2016) los factores más importantes que delinean 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 $\sim 20^\circ$ hacia el sureste con respecto al Intervalo I - ~ 47 -30 Ma) y a un incremento en la tasa de velocidad de convergencia (la tasa de velocidad incremento 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). Estos dos últimos factores tuvieron un importante impacto en la cuenca y a nivel de toda la Margen Peruana.

Principalmente las placas experimentas un cambio en la oblicuidad de convergencia que junto con el incremento de la tasa de velocidad de convergencia generaron una deformación transpresional compresivo entre los dos bloques rígidos, Cordillera de la Costa y Cordillera Occidental. Esta deformación nos permite plantear un modelo Tipo B de Fossen y Tikoff (1998), que resulta en un acortamiento horizontal (σ_1) y un estiramiento vertical (σ_3). El estiramiento vertical da como resultado la componente inversa de las fallas de rumbo sinistral y el plegamiento permitiendo explicar el régimen compresivo y levantamiento de la cuenca Pisco Este (Figura 2 y Figura 24).

Este cambio de régimen extensional a régimen compresivo fue gradual y se puede ser identificado mediante estratos de crecimiento en los anticlinales de San Salvador y Santa Sofía. Por ejemplo, en la Figura 25 se puede ver la evolución de la deformación del anticlinal de San Salvador. Un aporte importante de esta tesis con respecto al estilo de

deformación es que se logró la caracterización de los trenes de anticlinales y que permiten explicar, identificar y predecir el origen y lineamiento de estas estructuras en toda la cuenca.

Regionalmente, este periodo de levantamiento ha sido identificado por varios autores. Vicente et al. (2000) evidenció rasgos de inversión tectónica con relieves positivos que estuvieron sujetos a erosión en el Mioceno Medio. Mientras León et al. (2008) identificó en la parte continental de la cuenca Pisco Este, periodos de levantamiento y posterior extensión en el Mioceno medio. Por otro lado, 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 Calderón (2007) principalmente atribuye esta secuencia a un evento estratigráfico (dominado por eustatismo) más que a un componente tectónico. Dentro de nuestra área de estudio hemos considerado para nuestra interpretación la curva de nivel eustático (Miller et al., 2020) (Figura 2) 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 un evento transgresivo y por consiguiente predominio de sedimentación sobre la deformación (pe. Mioceno inferior temprano y Mioceno inferior tardío) (modelo basado en el concepto Burbank y Verges, 1994) (Figura 2 y Figura 25).

En otras Cuencas como Salaverry, Lima y también Pisco Este (Viveen y Schlunegger, 2018) identificaron 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*.

Otro análogo en la Margen Pacífica, Bishop y Mann (2019) identifica la formación de una plataforma carbonatada durante el Oligoceno superior al Mioceno medio temprano el cual finaliza con plegamiento y truncación por erosión de unidades antiguas del antearco. Del mismo modo, en las cuencas en Chile, Encinas et al. (2021) en su estudio sobre la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, propone inversión tectónica de las cuencas extensionales durante el Mioceno temprano-tardío lo cual género que importantes áreas del antearco llegaran a ser un relieve positivo que estuvieron sujetos a erosión fluvial.

5.1.3.4 Ejemplos de tectónica compresional en la cuenca Pisco Este – costa afuera

En el área de estudio se interpretaron 3 estructuras del tipo plegamiento correspondiente a este régimen compresivo.

En la Figura 25, se observa la evolución del plegamiento de San Salvador. Estos se identificaron con los rasgos estratigráficos denominados estratos de crecimiento del Intervalo II.a (polígono verde en la Figura 25). Este rasgo estratigráfico-estructural señala el inicio de la reactivación o inversión de las fallas sinistralas. En los siguientes Intervalos se observa muy claramente la formación y geometría del anticlinal.

En la Figura 26, se observa en la vista 3D otro plegamiento (flecha amarilla) más importantes del área de estudio de la tesis, anticlinal San Felipe (también ver Figura 21). Este pliegue se encuentra ubicado en la parte central del graben de Asia. Asimismo, se puede observar la configuración particular de este complejo graben mostrando convivencia de estructuras compresivas (anticlinales) y las estructuras extensivas (grábenes y horst).

En la Figura 27 se observa un afloramiento ubicado en Pampas Chilcatay correspondiente a un pliegue anticlinal producto de la inversión tectónica de las fallas de rumbo.

La interpretación y explicación de su formación, evolución y geometría de los sistemas de pliegues (San Salvador, Santa Sofía y San Felipe, incluso el de Pampa Chilcatay) en el área de estudio ha permitido establecer un elemento importante dentro del sistema petrolero existente en el área. Dicho elemento viene a ser la principal trampa estructural. La trampa (pliegue anticlinal) se puede describir como una estructura que tiene su cierre estructural en sus 4 lados (flancos y plunges) y que tienen un excelente potencial exploratorio por hidrocarburos ya que favorecen el entrapamiento de hidrocarburos.

Asimismo, estas estructuras (pliegues) involucran en su geometría final a las rocas reservorios (Fms. Caballas- Choros, y los pre-cenozoicos), rocas reservorios syntectónicos (Fm Chilcatay) y también sus respectivas rocas sellos (Fms Yumaque y Pisco inferior, respectivamente).

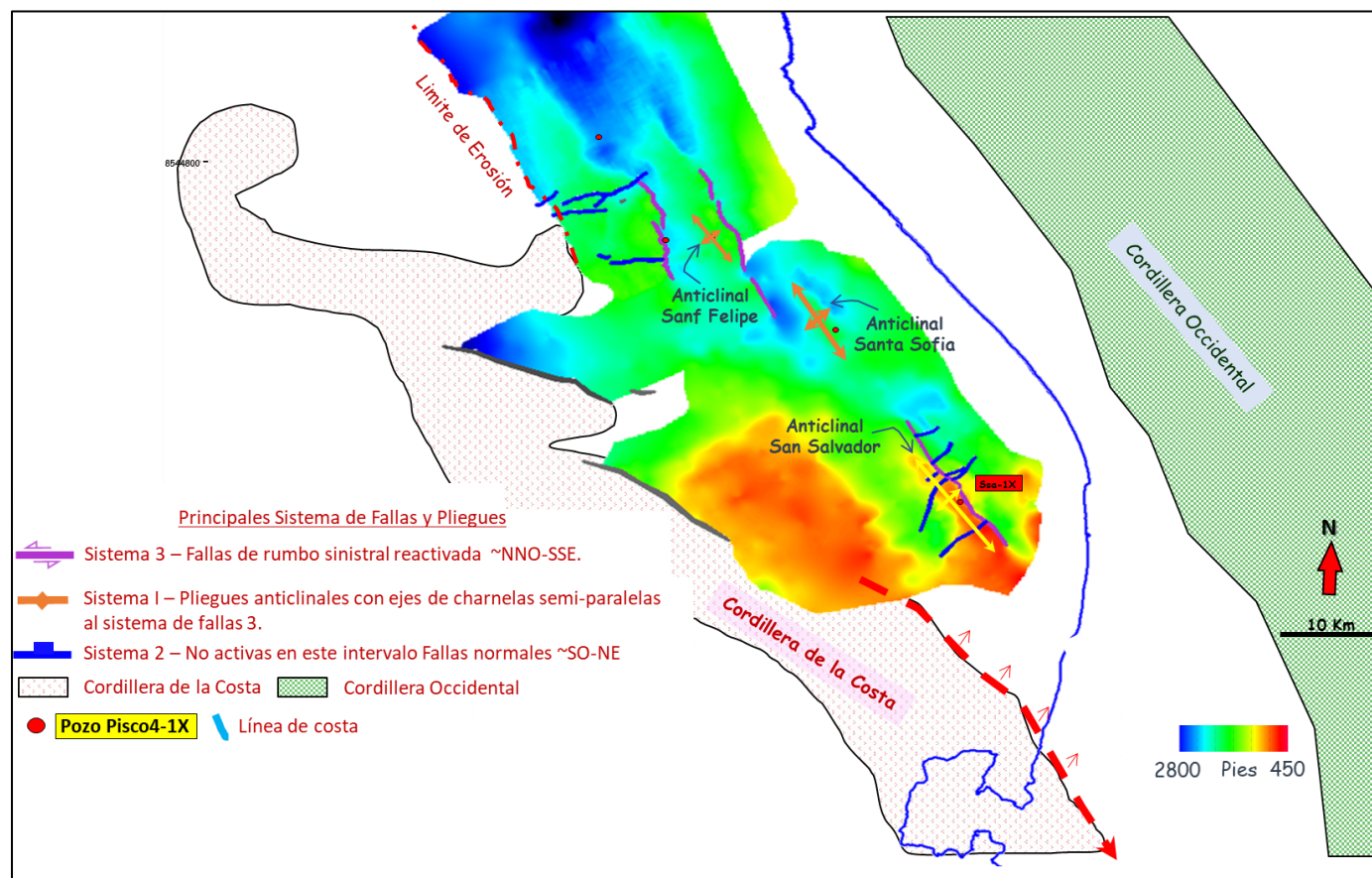


Figura 21. Mapa estructural del Intervalo Oligoceno superior (Formaciones Chilcatay y Pisco Inferior; entre ~30 - ~16 Ma).

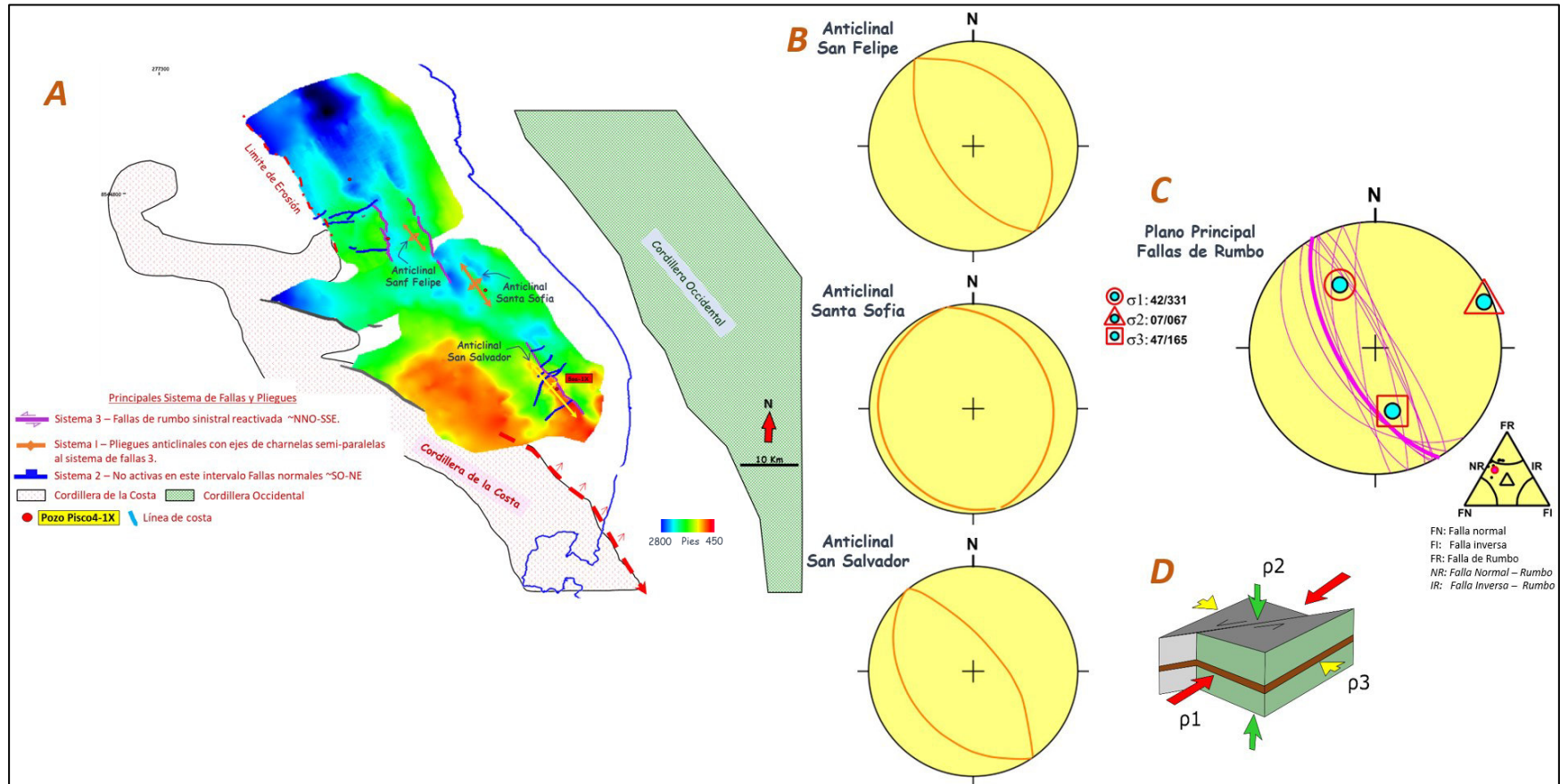


Figura 22. A) Mapa del Sistema I de Pliegues anticlinales San Felipe, Santa Sofia y San Salvador (color naranja) y del Sistema 3 – Fallas de rumbo sinistral ~NNO-SSE (color magenta); B) Proyección estereográfica de los pliegues anticlinales San Felipe, Santa Sofia y San Salvador; C) Proyección estereográfica del Sistema 3 de fallas de rumbo sinistral; adicionalmente el diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden principalmente a fallas de rumbo sinistral con componente normal; D) Block diagrama esquemático de una falla de rumbo.

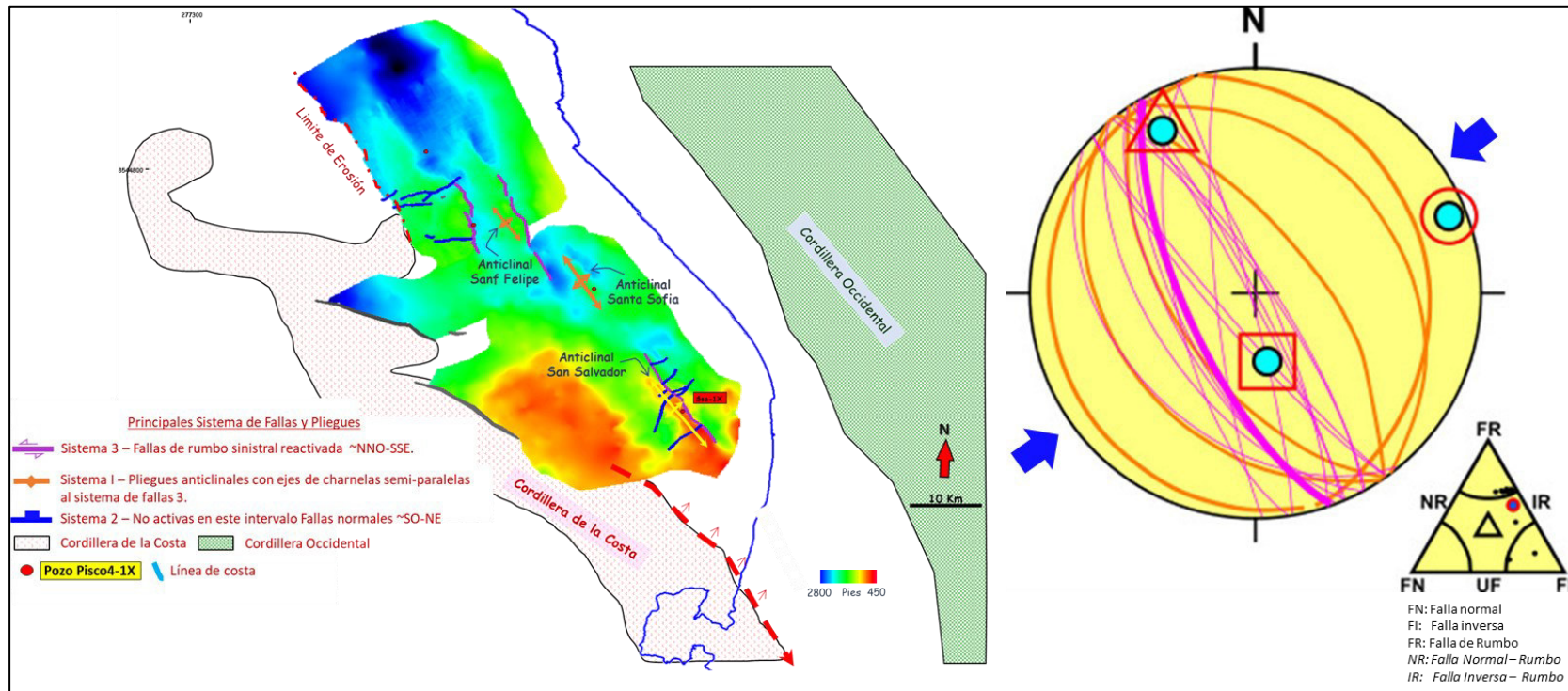


Figura 23. Asociación II basado en la integración de las Sistemas de fallas 3 de las fallas de rumbo sinistral “reactivadas o invertidas” y el Sistema de Pliegues anticlinales generados por compresión. Se interpreta que esta Asociación II tiene una componente principalmente compresional. Dirección de paleo-esfuerzo extensional principal ~N52 (flechas azules). Adicionalmente el diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden principalmente a fallas de rumbo sinistral con componente inversa.

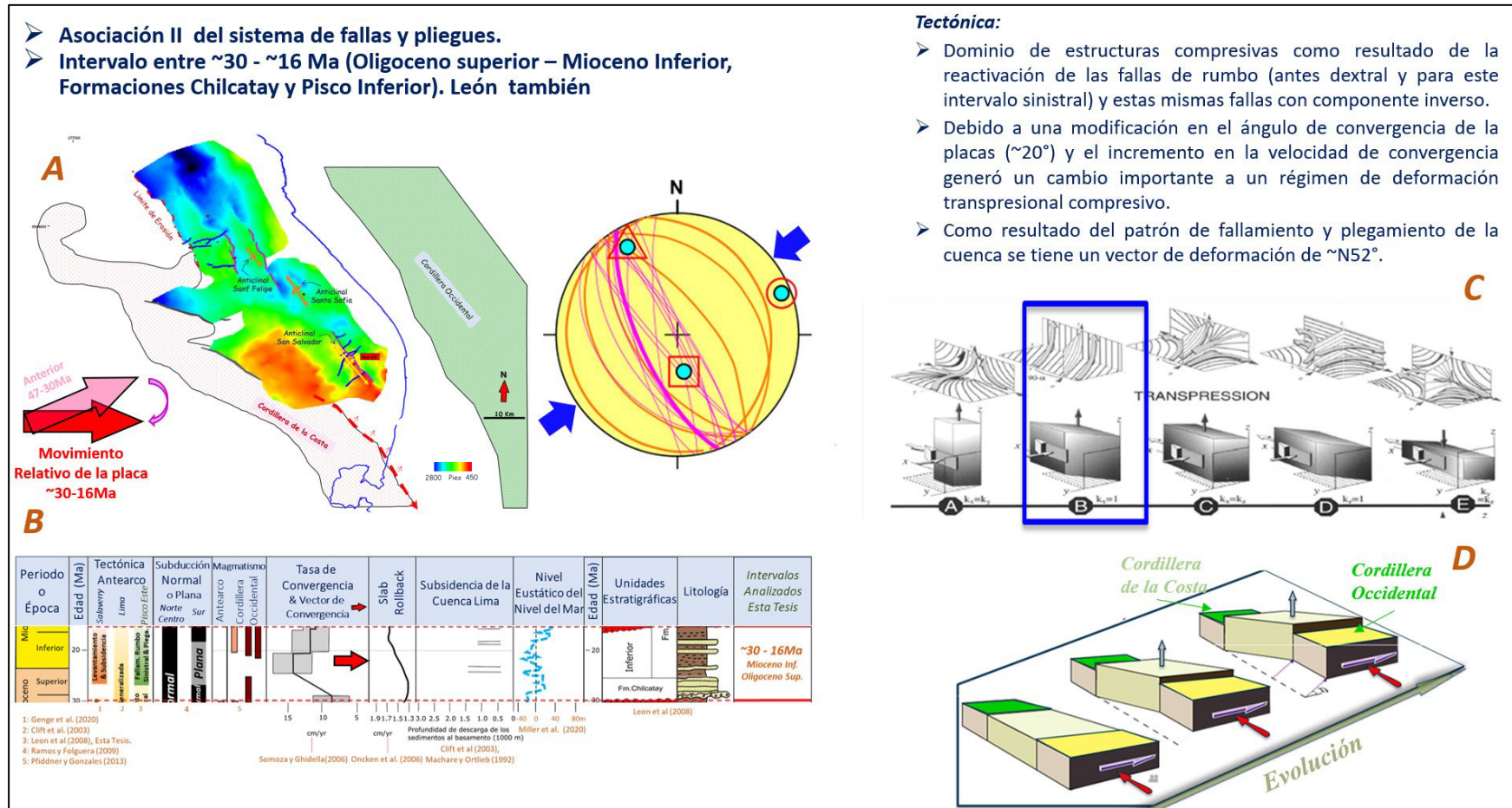


Figura 24. A) Mapa estructural de Asociación II (explicación en la Figura 23), Flecha roja representa el movimiento relativo de la convergencia de la placa oceánica de Nazca. Flecha rosada indica la vergencia del intervalo previo y la flecha curva magenta representa el sentido de la rotación de la vergencia de las placas. B) fragmento de la Figura 2 del intervalo ~30-16 Ma con los factores más importantes que delinean la geometría final de una cuenca Pisco Este. C) Polígono azul resalta el tipo B del espectro de deformación por transpresión (Fossen y Tikoff 1998). D) Esquema evolutivo de la deformación del Modelo tipo B aplicado a la cuenca Pisco Este.

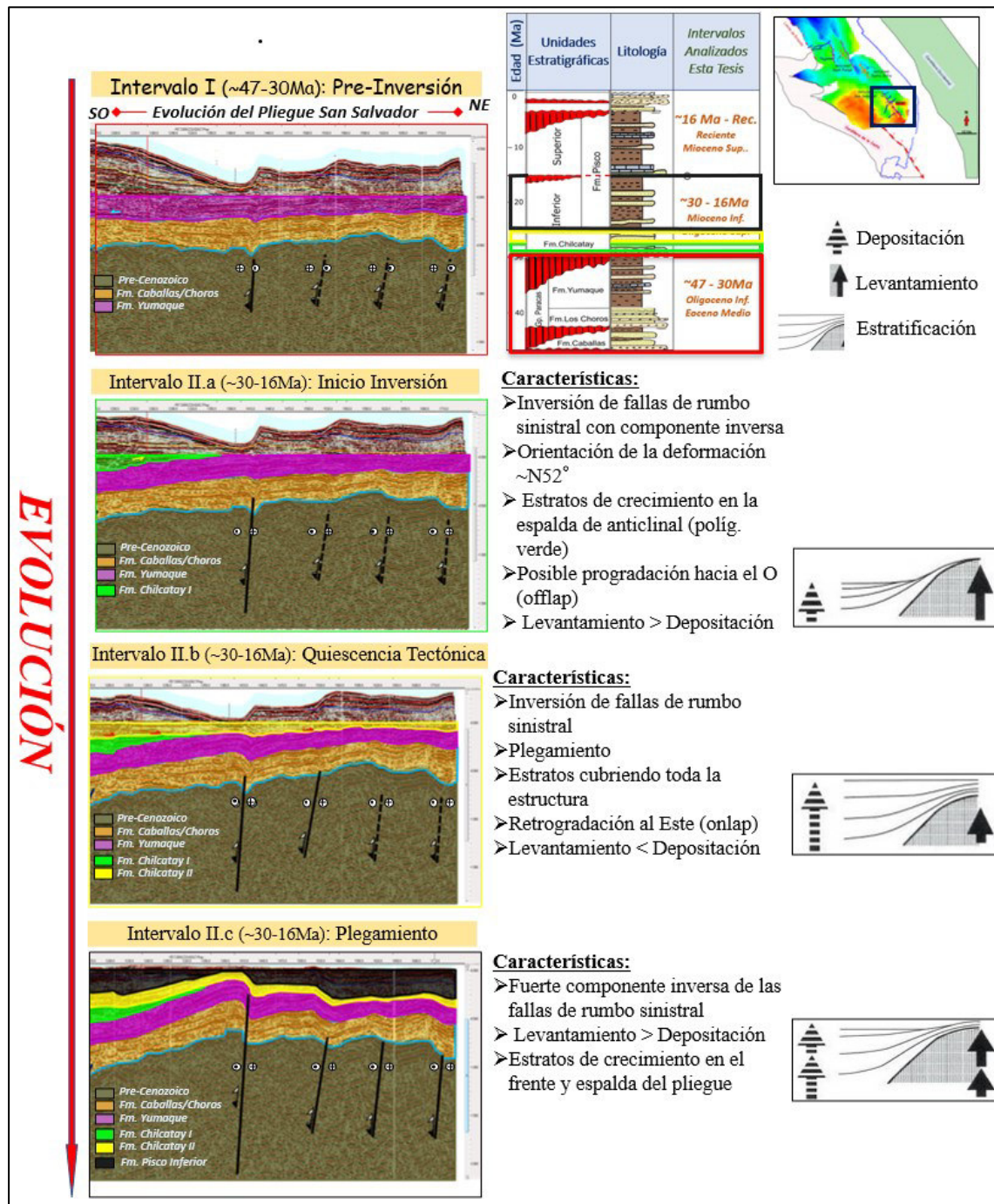


Figura 25. Ejemplo de evolución de la deformación del pliegue San Salvador. Columna estratigráfica señalando los dos intervalos principales afectados por la deformación. Mapa de ubicación del pliegue. Esquema ilustrativo de la comparación entre levantamiento y deposición (modelo de Burbank y Verges, 1994).

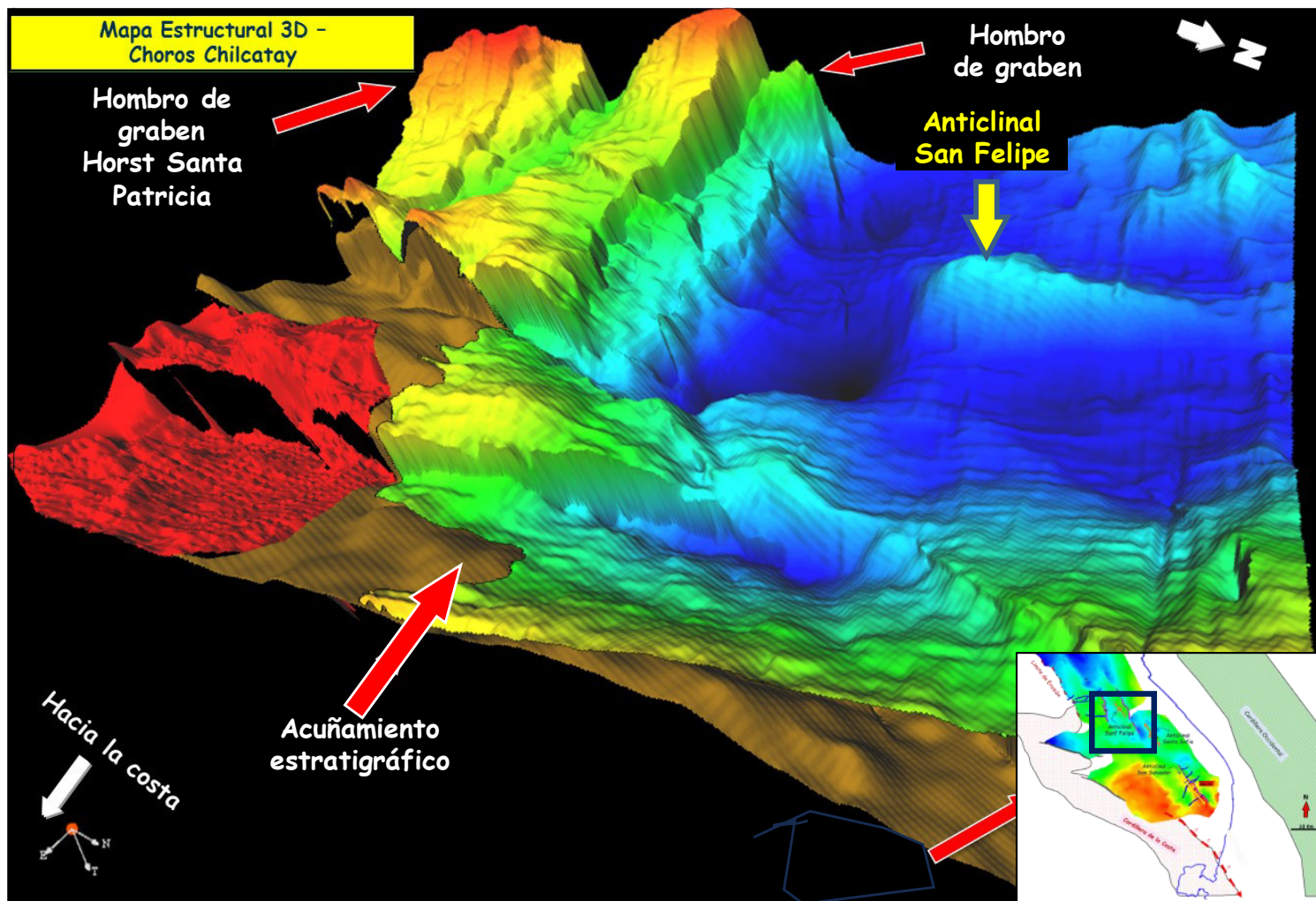


Figura 26. Pliegue San Felipe como resultado de la inversión de las fallas de rumbo sinistres con fuerte componente inverso ubicado en el graben de Asia

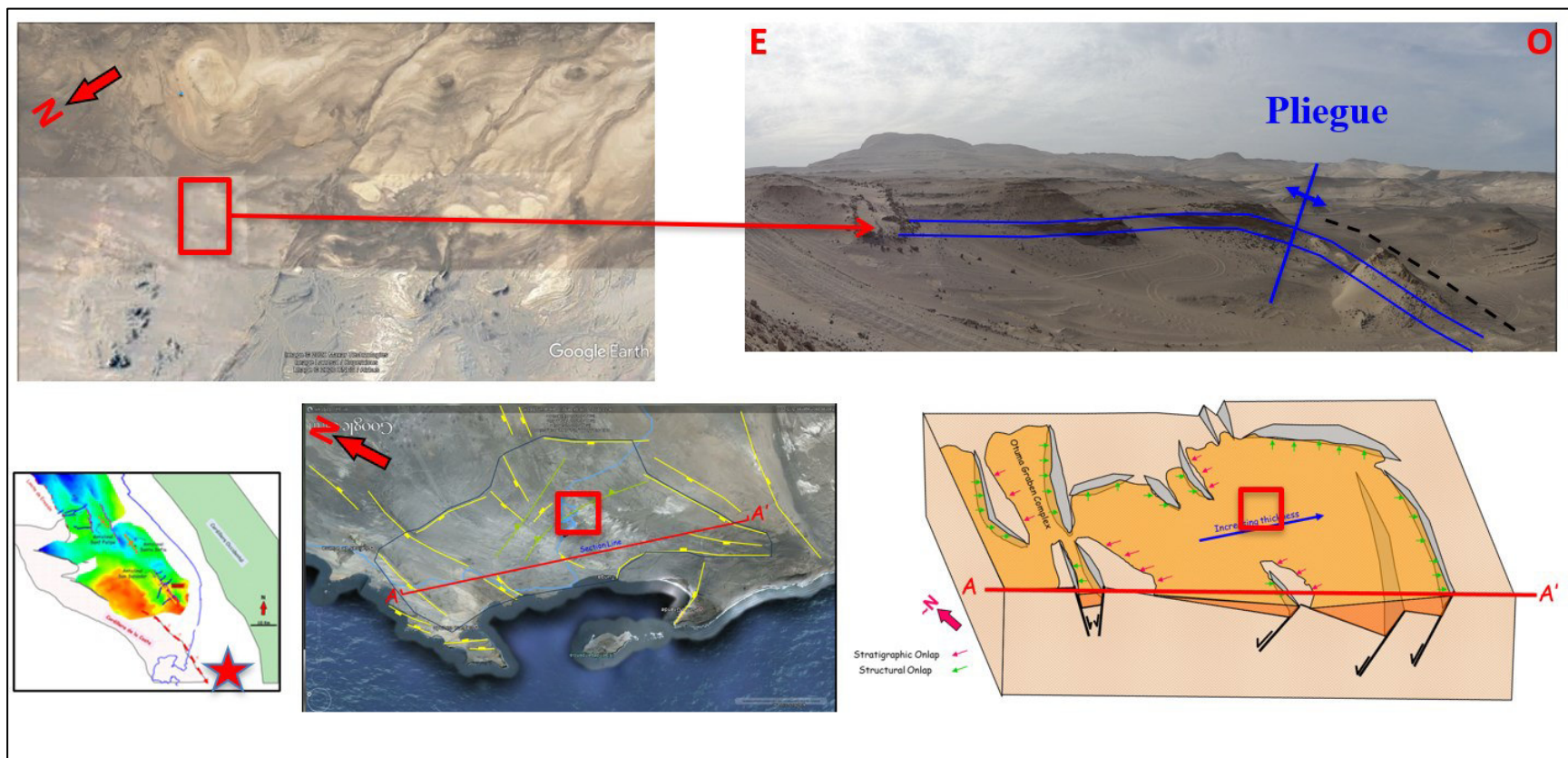


Figura 27. Afloramiento del pliegue por propagación producto de la inversión de las fallas de rumbo sinistral dentro del complejo de graben de Pampa Chilcatay (cerca de la bahía de Independencia - Ica).

5.1.4 Intervalo III entre ~16 - 0Ma (Mioceno Superior al Reciente, Formaciones Pisco Superior y Changuillo).

El mapa estructural de la Figura 28 corresponde al intervalo de edad entre ~16 y ~0Ma.

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

Este mapa permite observar especialmente zonas de altos y bajos estructurales. Los altos en el mapa principalmente están ubicados en la zona sur y corresponden a zonas que sufren levantamiento continuo en el borde oeste de la cuenca costa afuera.

La Figura 28, muestra también, al igual que en el mapa anterior, 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.

Otro rasgo importante observado en este mapa 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.

5.1.4.1 Sistema de fallas III y pliegues del Intervalo III

En el mapa estructural de la Figura 28, se registran los siguientes sistemas de fallas (Anexo 2):

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

5.1.4.2 Asociación del sistema de fallas III y pliegues

La Asociación III (Figura 29) se basa en base a la integración de lo siguiente: 1) el sistema de fallas 5; 2) el mapa estructural y; 3) la interpretación sísmica geológica (Figura 6 y Figura 28). 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 28 y Figura 29).

Cronológicamente se le ha designado una edad Mioceno Superior Terminal (~16 Ma?) al Reciente.

5.1.4.3 Interpretación y discusión

Esta Asociación III, es particularmente compleja 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 sector sur de la cuenca (Figura 2 y Figura 30)

El factor que impactan en la geometría del antearco según Noda et al. (2016) en el Intervalo III está principalmente relacionado a la subducción plana como resultado de la subducción de la Dorsal de Nazca (Ramos y Folguera, 2000, Gutsher et al., 2019; Rosenbaum et al., 2005) (Figura 2).

En 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 se relacionada directamente subducción y migración hacia el sureste de la Dorsal de Nazca (Gutsher et al., 2019; Clift et al., 2003 y Rosenbaum et al., 2005) (Figura 2 y Figura 30). Según Machare y Ortlieb (1992), interpretan que la subducción de la Dorsal de Nazca genera levantamiento en la posición del eje de la dorsal y subsidencia alejándose de este

radio de impacto (es decir a un radio de $\sim 100\text{km}$ al norte y sur y $\sim 60\text{km}$ hacia el oeste del eje) y dando como resultado la reactivación de las fallas normales tal como se puede observar en la parte norte del mapa estructural de la Figura 31 y las líneas sísmicas interpretadas (Figura 32).

5.1.4.4 Ejemplos de Convivencia de tectónica y compresional en la cuenca Pisco Este – costa afuera.

La Figura 32, ilustra claramente en las líneas sísmicas las fallas normales reactivadas afectando niveles estratigráficos muy someros (incluso casi alcanzando el fondo marino actual). También se puede ver ilustrado el efecto de “convivencia” subsidencia (por el norte) y levantamiento (por el sur), generado por la migración y subducción de la Dorsal de Nazca.

La migración de la dorsal de Nazca se podría expresar en al menos dos impactos en la cuenca:

- 1) Subsidencia por el norte de la cuenca, que podría tener un efecto en el soterramiento del graben de Chíncha y principalmente del graben de Asia. Este soterramiento podría tener un impacto no menospreciable sobre un pulso nuevo de generación de hidrocarburos (cabe mencionar que este efecto debe ser modelado termalmente para visualizar su efecto en la madurez y generación de hidrocarburos).
- 2) Levantamiento por el sur de la cuenca, resultando en la exaltación de algunas trampas o destrucción de los sellos de las trampas formadas previamente. Con esta visión de cronología de la deformación asociada la migración de la dorsal podría aportar un dato útil para modelos exploratorios en el área de estudio o como en cuencas en otras partes del mundo.

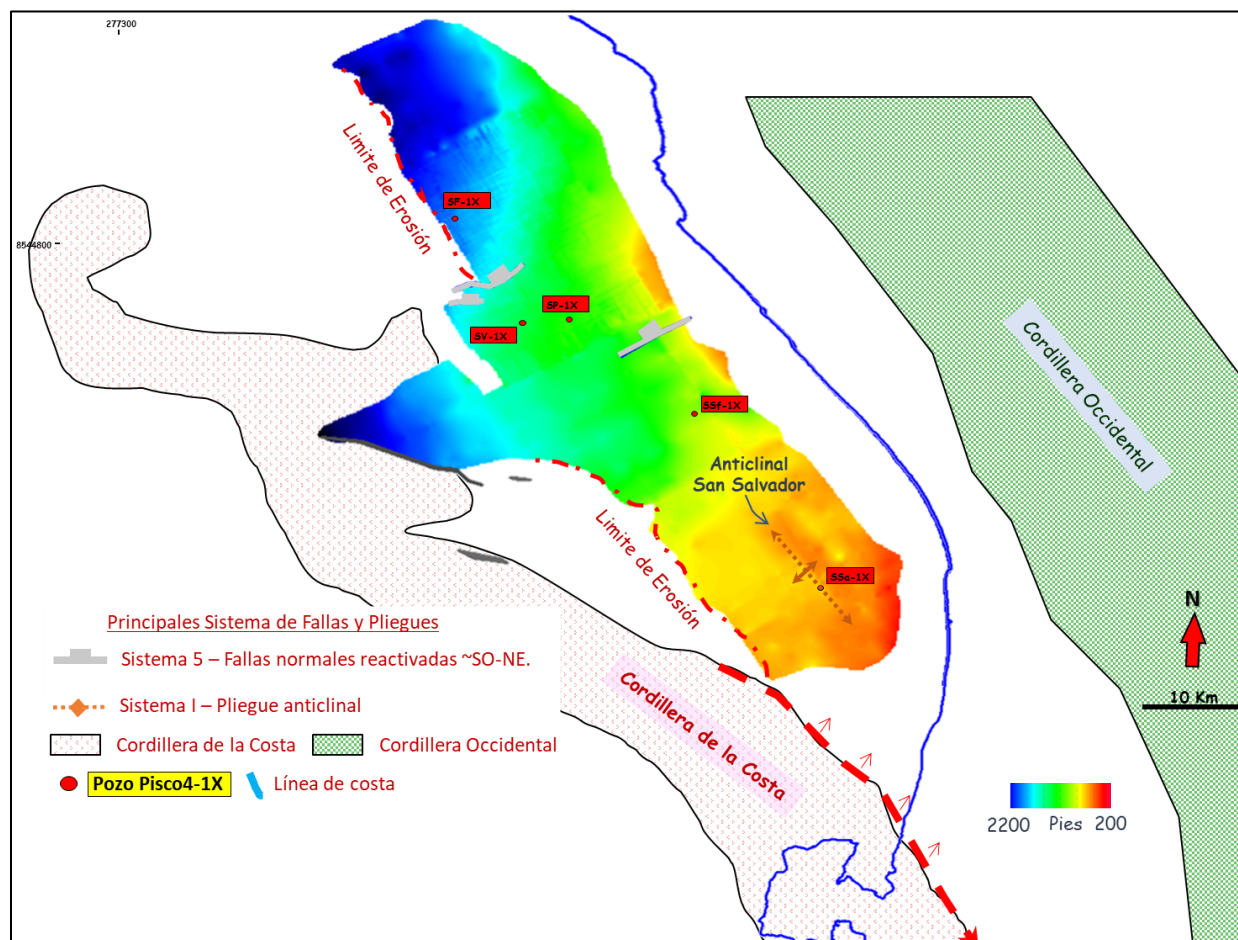


Figura 28. Mapa estructural del Intervalo Mioceno Superior al Reciente (Formaciones Pisco Superior y Changuillo; entre ~16 - 0Ma).

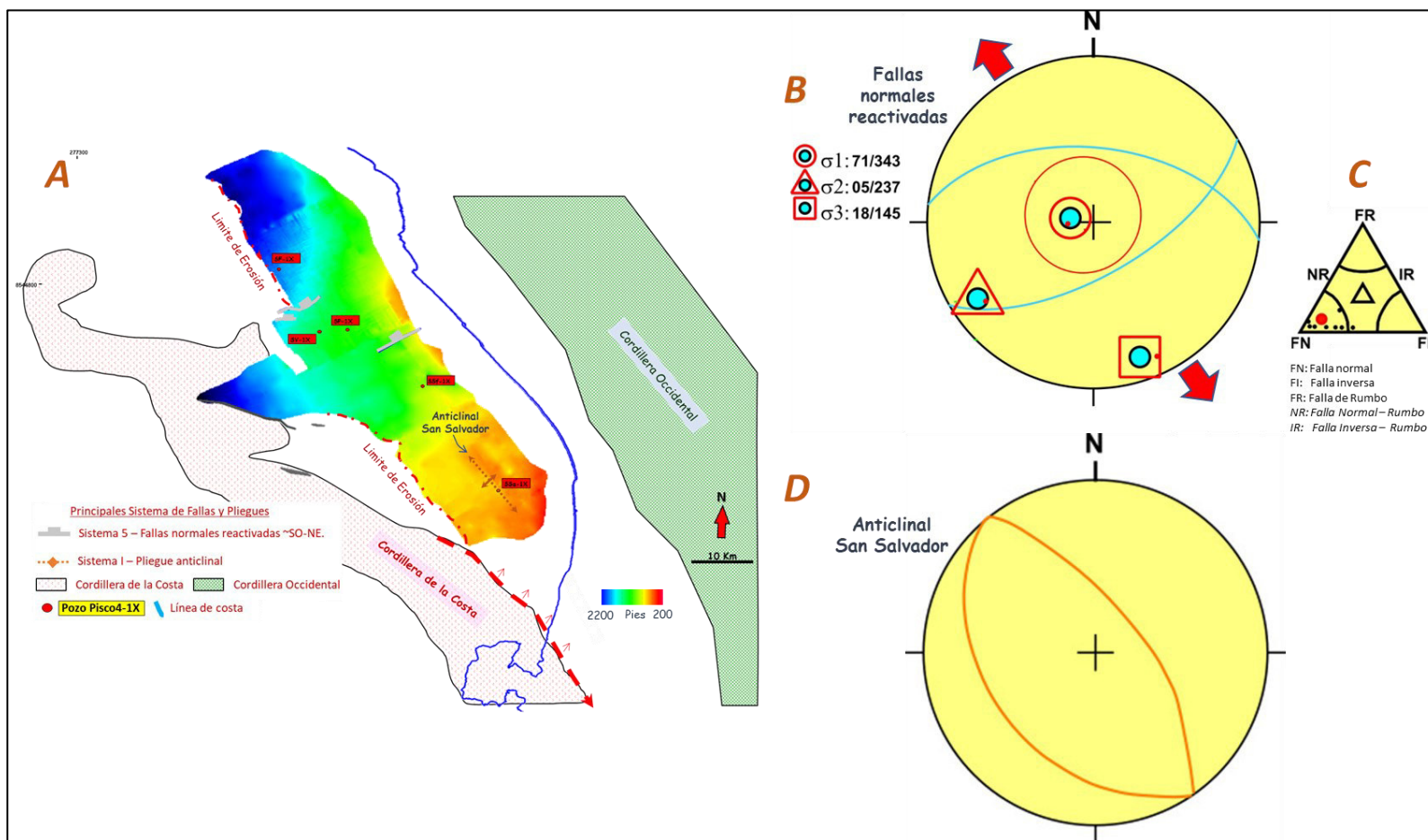


Figura 29. A) Mapa del Sistema 5 de la asociación III que corresponde a la reactivación de las fallas normales del Sistema 2 (color gris claro); B) Proyección estereográfica del Sistema 5. C) Diagrama triangular de Frohlich mostrando que las fallas mayormente corresponden a fallas normales; D) proyección estereográfica del anticlinal San Salvador.

Esta asociación da como resultado una orientación principal de esfuerzo ~N330 (flechas rojas en B).

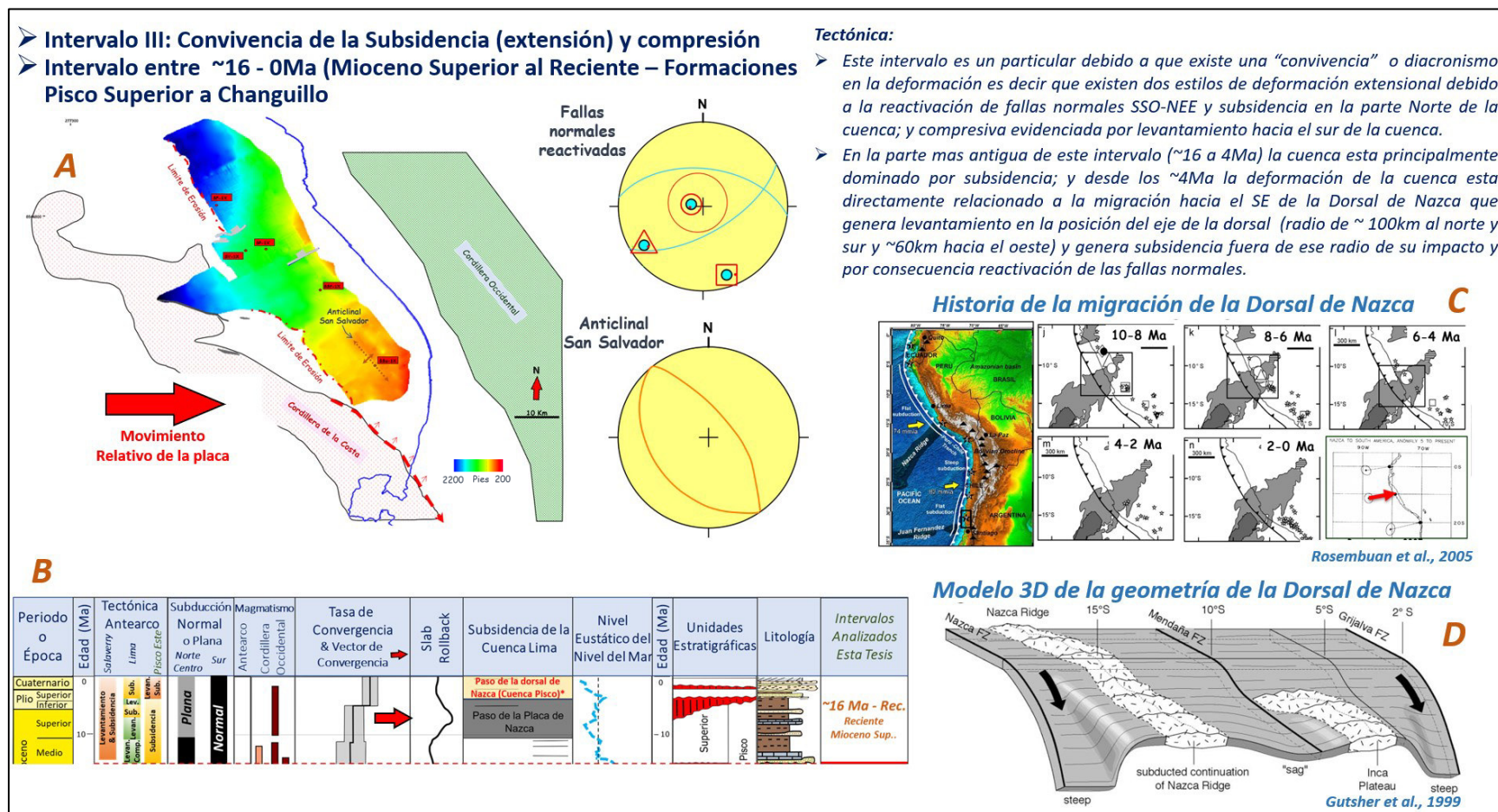


Figura 30. A) Mapa estructural de Asociación III (explicación en la Figura 29), Flecha roja representa el movimiento relativo de la convergencia de la placa oceánica de Nazca. B) fragmento de la Figura 2 del intervalo ~16 Ma al reciente con los factores más importantes que delinean la geometría final 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.

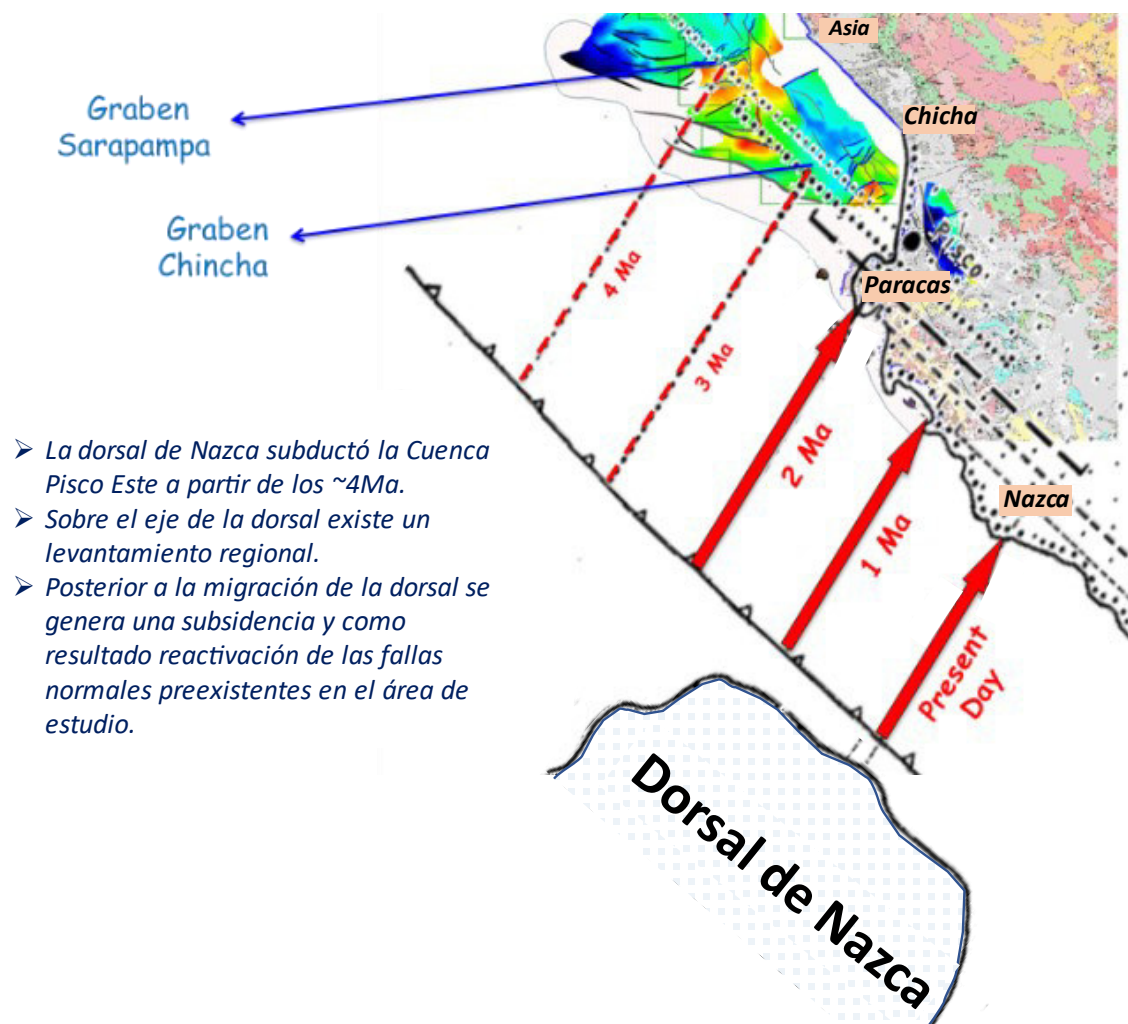


Figura 31. Historia de la migración de la Dorsal de Nazca y su relación con la cuenca Pisco Este (adaptado de Machare y Ortlieb, 1992).

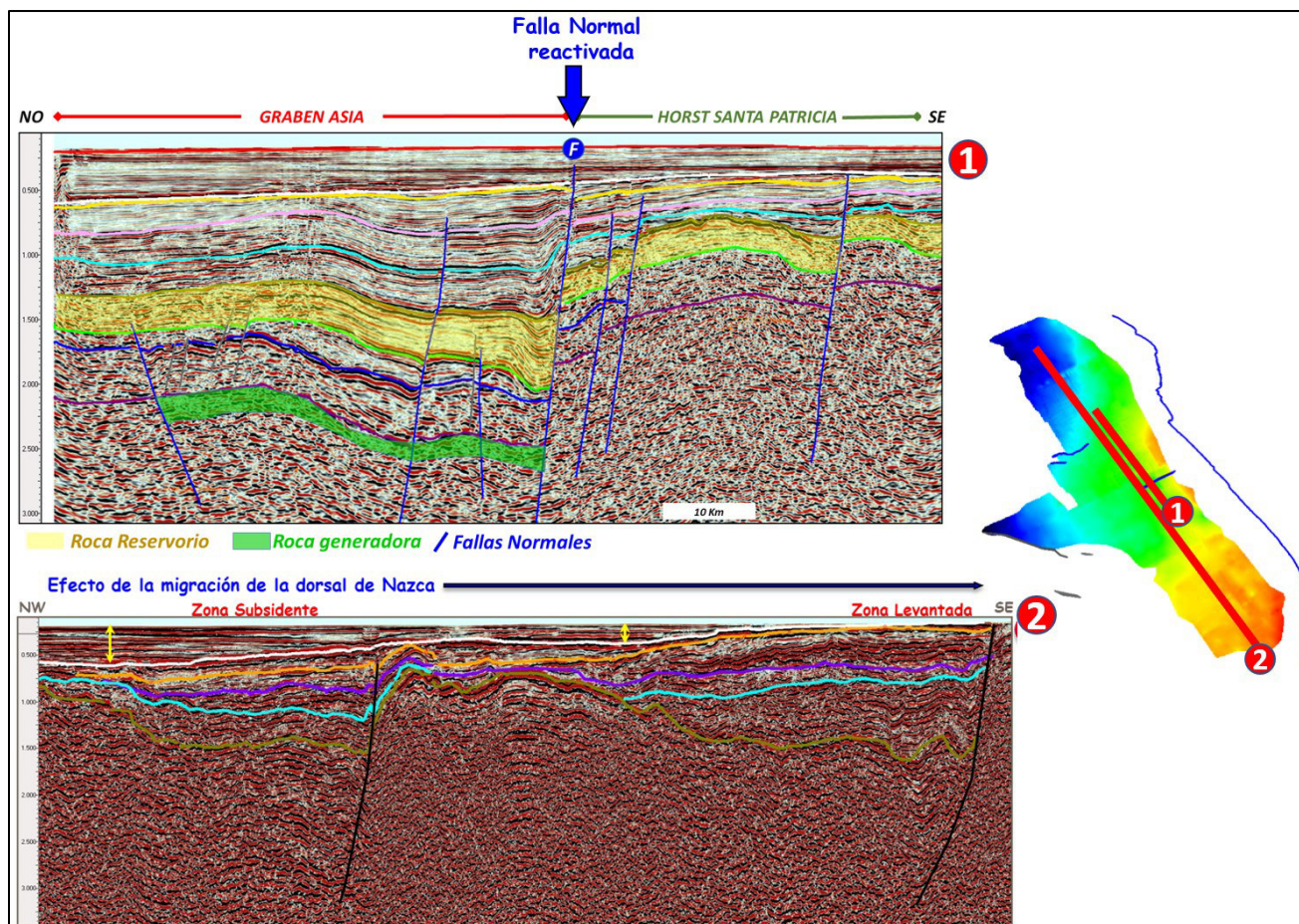


Figura 32. La imagen de la derecha se observa el mapa estructural del Intervalo III. La imagen sísmica de arriba muestra un ejemplo de una de las fallas normales reactivada afectando niveles estratigráficos muy someros (incluso casi alcanzando el fondo marino actual). La imagen sísmica inferior muestra a escala de toda la cuenca Pisco Este este efecto de “convivencia” subsidencia (por el norte) y levantamiento por el sur) generado por el paso de la Dorsal de Nazca.

CONCLUSIONES

Generales

- Se realizó un análisis del estilo estructural y se generó un modelo de evolución tectónica:

1) Intervalo I entre ~47 - ~30Ma (Eoceno Medio – Oligoceno Inferior. Formaciones Caballas, Choros y Yumaque).

Tectónica:

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

2) Intervalo II entre ~30 - ~16 Ma (Oligoceno superior – Mioceno Inferior, Formaciones Chilcatay y Pisco Inferior).

Tectónica:

- Dominio de estructuras compresivas tales como plegamientos como resultado de la reactivación de las fallas de rumbo sinistral con fuerte componente inverso (estas mismas fallas en el Intervalo I eran dextrales).

- Debido a un cambio en el ángulo de convergencia de las placas ($\sim 20^\circ$) y el incremento en la velocidad de convergencia se tuvo un impacto importante y generó un régimen de deformación transpresional compresivo.
- Como resultado del patrón de fallamiento y plegamiento de la cuenca se tiene un vector de deformación de $\sim N52^\circ$.

3) Intervalo III entre ~ 16 - 0 Ma (Mioceno Superior al Reciente – Formaciones Pisco Superior a Changuillo).

Tectónica:

- Este intervalo es muy 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 4 Ma) la cuenca esta principalmente dominado por subsidencia; y desde los ~ 4 Ma, la deformación de la cuenca está directamente relacionado a la migración hacia el sureste de la Dorsal de Nazca que generó levantamiento en la posición del eje de la dorsal y genera subsidencia fuera de ese radio de alcance y por consecuencia reactivación de las fallas normales.

Específicas

1. Estilo Estructural

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 sinistral reactivadas (previamente dextrales) y con fuerte componente inverso. Este componente inverso de las fallas de rumbo generó plegamiento por la propagación de estas fallas.

Intervalo III entre ~16 - 0Ma (Mioceno Superior al Reciente – Formaciones Pisco Superior a Changuillo): convivencia de fallas normales con subsidencia y levantamiento.

2. Reconstruir 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 compartimentalizado por fallas transcurrentes.

Posteriormente, en el segundo intervalo la cuenca estuvo sujeta a un cambio importante debido a la inversión o reactivación del sistema de fallas de rumbo produciendo estructuras compresivas anticlinales con ejes NNO-SSE denotando un levantamiento gradual de la cuenca.

Finalmente, la cuenca dejó de experimentar compresión ocurrida a finales del Mioceno medio y reactivándose la subsidencia. Sin embargo, al final de este intervalo aproximadamente a ~4 Ma la cuenca fue impactada por la subducción y migración de la Dorsal de Nazca lo cual produjo un sincronismo entre levantamiento y subsidencia.

3. Se determinó la creación de estructuras (trampas) con potencial exploratorio por hidrocarburos y la definición de los elementos del sistema petrolero.

Intervalo I entre ~47 - ~30 Ma (Eoceno Medio – Oligoceno Inferior. Formaciones Caballas, Choros y Yumaque): todos estos atributos fueron formados principalmente durante el estilo estructural extensivo de la cuenca.

- Formación de Estructuras tipo horst u hombros de graben que funcionan como trampas estructurales que entraparían a los hidrocarburos.
- Fracturamiento de las rocas en los hombros de los grábenes generando un sistema de reservorios tipo fracturados.
- La depositación syn-tectónica de los sistemas arenosos que son los reservorios primarios (Fms. Caballas y Choros) y la depositación de la roca principalmente arcillosa de la Fm. Yumaque que constituyen la roca sello de los reservorios antes mencionados. Ambos, reservorio y sello son elementos fundamentales del sistema petrolero.

Intervalo II entre ~30 - ~16 Ma (Oligoceno superior – Mioceno Inferior, Formaciones Chilcatay y Pisco Inferior: Estos atributos fueron formados principalmente durante el estilo estructural compresivo y de reactivación de las fallas de rumbo de la cuenca.

- Formación de pliegues anticlinales que conforman trampas estructurales por excelencia.
- Durante este intervalo se deposita la tercera formación arenosa (Fm. Chilcatay) considerado como otro potencial reservorio.

Intervalo III entre ~16 – 0 Ma (Mioceno Superior al Reciente – Formaciones Pisco Superior a Changuillo):

- Subsistencia que puede ayudar a la madurez de la roca madre en los principales depocentros (grábenes de Asia y/o Chíncha).

RECOMENDACIONES

- Complementar con un estudio sismoestratigráfico en el área estudiada.
- El área estudiada contiene diferentes prospectos estructurales, estratigráficos y combinados con excelente potencial exploratorio y que se recomiendan ser evaluados desde el punto de vista de cálculo de recursos hidrocarburíferos y chance de éxito geológico y económico.
- Perforar pozos exploratorios en las estructuras con mayor potencial exploratorio.
- Con la perforación de un pozo exploratorio se podría ajustar el modelo geológico presentado.
- Se recomienda interpretar la sísmica del Sector de la cuenca Pisco Oeste, comparar y correlacionarla con el área estudiada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Audin L., David C., Hall S., Farber D., Hérail G. 2006. Revista geológica Argentina 61. P. 545-554.
- Alarcón P., Anzoleaga R., Gonzales E., Bianchi C., Fuentes J. 2005. Estilos estructurales y evolución de las cuencas Costa fuera del Perú y su potencial Hidrocarburífero. Congreso Internacional de Exploración, Explotación, Procesamiento y Transporte de Hidrocarburos (INGEPET), No. 5, EXPR-3-CB-33: P. 11 Lima.
- Bellido E., Narváez S. 1960. Geología del Cuadrángulo de Atico, Hoja 33-o. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Dirección de Geología Regional, Comisión de la Carta Geológica Nacional, Boletín 2, Serie A: 59p. Lima.
- Bishop L., Mann P. 2019. Tectonic and Stratigraphic Stages and Hydrocarbon Prospectivity of the Sandino Forearc Basin of Nicaragua and Costa Rica Inferred from Seismic Mapping, Seismic Facies Analysis, and 2D Basin Modeling. First HGS and EAGE Conference on Latin America. Houston, Texas, Unites States. Poster Presentation.
- Benavente C. 2009. Estilo de deformación cenozoica del Antearco del Oroclino de los Andes Centrales: Nuevas ideas a partir de modelos analógicos. Máster 2 SGT PREFALC "Ciencias y Gestión de la Tierra" Geología, Riesgos y Gestión del Territorio. Dynamique des Systèmes Géologiques et Aléas. Universidad Nice, Francia. 37p.
- Barredo S., Giambagi L., Tunik M., Martinez A. 2010. Curso Tectónica Extensional. CRICyT, Mendoza, Argentina. 493p.
- Bosc E. 1963. Geología de la región comprendida entre la Quebrada Parcca (Chilca) y el valle de Mala. Tesis de Bachiller. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 84p.
- Buchanan J., Buchanan P. 1995. Basin inversion, The Geological Society, Bath, UK, Earth-Science Reviews, Volume 41, Issues 3–4, 1996, P. 213-214, ISSN 0012-8252, [doi.org/10.1016/S0012-8252\(96\)00024-4](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(96)00024-4).

- 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](https://doi.org/10.1029/94JB00463).
- Caldas J. 1978. Geología de los cuadrángulos de San Juan, Acarí y Yauca. Instituto Geológico Minero, Boletín 30, 78p.
- 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 Master 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](https://doi.org/10.1029/2002TC001386), 2003.
- Clift P., Hartley A. 2007. Slow rates of subduction erosion and coastal underplating along the Andean margin of Chile and Peru. *Geology*; 35 (6): P.503– 506. doi.org/10.1130/G23584A.1
- Decou A., von Eynatten H., Dunkl I., Frei D., Wörner G. 2013. Late Eocene to Early Miocene Andean uplift inferred from detrital zircon fission track and U-Pb dating of Cenozoic forearc sediments (15-18°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 45, P. 6-23. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.02.003>.
- 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](https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2072780).
- Digicon Geophysical Corporation 1993. Continental shelf offshore Peru. 208p.
- Fernández M. 1993. Geología de los cuadrángulos de Pisco, Guadalupe, Punta Grande, Ica y Córdova. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 47, 62p.
- Fossen H., 2010. *Structural Geology*. Cambridge University Press, Cambridge. 480p. ISBN: 1139488619, 9781139488617.

- 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](https://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](https://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, [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00153-3).
- Harding, T., Lowell D. 1979. Structural styles, their plate-tectonic habitats and hydrocarbon traps in petroleum provinces: *AAPG Bulletin*, volumen 63, P. 1016-1058. <https://doi.org/10.1306/2F9184B4-16CE-11D7-8645000102C1865D>.
- Horton B. 2018. Tectonic regimes of the central and southern Andes: Responses to variations in plate coupling during subduction. *Tectonics*, 37, P. 402-429. [//doi.org/10.1002/2017TC004624](https://doi.org/10.1002/2017TC004624).
- Jaillard E., Hérail G., Monfret T., Díaz-Martínez E., Baby P., Lavenu A., Dumont J. 2000. Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northernmost Chile. En: Cordani, U.G., et al., eds. *Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro, P. 481-559.
- Lavenu A. 2006. Neotectónica de los Andes entre 1°N y 47°S (Ecuador, Perú y Chile): Una Revisión. *Revista geológica argentina* 61 (4): P. 504 – 524.
- 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.
- León W., Alemán A., 2002. Forearc extension: Tectonics, sedimentologic and stratigraphic evolution of the East Pisco Basin. *XI Congreso Peruano de Geología. Trabajos Científicos, Sociedad Geológica del Perú*. P. 213-217.

- Loewy S., Connelly J., Dalziel I. 2004. An orphaned basement block: The Arequipa-Antofalla Basement of the central Andean margin of South America. *GSA Bulletin*, v. 116, P. 171-187. [//doi.org/10.1130/B25226.1](https://doi.org/10.1130/B25226.1)
- Lowell J. 1985, *Structural Styles in Petroleum Exploration*: Tulsa, OGCI, 460 p.
- Macharé J. y 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](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90420-B).
- Martínez F., Muñoz B., Bascuñán S., Arriagada C. 2022. Chapter 38 - Interaction between inverted normal and reverse faults in the inner forearc of the Central Andes: an example from the Salar de Atacama Basin. Editor(s): Gonzalo Zamora, Andrés Mora, *Andean Structural Styles*, Elsevier, 2022, P. 487-494, ISBN 9780323851756, [//doi.org/10.1016/B978-0-323-85175-6.00038-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85175-6.00038-9).
- Maruyama T., Lin A. 2004. Slip sense inversion on active strike-slip faults in southwest Japan and its implications for Cenozoic tectonic evolution. *Tectonophysics*, Volume 383, Issues 1–2, Pages 45-70, ISSN 0040-1951, [//doi.org/10.1016/j.tecto.2004.02.007](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.02.007).
- McClay K. 2000. *Advanced Structural geology for petroleum exploration*. References course notes. Fault Dynamics Research Group Royal Holloway University of London. 54p.
- 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>.
- Morris R. 1955. Report of wildcat Well, Pisco 4X-1. International Petroleum Company Limited. Lima Peru. 39p.
- Mukasa S., Henry D. 1990. The San Nicolas batholith of coastal Peru: early Palaeozoic continental arc or continental rift magmatism?. *Journal Geological Society London*, 147(1). P. 27-39. doi.org/10.1144/GSJGS.147.1.0027.

- Newell N., Chronic B., Roberts T. 1953. Upper Paleozoic of Peru. New York: Geological Society of América, Memoir 58, 276p. <https://doi.org/10.1130/MEM58>.
- 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>.
- Ochoa D., Salas-Gismondi R., DeVries T., Baby P., De Muizon C., Altamirano A., Barbosa-Espitia A., Foster D., Quispe K., Cardich J., Gutierrez D., Perez A., Valqui J., Urbina M., Carre M. 2021. Late Neogene evolution of the Peruvian margin and its ecosystems: a synthesis from the Sacaco record. Int J Earth Sci (Geol Rundsch) 110, P. 995–1025. <https://doi.org/10.1007/s00531-021-02003-1>.
- Oncken O., Hindle D., Kley J., Elger K., Pia V.y Shemmman K. 2006. Deformation of the Central Andean Upper Plate System — Facts, Fiction, and Constraints for Plateau Models. In: The Andes. Frontiers in Earth Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg . https://doi.org/10.1007/978-3-540-48684-8_1
- Peña F.D., Timoteo D., Alarcón P. 2020. Cenozoic Structural Style and Tectonic Evolution of East Pisco Basin, Offshore Peru - Implications for an Active Petroleum System. Pacific Basins: Exploring South America’s Active Margin (Colombia, Ecuador, Peru, and Chile). The Pacific Basins Symposium formed part of the AAPG’s Latin America and Caribbean Region’s 2020 Virtual Research Symposia. Abstract, oral presentation and recorded video.
- 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. <https://doi.org/10.1029/TC006i003p00233>.
- Perupetro (<https://www.perupetro.com.pe>), Mapa de Cuencas Sedimentarias.
- Petrotech Peruana S.A. 2008. Reporte final del segundo periodo exploratorio, Adquisición Pisco “A” 3D, Lote Z-33, Tomo II-1. 277p.
- Petrotech Peruana S.A. 2009. Final seismic acquisition report, 2D seismic survey, Block Z33, Project: PET0SS09Z33- San Salvador. 100p.

- Royal Dutch Shell 2014. Play Based Exploration, A Guide for AAPG's Imperial Barrel Award Participation. 52p.
- Ramos V., Aleman A. 2000. Tectonic Evolution of the Andes. En: Cordani, U.G., et al., eds. Tectonic evolution of South America. Rio de Janeiro, P. 635-685.
- Ramos V. y Folguera A. 2000. Ramos, V.A., & 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>.
- Romero D., De La Cruz O., Rosell W. 2005. Nueva datación 40ar/39ar de la Formación Pucusana como aporte a la Interpretación paleogeográfica (Hauteriviano-Albiano Inferior) De La Costa Del Perú Central. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú 10. P. 7- 19.
- Romero D., Valencia K., Alarcón P., Peña D., Ramos V. 2013. The offshore basement of Perú: Evidence for different igneous and metamorphic domains in the forearc, Journal of South American Earth Sciences, Volume 42, Pages 47-60, ISSN 0895-9811, [//doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.003](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.003).
- 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](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.08.003)
- Rustichelli A, Di Celma C., Tondi E., Bianucci G. 2016. Deformation within the Pisco Basin sedimentary record (southern Peru): Stratabound orthogonal vein sets and their impact on fault development, Journal of South American Earth Sciences, Volume 65, ISSN 0895-9811, P. 79-100. [//doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.002](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.002).
- Seiscom Delta INC. 1973. Joint venture seismic survey. Peruvian continental shelf, Lagunitos Pisco, for Petróleos del Peru and Delta Exploration Co. INC. Houston Texas. 67p.
- Sempere T., Jacay J. 2006. Estructura tectónica del sur del Perú (antearco, arco, y Altiplano suroccidental). Resúmenes extendidos del XIII Congreso Peruano de Geología, Sociedad Geológica del Perú, P. 324-327.

- 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.
- Somoza R., Ghidella, M., 2012. Late Cretaceous to recent plate motions in western South America revisited, *Earth and Planetary Science Letters*, Volumes 331–332, ISSN 0012-821X, P. 152-163. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.03.003>.
- Thornburg, T. and Kulm, L. D., 1981, Sedimentary basins of the continental margin: Structure, stratigraphy and Cenozoic tectonics from 6 ° S to 16 ° S latitude, in Kulm et al., (eds.), *Nazca Plate." crustal formation and Andean convergence*, *Geol. Soc. Amer. Memoir* 154, pp. 393-422. <https://doi.org/10.1130/MEM154-p393>.
- Valencia K. 2011. Geological Prognosis Exploratory Well San Felipe-1X. 48p.
- 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.
- 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](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.02.018).

ANEXOS

Anexo 1. Listado de proyectos sísmicos 2D y 3D interpretados para la tesis.

Anexo 2. Base de datos de fallas y pliegues interpretados con sus respectivas características.

Anexo 3. Matriz de Consistencia.

Anexo 4. Operacionalización de Variables.

Anexo 1. Listado de proyectos sísmicos 2D y 3D interpretados para la tesis.

ID	Año	Cuenca	Survey	Tipo sísmica	Tipo	Operadora
1	2010	Pisco	San Felipe Cube	3D	mig	Petrotech
1	2009	Pisco	PET2009-Z33-01	2D	mig	Petrotech
2	2009	Pisco	PET2009-Z33-02	2D	mig	Petrotech
3	2009	Pisco	PET2009-Z33-03	2D	mig	Petrotech
4	2009	Pisco	PET2009-Z33-04	2D	mig	Petrotech
5	2009	Pisco	PET2009-Z33-05	2D	mig	Petrotech
6	2009	Pisco	PET2009-Z33-06	2D	mig	Petrotech
7	2009	Pisco	PET2009-Z33-08	2D	mig	Petrotech
8	2009	Pisco	PET2009-Z33-09	2D	mig	Petrotech
9	2009	Pisco	PET2009-Z33-10	2D	mig	Petrotech
10	2009	Pisco	PET2009-Z33-11	2D	mig	Petrotech
11	2009	Pisco	PET2009-Z33-07	2D	mig	Petrotech
12	2005	Pisco	PET2005-Z33-31	2D	mig	Petrotech
13	2005	Pisco	PET2005-Z33-31	2D	mig	Petrotech
14	2005	Pisco	PET2005-Z33-01	2D	mig	Petrotech
15	2005	Pisco	PET2005-Z33-03	2D	mig	Petrotech
16	2005	Pisco	PET2005-Z33-04	2D	mig	Petrotech
17	2005	Pisco	PET2005-Z33-05	2D	mig	Petrotech
18	2005	Pisco	PET2005-Z33-06	2D	mig	Petrotech
19	2005	Pisco	PET2005-Z33-07	2D	mig	Petrotech
20	2005	Pisco	PET2005-Z33-08	2D	mig	Petrotech
21	2005	Pisco	PET2005-Z33-11	2D	mig	Petrotech
22	2005	Pisco	PET2005-Z33-12	2D	mig	Petrotech
23	2005	Pisco	PET2005-Z33-13	2D	mig	Petrotech
24	2005	Pisco	PET2005-Z33-15	2D	mig	Petrotech
25	2005	Pisco	PET2005-Z33-17	2D	mig	Petrotech
26	2005	Pisco	PET2005-Z33-18	2D	mig	Petrotech
27	2005	Pisco	PET2005-Z33-20	2D	mig	Petrotech
28	2005	Pisco	PET2005-Z33-21	2D	mig	Petrotech
29	2005	Pisco	PET2005-Z33-23	2D	mig	Petrotech
30	2005	Pisco	PET2005-Z33-24	2D	mig	Petrotech
31	2005	Pisco	PET2005-Z33-25	2D	mig	Petrotech
32	2005	Pisco	PET2005-Z33-26	2D	mig	Petrotech
33	2005	Pisco	PET2005-Z33-27	2D	mig	Petrotech
34	2005	Pisco	PET2005-Z33-30	2D	mig	Petrotech
35	2005	Pisco	PET2005-Z33-31	2D	mig	Petrotech
36	2005	Pisco	PET2005-Z33-34	2D	mig	Petrotech
37	2005	Pisco	PET2005-Z33-35	2D	mig	Petrotech
38	2005	Pisco	PET2005-Z33-33	2D	mig	Petrotech
39	2005	Pisco	PET2005-Z33-32	2D	mig	Petrotech

ID	Año	Cuenca	Survey	Tipo sísmica	Tipo	Operadora
40	2005	Pisco	PET2005-Z33-02	2D	mig	Petrotech
41	2005	Pisco	PET2005-Z33-09	2D	mig	Petrotech
42	2005	Pisco	PET2005-Z33-10	2D	mig	Petrotech
43	2005	Pisco	PET2005-Z33-14	2D	mig	Petrotech
44	2005	Pisco	PET2005-Z33-16	2D	mig	Petrotech
45	2005	Pisco	PET2005-Z33-19	2D	mig	Petrotech
46	2005	Pisco	PET2005-Z33-22	2D	mig	Petrotech
47	2005	Pisco	PET2005-Z33-28	2D	mig	Petrotech
48	2005	Pisco	PET2005-Z33-29	2D	mig	Petrotech
49	1993	Pisco	93-78	2D	mig	Ribiana Inc.
50	1993	Pisco	93-79	2D	mig	Ribiana Inc.
51	1993	Pisco	93-80	2D	mig	Ribiana Inc.
52	1993	Pisco	93-81	2D	mig	Ribiana Inc.
53	1993	Pisco	93-82	2D	mig	Ribiana Inc.
54	1993	Pisco	93-83	2D	mig	Ribiana Inc.
55	1993	Pisco	93-84	2D	mig	Ribiana Inc.
56	1993	Pisco	93-85	2D	mig	Ribiana Inc.
57	1993	Pisco	93-86	2D	mig	Ribiana Inc.
58	1993	Pisco	93-87	2D	mig	Ribiana Inc.
59	1993	Pisco	93-69	2D	mig	Ribiana Inc.
60	1993	Pisco	93-68	2D	mig	Ribiana Inc.
61	1993	Pisco	93-67	2D	mig	Ribiana Inc.
62	1993	Pisco	93-67	2D	mig	Ribiana Inc.
63	1973	Pisco	D-3425	2D	mig	Seiscom-Delta
64	1973	Pisco	D-1301	2D	mig	Seiscom-Delta
65	1973	Pisco	D-3050	2D	mig	Seiscom-Delta
66	1973	Pisco	D-3400	2D	mig	Seiscom-Delta
67	1973	Pisco	D-3625	2D	mig	Seiscom-Delta
68	1973	Pisco	D-1500	2D	mig	Seiscom-Delta
69	1973	Pisco	D-1300	2D	mig	Seiscom-Delta
70	1973	Pisco	D-3200	2D	mig	Seiscom-Delta
71	1973	Pisco	D-3250	2D	mig	Seiscom-Delta
72	1973	Pisco	D-3275	2D	mig	Seiscom-Delta
73	1973	Pisco	D-3425	2D	mig	Seiscom-Delta
74	1973	Pisco	D-3450	2D	mig	Seiscom-Delta

Anexo 2. Base de datos de fallas y pliegues interpretados con sus respectivas características.

Falla ID	Este (X)	Norte (Y)	Tipo de Falla o Estructura	Long. (km)	Dirección del Buzamiento	Buzamiento
1	324239	8509852	Normal/Rumbo dextral	54	25	63
2	313660	8524495	Normal/Rumbo dextral	50	17	44
3	318829	8525221	Normal/Rumbo dextral	11	11	55
4	285062	8568504	Normal/Rumbo dextral	9	307	75
5	285062	8560299	Normal/Rumbo dextral	11	10	83
6	283415	8557646	Normal/Rumbo dextral	9	8	55
7	293054	8557554	Normal/Rumbo dextral	10	30	70
8	293083	8550934	Normal/Rumbo dextral	17	6	53
9	285306	8552581	Normal/Rumbo dextral	5	40	70
10	276460	8553405	Normal/Rumbo dextral	9	33	70
11	290812	8543279	Normal/Rumbo dextral	12	16	50
12	291700	8542550	Normal/Rumbo dextral	22	17	30
13	276032	8545292	Normal/Rumbo dextral	28	25	36
14	301960	8544163	Normal/Rumbo dextral	6	324	60
15	356867	8509207	Inversa/Rumbo sinistral	25	235	60
16	358878	8511708	Inversa/Rumbo sinistral	9	237	60
17	361318	8512319	Inversa/Rumbo sinistral	14	230	60
18	342192	8520036	Inversa/Rumbo sinistral	10	244	71
19	334687	8533334	Normal/Rumbo dextral	14	64	84
20	340850	8534342	Inversa/Rumbo sinistral	15	225	45
21	323252	8531412	Normal/Rumbo dextral	11	263	51
22	321756	8540228	Inversa/Rumbo sinistral	4	240	66
23	320963	8544774	Inversa/Rumbo sinistral	6	255	67
24	320322	8549197	Inversa/Rumbo sinistral	7	243	68
25	320414	8555540	Inversa/Rumbo sinistral	17	263	80

26	324409	8555632	Normal/Rumbo dextral	13	57	77
27	316510	8561733	Normal/Rumbo dextral	10	62	85
28	313154	8567619	Normal/Rumbo dextral	8	83	83
29	312849	8574422	Normal/Rumbo dextral	7	91	83
30	308854	8574422	Normal/Rumbo dextral	13	88	58
31	304980	8574269	Normal/Rumbo dextral	18	70	65
32	297322	8570823	Normal/Rumbo dextral	17	84	50
33	303868	8583405	Normal/Rumbo dextral	13	70	70
34	357749	8501887	Normal/Rumbo dextral	5	110	50
35	355097	8504540	Normal/Rumbo dextral	12	315	54
36	361044	8501307	Normal/Rumbo dextral	3	150	60
37	352046	8510030	Normal/Rumbo dextral	10	290	61
38	351161	8510397	Normal/Rumbo dextral	8	285	56
39	348850	8514800	Normal/Rumbo dextral	5	322	48
40	362020	8505800	Normal/Rumbo dextral	5	6	65
41	357049	8514789	Normal/Rumbo dextral	7	318	44
42	356287	8515674	Normal/Rumbo dextral	7	302	51
43	353724	8516283	Normal/Rumbo dextral	5	315	66
44	352839	8520067	Normal/Rumbo dextral	8	336	58
45	336671	8543950	Normal/Rumbo dextral	13	150	64
46	315594	8534860	Normal/Rumbo dextral	17	148	64
47	314742	8541051	Normal/Rumbo dextral	16	353	65
48	312849	8542993	Normal/Rumbo dextral	11	354	66
49	312117	8548677	Normal/Rumbo dextral	17	350	72
50	316327	8549472	Normal/Rumbo dextral	2	342	79
51	313582	8549959	Normal/Rumbo dextral	2	325	64
52	315442	8551178	Normal/Rumbo dextral	14	333	56
53	316389	8552825	Normal/Rumbo dextral	5	324	60
54	312910	8554321	Normal/Rumbo dextral	2	295	55

Falla ID	Este (X)	Norte (Y)	Tipo de Falla o Estructura	Long. (km)	Dirección del Buzamiento	Buzamiento
55	312297	8554679	Normal/Rumbo dextral	5	320	56
56	302568	8548677	Normal/Rumbo dextral	16	336	56
57	288431	8548308	Normal/Rumbo dextral	6	292	60
58	320748	8567375	Normal/Rumbo dextral	10	105	57
59	315288	8568383	Normal/Rumbo dextral	6	135	69
60	317783	8571182	Normal/Rumbo dextral	8	150	81
61	301470	8573568	Normal/Rumbo dextral	7	352	80
62	311539	8583055	Normal/Rumbo dextral	9	152	60
63	301229	8560696	Normal/Rumbo dextral	3	140	74
64	303212	8559414	Normal/Rumbo dextral	6	150	61
65	303789	8557736	Normal/Rumbo dextral	6	150	60
66	303607	8556060	Normal/Rumbo dextral	2	140	52
67	306231	8558439	Normal/Rumbo dextral	2	150	53
68	307429	8563214	Normal/Rumbo dextral	11	63	83
69	308578	8561801	Normal/Rumbo dextral	6	75	84
70	309546	8561399	Normal/Rumbo dextral	11	67	79
71	311431	8561919	Normal/Rumbo dextral	9	56	78
1	338405	8534771	Flanco W Anticlinal Santa Sofia		240	5
2	339993	8535645	Flanco E Anticlinal Santa Sofia		55	14
3	355876	8507548	Flanco W Anticlinal San Salvador		235	40
4	356439	8510653	Flanco E Anticlinal Santa Salvador		50	64
4	356439	8510653	Flanco E Anticlinal San Felipe		36	30
5	356439	8510653	Flanco W Anticlinal San Felipe		60	63

Anexo 3. Matriz de Consistencia.

PROBLEMAS GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES	METODOLOGIA
¿De qué manera con el análisis del estilo estructural se generará un modelo de evolución tectónica para el Cenozoico en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima - Perú?	Realizar el 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 y Lima – Perú,	El análisis del estilo estructural ayudará a generar un modelo de evolución tectónica para el Cenozoico en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú.	- Variable Independiente: Estilo estructural. - Dimensiones ✓ Interpretación de la información de subsuelo y superficie. ✓ Parámetros estructurales tales como Fallas y pliegues. - Indicadores & Unidades ✓ Líneas 2D sísmicas - Km. ✓ Cubo sísmico 3D - Km². ✓ Reflectores u horizontes clave - Horizontes. ✓ Análogos o afloramientos - m. ✓ Desplazamientos de fallas - m. ✓ Deformación - m. ✓ Pliegues y Discontinuidades - Ángulos - Variable Dependiente: Modelo de evolución tectónica. - Dimensiones ✓ Rasgos geométricos. ✓ Parámetros cinemáticos. ✓ Modelo de evolución tectónica. - Indicadores & Unidades ✓ Prismas, cuñas, estratos de crecimiento, onlaps, toplaps, truncaciones - m. ✓ Inversión de fallas – m. ✓ Propagación de fallas – m. ✓ Plegamiento – m. ✓ Fallas y pliegues en cada nivel clave u horizonte (unidad estratigráfica) en sus respectivos “mapas estructurales” – Ma.	Tipo y Diseño - No Experimental. - Transversal (Correlacional-Causal) Unidad de Análisis - La geometría de las fallas y pliegues – estilo estructural y su cinemática mediante el uso de la información sísmica, pozo y análogos o afloramientos. Población de Estudio 9000 km de líneas sísmicas 3000 Km2 cubos sísmicos 1 pozo y registros. - Información de Superficie. Tamaño de muestra - El tamaño de muestra es igual a la Población Selección de la muestra - No Aplica Técnica de recolección de datos. - La información se obtiene en campañas de adquisición sísmica. Usa la técnica con una fuente de energía y un receptor (geófono) en un arreglo especial para mar adentro. El resultado es una imagen indirecta a de subsuelo. - Solo se tiene un pozo en el área en continente. Para control de la estratigrafía. - Mapas geológicos, columnas estratigráficas adquiridas con geología de superficie.
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS		
¿Cuál es estilo estructural dominante durante diferentes periodos y edades del Cenozoico en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú? ¿De qué modo el análisis del estilo estructural puede ayudar a reconstruir la cinemática de falla, pliegues e historia de deformación de la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú? ¿El análisis de estructural y el modelo de evolución tectónica podrán demostrar la formación de estructuras (trampas) con potencial exploratorio por hidrocarburos y la formación de un sistema petrolero en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú?	- Determinar el estilo estructural dominante durante diferentes periodos y edades del Cenozoico en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú. - Realizar el análisis del estilo estructural para reconstruir la cinemática de fallas, pliegues e historia de deformación de la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú. - Mediante el análisis de estructural y el modelo de evolución tectónica determinar la formación de estructuras (trampas) con potencial exploratorio por hidrocarburos y la identificación de un sistema petrolero en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú.	- El estilo estructural dominante durante diferentes periodos y edades del Cenozoico en la cuenca será determinado mediante el análisis del estilo estructural tales como tipos de falla y pliegue en cada determinado periodo de tiempo. - El análisis del estilo estructural ayudará a reconstruir la cinemática de fallas, pliegues, así como la historia de deformación de la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú. - El análisis del estilo estructural y el modelo de evolución tectónica ayudará a determinar la formación de estructuras (trampas) con potencial exploratorio por hidrocarburos y la identificación de un sistema petrolero en la cuenca Pisco Este en el sector costa afuera, Ica y Lima – Perú.		

Anexo 4. Operacionalización de Variables.

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES
Variable Independiente Estilo estructural.	Se entiende como el estudio de las características estructurales (fallas y pliegues) como resultado de la deformación frágil de la corteza (Fossen, 2010)..	Fase en la cual se elabora un marco estructural a través de la interpretación de fallas y pliegues y discontinuidades estratigráficas en el área de interés.	Interpretación de la información de subsuelo y superficie.	Líneas sísmicas 2D	kilómetros
				Cubo sísmico 3D.	kilómetros cuadrados
				Reflectores u horizontes clave.	Reflectores sísmicos / Horizontes (formaciones estratigráficas)
				Análogos o afloramientos.	
			Parámetros tectónicos.	Desplazamientos.	Metros
				Deformación.	Kilómetros
				Discontinuidades.	Ángulos
Variable Dependiente Modelo de evolución tectónica.	Se refiere a la generación de modelo basado en la deformación de parte de la corteza a lo largo del tiempo geológico (McClay, 2000).	Proceso mediante el cual se integrará la cinemática de la deformación de la corteza (fallas y pliegues) para elaborar un modelo de evolución tectónica.	Rasgos geométricos.	Prismas, cuñas, estratos de crecimiento, onlaps, toplaps, truncaciones.	Metros
					Reflectores sísmicos
			Parámetros cinemáticos.	Inversión de fallas.	Metros
				Propagación de fallas.	Reflectores sísmicos.
				Plegamiento.	Ángulos
			Modelo de evolución tectónica.	Fallas y pliegues en cada nivel clave u horizonte (unidad estratigráfica).	Millones de años.