



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**ESTUDIO TECTONO-ESTRATIGRÁFICO DE LA CUENCA
TRANSTENSIONAL EN EL MARGEN DE SONORA FRENTE AL
RIFT DE GUAYMAS, GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

LEONARDO JOSÉ FIGUEROA ALBORNOZ

TUTOR PRINCIPAL

CARLOS ÁNGEL Q. MORTERA GUTIÉRREZ

Instituto de Geofísica, UNAM

COMITÉ TUTOR:

ARTURO CARRANZA EDWARDS

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

JOAQUÍN EDUARDO AGUAYO CAMARGO

Facultad de Ingeniería, UNAM

WILLIAM LEE BANDY

Instituto de Geofísica, UNAM

THIERRY CALMUS

Instituto de Geofísica, UNAM

MÉXICO, D.F. JUNIO DE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología

Universidad Nacional Autónoma de México



**ESTUDIO TECTONO-ESTRATIGRÁFICO DE LA
CUENCA TRANSTENSIONAL EN EL MARGEN DE
SONORA FRENTE AL RIFT DE GUAYMAS, GOLFO
DE CALIFORNIA, MÉXICO**

T E S I S

que para obtener el grado académico de

**Maestro en Ciencias del Mar y Limnología
(Geología Marina)**

presenta

LEONARDO JOSÉ FIGUEROA ALBORNOZ

Director de Tesis: **Dr. Carlos A. Q. Mortera Gutiérrez**

Comité Tutorial: **Dr. Arturo Carranza Edwards**

Dr. Joaquín Eduardo Aguayo Camargo

Dr. William Lee Bandy

Dr. Thierry Calmus

Ciudad de México, Junio de 2013

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de esta investigación fue posible gracias al financiamiento de los proyectos UNAM-DGAPA-PAPIIT números: IN114410, IN108110, IN115613; así como al apoyo financiero de CONACyT por la beca otorgada para la realización de estudios de maestría. Al grupo científico que participó en el desarrollo de la campaña oceanográfica BIG10 del proyecto *Biodiversidad Global en la Cuenca de Guaymas, Golfo de California*, a cargo de la Dra. Anne Godfroy y Daniel Prieur de IFREMER, Francia. Así como el apoyo prestado por la investigadora del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, la Dra. Elva G. Escobar Briones para participar en esta investigación. Al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, en especial a la Dra. Gloria Vilaclara, por el apoyo para la realización de mis actividades académicas; y a título personal por la ayuda y consejos brindados durante la carrera. Hay que destacar el apoyo institucional de UNAM-CABO para la realización de la campaña oceanográfica GUAYRIV10. Y un especial agradecimiento al Laboratorio de Procesamiento de Datos Geofísicos Marinos, del Instituto de Geofísica, UNAM; así como a sus equipo de colaboradores el Dr. William Bandy, el Dr. Carlos Mortera y los compañeros que han transitado por este camino: Sandy, Elizabeth, Araceli, Daniel, Francisco, Roberto, Said y Omar. Al comité de tutores quienes con sus sabios consejos acompañaron en el desarrollo de esta investigación. Al Dr. Franck Audemard por sus comentarios y sugerencias.

Personalmente quiero agradecer a todas las amistades que coseche durante esta aventura de vivir en tierras extranjeras persiguiendo un sueño. Quiero destacar, como el amor de una familia, que día a día te impulsa, y lleva de la mano por la vida, es el más grande apoyo con el que alguien pueda contar. Y sin lugar a duda, dios me premio con seres maravillosos como lo son mis padres, tíos, abuelos, primos y una hermana grandiosa, que me han ayudado a alcanzar el éxito. Y a una persona muy especial que a fuerza de amor me dio a conocer la felicidad, quien me acompañó en horas de desvelo, regañones y motivaciones para hoy conseguir esta meta, y espero el destino nos permita disfrutar juntos.

DEDICATORIA

A una Rosa en cuyas arrugas se dibuja un mapa de sabiduría, quien dio su vida por forjar una gran familia, pilar de los jardines de mi vida.

A mi abuelita “Chela” quien me enseña con su vida que sin importar cuantos accidentes o enfermedades se pongan en el camino todo se supera.

A ellos que desde niños han cosechado el amor más puro, y que desde los 7 años coincidieron en la vida, para con risas y sueños construir el hogar que cada día extraño; a ustedes que siempre con sabios consejos me llevaron de la mano sin importar las distancias... mis padres.

A una pequeña gigante que con sus luchas me enseña que no existen limitaciones ni lenguas para no lograr lo que te gusta.

A la pintora de mis sonrisas, creadora de ilusiones y dueña de mi corazón, a ti que me enseñaste la felicidad y que Aniuska significa amor, a ti que me inspiraste a levantarme y seguir luchando tras cada golpe.

A la infancia e inocencia, que con sus letras y voces me recuerdan mi niñez, y que con lágrimas de nostalgia, me sacan de este loco mundo de rocas y mares, para darles mi bendición, a ustedes Aaron y Orleanys, mis ahijados.

Al recuerdo de la niñez, donde la familia siempre unida sonreía por sentimiento y no por compromiso, al recuerdo de mi primo que me acompaña bajo el agua y desde el cielo, y al recuerdo de las cosas que el destino nos quitó pero que siempre se llevan en el corazón.

Y a un país maravilloso que me vio crecer, que dios bendijo con todo para su gente, que como madre jamás se arrodillará para ver indolente como la política y violencia le arrebató a sus hijos; esa tierra tan grande que llevo en el corazón y a la que volveré para construir la patria que soñé, ese país con nombre de mujer a quien debo lo que soy, que me ofreció su casa que vence las sombras para seguir conquistando fronteras... a mi grandiosa Venezuela.

ESTUDIO TECTONO-ESTRATIGRÁFICO DE LA CUENCA TRANSTENSIONAL EN EL MARGEN DE SONORA FRENTE AL RIFT DE GUAYMAS, GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO

Leonardo J. Figueroa Albornoz ¹

Director de Tesis: *Carlos A. Mortera Gutiérrez*². **Comité Tutor:** *William L. Bandy*², *Arturo Carranza Edwards*³, *Eduardo J. Aguayo Camargo*⁴, *Thierry Calmus*².

(1) Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM; (2) Instituto de Geofísica, UNAM; (3) Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM; (4) Facultad de Ingeniería, UNAM

RESUMEN

Recientemente, han sido descubiertos un gran número de emanaciones de fluidos emergiendo desde el lecho marino en la Cuenca de Guaymas y en su margen noroeste en el Golfo de California. Desde 1978, numerosos estudios han reportado la presencia de dos sistemas hidrotermales emergiendo en el *rift* de Guaymas (uno en el Rift Norte, y el otro en el Rift Sur) y un sistema de emanaciones frías en la cordillera de la Falla Transformada de Guaymas. Estas emanaciones han tenido un auge de gran interés científico en la región al identificar recientemente sistemas aislados de emanaciones frías en el lecho de la planicie de la Cuenca de Guaymas, a distancia de los ejes de esparcimiento oceánico. Durante la campaña BIG10, a bordo del buque de IFREMER, NO L'Atalante, fueron registradas más de 30,000 imágenes de retrodispersión acústica de columna de agua con el ecosonda multihaz EM122, catalogando una base de datos de la presencia de plumas de burbuja. Estas plumas son la expresión de un sistema de emanación activo al momento del estudio en columna de agua. Estas imágenes documentan la presencia de dos sistemas de emanaciones frías, uno en las cercanías del escarpe de la Falla de Guaymas y de la Cuenca de Satélite; y el otro grupo de plumas están dispersas sobre la planicie del lecho de la Cuenca de Guaymas a distancia de ambos márgenes del Rift Norte, sin ser observada alguna pluma activa sobre las ventilas hidrotermales dentro del *rift*.

Así mismo, este estudio analiza datos de 17 perfiles sísmicos de reflexión de alta resolución (13 con orientación NE-SW y 4 con orientación NW-SE) y datos de batimetría multihaz obtenidos durante la Campaña GUAYRIV10, a bordo del buque de la UNAM, BO El Puma. La interpretación tectónico-estratigráfica de las secciones sísmicas está fundamentada en la estratigrafía documentada por las perforaciones marinas del Leg 64 del DSDP del margen de Sonora y la Cuenca de Guaymas, en relación a la presencia de estos sistemas de emanación de fluidos. Este flujo de gases, es evidenciados por plumas de burbuja aisladas, como las observadas en la Cuenca de Guaymas, son resultado de la alta tasa de sedimentación en la región, del gran contenido de materia orgánica en los sedimentos ricos en diatomeas, y por la presencia de intrusiones basálticas someras en formas de *sills* y diques con profundidades hasta de 200 m. Estos intrusivos causan una alteración termógena de los sedimentos, donde son generados hidrocarburos y CO₂. Parte de estos fluidos y gases son aparentemente almacenados en la unidad GB02, y al alcanzar condiciones de estabilidad a una menor profundidad se forma capas de hidrato. Los cuales, al quedar expuesto en los escarpes de falla o por la actividad de la falla que irrumpe la estratificación de los sedimentos superiores producirán la liberación de flujos constantes de burbujas alineadas sobre los rasgos estructurales.

ABSTRACT

Recently several hydrothermal and gas seeps systems has been located precisely at the Sonora margin within the Guaymas Basin (GB), Gulf of California. Since late 1970's, several marine studies had reported two main hydrothermal systems in the Guaymas Rift (one at the Northern Rift, and other at the Southern Rift), and a cold seeps in the Satellite Basin at the Sonora-margin lower edge. These discover has increased the scientific interest for study cold seeps system rising from GB off-axis rift seafloor. During the campaign BIG10, onboard the IFREMER vessel, NO L'Atalante, the EM122 multibeam echo-sounder log more than 30,000 water column acoustic images, which creates a data base of active bubble plumes systems on the northern part of the GB and the Sonora Margin. These plumes on the water column images are the expression of an active seep sites at the campaign time. Also these images document the presence of cold seep activity around the scarp of the Guaymas Transform Fault (GTF), and within the Satellite Basin. Few active plumes are located off-axis, to both sides of the Northern Rift. Although, it is not observed any active plumes rising from hydrothermal vent within NR. During the campaign GUARIV10, on board UNAM vessel BO "El Puma", marine geophysical data were recorded in 17 high resolution seismic profiles (13 on NE-SW strike, and 4 on NW-SE strike), and a multibeam bathymetry data base. Results of these data sets are integrated with the documented stratigraphy of DSDP Leg 64 to establish the sub-bottom tecto-stratigraphy near the Sonora margin at GB, and how it is related with the seep process. The high sedimentary rates and content of organic matter, in the diatom rich sediments in the GB region in conjunction to the presence of basaltic sills and dikes at 200 m depth that are thermogenic altered produce hydrocarbon gases and CO₂. That flux will rise as bubble plumes as it is observed in the water column images. The sites are random distributed as documented on the GB seafloor. Part of those gases is trapped in GB02 layer where hydrates are in stable conditions. At the GTF escarpment, the fluid and gases leak through the fault breccias, altering the hydrate stability, releasing continuous bubble plumes through the layer discontinuities induced by the fault activity.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
2.1. GOLFO DE CALIFORNIA	5
2.1.1. Características Morfológicas	6
2.1.2. Factores Ambientales	9
2.1.3. Marco Geodinámico	14
2.1.4. Evolución tectónica del Golfo de California	15
2.2. CUENCA DE GUAYMAS	17
2.2.1. Características Morfo-Tectónicas	17
2.2.2. Estratigrafía Regional	21
2.3. EMANACIÓN DE FLUIDOS	26
2.3.1. Actividad Hidrotermal	28
2.3.2. Emanaciones Frías	31
3. METODOLOGÍA	36
3.1. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR	37
3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS	37
3.2.1. Campaña BIG-10	37
3.2.2. Campaña GUAYRIV10	42
3.3. PROCESAMIENTO	51
3.3.1. Localización de plumas de burbuja	51
3.3.2. Procesamiento de datos de reflexión sísmica	56
3.3.3. Procesamiento de batimetría multihaz	58
3.4. INTERPRETACIÓN	59
4. RESULTADOS	60
4.1. DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA	60
4.1.1. Plataforma Continental Del margen De Sonora	61
4.1.2. Planicie de la Cuenca de Guaymas	67

4.2. SISMO-ESTRATIGRAFÍA.....	69
4.2.1. Plataforma del margen de Sonora.....	70
4.2.2. Cuenca de Guaymas.....	73
4.3. SITIOS DE PLUMAS DE BURBUJAS	80
4.3.1. Sistemas de plumas en la Cuenca de Guaymas.....	81
4.3.2. Sistemas de plumas en el margen de Sonora.....	83
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	88
5.1. MARCO TECTÓNICO.....	88
5.1.1. Rift Norte	89
5.1.2. Sistema de Falla de Guaymas	90
5.2. SISTEMAS SEDIMENTARIOS	94
5.2.1. Plataforma del margen de Sonora.....	94
5.2.2. Cuenca de Guaymas.....	96
5.3. SISTEMAS DE LIBERACIÓN DE FLUIDOS.....	99
5.3.1. Margen de Sonora.....	100
5.3.2. Cuenca de Guaymas.....	102
5.4. EVOLUCIÓN TECTONO-ESTRATIGRÁFICA.....	105
6. CONCLUSIONES	108
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ANEXO A: Base de datos de plumas de burbujas de BIG10	
ANEXO B: Secciones sísmicas de GUAYRIV10	
ANEXO C: Mapas	

NOTA 1: Las referencias bibliográficas empleadas en el desarrollo de este documento de tesis se realizaron bajo al formato de citas: *Chicago Citation Style 16th Edition* (2010). Empleado de forma automática por las herramientas de edición de Microsoft Office 2010 y Mac Office 2011.

NOTA 2: Los anexos de esta tesis sólo están disponibles en la versión digital debido a las dimensiones de los mapas y secciones ahí contenidas. Este documento está disponible para consulta en las páginas web del sistema de bibliotecas de la UNAM.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la Cuenca de Guaymas, dentro del Golfo de California, México.	2
Figura 2. Descripción física del Golfo de California.	6
Figura 3. Modelo digital de elevación del Golfo de California.	7
Figura 4. Mapa de ubicación de las principales cuencas dentro del Golfo de California.	7
Figura 5. Mapa de distribución climática en el territorio mexicano a escala original 1:1.000.000.	9
Figura 6. Flujo geostrofico superficial y a 200m de profundidad, en el Golfo de California durante los meses de invierno y verano de 1965.	10
Figura 7. Perfiles verticales de temperatura y salinidad en dirección longitudinal del Golfo de California.	11
Figura 8. Mapa de distribución promedios variaciones de nivel del mar por efecto de marea.	12
Figura 9. Principales fuentes de sedimentos en el Golfo de California.	12
Figura 10. Mapa de distribución de Clorofila en territorio mexicano.	13
Figura 11. Mapa de distribución de los sismos de magnitud superior a 5, registrados entre 1973 y 2009.	14
Figura 12. Mapa tectónico del Pacífico mexicano.	15
Figura 13. Mapa de evolución tectónica del occidente mexicano.	16
Figura 14. Ubicación de la Cuenca de Guaymas, dentro del Golfo de California.	17
Figura 15. Imagen de batimetría de la Cuenca de Guaymas.	18
Figura 16. Correlación sismo-estratigráfica en sísmica multicanal compilada para la Cuenca de Guaymas.	19
Figura 17. Modelo análogo para la formación de cuencas tipo nodal.	20
Figura 18. Modelo análogo para la formación de cuencas tipo <i>pull-apart</i> .	20
Figura 19. Mapa de ubicación de perforaciones realizadas por Deep See Drilling Project en la Cuenca de Guaymas.	21
Figura 20. Descripción de columnas estratigráficas registradas en los núcleos 478, 479, 480 y 481 obtenidos del DSDP en la Cuenca de Guaymas.	22
Figura 21. Modelo de estructura de velocidades sísmicas a lo largo de la Cuenca de Guaymas.	25
Figura 22. Presencia de evaporitas y diapiros en la Cuenca de Guaymas.	26
Figura 23. Plumitas de burbuja emergiendo desde el lecho marino.	27
Figura 24. Mapa de distribución de sistemas de emanación de fluidos observados en la Cuenca de Guaymas.	27
Figura 25. Versión esquemática propuesta por Gieskes <i>et al.</i> (1979 y 1991) para los sistemas hidrotermales asociados con las sitios 477 y 481 del DSPD.	29
Figura 26. Imágenes de las emanaciones de burbuja en el lecho marino de la Cuenca de Guaymas.	31
Figura 27. Presencia de BSR en la estratigrafía somera de la Cuenca de Guaymas.	32
Figura 28. Esquema de perfil geológico idealizado con exageración vertical de la ladera noreste del escarpe de la Falla de Guaymas.	33
Figura 29. Deslizamientos submarinos como consecuencia de la inestabilidad gravitacional causada por la presencia de hidratos de metano en zonas de talud.	33
Figura 30. Localización de sistemas de emanaciones frías en el lecho de la Cuenca de Guaymas.	34

Figura 31. Esquema de metodología de trabajo planteada para la presente investigación.	36
Figura 32. Ruta de navegación del LEG 2 de la campaña BIG10.	38
Figura 33. Esquema de configuración del ecosonda multihaz EM122.	39
Figura 34. Ilustración del método de localización de plumas de burbuja por medio de imágenes de eco-sonda multihaz EM122.	40
Figura 35. Movimientos de embarcación durante de navegación.	41
Figura 36. Ruta de navegación durante el LEG 2 de la campaña GUAYRIV10.	42
Figura 37. Diagrama de descomposición de un pulso de sonido en un medio acuático	43
Figura 38. Medición de profundidades con métodos hidroacústicos.	44
Figura 39. Cambios de la velocidad del sonido en la columna de agua y su efecto sobre las mediciones batimétricas realizadas por medios acústicos.	44
Figura 40. Sensores empleados durante la campaña GUAYRIV10 para la medición de velocidad de sonido en la columna de agua.	45
Figura 41. Esquema de configuración del ecosonda monohaz EA600.	46
Figura 42. Esquema de configuración del ecosonda multihaz EM300.	47
Figura 43. Esquema de configuración de perfilador de subsuelo TOPAS PS18.	48
Figura 44. Ilustración de los principios de operación del perfilador de subsuelo TOPAS PS18.	49
Figura 45. Sistema de navegación y movimiento Seapath 200.	50
Figura 46. Cobertura de solape entre imágenes acústicas multihaz.	52
Figura 47. Configuración angular y de cobertura para el ecosonda EM122.	53
Figura 48. Composición de imágenes de columna de agua.	53
Figura 49. Datos obtenidos por métodos directos sobre las imágenes acústicas multihaz de la columna de agua.	54
Figura 50. Ilustración de proceso de localización de las plumas de burbuja a partir de las imágenes acústicas multihaz de columna de agua.	55
Figura 51. Ubicación relativa de los 16 perfiles sísmicos analizados.	56
Figura 52. Proceso de integración de datos batimétricos obtenidos en GUAYRIV10 con la base de datos internacionales GMRT (GeoMapApp).	58
Figura 53. Integración de modelos batimétricos de la Cuenca de Guaymas.	60
Figura 54. Unidades morfológicas descritas en la el margen de Sonora y la Cuenca de Guaymas.	61
Figura 55. Plataforma continental del margen de Sonora.	62
Figura 56. Cañón submarino observado en la plataforma continental del margen de Sonora.	63
Figura 57. Unidad morfológica de talud en el margen de Sonora.	64
Figura 58. Modelo de elevación digital en 3D del talud.	64
Figura 59. Unidad morfológica de la cordillera de la Falla de Guaymas.	65
Figura 60. Vistas de los abanicos submarino AST01 y AST02 sobre el pie del talud. ...	65
Figura 61. Unidad morfológica de la Cuenca de Satélite.	66
Figura 62. Unidad morfológica de la Cuenca de Guaymas.	67
Figura 63. Unidad morfológica de la Cuenca Nodal.	68
Figura 64. Unidad morfológica del Rift Norte.	69
Figura 65. Interpretación sismo-estratigráfica de la plataforma continental del margen de Sonora.	70
Figura 66. Deslizamientos por gravedad en la parte marginal de la plataforma continental del margen de Sonora.	71
Figura 67. Sistema de fallas verticales en el interior de la plataforma continental del margen de Sonora.	72

Figura 68. Estructuras de colapso con morfología sinclinal en las localidades SH-01 (izquierda) en el perfil L12 y SH-02 (derecha) en el perfil L01.....	72
Figura 69. Interpretación sismo-estratigráfica de la Cuenca de Guaymas, cortando el Rift Norte.	73
Figura 70. Unidades estratigráficas someras observadas en las secciones sísmicas de la Cuenca de Guaymas.....	74
Figura 71. Turbiditas observados en la región norte de la Cuenca de Guaymas.	74
Figura 72. Secuencia de discontinuidades irregulares verticales en el margen sur del Rift Norte	75
Figura 73. Cuerpo intrusivo II-01 o zona de escape que deforma la secuencia sedimentaria en la Cuenca de Guaymas, fuera del <i>rift</i>	76
Figura 74. Posibles BSR en la Cuenca de Guaymas cercanos a la cordillera.	76
Figura 75. Interpretación sismo-estratigráfica de la cuenca del Rift Norte.	77
Figura 76. Interpretación sismo-estratigráfica de la cuenca nodal.....	78
Figura 77. Delimitación de la cuenca nodal por la terminación del Rift Norte y la Falla de Guaymas.....	79
Figura 78. Interpretación sismo-estratigráfica de la Cuenca Satélite.....	80
Figura 79. Localización de sistemas de plumas de burbujas observados durante la campaña BIG10.	81
Figura 80. Sistemas de plumas de burbuja emanando desde el lecho de la Cuenca de Guaymas, adyacentes a los márgenes del Rift Norte.....	82
Figura 81. Imágenes de reflexión acústica de la columna de agua con plumas de SCG-01 a SCG-05.	83
Figura 82. Localidades de plumas de burbuja emanando del lecho, cercanas a la intersección entre la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora.....	84
Figura 83. Imágenes de reflexión acústica de la columna de agua con sistemas de pluma que emanan del lecho en la zona de interacción entre la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora.	86
Figura 84. Rasgos tectónicos en el lecho marino en la región de la intersección entre el margen de Sonora y la Cuenca de Guaymas, con las localidades de los sistemas de liberación de burbujas.	87
Figura 85. Interpretación tectónica del margen de Sonora con la Cuenca de Guaymas. A partir de la Interpretación de los perfiles de subsuelo de GUYARIV10.	88
Figura 86. Mapa tectónico del Sistema de Falla de Guaymas, en la interacción con el Rift Norte.....	90
Figura 87. Cambios en el estilo estructural del pie de talud.	91
Figura 88. Aparente correlación de cañón submarino observado en la plataforma del margen de Sonora y los flujos del delta del Río Sonora.	92
Figura 89. Abanicos submarinos AST01 y AST02 observados al norte de la Cuenca de Guaymas.....	93
Figura 90. Correlación sismo-estratigráfica somera de la plataforma del margen de Sonora.....	95
Figura 91. Correlación sismo-estratigráfica somera del lecho de la Cuenca de Guaymas.	97
Figura 92. Correlación sismo-estratigráfica somera del lecho del Rift Norte.	99
Figura 93. Mapa de distribución de emanaciones de fluidos en la C. de Guaymas.	100
Figura 94. Respuesta sísmica de emanaciones frías en el lecho de la Cuenca de Guaymas.....	103
Figura 95. Intrusiones de diques y <i>sills</i> en la columna sedimentaria de la Cuenca de Guaymas, como mecanismo de producción de gases hidrocarburos y CO ₂	105

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han descubierto sistemas de emanación de fluidos desde el lecho marino en numerosas regiones del mundo, observándose que en ocasiones estas emanaciones vienen asociadas a hidrocarburos. El estudio de estos procesos de liberación de hidrocarburos resulta fundamental para la ciencia actual, tanto por motivos ecológicos como económicos, haciendo cada vez más necesarios las investigaciones que abarquen estos fenómenos. De estos hidrocarburos, el más frecuente es el metano como producto de la maduración de la materia orgánica y actividad biológica; que al llegar a la atmósfera, incide en la cantidad de los gases de efecto invernadero. La actual carrera mundial en búsqueda de nuevas fuentes de energía, puede hallar una solución a futuro en este tipo de procesos. Sin embargo, aún resta por tener una mejor comprensión de las dinámicas involucradas en la generación de hidrocarburos, en tiempos geológicos instantáneos, así como de las concentraciones en capas sobresaturadas de hidratos de metano. La importancia de los sistemas de emanación de hidrocarburos tiene plena vigencia en el territorio nacional puesto que, dentro de la zona económica mexicana ha sido reportada la presencia de estos sistemas, tanto en el Golfo de México como en el Golfo de California.

El Golfo de California, referido también como Mar de Cortés, se encuentra separando a la península de Baja California de los estados de Sonora y Sinaloa en el occidente mexicano (Figura 1). Esta provincia oceanográfica corresponde al límite tectónico entre la Placa Oceánica del Pacífico y la Placa Continental de Norte América. Dicho límite está definido por el Sistema Transformante del Golfo de California, el cual es parte desde el Sistema de Falla de San Andrés (al norte) hasta la Dorsal del Pacífico Este (*East Pacific Rise*) donde limita con la Placa Oceánica de Rivera (al sur) (e.g., Curry, y otros 1982, Saunders, Fornari y Morrison 1982, Lonsdale 1985, Aragón-Arreola, y otros 2005). Estas características tectónicas, se dieron a conocer a partir del gran interés que generó el establecimiento de la teoría de tectónica de placas, a finales de los años 70, donde ocurriera un auge en la exploración de los fondos oceánicos, y muy en particular del Golfo de California, que por su compleja tectónica representa un laboratorio ideal para el estudio de los procesos geológicos que dan origen a un nuevo océano. Durante este período, se

dio a conocer por primera vez, de forma general, los rasgos morfológicos que definen las áreas sumergidas del Golfo de California, con lo cual se rompió la antigua creencia de que el golfo debía su origen a la erosión causada por el río Colorado (Blatsford 1910), al descubrir una cadena de cuencas sedimentarias alineadas a lo largo de golfo (Byrne and Emery 1960).



Figura 1. Ubicación de la Cuenca de Guaymas, dentro del Golfo de California, México, localizada frente a la Bahía de Guaymas (Sonora) y al norte de la Bahía de Concepción (B.C.S.). Modificado de Ryan et al. (2009).

De estas cuencas, una de las más destacadas y motivo de numerosas investigaciones oceanográficas, es la Cuenca de Guaymas; la cual lleva su nombre por ubicarse frente a la Bahía de Guaymas (Sonora) en la región central del golfo (Figura 1). Esta región geográfica considerada como una cuenca transtensional tectónicamente activa, donde nuevo material magmático está siendo emplazado mediante un sistema de *rift*, integrado por el Rift Norte y Rift Sur, que interrumpen un relieve plano casi horizontal. Esta cuenca limita al NE con el Sistema de Falla de Guaymas, y al SW con la Falla de Carmen. Dentro de esta región del golfo fueron reportadas columnas de burbujas emergiendo del lecho marino en forma de plumas de fluidos ascendentes (Curry, et al. 1982, Merewether, Olsson and Lonsdale 1985, Lonsdale 1989, Kawka and Simoneit 1994,

Lanza-Espino and Soto 1999, Paull, et al. 2007, Lizarralde, Soule, et al. 2010). En general, estos autores sugirieron que tales plumas son la expresión de fluidos y gases, entre ellos hidrocarburos livianos, ascendiendo dentro de la columna de agua. Como consecuencia de la actividad hidrotermal y las emanaciones frías que tienen lugar en esta región, hasta el momento han sido reportados dos sistemas hidrotermales dentro de la Cuenca de Guaymas, y dos sistemas de liberación de burbujas asociados a emanaciones frías en el margen de Sonora y el lecho de la Cuenca de Guaymas.

Esta región del occidente mexicano es conocida a nivel mundial por la gran diversidad biológica que en ella habita, donde los fluidos tanto hidrotermales como de emanaciones frías, proveen nutrientes que son aprovechados no sólo por la mega-fauna marina, sino por comunidades quimiosintéticas que se nutren de estos sistemas, lo que ha despertado el interés científico, de biólogos y de geólogos, para estudiar la influencia en la biodiversidad de estos fluidos (Teske, Hinrichs, et al. 2002, Weber and Jorgensen 2002, Duhaime, Vrijenhoek and Jones 2003, Teske, Dhillon and Sogin 2003).

Pese a la cantidad de información que se ha generado, aún existen muchas interrogantes sobre la geología asociada de esta región. Uno de los vacíos de información se refiere a los márgenes continentales sumergidos del occidente mexicano y la península de Baja California, los cuales han sido poco estudiados en relación a las numerosas publicaciones disponibles de las áreas profundas del golfo, dificultando la construcción de modelos de evolución tectono-estratigráficos de los márgenes. Ante tal carencia, esta tesis ha planteado un levantamiento de datos de reflexión sísmica de alta resolución y batimetría multihaz, a gran detalle de la región nor-oriental de la Cuenca de Guaymas.

En particular, las limitaciones de los estudios de plumas de burbuja en la Cuenca de Guaymas realizadas hasta el momento, impulsan a continuar la exploración de los mecanismos de liberación de fluidos. La mayoría de sus datos fueron obtenidos con sistemas de detección acústicos monohaz de 2.5 a 4 kHz, tanto de arrastre profundo como superficiales, limitando el campo de observación a lo largo de los transectos, por lo que para 1985 sólo habían sido estudiados cerca del 10% de la superficie de los *riffts* y menos del 1% del margen transformante de la falla de Guaymas (Merewether, Olsson and Lonsdale 1985). Para resolver esta incertidumbre, se planteó la utilización de ecosondas de batimetría multihaz de mayor frecuencia (EM-122) que brindan imágenes de

retrodispersión acústicas de la columna de agua dentro del cono de proyección de los haces. La utilización de esta nueva tecnología permite la detección de las plumas de burbujas desde el lecho marino hasta unos 1000 m de elevación, observando en cada muestreo cerca de 3500 m a cada lado del barco.

¿Cuál es la relación existente entre las estructuras geológicas, la sedimentación reciente y la morfología del relieve del lecho marino, con el proceso de filtración de los fluidos hidrotermales y de emanaciones frías en la cuenca transtensional del margen de Sonora de la Cuenca de Guaymas? Esta es la interrogante que deja la revisión de los datos anteriormente señalados, y representa el principal objetivo de esta investigación.

En consecuencia, se analizaron datos geofísicos de dos campañas oceanográficas realizadas en el 2010 que dieron a conocer las relaciones morfológicas, estructurales y litológicas involucradas en los procesos de emanación de fluidos en la región norte de la Cuenca de Guaymas. La primera de ellas bajo el nombre BIG10 a bordo del buque oceanográfico francés NO L'Atalante de IFREMER y la segunda con nombre GUAYRIV10 a bordo del buque oceanográfico BO EL PUMA de la UNAM. Los datos geofísicos que se utilizan para el estudio de la cuenca y del margen de Sonora son batimetría multihaz, imágenes acústicas multihaz de la columna de agua y perfiles de reflexión sísmica de alta resolución.

2. ANTECEDENTES

La oceanografía es una ciencia relativamente joven; sin embargo, la curiosidad de estudiar los fondos marinos es tan antigua como la humanidad misma. El desarrollo de la industria militar, posterior a la primera guerra mundial, permitió la construcción de las herramientas e infraestructura necesarias para el desarrollo de las investigaciones oceanográficas. Los estudios en el Golfo de California tienen una historia muy antigua, de hecho es reconocido como el primer lugar del Pacífico oriental, en ser explorado por los colonos europeos en 1532 (Byrne and Emery 1960). No obstante, los estudios científicos no empezarían hasta 1822, con la incursión de los buques británicos HMS *Blosson* y HMS *Sulfur*, para realizar estudios hidrográficos y biológicos a lo largo de la costa mexicana (Schwartzlose and Alvarez-Borrego 2002). Es hasta mediados de 1939, cuando el científico alemán Grenwingk, realiza las primeras publicaciones de geología marina, al realizar descripciones geológicas de las islas del Golfo de California (Grenwingk 1848).

A finales de los años 60's e inicios de los 70's, ocurre un auge en los estudios de geología marina en todo el mundo, a raíz del desarrollo de los conceptos de tectónica de placas, una muestra de ello son las numerosas investigaciones realizadas en el Golfo de California (e.g., Phillips 1964, Shepard 1964, Harrison and Mathur 1964, Phillips 1968, Chase, et al. 1970). Conforme se divulgaban los resultados de los estudios regionales, aumento el interés de la comunidad científica especializada en realizar este tipo de estudios especializados, siendo la Cuenca de Guaymas una de las regiones más estudiada (e.g., Lonsdale, Bischoff, et al. 1980, Curray, et al. 1982, Merewether, Olsson and Lonsdale 1985, Lonsdale 1985, Morandi, et al. 2002, Aragón-Arreola, et al. 2005, Paull, et al. 2007, Lizarralde, Soule, et al. 2010).

2.1. GOLFO DE CALIFORNIA

El Golfo de California se ubica en la costa este del Océano Pacífico, siendo una extensión de mar que divide la Península de Baja California de la región continental de México (estados de Sonora y Sinaloa). Este golfo es también conocido en la bibliografía como Mar de Cortés, por ser el conquistador Hernán Cortés. También se consigue en la literatura referencias de esta región como Mar Bermejo (*Sea Vermilion* en inglés), por las tonalidades rojizas de los florecimientos de algas (Nix 2004).

2.1.1. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

Este golfo es una extensión larga y angosta del Océano Pacífico (Figura 2), con 1126 km de longitud, y un ancho que varía entre 48 a 241 km, con un área total de 177,000 km². Es una cuenca semi-cerrada, con línea de costa irregular que define a ambos márgenes un conjunto de bahías estrechas. La parte norte del golfo, comúnmente referida como “cabecera”, es dominada por la afluencia del delta del Río Colorado, que se extiende hasta 32 km mar adentro, generando una batimetría somera en esta región (con profundidad promedio de 18 m). La costa este se encuentra bordeada por colinas, las cuales se ven interrumpidas por numerosos drenajes, entre los que destacan los ríos Sonora, Yaqui y Fuerte; mientras que la costa oeste está definida por el relieve escarpado la península de Baja California.

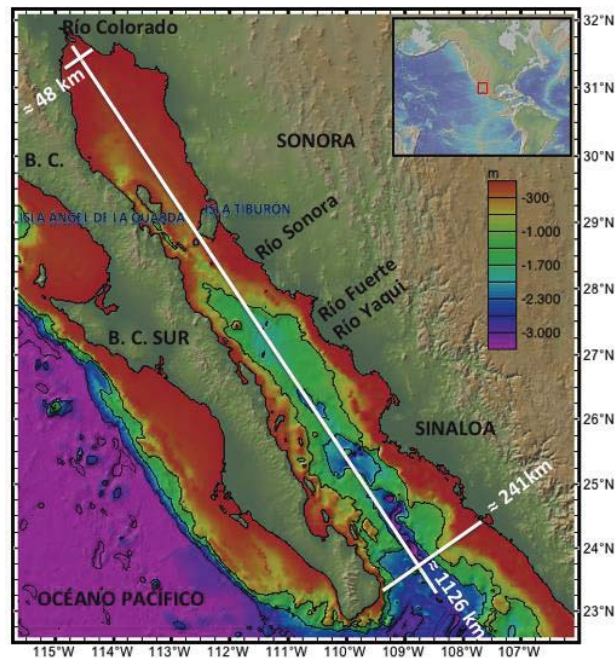


Figura 2. Descripción física del Golfo de California. Presenta una batimetría creciente hacia el sur que va desde los 18 m en el delta del Río Colorado, hasta una profundidad superior a los 3000 m en la boca (Modificado de GeoMapApp).

La batimetría general del Golfo de California (Figura 3) presenta una plataforma continental angosta a lo largo de la costa este (≈ 50 km de ancho), interrumpida en un talud a una profundidad cercanas a 110 m (Lonsdale 1989). Mientras que en la costa oeste observamos pendientes abruptas en los márgenes de la península. El fondo profundo de este estrecho mar consta de una serie de cuencas, las cuales se profundizan hacia el sur, en la región conocida como “boca del golfo”.

2.1. Golfo de California

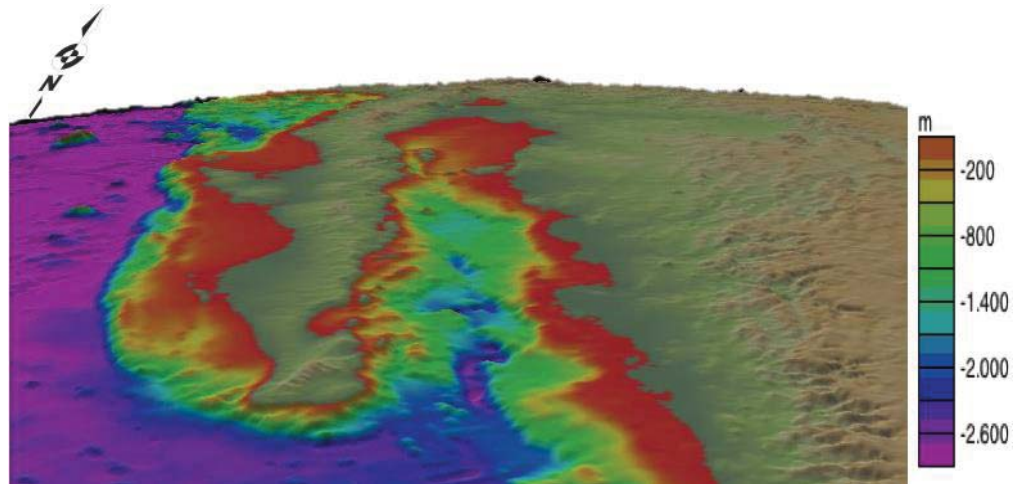


Figura 3. Modelo digital de elevación del Golfo de California. Donde a escala de colores discontinuos, se observa a color rojo las profundidades inferiores a los 200 m que de forma generalizada corresponde a la plataforma continental en el margen este del golfo. Mientras que en el margen oeste se observa el relieve abrupto con pendientes pronunciadas. (Ryan and et al. 2009).

Durante la evolución tectónica que dio origen a este golfo quedaron como remanentes en el margen oriental un conjunto de cuencas transtensivas (Waldron 2005) que fueron abortadas conforme migró la deformación en la región (Bischoff and Hanyey 1974), estas son: Eastern Mesa, Altar, Adair-Tepoca, Tiburón y Yaqui (Figura 4). Por su parte, en la zona central y margen occidental, se observan una serie de cuencas, clasificado como activas por aun presentar actividad tectónica y encontrarse en etapas de expansión; identificadas como: Saltón, Cerro Prieto, Laguna Salada, Wegner, Delfin, Guaymas, Carmen y Farallón.

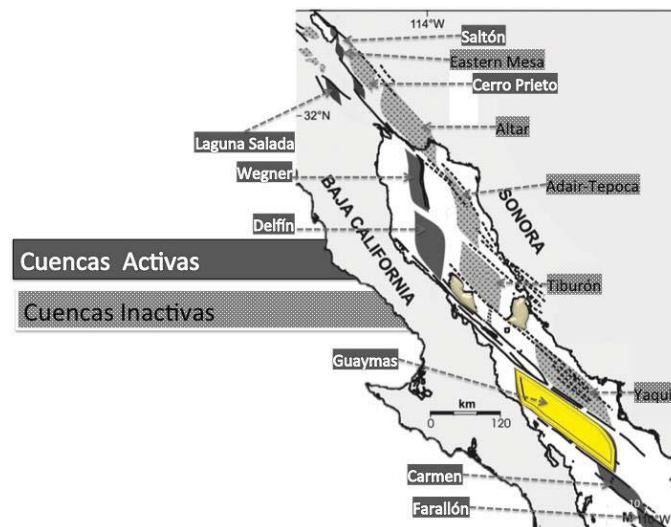


Figura 4. Mapa de ubicación de las principales cuencas dentro del Golfo de California. ■ Cuenca de Guaymas (Activa), ■ Cuencas Activas, ■ Cuencas Inactivas, ■ Islas de Tiburón y Ángel de la Guarda. (Modificada de Bischoff & Hanyey 1974)

2.1. Golfo de California

Así mismo, el Golfo de California en su interior presenta una serie de accidentes topográficos (Figura 4), de los cuales algunos logran emerger; entre estos destacan las islas: Tiburón, Ángel de La Guarda, Tortuga, San Pedro Mártir, San Lorenzo, San Esteban, San Marcos, Pedro Nolasco, Santa Cruz, San José, Carmen, Santa Catalina, Monserrat, Cerralvo, entre otros (e.g., Gastil, et al. 1999, Delgado Argote 2000, Ryan and et al. 2009). Como respuesta de la actividad magmática asociada a los centros de expansión y zonas de fractura, en el margen oeste de la Península de Baja California se tienen el volcán emergido de la Isla Tortuga, así como las islas San Luis y San Esteban (Batiza 1978).

El Golfo puede ser dividido en dos grandes regiones con fisiografías contrastantes, donde las islas Tiburón y Ángel de la Guarda (Figura 2) dividen en norte y sur. La región norte, está caracterizada por una batimetría general somera (Figura 3); las cuencas están rellenas por paquetes sedimentarios de grandes espesores que cubren los escasos afloramientos ígneos, con una topografía suavizada de escasos rasgos tectónicos. La gravimetría en esta región tiene amplias anomalías alargadas de baja frecuencia y baja magnitud, que reafirman la presencia de grandes espesores de sedimentos (Morandi, et al. 2002). La corteza continental en su parte central está adelgazada (aproximadamente 10 y 17 km) y en algunas partes está siendo parcialmente reemplazada por intrusiones máficas (Fuis and Kohler 1984, Núñez-Cornú, et al. 1996, Frez, et al. 2000).

En la región sur, la corteza continental se va adelgazando a medida que avanza a la boca del golfo y evolucionando de esta forma a una corteza totalmente oceánica (Lonsdale and Lawver 1980, Lizarralde, Axen, et al. 2011). La deformación está definida principalmente por fallas transformantes y centros de esparcimiento oceánico (Bischoff and Hanyey 1974, Lonsdale 1989). La magnetometría del subsuelo marino muestra anomalías localizadas y alargadas que sugieren intrusiones máficas poco profundas (Morandi, et al. 2002), pese a la tasa de sedimentación tan abundante que enmascara los rasgos magnéticos (Larson 1972, Kongsberg 2007).

2.1.2. FACTORES AMBIENTALES

El Golfo de California por tener casi 10° de longitud, presenta variabilidad climática en función de las regiones geográficas abarcadas. Según las clasificaciones Köppen-Geiger (Köppen 1936), la región norte del golfo está caracterizado por un clima desértico (BWh), el cual pasa progresivamente de un clima de estepa seca (BSshv) a templado (Cw) en la región central; para continuar con sabana tropical (Aw) en ambos márgenes de la región sur de la salida del golfo (Byrne and Emery 1960).

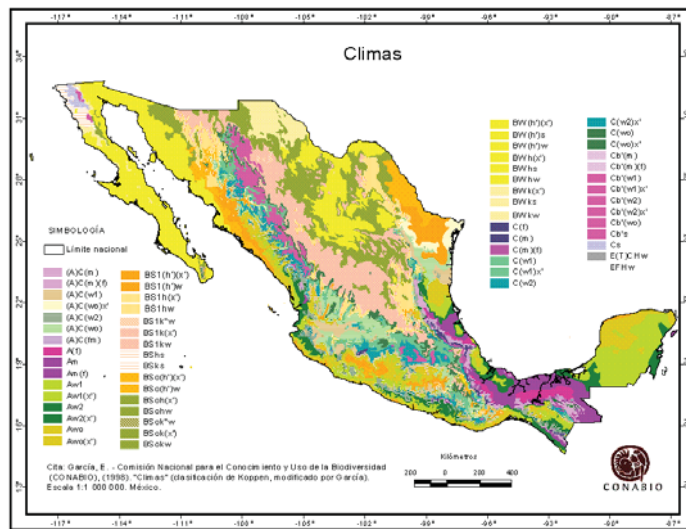


Figura 5. Mapa de distribución climática en el territorio mexicano a escala original 1:1.000.000. Con un dominio de climas desértico (BW) a estepa seca (BS) para la región del Golfo de California. (García 1998)

En función de estas características ambientales, y datos oceanográficos, investigaciones regionales definen que las temperaturas en la región sur promedian entre los 20 y 28 °C, haciéndose más extremas hacia el norte, adquiriendo un rango entre 14 y 31 °C (Wilson 1955, Roden 1958, Byrne and Emery 1960). Así mismo, las precipitaciones pueden alcanzar los 850 mm en el estado Sonora, estando limitadas a temporadas de invierno en la región norte y verano al sur. El promedio anual de precipitaciones favorece a los estados de Sonora y Sinaloa respecto a la península, en una relación de 300 mm / 120 mm. Los vientos son de baja velocidad (aprox. 5.4 a 21.6 km/h), en dirección hacia el NW a lo largo del golfo durante los meses de invierno, y hacia el SE durante el verano. Con presencia ocasional de tormentas en invierno, alcanzando velocidades de hasta 108 km/h; y huracanes provenientes del SE, con velocidades superiores a los 162 km/h, durante otoño (Byrne and Emery 1960).

2.1. Golfo de California

Los estudios geostroficados (Figura 6) sugieren que durante el invierno la circulación oceánica es hacia el SE debido al descenso de temperaturas en el cabecera, liberando las aguas hacia el océano Pacífico. Ésta se invierte durante el verano al aumentar la temperatura en la región norte (Sverdrup 1940, Byrne and Emery 1960, Hubbs and Rodden 1964, Rosas Cota 1977, Bray and Robles 1991, Lavín, Gaxiola-Castro and Robles 1995). Estos autores, señalan que los vientos son los responsables de la circulación superficial dentro del golfo (Hubbs and Rodden 1964). Por su parte, en función de las características observadas a una profundidad de 200 m, y conociendo que la misma disminuye conforme aumenta la profundidad (Rosas Cota 1977), se infiere que la velocidad de las corrientes del golfo es mayor durante el verano. Siendo ésta de 1.26 km/h en superficie, y de 0.53 km/h a 200 m de profundidad; mientras que en invierno la velocidad superficial fue menor a 1 km/h, y a nivel de 200 m de 0.35 km/h.

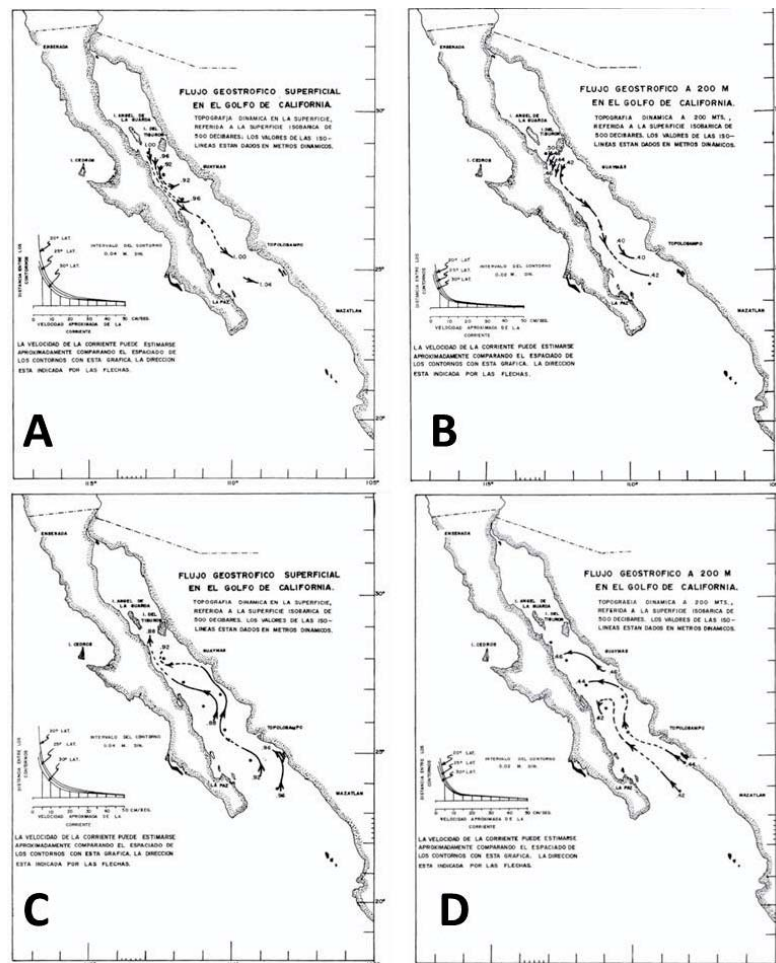


Figura 6. Flujo geostrofico superficial y a 200m de profundidad, en el Golfo de California durante los meses de invierno y verano de 1965. (A) Flujo superficial durante verano. (B) Flujo a 200m durante verano. (C) Flujo Superficial durante invierno. (D) Flujo a 200m invierno. (Rosas Cota 1977).

2.1. Golfo de California

En una sección vertical de temperatura y salinidad del golfo (Figura 7), se observa la estratificación cercana a los 150 m. En ella, el descenso de las isohalinas en la cabecera indica la producción local de aguas híper-salinas, producto de la alta tasa de evaporación presente en estas zonas someras (Byrne and Emery 1960), mientras que el ascenso observado en la zona central, indica una surgencia local de masas de agua profundas, a medida que las masas superficiales son desplazadas por el efecto del viento (Sverdrup 1940, U. S. Navy Hydrographic Office 1951). El agua que queda atrapada en las cuencas profundas permanece en ellas hasta iniciar la temporada de mezcla con las masas superficiales; periodo durante el cual pudiese presentar estado de anoxia (Byrne and Emery 1960).

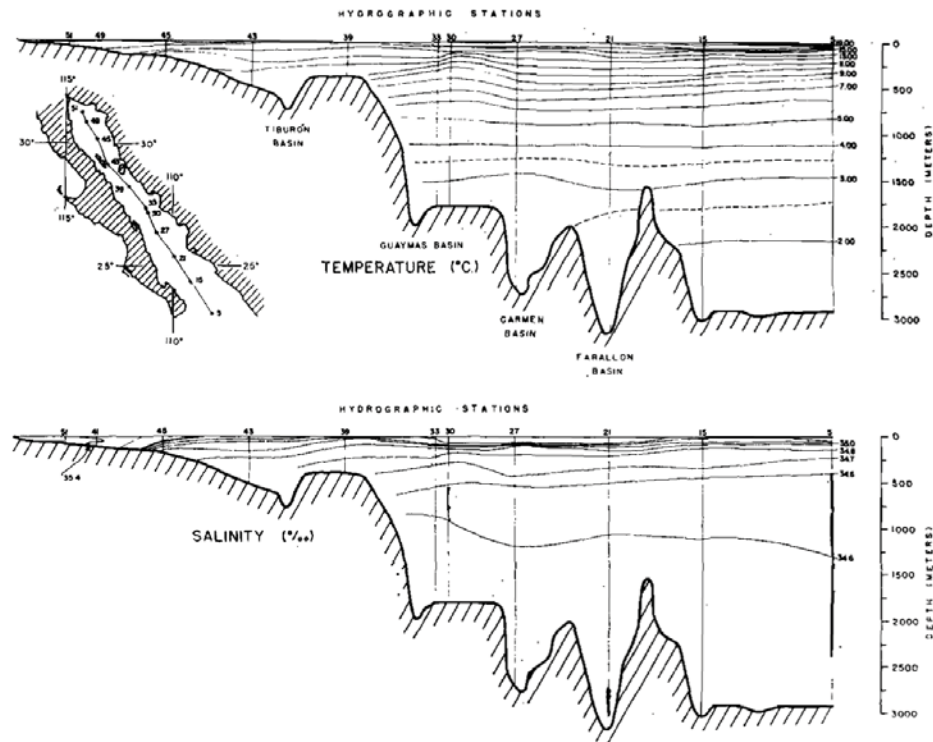


Figura 7. Perfiles verticales de temperatura y salinidad en dirección longitudinal del Golfo de California. Observados durante cuatro cruceros efectuados en 1957 (Byrne and Emery 1960).

Dada la geometría estrecha y la latitud a la que se ubica el Golfo, resulta susceptible a efectos de marea. Este fenómeno varía notablemente en función de las regiones internas del golfo. Es así como en la región norte se registran valores máximos que puede alcanzar los 400 cm (Figura 8). Disminuyendo hacia sureste, donde adquiere valores promedio de 2.2 m en Guaymas y 0.7 m en Mazatlán (U. S. Navy Hydrographic Office 1951, Servicio Mareográfico Nacional 2012).

2.1. Golfo de California

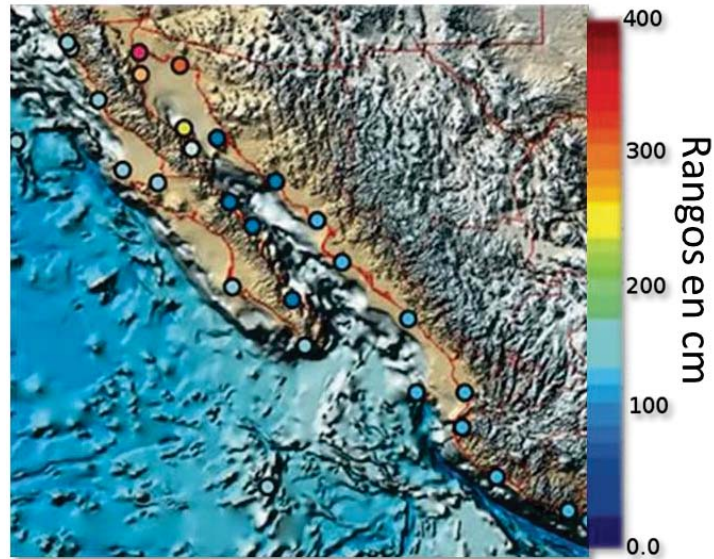


Figura 8. Mapa de distribución promedios variaciones de nivel del mar por efecto de marea. Variabilidad de mareas en el Golfo de California, que va desde 1m al sur hasta 4m en la cabecera.

Los sedimentos terrígenos que se depositan en las depresiones del golfo tienen como fuente principal el Río Colorado (Figura 9) por lo caudaloso de sus aguas y la gran carga de partículas que lleva consigo (Byrne and Emery 1960, Lonsdale 1989, Carranza, et al. 1990). Sin embargo éste solo domina en la región norte, donde se desarrolla su delta, puesto que al sur del obstáculo que representan las islas Tiburón y Ángel de La Guarda, la principal fuente de sedimentos viene dada por los ríos que drenan desde Sonora y Sinaloa. Dejando en tercer lugar los sedimentos que provienen de la Península de Baja California.



Figura 9. Principales fuentes de sedimentos en el Golfo de California. (Byrne and Emery 1960, Lonsdale 1989, Carranza, et al. 1990). Imagen de Google Earth.

2.1. Golfo de California

Las zonas de surgencia referidas anteriormente, favorecen el florecimiento de grandes volúmenes de plancton a lo largo del Golfo de California (Ryan and et al. 2009), tal como se observa en el mapa de distribución de clorofila del territorio mexicano (Figura 6). Este plancton al parecer desciende al lecho marino, conservando en muchos casos su exoesqueleto, lo cual representa un gran aporte de detritos pelágicos y materia orgánica. Las frústulas silíceas de las diatomeas que componen al menos la mitad de los sedimentos acumulados en las cuencas de Guaymas y San Pedro Mártir, representan así la cuarta fuente de sedimentos más importantes de la región.

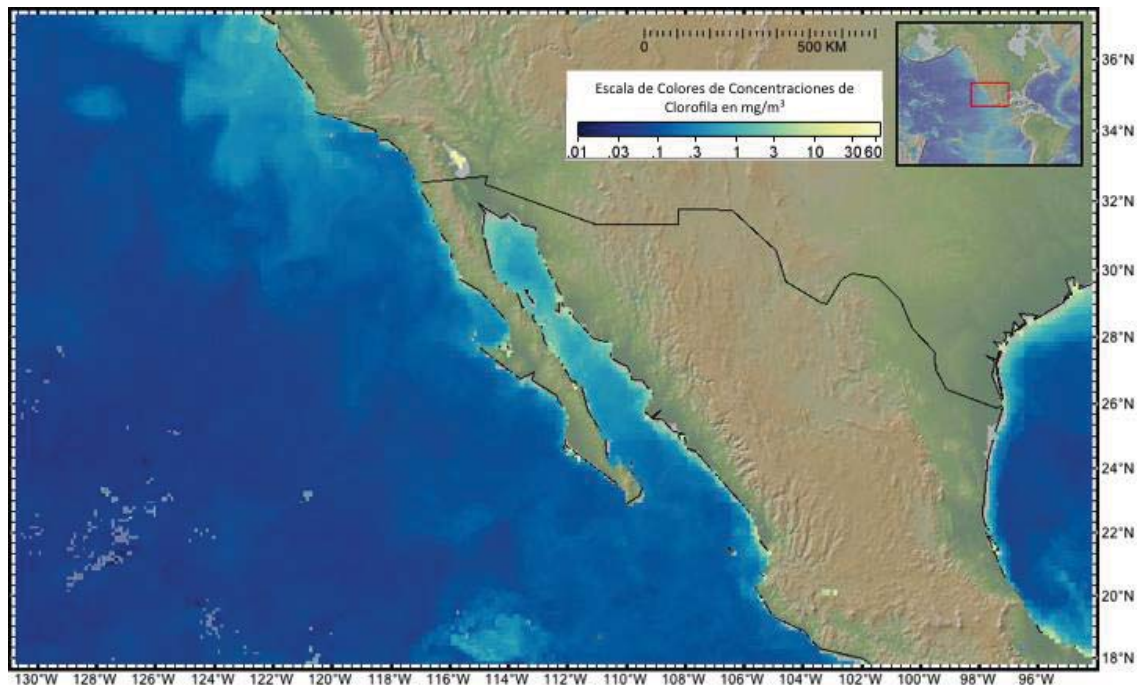


Figura 10. Mapa de distribución de Clorofila en territorio mexicano. Con concentraciones promedio superiores a los 10 mg/m^3 en el Golfo, y valores máximos de 30 mg/m^3 que definen sus aguas como ricas en nutrientes con presencia de zonas de surgencia en la costa este.

Finalmente, y en menor proporción tenemos a todas aquellas fuentes de sedimentos autógenos presentes en la región (Byrne and Emery 1960, Lonsdale 1989). Entre ellas tenemos los precipitados minerales producto de la actividad volcánica de los *rift*. Así mismo, asociado a la actividad de emanación hidrotermal y de emanaciones frías, produce una precipitación de carbonato autógenos característicos de estos sistemas. Sin embargo, lo puntual y localizado de estos sistemas, hace que el volumen de estos complejos represente un aporte minoritario.

2.1.3. MARCO GEODINÁMICO

El margen este del Océano Pacífico presenta una compleja actividad tectónica, en especial en la región occidental mexicana. A partir de los mapas de distribución de sismos (Figura 11) se evidencia una intensa actividad tectónica (Ryan and et al. 2009). Los sismos más profundos y de magnitud promedio superior a 7, se alinean por todo Centro América desde las costas de Jalisco (México) hasta el Pacífico panameño; indicando la presencia de un margen convergente en esta región. Por su parte, en el interior del Golfo de California, destaca una alineación de sismos poco profundos y de magnitudes promedio cercanas a 5, que sugieren la presencia de un margen transformante que se extiende desde el Sistema de Falla de San Andrés en los Estados Unidos hasta la boca del golfo (Lonsdale 1989, Bartolomé de la Peña 2002).

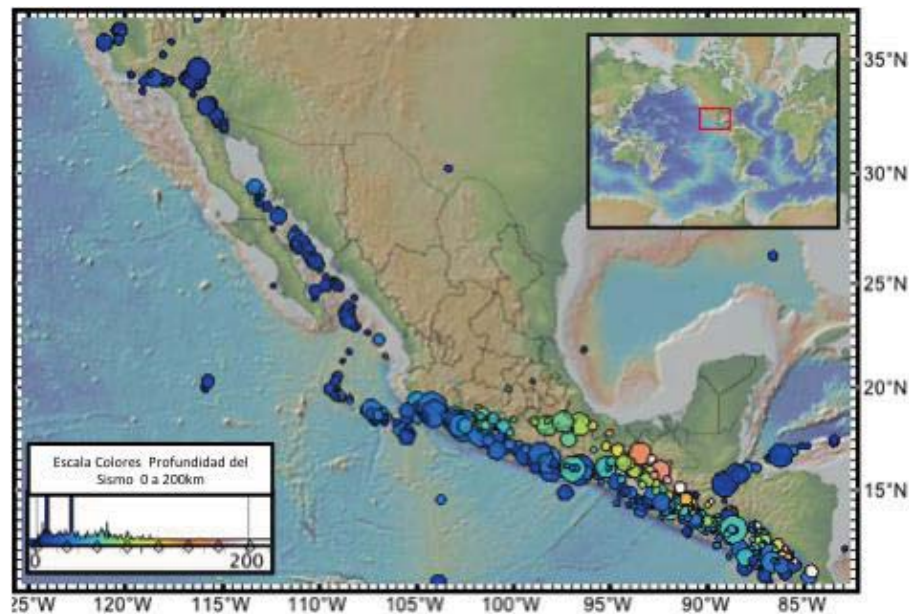


Figura 11. Mapa de distribución de los sismos de magnitud superior a 5, registrados entre 1973 y 2009. Escala de magnitud de los sismos directamente proporcional al área de los círculos, valores entre 5 y 9 de magnitud. Escala de colores correspondiente a la profundidad del hipocentro del sismo. (GeoMapApp, base de datos USGS)

La tectónica del oeste mexicano (Figura 12) está definida al norte por un margen transformante dextral asociado a un conjunto de zonas de expansión, referido como Sistema Transtensional del Golfo de California. Éste sirve de límite entre la Placa Oceánica del Pacífico y la Placa Continental Norteamericana, entre los 32° N y los 23° N. Por su parte, al oeste del Golfo, se localiza la península de Baja California, y al oeste de ella un paleo-margen convergente cuya actividad cesó aproximadamente hace 10 Ma, y

2.1. Golfo de California

representaba una subducción entre las placas Farallón y Norteamérica (Lonsdale 1989, Bartolomé de la Peña 2002). En el extremo meridional del Golfo, el rasgo estructural más notable es la Falla Transformante de Tamayo, de 70 km de longitud, que conecta hacia el sur con la zona de acreción oceánica de la dorsal Pacífico-Rivera (Lonsdale 1989).

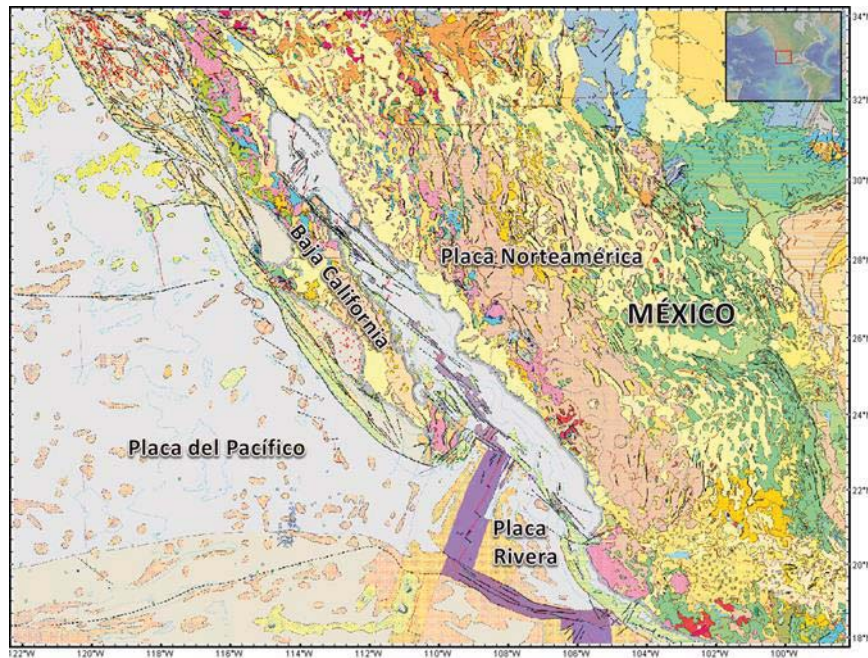


Figura 12. Mapa tectónico del Pacífico mexicano. Situación geodinámica del Golfo de California, enmarcado en el límite de la Placa Oceánica del Pacífico y la Placa Continental Norteamericana. (Bartolomé de la Peña 2002)

2.1.4. EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL GOLFO DE CALIFORNIA

Las teorías sobre el origen del Golfo de California han evolucionado con el paso de los años, conforme se fueron generando nuevos conocimientos y nuevas tecnologías. Una de las primeras referencias al respecto es de 1919, cuando señalan que este golfo debe su origen a la erosión causada por el Río Colorado (Blatsford 1910). No fue hasta que se conociera la batimetría general del golfo que se pudiera descartar esta teoría. A partir de los datos modernos, se ha propuesto que el inicio del proceso de *rifting* que da origen a la cuenca del golfo ocurre a partir de la sutura entre las placas de Norteamérica y del Pacífico, a lo largo del margen del bloque continental de Baja California hace 12.3 Ma (Figura 13) cuando cesa la subducción de la Placa oceánica Guadalupe bajo el bloque de la Península de Baja California que formaba parte de la Placa de Norteamérica (Morandi, et al. 2002, Fletcher, et al. 2007).

2.2. Cuenca de Guaymas

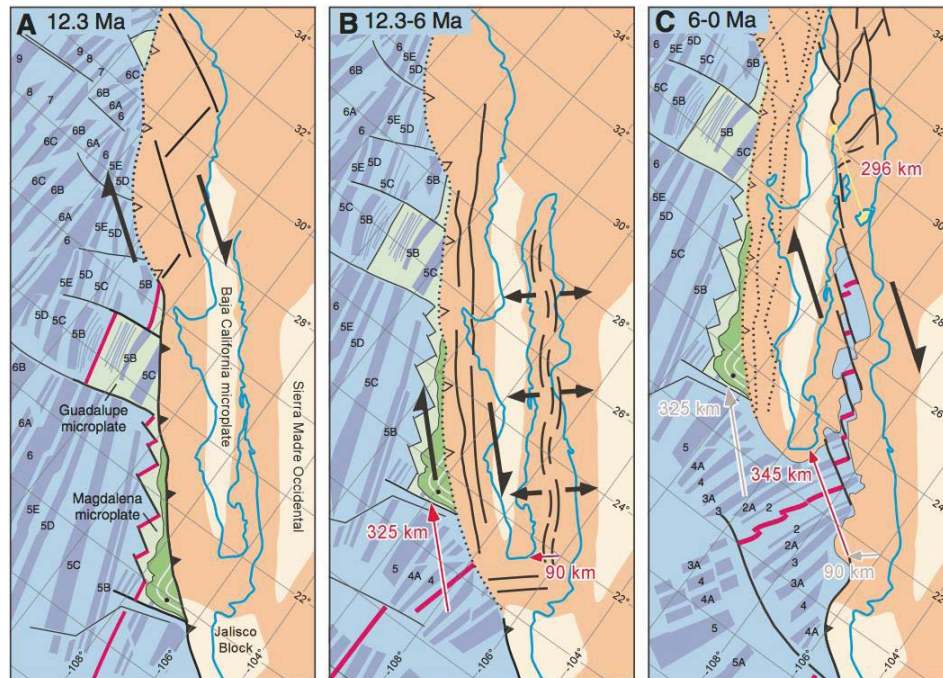


Figura 13. Mapa de evolución tectónica del occidente mexicano. (A) Configuración de segmentos de dorsales activas (rosa) en la costa oeste de Baja California, antes de ser abortadas hace 12.3 Ma. (B) Movimiento de las placas entre los 12.3 a 6 Ma, el cual fue particionado a un movimiento de deslizamiento dextral en sistemas de fallas a lo largo del Oeste de Baja California, y un *rifting* ortogonal en el interior del Golfo, en la etapa conocida como porto-golfo. (C) Periodo de 6 Ma a la configuración actual, donde el oeste de Baja California parece haber cesado el movimiento, y la deformación parece haberse concentrado en el interior del Golfo mediante un mecanismo transtensional. (Fletcher, et al. 2007).

Durante el período 12.3 a 6 Ma (Figura 13), los graduales cambios relativos del movimiento entre ambas placas, causaron que los ejes de esparcimiento se fueran acomodando ortogonalmente al movimiento de cizalla, generando así un sistema transtensional en la parte interior del golfo (Angelier, et al. 1981, Atwater 1989, Morandi, et al. 2002, Waldron 2005). Esto produjo una partición tectónica en el interior del golfo, de modo *rifting*, y las estructura de los márgenes, principalmente por fallas transcurrentes (Spencer and Normark 1979).

Más tarde, aproximadamente a 6 Ma (Figura 13), el vector de movimiento entre los bloques continentales de la Placa del Pacífico y la Placa Norteamericana, rotó ligeramente y promovió el establecimiento de cuencas *pull apart* ligadas a la deformación de sendas fallas transformantes (Morandi, et al. 2002, Fletcher, et al. 2007). La aceleración de la separación cortical, permite que las cuencas del sur evolucionen a centros de esparcimiento oceánico, mientras al norte se presente una etapa *pre-rift* (Lonsdale 1989, Sturz, et al. 1996).

2.2. CUENCA DE GUAYMAS

La Cuenca de Guaymas se ubica en la zona central del golfo frente a las costas Guaymas (Sonora), con profundidades que van desde los 1,300 hasta los 2,030 m. El desarrollo de esta investigación se dedicó a abarcar un área de 2,230 km², del margen nor-oriental de la Cuenca de Guaymas, tal como se indica en el recuadro rojo de la Figura 14, que se extiende desde el límite inferior del margen de Sonora (latitud 27°45'N), hasta la parte central del Rift Norte (latitud 27° N); entre los meridianos 111°15' W y 111°40' W.

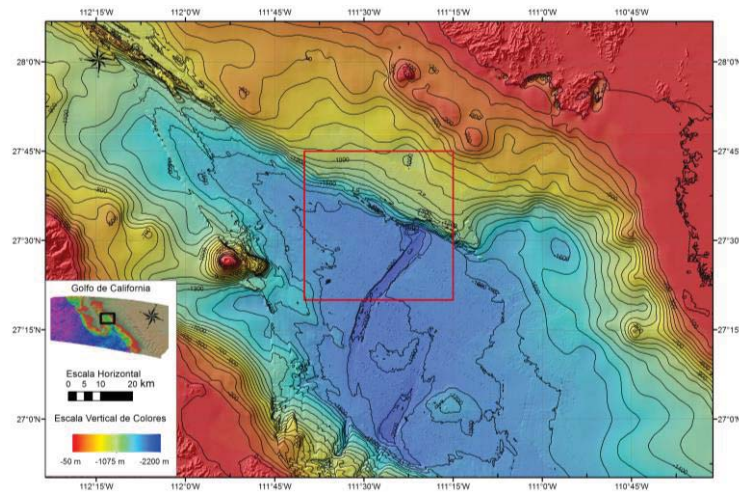


Figura 14. Ubicación de la Cuenca de Guaymas, dentro del Golfo de California, México.

2.2.1. CARACTERÍSTICAS MORFO-TECTÓNICAS

Esta cuenca presenta una extensión de aproximadamente 240 km de largo y 60 km de ancho (Figura 15a) (Kastner 1982), quedando definida por dos segmentos cortos de *rifting*, limitada al sur por una falla transformante relativamente corta identificada como Falla del Carmen, y flanqueada al norte por una transformada de mayor longitud, referida como Sistema de Falla de Guaymas (Lonsdale 1989). Ambas corresponden al límite entre las placas del Pacífico y Norte América (Figura 15) (Lonsdale 1989, Aragón-Arreola, et al. 2005). El Sistema de Falla de Guaymas, exhibe una longitud de casi 325 km que forma el límite entre la Cuenca de Guaymas y las cuencas de Delfín, Yaqui y la plataforma del margen de Sonora (Lonsdale 1989). Mientras que al suroeste la Fallad el Carmen define el límite con el margen de Baja California y la Cuenca de Carmen (Figura15b) (Aragón-Arreola, et al. 2005).

2.2. Cuenca de Guaymas

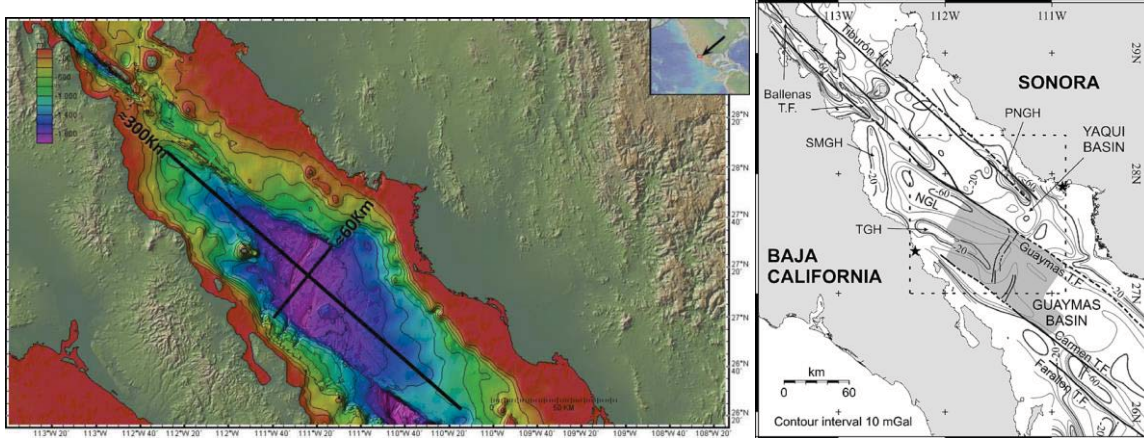


Figura 15. Imagen de batimetría de la Cuenca de Guaymas. Esta cuenca presenta una extensión cercana a los 300 km de largo por 60 km de ancho. Modificado de Ryan *et al.* (2009)

Sobre la plataforma del margen de Sonora (Figura 16) son identificadas un conjunto de fallas con orientación preferente N50°W (Curry, *et al.* 1982, Aragón-Arreola, *et al.* 2005, Lizarralde, Soule, *et al.* 2010), de las cuales el Sistema de Pedro Nolasco llega a aflorar, mientras que la Falla de Yaqui se ve cubierta por sedimentos recientes. Entre esta última y el Sistema de Falla de Guaymas, se reportan un conjunto de fallas a profundidad que no deforman la secuencia sedimentaria del Cuaternario Tardío, sugiriendo así una mega estructura de flor negativa entre este conjunto de fallas (Lonsdale 1989, Aragón-Arreola, *et al.* 2005).

El Sistema de Falla de Guaymas, exhibe una expresión morfológica de cordillera, para la cual se ha propuesto la teoría de que corresponde a efecto de levantamiento, cizalla y probable serpentización de corteza oceánica (Lonsdale 1989). La altura de esta cordillera se incrementa conforme se aleja del eje de esparcimiento, siendo apreciable a partir de 5 km de este eje, sugiriendo incluso la existencia de pliegues estrechos a lo largo de la cresta de esta cordillera (Lonsdale 1989).

Cerca del centro de la Cuenca de Guaymas, se encuentra un par de *graben* referidos como Rift Norte y Rift Sur (e.g., Lawver, y otros 1973, Curry, y otros 1982, Lonsdale 1989). (Figura 14). Estos tienen entre 3 y 4 km de ancho, con profundidades de menos 200 m, exhibiendo una geometría semicircular sobrepuesta, con desviación convergente de sus extremos, tal como ocurre en zonas no-transformantes en las dorsales oceánicas, conocida como *overlapping* (Aragón-Arreola, *et al.* 2005). Inmersiones en sumergibles corroboraron que las paredes de este surco, corresponden a escarpes de fallas activas que exponen las secuencias de lodos hemipelágicos (Lonsdale 1989).

2.2. Cuenca de Guaymas

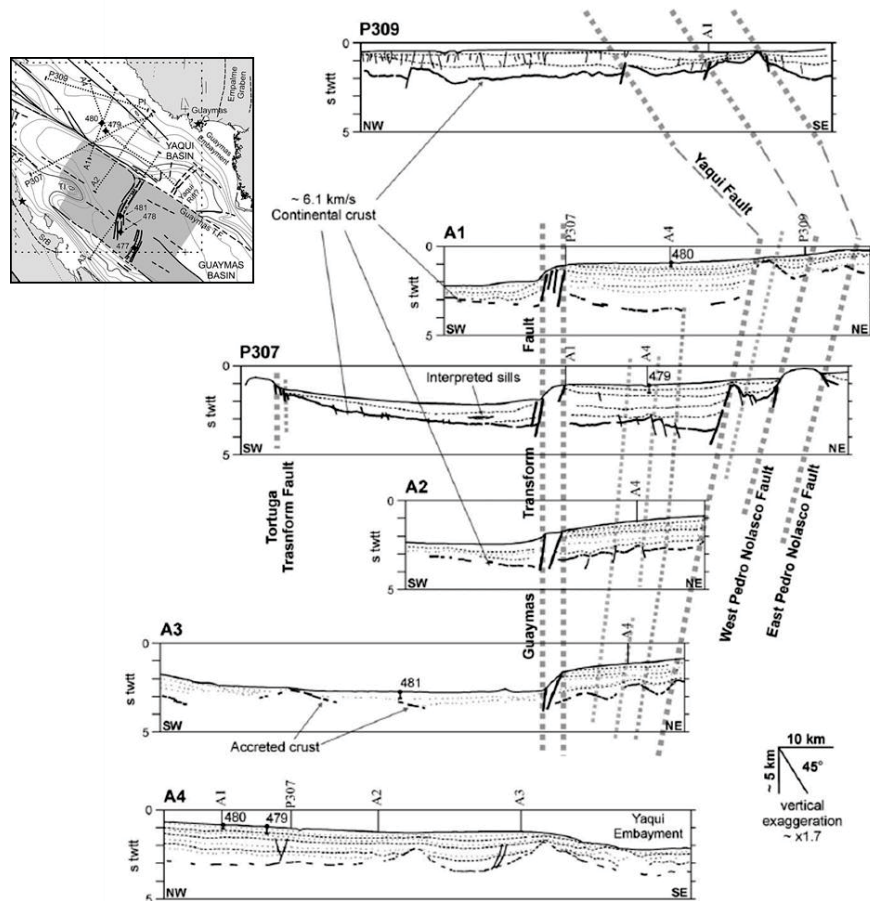


Figura 16 Correlación sismo-estratigráfica en sísmica multicanal compilada para la Cuenca de Guaymas. Perfiles A1 a A4 tomados de Albertin (1989). Perfiles 307 y 309 de Lizarralde et al (2007). Las líneas punteadas señalan la importancia y correlación de cada falla en la región. (Aragón-Arreola, et al. 2005)

En el límite del Rift Norte con el Sistema de Falla Transformada de Guaymas, en el ángulo interno, se produce una depresión que cambia la morfología del *rift* alargándola hacia el norte, lo que Lonsdale define como una cuenca de interacción (Figura 17) (Lonsdale 1985). Los modelos tectónicos actuales se refieren a aquellas cuencas transtensionales, en la interacción de límites divergentes de *rifting* con fallas transformadas, como cuencas de tipo nodal (Karson, et al. 1984, Basile and Brun 1999). Este tipo de cuenca ha sido descrito en localidades como la cordillera meso-atlántica en el área "Famous" en la Cordillera de Caimán, El Rift de Galápagos, La Dorsal del Pacífico este en 21°N, entre otros (Karson, et al. 1984).

2.2. Cuenca de Guaymas

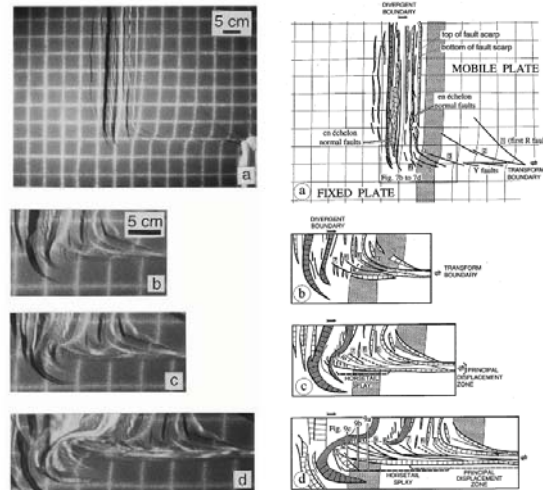


Figura 17. Modelo analógico para la formación de cuencas tipo nodal. En la interacción de ejes de espargimiento oceánico con sistema transformantes. (Basile and Brun 1999).

Por su parte, en el margen de Sonora de esta cuenca, dentro del Sistema de Falla de Guaymas, tiene lugar una estrecha cuenca de origen *pull-apart*, a la que se han referido como Cuenca de Satélite (Paull, et al. 2007). Exhibe una geometría romboidal, y una superficie aparentemente muy regular que sugieren altas tasas de sedimentación, concordante con los modelos tectónicos de cuencas *pull-apart* (Figura 18) (Basile and Brun 1999, Gúrbüz 2010).

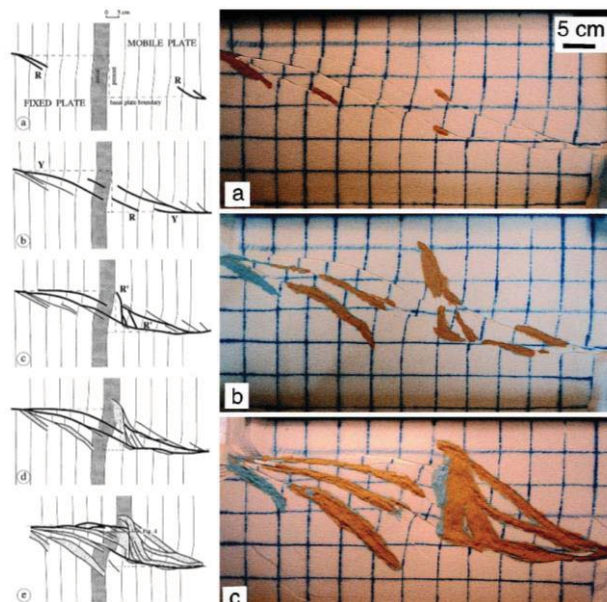


Figura 18. Modelo analógico para la formación de cuencas tipo *pull-apart*. Cuencas de transtensión ubicadas en la interacción sistema transformantes. (Basile and Brun 1999).

2.2. Cuenca de Guaymas

2.2.2. ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

Esta región del Golfo de California cuenta con numerosas investigaciones a lo largo del tiempo; sin embargo, son escasas las que aporten información acerca de la estratigrafía de la región. La sísmica de reflexión monocanal fue la herramienta fundamental a inicios de las investigaciones (Lonsdale and Lawver 1980, Simoneit, Lonsdale and Edmond 1990, Curray, et al. 1982). Hoy en día se cuenta con algunos datos de sísmica multicanal (Morandi, et al. 2002, Aragón-Arreola, et al. 2005, Paull, et al. 2007, Lizarralde, Soule, et al. 2010, Miller and Lizarralde 2012), anomalías magnéticas (Larson 1972), 5 perforaciones de núcleos de perforaciones profundas (Figura 19) (Curray, et al. 1982), así como datos de observaciones superficiales realizadas en inmersiones con AUV y ROV (Lonsdale 1985, Lanza-Espino and Soto 1999, Paull, et al. 2007).

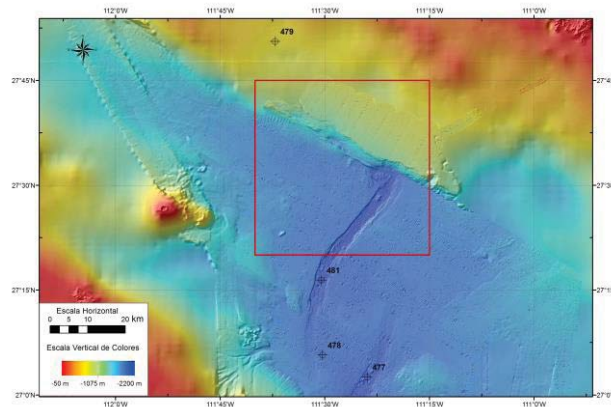


Figura 19. Mapa de ubicación de perforaciones realizadas por Deep See Drilling Project en la Cuenca de Guaymas. Localización de las perforaciones 477, 478, 479, 480 y 481; en relación a la ubicación del área de estudio.

De las perforaciones realizadas durante el Leg 64 del *Deep See Drilling Project* (Figura 19 y 20) (Curray, et al. 1982) dos de ellas se ubican sobre la plataforma del margen de Sonora (perforaciones 479 y 480), una sobre el eje del Rift Norte (perforación 478), una al sur de la Cuenca de Guaymas en la zona de solape entre ambos *rift* (perforación 481), y finalmente una en el eje del Rift Sur (perforación 477). Ésta última no es considerada dentro de esta investigación, por estar fuera de los objetivos planteados. En este sentido las secciones 478, 479, 480 y 481; serían correlacionadas con las secciones sísmo-estratigráficas de GUAYRIV10 para establecer inferencias sobre la distribución de dichas unidades a lo largo de los bloques tectónicos.

2.2. Cuenca de Guaymas

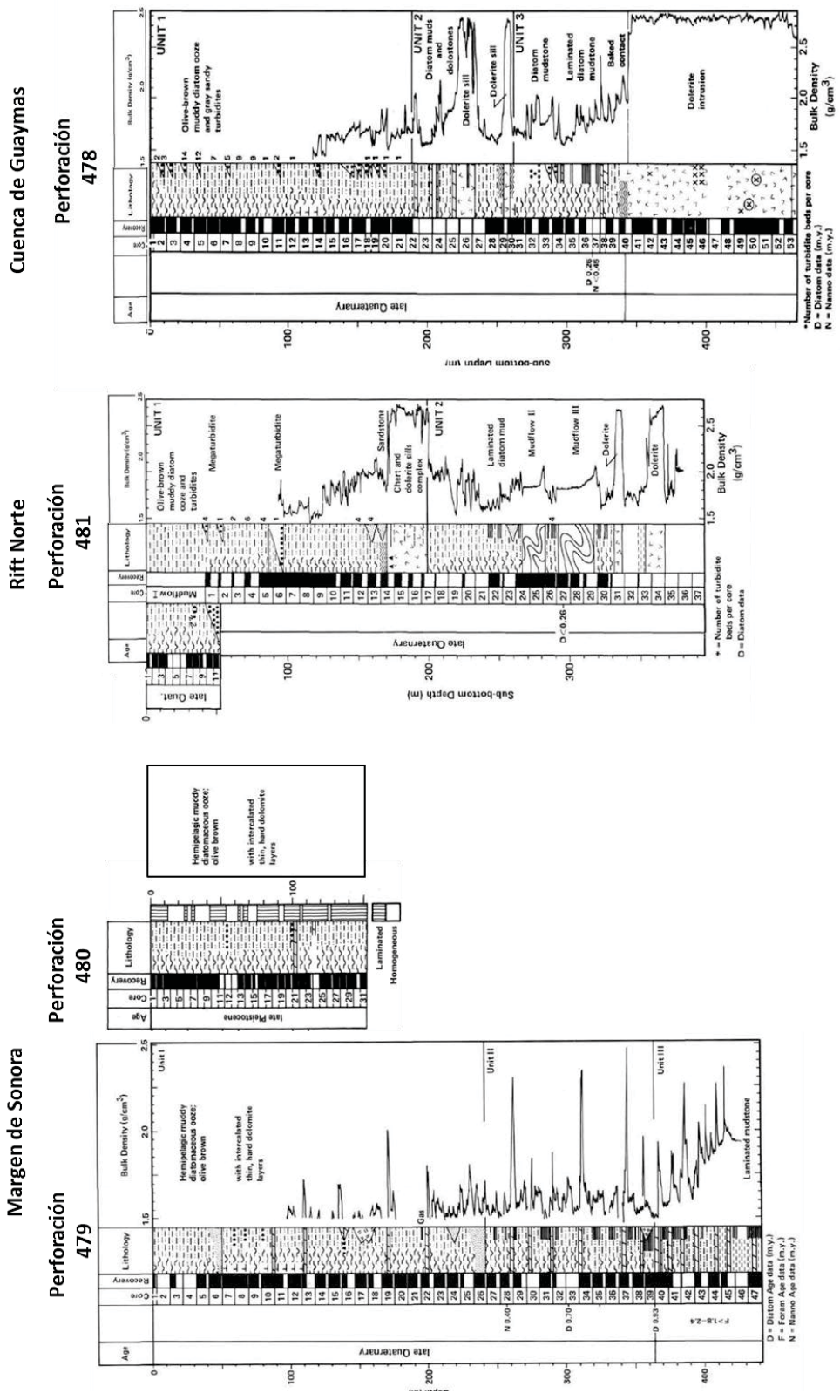


Figura 20. Descripción de columnas estratigráficas registradas en los núcleos del DSDP en la Cuenca de Guaymas (Curry, et al. 1982).

2.2. Cuenca de Guaymas

PLATAFORMA DE MARGEN DE SONORA

La estratigrafía de la plataforma del margen de Sonora (Figura 20), observada en las perforaciones 479 (penetración 440 m) y 480 (penetración 152 m), está definida por sedimentos Cuaternario Tardío (Curry, et al. 1982). Descrita en Curry y otros (1982) como una secuencia que inicia superficialmente con una intercalación de aproximadamente 240 m de capas laminadas y homogéneas de lodos ricos en diatomeas, con ocasional presencias de arenas y diatomitas intercaladas. Igualmente, inmersiones realizadas en la región señalan que la superficie de la plataforma está definida por una capa de sedimentos rojizos no consolidados de granulometría muy fina (Paull, et al. 2007). Esta primera unidad, pasa progresivamente a una unidad más compactada, con resistencia de firme a dura, integrada por litologías similares en cuanto contenido de diatomeas, pero con presencias de carbonatos diagenéticos y delgadas capas de cenizas. La dureza de penetración por efecto de la compactación aumenta en los litotipos, definiendo una tercera unidad estratigráfica. Los datos sugieren un aumento en la tasa de sedimentación que va de 100 a 280 m/Ma para la unidad intermedia, y velocidades mayores a los 550 m/Ma para las secuencias someras. Estas características permiten definir un ambiente hemipelágico para toda la secuencia, con características adicionales de talud con episodios de mínimo de oxígeno y presencia de zonas de surgencia para las unidades someras (Curry, et al. 1982). Esta estratigrafía coincide con la respuesta sísmica obtenida en la región, tal como lo sugiere la correlación sismo-estratigráfica, efectuada entre los datos de la perforación con la sísmica multicanal y monocal disponible al momento de la investigación (Curry, et al. 1982).

PLANICIE DE LA CUENCA DE GUAYMAS

Mediante la perforación 481 se determinó que la estratigrafía en los primeros 384 m de la región sur oeste de la Cuenca, está definida por dos mega unidades de edad Cuaternario Tardío (Curry, et al. 1982). Tal como lo muestra la Figura 20, la primera unidad corresponde a sedimentos perturbados compuestos de lodos ricos en diatomeas con ocasional presencia de arenas gradadas, las cuales parecen corresponder a turbiditas. Similar a las turbiditas observadas en sedimentos recientes en la región norte de la Cuenca de Guaymas; mediante imágenes de *side scan sonar* (Lizarralde, Soule, et al. 2010). Por su parte, la unidad inferior aumenta su resistencia a la penetración

2.2. Cuenca de Guaymas

progresivamente, conservando la litología de lodos ricos en diatomeas intercaladas con turbiditas. Esta define un ambiente sedimentario hemipelágico, muy similar a lo observado en la plataforma del margen de Sonora (Curry, et al. 1982), caracterizado por una muy rápida tasa de sedimentación para la región, que se ubica entre los 1200 m/Ma a 2700 m/Ma (van Andel 1964). Los lodos hemipelágicos observados en la región, presentan un alto contenido de carbono orgánico, especialmente en aquellas zonas donde el lecho marino intercepta las zonas de mínimo de oxígeno, que con frecuencia se observan entre los 300 y 800 m, favoreciendo las condiciones necesarias para la producción de hidrocarburo en la región (Lonsdale 1985).

Observaciones realizadas en inmersiones, así como en imágenes de *Side Scan Sonar*, sugieren la presencia de montículos de alta reflectividad acústica (Paull, et al. 2007, Lizarralde, Soule, et al. 2010), los cuales, son la expresión de aglomeraciones minerales de carbonatos autigénicos, así como bioturbaciones causadas por las comunidades biológicas que se alimentan de las emanaciones de fluidos que ocurre en esta región (Merewether, Olsson and Lonsdale 1985).

Tal como se muestra en la columna estratigráfica de la Figura 20, esta secuencia sedimentaria pasa progresivamente a complejos ígneos, como consecuencia de conjunto de intrusiones de *sills* doleríticos, distribuidos aleatoriamente desde el eje del *rift* hasta una distancia de 50 km (Lonsdale 1989, Lizarralde, Soule, et al. 2010), los cuales deforman la secuencia sedimentaria en forma de pliegues.

RIFT NORTE

Por su parte, la perforación 478 dentro del eje del Rift Norte presenta una sección de 342 m en la columna estratigráfica (Figura 20), en la cual se definieron 3 unidades: (1) la más somera corresponde a la intercalación de lodos diatomáceos con episodios gradados de arenas grises; subyacente a ella, (2) intrusiones dolomíticas que generan aureola de contacto en una secuencia de los lodos ricos en diatomeas; mientras que bajo ellas (3) se reportan limolitas intercaladas con lodos diatomáceos y arenas ocasionales, la cual progresivamente se ve enriquecido en contenido dolomítico. Observaciones realizadas en inmersiones corroboran la presencia de lodos hemipelágicos semilitificados expuestos sobre el escarpe de las fallas normales del este *graben* (Lonsdale 1989). Así mismo

2.2. Cuenca de Guaymas

registraron la presencia de sedimentos Holoceno rellenando el eje del *graben* (Lonsdale and Lawver 1980, Lonsdale 1989).

La sísmica multicanal a través del *rift* y la planicie muestra que esta región del golfo existen intrusiones de magmáticas en la columna sedimentaria, hasta una distancia de 50 km fuera de los ejes de esparcimiento (Lizarralde, Soule, et al. 2010). El proceso de acreción de corteza oceánica mediante la intrusión de diques y *sills* basálticos dentro de los sedimentos no consolidados, conduciendo a una alta conductividad de flujo de calor (Einsele and Kelts 1982, Lonsdale 1985, Simoneit, Lonsdale and Edmond 1990) produce un adelgazamiento cortical, que define una corteza transicional de 7 km, bajo una gruesa capa de sedimentos cuyo espesor oscila entre 2 y 3 km (Figura 16) (Lizarralde, Axen, et al. 2011).

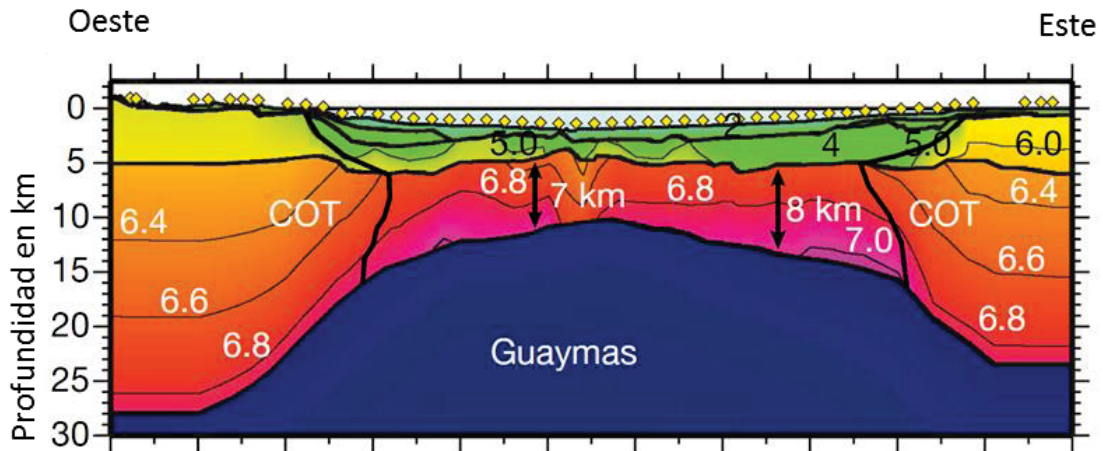


Figura 21. Modelo de estructura de velocidades sísmicas a lo largo de la Cuenca de Guaymas. Contornos de velocidades en escala de colores y etiquetado en unidades km/s, los rombos amarillos corresponden a localización de instrumentos de medición. COT indica la interpretación de la transición litosférica océano continente (Lizarralde, Axen, et al. 2011).

Como se observa en la Figura 22, empleando sísmica multicanal y anomalías gravimétricas, fue descrita una capa de evaporita así como deformaciones causadas por cuerpos intrusivos no magmáticos identificados como diapiros (Miller and Lizarralde 2012). Esto sugiere que las superficies evaporíticas son evidencias de las etapas de proto-golfo, que tuvieron origen durante las primeras incursiones marinas del Mioceno Tardío hace 7 Ma.

2.3. Emanación de Fluidos

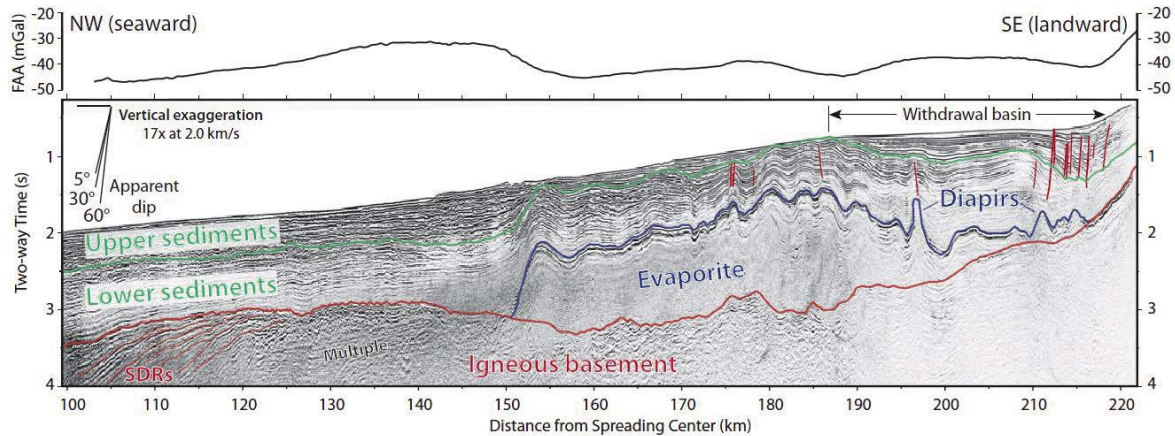


Figura 22. Presencia de evaporitas y diapiros en la Cuenca de Guaymas. Interpretación realizada sobre sísmica multicanal con migración de tiempo (abajo) y su correlación con las anomalías gravimétrica de aire libre (Miller and Lizarralde 2012).

2.3. EMANACIÓN DE FLUIDOS

La primera observación de emanaciones de fluidos en el océano profundo ocurre en 1977, en la exploración del *rift* de Galápagos, a bordo del sumergible *Alvin* a 2500 m de profundidad, cuando descubrieran y captaran las primeras imágenes de ventilas hidrotermales (USGS 1999). Un año más tarde, los estudios del *Deep Sea Drilling Project*, presentan fenómenos similares en el *rift* de la Cuenca de Guaymas (Curry, et al. 1982). Posteriormente en 1984, en el Golfo de México y en la Bahía de Monterrey en California (National Oceanography Centre n.d.), serían descubiertas un conjunto de emanaciones de fluidos a temperatura inferior a las del océano donde emergían, lo cual les hizo merecer el título de Emanaciones Frías (*Cold Seeps*).

Esta emanación de fluidos era observada en forma de “Pluma” de burbujas; término que se acuñó debido a la forma observada en los registros hidroacústicos de columna de agua (Baker, et al. 1989). En ella se observa una raíz de diámetro inferior al metro, con un cuerpo que crece en forma de gota alargada, hasta alcanzar un ancho de hasta 100 m, asemejando la forma de plumas de aves (Figura 18). También son referidos en la literatura como *flares* (Schneider von Deimling, Brockhoff and Greinert 2007).

2.3. Emanación de Fluidos

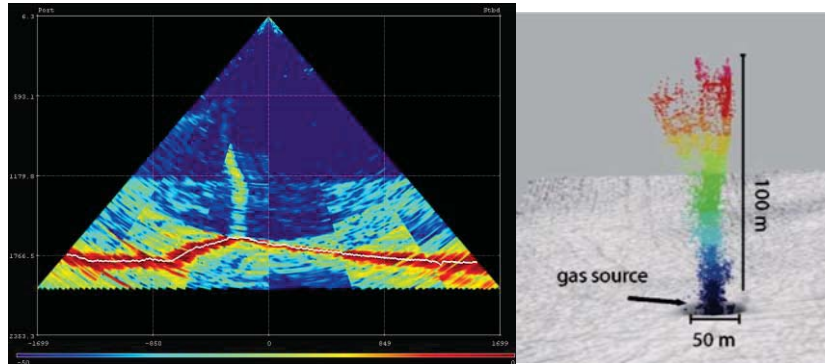


Figura 23. Plumaz de burbuja emergiendo desde el lecho marino. Forma de gota alargada de los fluidos al mezclarse en la columna de agua, que le hizo valer el título de plumaz. Imágenes hidroacústicas multihaz de columna de agua 12 kHz, Izquierda obtenida durante esta investigación, Derecha tomada de (Schneider von Deimling , Brockhoff and Greinert 2007)

Desde finales de los 70's, el Golfo de California ha servido de importante laboratorio por presentar en su interior emanaciones de fluidos en distintos contextos, incluso en asociación con hidrocarburos neo-formados (e.g., Lonsdale, Bischoff, et al. 1980, Lonsdale and Lawver 1980, Galimov and Simoneit 1982, Merewether, Olsson and Lonsdale 1985, Kawka and Simoneit 1994, Sturz, et al. 1996, Paull, et al. 2007, Lizarralde, Soule, et al. 2010). En función de los datos bibliográficos disponibles se pudo cartografiar los sistemas de emanación de fluidos presentes en esta región (Figura19). En la Cuenca de Guaymas tienen lugar dos grandes grupos de sistemas de emanación agrupados en función de la actividad hidrotermal y emanaciones frías.

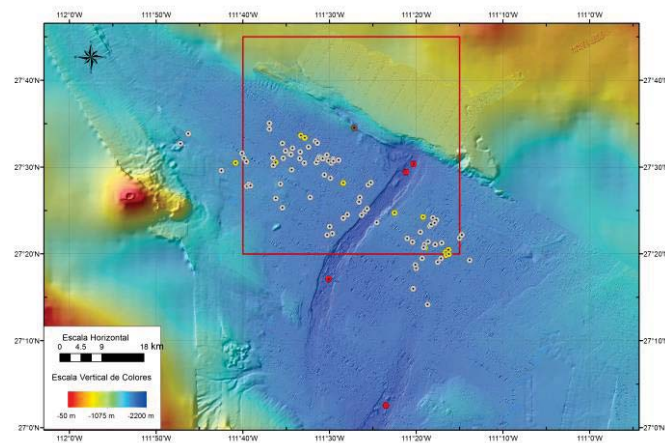


Figura 24. Mapa de distribución de sistemas de emanación de fluidos observados en la Cuenca de Guaymas. ● Emanaciones hidrotermales sobre los ejes del Rift Norte y Rift Sur (Lonsdale, Bischoff, et al. 1980), ● Emanaciones frías sobre la cordillera de la Falla de Guaymas (Lonsdale 1989, Paull, et al. 2007), ● Montículos de carbonatos autigénicos asociados a emanaciones frías observados sobre el lecho de la Cuenca de Guaymas (Lizarralde, Soule, et al. 2010), ● Montículos de alta reflectividad acústica considerados posibles sitios de emanaciones frías (Lizarralde, Soule, et al. 2010).

2.3. Emanación de Fluidos

El estudio de los sistemas de emanaciones es de gran importancia para la humanidad, debido a que en ella son liberadas grandes volúmenes de gases que contribuyen al efecto invernadero (Dando and Hovland 1992, Etiope and Klusman 2002). También tiene una gran importancia en el aspecto económico, ya que los gases hidrocarburos (principalmente metano), contenidos en los hidratos de las emanaciones frías, pueden ser empleados en niveles comerciales. Tal como lo sugieren las pruebas realizadas por la empresa estatal *Japan Oil, Gas and Metals National Corporation* (JOGMEC) sobre la plataforma japonesa, donde el buque de perforación DSV *Chikyu* (perteneciente al IODP) a 1 km de profundidad, perforó 270 m de sedimentos para alcanzar un reservorio de hidratos de metano de 60 m de espesor, logrando hacer fluir el metano a superficie (Cyranoski 2013). Actualmente se están desarrollando estudios para conservar la presión y mejorar el proceso de producción. Otros proyectos realizados en territorio americano, como el desarrollado en hidratos de metano en Alaska (Jones 2012), reflejan el interés mundial en la búsqueda de nuevas fuentes energéticas.

2.3.1. ACTIVIDAD HIDROTHERMAL

Los ejes del Rift Norte y el Rift Sur, han sido ampliamente estudiados por la presencia de ventilas hidrotermales (e.g., Lonsdale, Bischoff, et al. 1980, Curray, et al. 1982, Carranza, et al. 1990, Teske, Hinrichs, et al. 2002). El descubrimiento de estas emanaciones fueron hechas con un sonar transportado por el sumergible *Alvin*, en las que se identificaron plumas ascendentes de gases (Simoneit, Lonsdale and Edmond 1990). Dentro del Rift Norte, fueron reportados montículos de agregados minerales asociados a ventilas hidrotermales que se alzan entre 20 y 30 m sobre el lecho, a profundidades cercanas a los 2000 m, destacando que los fluidos que ahí emergen presentan temperaturas de 315 °C a una presión aproximada de 200 bar, que permitieron definirlos como emanaciones hidrotermales (Lonsdale, Bischoff, et al. 1980, Lonsdale 1985, Merewether, Olsson and Lonsdale 1985, Simoneit, Lonsdale and Edmond 1990).

En el caso de los sistemas hidrotermales, el proceso de producción de hidrocarburos reducido a una marco de tiempo geológico instantáneo. En esta región los sistemas hidrotermales operan bajo una capa de sedimentos, generando petróleo a partir de la materia orgánica inmadura contenida en dichos sedimentos (Whelan and Hunt 1982, B. Simoneit 1988), según lo cual, durante la diagénesis mineral y el metamorfismo bajo

2.3. Emanación de Fluidos

condiciones no oxidantes, la composición de la materia orgánica cambia progresivamente a residuos más aromáticos y asfálticos, mediante la expulsión de componentes volátiles (i.e., CO_2 , CH_4 , H_2O , etc.) (B. Simoneit 1988). Posteriormente estos hidrocarburos migran ascendentemente hacia la columna de agua, lo cual parece ocurrir en conjunto como petróleo puro, en fluidos co-solubles y en solución acuosa. Al alcanzar la columna de agua, estos hidrocarburos son expuestos en una superficie no consolidada de sedimentos, donde son degradados por la actividad microbiana, el petróleo se condensa (solidifica) y se acumula en los conductos y vetas minerales de los montículos hidrotermales en respuesta a las temperaturas de estos ambientes (B. Simoneit 1988). El petróleo encontrado en la Cuenca de Guaymas está compuesto por: hidrocarburos en el rango de gasolina (C1-C12); un amplio conjunto de n-alkalinos (C12-C40), acumulaciones naftenicas, pristano y phytano en concentraciones significantes, bio-marcadores maduros, así como concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos y sulfuros (Lonsdale, Bischoff, et al. 1980, B. Simoneit 1988).

Si bien el origen de estos sistemas hidrotermales ha sido motivo de múltiples discusiones, los datos más contundentes sugieren la existencia de dos mecanismos hidrotermales dominantes en la Cuenca de Guaymas y un sistema biogénico de menor volumen en generación (Gieskes, Kastner, et al. 1979, Kastner 1982, Gieskes, Shaw, et al. 1991, Teske, Hinrichs, et al. 2002).

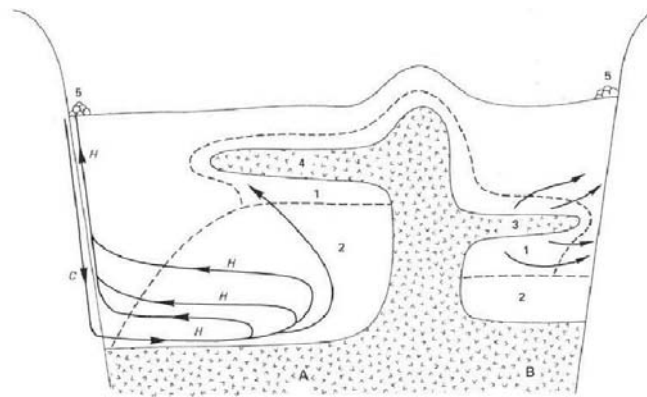


Figura 25. Versión esquemática propuesta por Gieskes et al. (1979 y 1991) para los sistemas hidrotermales asociados con los sitios 477 y 481 del DSPD. (1) Porosidad afectada mayormente por la intrusión superior del sill; (2) porosidad afectada por intrusiones de sill antiguos y/o la continuación de actividad hidrotermal de una mayor profundidad; (3) intrusiones de sill; (4) intrusiones frías actuando como un sello para sistemas hidrotermales profundos; (5) depósitos hidrotermales sobre el piso de la cuenca; A: modelo para el sitio 477; B: modelo para el sitio 481; H: corrientes de agua caliente a través de los sedimentos y zonas de fallas; C: corrientes de agua fría a través de zonas de fallas.

2.3. Emanación de Fluidos

VENTILAS ASOCIADA A INTRUSIONES SOMERAS EN SEDIMENTOS DE GRAN POROSIDAD

Estas ventilas son producto de la intrusión de *sills* basálticos someros (<50 m) en sedimentos porosos para el Rift Sur (Figura 25). La intrusión produce un metamorfismo de contacto, evidenciado en la recristalización de arcillas y carbonatos, disolución de ópalo, etc. En tal sentido, las relaciones isotópicas en la recristalización de carbonatos y el relativamente alto valor de $\delta^{18}\text{O}$ en los silicatos recristalizados indican que temperaturas entre los 100 y 200°C están involucradas en esta actividad hidrotermal.

VENTILAS ASOCIADA A INTRUSIONES MAGMÁTICAS DE GRAN VOLUMEN

El segundo mecanismo en las ventilas se debe a intrusiones magmáticas de gran volumen, emplazadas a mayor profundidad en la columna sedimentaria (Figura 25), propuesto para el Rift Norte, permitiendo la alteración termal de los sedimentos, llevándolos a una facies de esquistos verdes. Las relaciones isotópicas en las acumulaciones de silicatos y el agua sugieren que tal alteración debe ocurrir en un sistema abierto a temperatura cercana de 300°C. La recarga de agua al fondo de la cuenca, y la descarga de los fluidos hidrotermales, ocurre por medio de zonas de fallas, con estructuras de *sills* actuando como sello de estos sistemas hidrotermales, forzando así a los fluidos en direcciones laterales hasta zonas de fallas.

ACTIVIDAD BIOLÓGICA EN LA PRODUCCIÓN DE METANO

Esta actividad biológica en el *rift* ha sido ampliamente estudiada debido a la biodiversidad asociada a la emanación de estos fluidos (e.g., Oremland, Culbertson and Simoneit 1982, Pearson, Seewald and Eglinton 2005, Dick, Yifan and Tebo 2006). A partir de muestras de sedimentos, se detectó la presencia de bacterias capaces de generar metano por debajo de los 12 m de profundidad (Oremland, Culbertson and Simoneit 1982), lo cual representa una fuente significativa de este hidrocarburo en la región (Teske, Hinrichs, et al. 2002). La metanogénesis se debe al consumo de carbono relicto por parte de las bacterias, de modo que se conservan las concentraciones de carbono disuelto en la columna de agua (Pearson, Seewald and Eglinton 2005).

2.3. Emanación de Fluidos

2.3.2. EMANACIONES FRÍAS

En comparación a la actividad hidrotermal, los sistemas de emanaciones frías han sido muy poco estudiados. Las primeras referencias de este tipo de emanaciones en la región, son sobre la cordillera del Sistema de Falla de Guaymas (Curry, et al. 1982), y recientemente sobre el lecho de la Cuenca de Guaymas (Lizarralde, Soule, et al. 2010). A continuación realizaremos una descripción detallada de ambos grupos de emanaciones frías, que están en el: (1) margen de Sonora de la Cuenca de Guaymas (Figura 26), y (2) Lecho de la Cuenca de Guaymas fuera de ejes de esparcimiento.

MARGEN DE SONORA DE LA CUENCA DE GUAYMAS

En el margen de Sonora de la Cuenca de Guaymas, un conjunto de plumas concentradas fueron identificadas sobre la cordillera de la Falla de Guaymas frente la Cuenca de Satélite. En la detección de estas emanaciones (Figure 26) se emplearon mediciones hidroacústicas monohaz e imágenes de *Side Scan Sonar* (Lonsdale 1985, Merewether, Olsson and Lonsdale 1985). Posteriormente, mediante un submarino no tripulado (Figura 26) fue posible la observación directa de estas emanaciones de burbuja, notando la presencia de comunidades quimiosintéticas (almejas vesicomidia y gusanos tubulares vestiminíferas), así como agregados de carbonato autigénicos (Paull, et al. 2007).

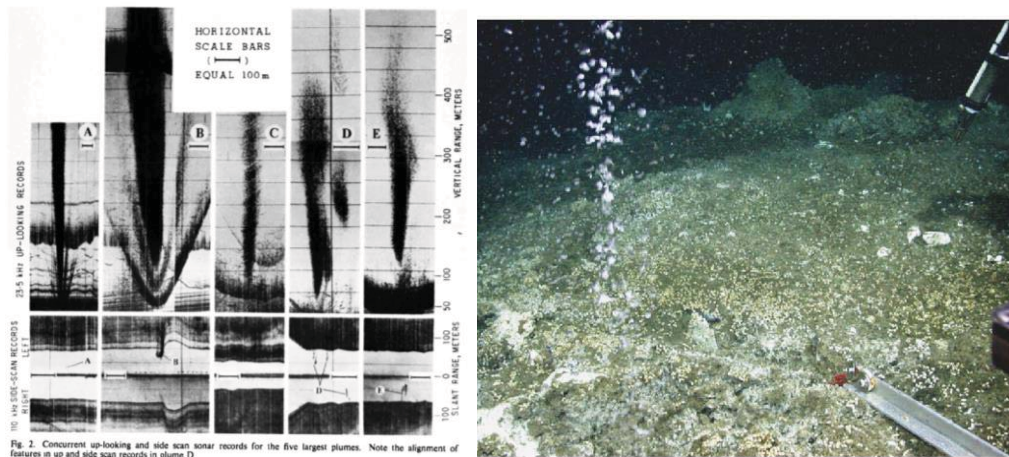


Figura 26. Imágenes de las emanaciones de burbuja en el lecho marino de la Cuenca de Guaymas. Izq. Imagen hidroacústica mediante una ecosonda monohaz de 2.3 a 5 kHz (Merewether, Olsson and Lonsdale 1985). Der. Fotografía de un sitio de emanación fría sobre el Sistema de Falla de Guaymas capturadas con un ROV (Paull, et al. 2007)

2.3. Emanación de Fluidos

La sísmica colectada en esta región (Figura 27) ha evidenciado la presencia de BSR (*Bottom Simulator Reflector*), dentro de la secuencia estratigráfica en las cercanías de la cordillera (Lonsdale 1985, Merewether, Olsson and Lonsdale 1985, Paull, et al. 2007). Los BSR, son reflectores que simulan el relieve batimétrico sin guardar paralelismo con la estratigrafía, las cuales corresponden a la base de una capa de hidratos (Bohrmann and Torres 2006). El reflector que simula el relieve batimétrico es consecuencia de una zona de estabilidad trifásica del estado de la materia, en donde la presión batimétrica, la carga litostática y la temperatura; permiten que los fluidos que saturan los sedimentos se encuentren en un estado sólido-líquido-gaseoso (Cruz Melo 2008). El cambio de cualquier de estas variables va a producir la inestabilidad molecular y su consecuente ruptura. Estas moléculas de hidrato suelen contener en su interior moléculas no enlazadas de gases de hidrocarburos, las cuales serían liberadas ante la disociación molecular (Bohrmann and Torres 2006).

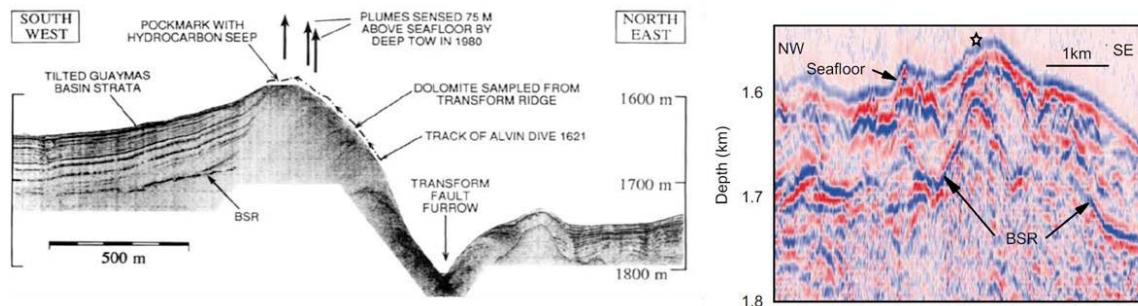


Figura 27. Presencia de BSR en la estratigrafía somera de la Cuenca de Guaymas. Izquierda: BSR interpretados en sísmica de reflexión de 4 kHz (Lonsdale 1985). Derecha: BSR interpretados en sísmica multicanal sobre el flanco NE de la Cuenca de Guaymas (Paull, et al. 2007).

El análisis geoquímico practicado a los fluidos y sedimentos cercanos a las zonas de emanación (Paull, et al. 2007), sugiere la presencia de dos fuentes de carbono para los carbonatos autigénicos. El primero de ellos asociado a fuentes profundas caracterizadas por la isotopía pesada de CO_2 , y una fuente isotópica ligera de carbono inorgánico disuelto (DIC) derivado de fuentes locales de oxidación anaeróbica del metano en la interface sulfato-metano en sedimentos someros.

La información tectónica disponible, sugiere una estrecha relación entre los rasgos estructurales y las zonas de emanación, donde las plumas observadas se ubican sobre la cordillera de la falla de Guaymas (Figura 24 y 27) (Lonsdale 1985). Posteriormente, se identificó la presencia de plumas ascendiendo desde la cara norte de dicha cordillera, la

2.3. Emanación de Fluidos

cual está definida por el escarpe de la Falla de Guaymas, donde los sedimentos someros de la Cuenca de Guaymas es expuesta al ambiente oceánico. Esta estratigrafía incluye la presencia de hidratos, los cuales al ser expuestos sufren una ruptura molecular que causaría la constante liberación de burbujas (Figura 28) (Paull, et al. 2007).

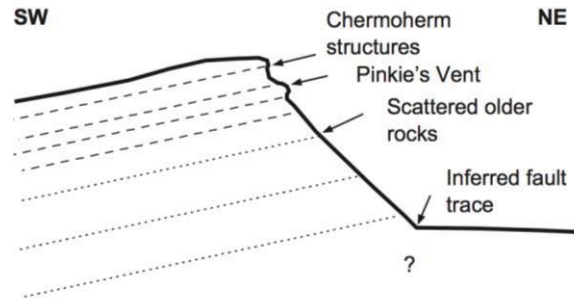


Figura 28. Esquema de perfil geológico idealizado con exageración vertical de la ladera noreste del escarpe de la Falla de Guaymas. Muestra la disposición de las emanaciones frías en la localidad de *Pinkie Vent* sobre la cordillera de la Falla de Guaymas, señalando la ubicación de las comunidades químio-sintéticas.

Estudios comparativos con otras regiones sugieren que la presencia de hidratos bajo un talud va a generar una morfología de estructuras de colapso gravitacional (Figura 23), como las observadas en Cabo "Fear" (Hornbach, Lavier and Ruppel 2007, USGS 2013). En tal sentido, el paso de los fluidos a través de los sedimentos, produce una reorganización de los clastos en un proceso similar a la licuefacción de suelos, lo cual ante la inestabilidad gravitacional propia del talud, puede producir deslizamientos y abanicos submarinos (USGS 1999).

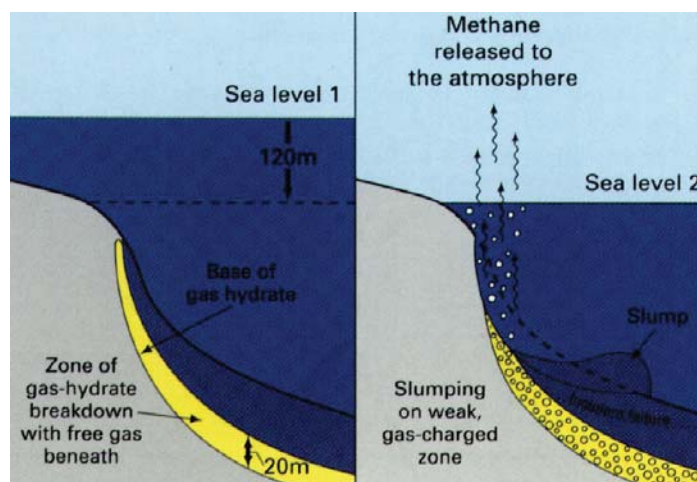


Figura 29. Deslizamientos submarinos como consecuencia de la inestabilidad gravitacional causada por la presencia de hidratos de metano en zonas de talud. La constante emanación de fluidos a través de los sedimentos genera una perturbación y un reordenamiento de los mismos, haciéndolos susceptibles a las inestabilidad gravitacional (USGS 2013)

2.3. Emanación de Fluidos

LECHO DE LA CUENCA DE GUAYMAS (FUERA DE EJES DE ESPARCIMIENTO)

En un análisis de imágenes de *Side Scan Sonar* fueron observados numerosos montículos de alta reflectividad sobre el lecho marino de la Cuenca de Guaymas, fuera de los ejes de esparcimiento oceánico (Figura 24 y 30). Algunos fueron analizados con imágenes de video y muestras de agua, corroborando que esta respuesta acústica corresponde a montículos de entre 3 y 5 m de altura conformados por agregados minerales y comunidades biológicas quimiósintéticas, producto del flujo enriquecido que emiten los sitios de emanaciones frías (Lizarralde, Soule, et al. 2010).

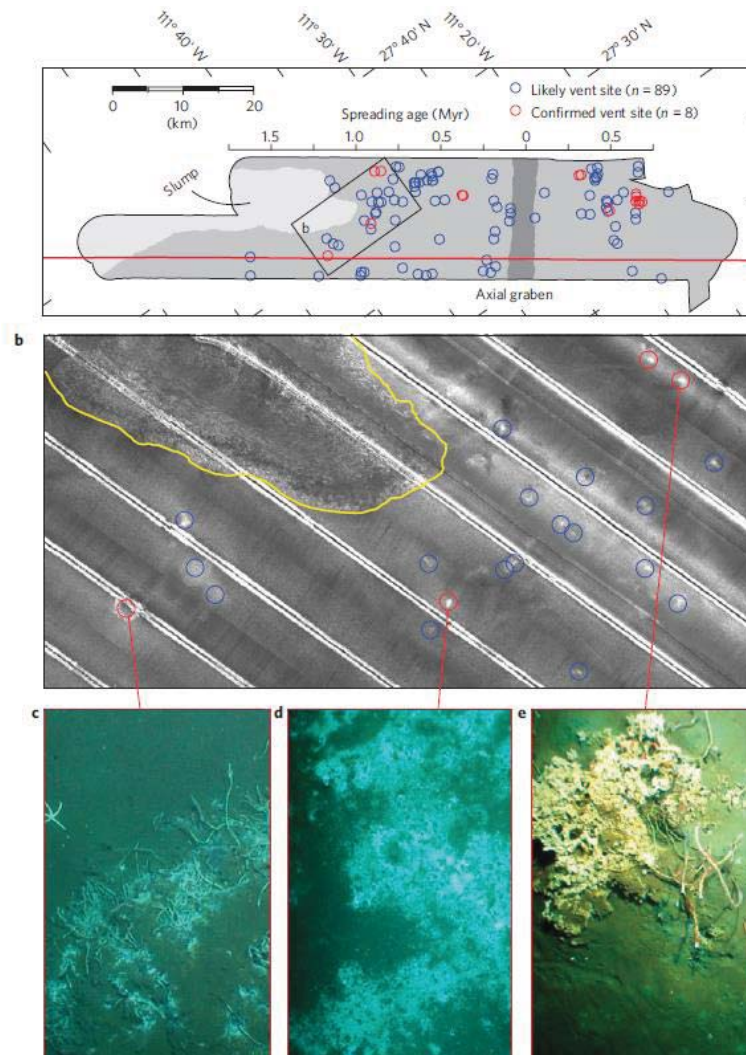


Figura 30. Localización de sistemas de emanaciones frías en el lecho de la Cuenca de Guaymas. Distribución de montículos de carbonatos autigénicos y comunidades biológicas quimiósintéticas, debidos a la presencia de emanaciones frías en la localidad. (A) Mapa de distribución, (B) Imagen de *Side Scan Sonar* donde se observa la respuesta hidroacústica de estos montículos, (C, D y E) fotografías de las localidades donde se observan la compleja fauna quimiósintética y los carbonatos autigénicos.

2.3. Emanación de Fluidos

Estos sistemas resultan muy distintos a los observados en márgenes continentales activos y pasivos, por presentar una distribución aleatoria (Figura 30). Los análisis geoquímicos de los fluidos emergentes reflejan una concentración de metano que va de 1.2 a 2,500 nmol/kg, lo cual supera hasta 6,800 veces las concentraciones observadas a escasos 100 m por encima de esta emanación (0.37 nmol/kg). Así mismo, la relación isotópica de helio en estas muestras, señala una alta relación $^3\text{He}/^4\text{He}$ indicativos de una fuente magmática ^3He . Por su parte, la relación entre las temperaturas de los flujos y el océano circundante, muestran una diferencia de entre 0.005 y 0.05 °C, lo cual permite clasificarla como emanación fría. Estas emanaciones dispersas en el lecho de la Cuenca de Guaymas, parecen corresponder a un mecanismo de producción debido a intrusiones magmáticas en forma de *sills* (Lizarralde, Soule, et al. 2010), las cuales se han observado hasta a 50 km de distancia de los ejes de esparcimiento oceánico (Figura 30) (Lizarralde, Axen, et al. 2011). Este emplazamiento magmático en columnas sedimentarias ricas en materia orgánica (Curry, et al. 1982) genera las condiciones potenciales para la liberación de grandes volúmenes de carbono.

3. METODOLOGÍA

La metodología empleada para esta investigación está dividida en cuatro etapas fundamentales como se muestra en la Figura 31. Estas etapas engloban las distintas pautas que conducen al método científico, partiendo desde las investigaciones anteriores, la adquisición de datos, el procesamiento de los datos y el análisis de los resultados. Dichas etapas serán descritas a continuación.

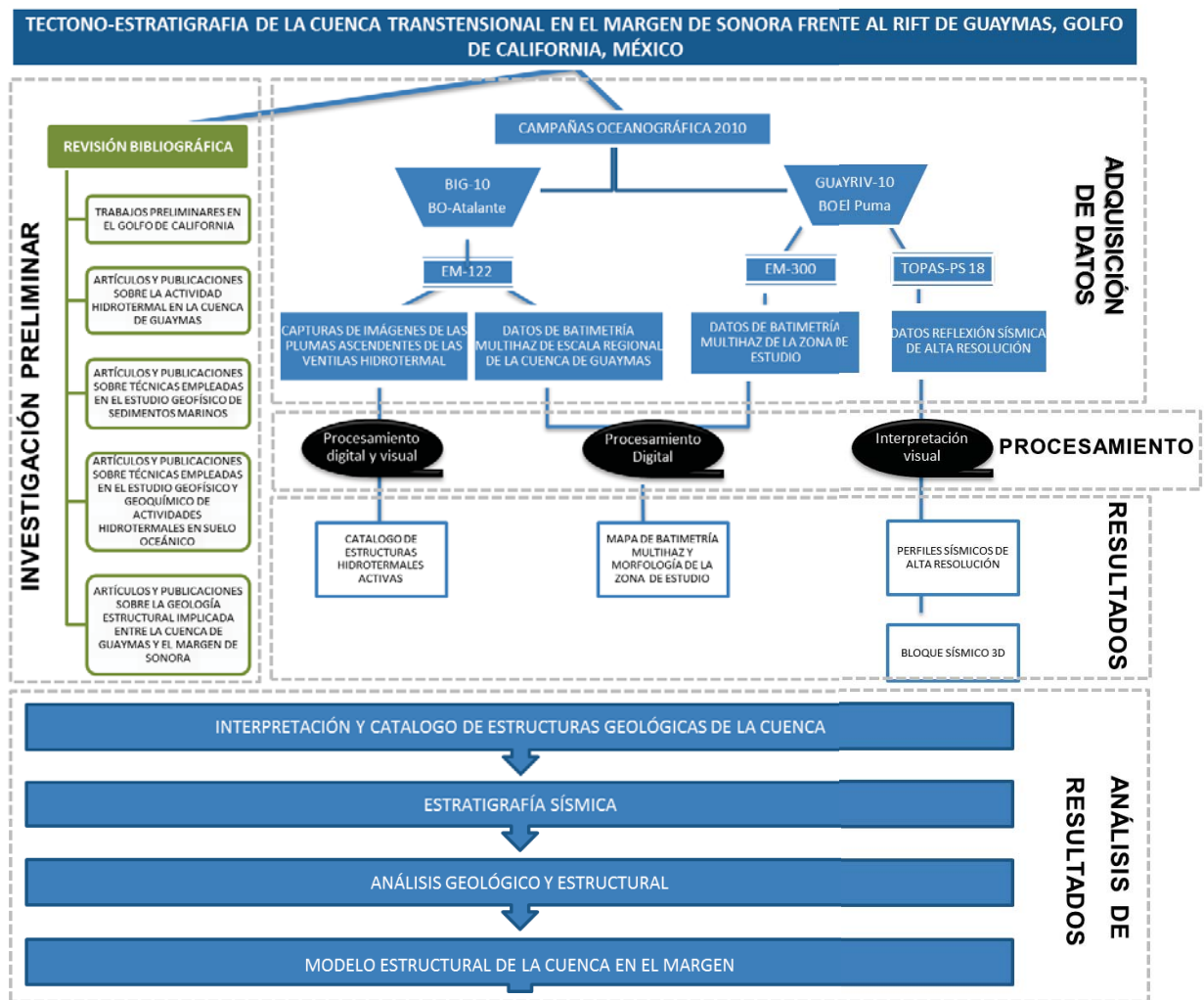


Figura 31. Esquema de metodología de trabajo planteada para la presente investigación. Basado en cuatro etapas (1) Investigación preliminar, (2) Adquisición de Datos, (3) Procesamiento, y (4) Análisis de Resultados

3.1. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

La consulta bibliográfica representa un factor fundamental de toda investigación, pues a partir de ella surgen los conocimientos e hipótesis a desarrollar. En esta etapa de investigación se realizó una amplia consulta bibliográfica de los trabajos geológicos del Golfo de California, enfocado en las interacciones que ocurren entre el margen de Sonora y la Cuenca de Guaymas (e.g., Anderson, et al. 1950, Curray, et al. 1982, Lonsdale 1989, Paull, et al. 2007). De igual forma, se realizó una revisión acerca de los sistemas hidrotermales y de emanaciones frías, en asociación a la liberación de hidrocarburos, en procesos similares a los que ocurre dentro del área de estudio (e.g., Laberg, Andreassen and Knutsen 1998, Canet, et al. 2006, Kauccke, et al. 2006).

3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS

Los datos empleados para este estudio corresponden a datos de geofísica marina registrados durante dos campañas oceanográficas, en el año 2010. La primera de ellas corresponde a una campaña internacional (BIG10), y la segunda correspondiente a la campaña GUAYRIV10, financiada por la Universidad Nacional Autónoma de México.

3.2.1. CAMPAÑA BIG-10

La campaña BIG10, lleva su nombre por las siglas en francés de “Biodiversidad e Interacciones en Guaymas” (*Biodiversité et Interactions à Guaymas*), y se llevó a cabo a bordo del Buque Oceanográfico *NO L'Atalante*, entre las fechas del 30 de mayo al 9 de julio del 2010, abarcando la zona central de la Cuenca de Guaymas (Figura 32). Esta misión encabezada por el Instituto Francés de Investigación para La Utilización del Mar (*Institut Français de Recherche pour l'exploitation de la Mer*, IFREMER), fue coordinada por la Dra. Anne Godfroy con la participación nacional de la Dra. Elva Escobar y el Dr. Carlos Mortera de la UNAM. La parte medular de BIG10 fue investigar las características biogeoquímicas que hacen tan particulares a las ventilas hidrotermales dentro del *rift* y los sitios de emanación de fluidos fríos en el margen de la Cuenca de Guaymas, con el objetivo de describir y comparar las comunidades microbianas y los ecosistemas en ambos regímenes del medio marino profundo.

3.2. Adquisición de Datos

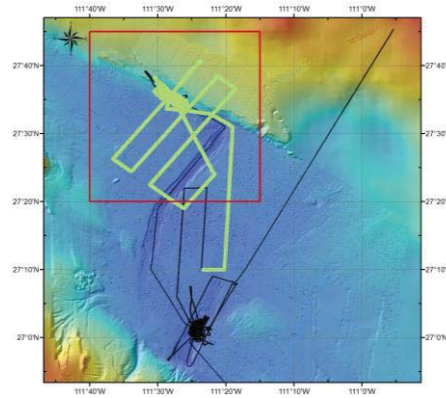


Figura 32. Ruta de navegación del LEG 2 de la campaña BIG10. — Transecto de navegación total, — Transecto donde se registró datos de imágenes hidroacústicas de columna de agua, ■ Área de estudio

La ejecución de esta campaña oceanográfica constó de 3 etapas (Leg). El Leg 1, consistió en realizar el mapeo geofísico regional y de detalle de los sitios de interés principal dentro de la Cuenca de Guaymas. El levantamiento geofísico de detalle se abocó a mapear las estructuras dentro del *Rift* Sur y los sitios en el margen de Sonora. La Figura 32 muestra los dos tipos de navegación dentro del área de estudio; el levantamiento regional está definido por los transectos paralelos y rectos con una orientación dominante NE-SW, y los levantamientos en detalle de los sitios a muestrear son el conjunto de transectos sin orientación general. Esto último corresponde a aquellos transectos que seguía la embarcación para mantenerse dentro del rango de alcance de telemetría de los sumergibles (Nautilo) y el AUV, mientras que los mismos entraban en operación.

Desde que se diera a conocer la presencia de ventilas hidrotermales y sistemas de emanaciones frías en distintas localidades de la Cuenca de Guaymas (Merewether, Olsson and Lonsdale 1985), las tecnologías disponibles han evolucionado lo suficiente para continuar el estudio a detalle de estos fenómenos a grandes profundidades. A finales de los años 70's, al momento de realizar estos descubrimientos fue empleada la metodología de Sackett, en la cual se logra la detección de flujos (plumas) que emanan del lecho marino a través de técnicas hidroacústicas (Sackett 1977). Esta metodología señala el empleo de ecosondas monohaz a frecuencias entre 3.5 a 12 kHz, con un ángulo menor de 20 grados para el cono de recepción para la detección de estos fluidos. Actualmente es posible emplear los sistemas de hidroacústicos multihaz bajo estos mismos principios de operación, para la detección de estas emanaciones, y los cuales tienen una cobertura espacial de mayor cobertura.

3.2. Adquisición de Datos

Por esta razón, durante el Leg 1 de BIG10 se realizó un registro continuo mediante la ecosonda multihaz EM-122 (Figura 33). Esta ecosonda está equipada con 288 haces de transmisión y registra hasta 432 sondeos por cada disparo en una franja, con ángulos de barrido ajustables automáticamente de acuerdo a la cobertura deseada o a los límites definidos por el operador. La EM122, emplea una frecuencia de 12 kHz, lo cual le brinda un diseño para la cartografía batimétrica de los fondos marinos, con un rango de operación a profundidades que van desde los 20 hasta los 11000 m (Kongsberg 2007).

Kongsberg emplea el software SIS (*Seafloor Information System*) para la operación del EM122 y el pre-procesamiento en tiempo real. Este es un paquete usado como Sistema de Información del Lecho Marino, y corresponde a un software de tiempo real diseñado para ser la interfaz entre el usuario y el sistema de procesamiento simultaneo de datos, en el que se emplean herramientas hidrográficas producidas por Kongsberg Maritime®. Los ecosondas de más reciente manufactura, como lo es el EM122 empleado durante BIG10, operan con este software, el cual brinda al usuario la posibilidad de obtener imágenes de reflexión acústica de objetos en la columna de agua tales como cardúmenes, concentraciones de biomasas, boyas sumergidas, fluidos hidrotermales y las plumas de burbujas que emergen del lecho marino.

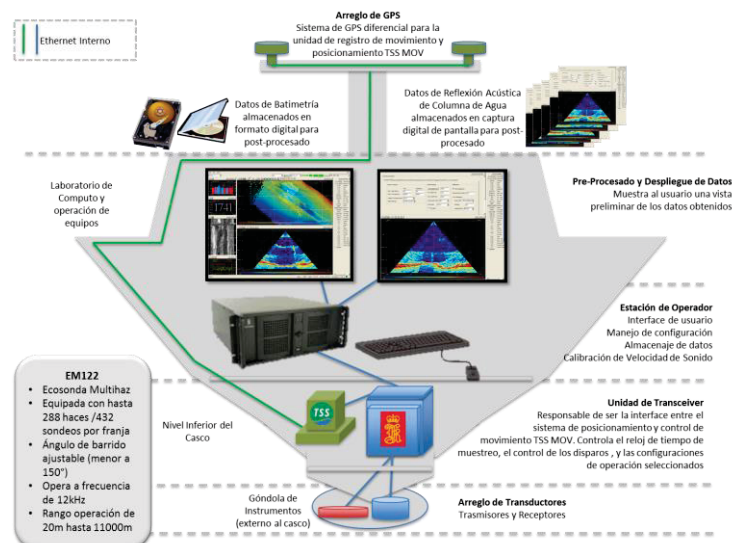


Figura 33. Esquema de configuración del ecosonda multihaz EM122. Integración de los sistemas de navegación y sondeo con el registro de los datos en sección transversal del buque, sistema instalado en el NO L'Atalante. (Modificado de Kongsberg, Manual de Operador)

3.2. Adquisición de Datos

Las plumas de burbujas, presentan características de temperaturas, composición y densidades contrastantes con las de las masas de agua del océano donde son liberados. Estas características conllevan a valores de velocidad de propagación del sonido anómalos, generando así una reflexión acústica para las ondas de sonido emitidas por el transductor transmisor y registradas por el transductor-receptor del ecosonda tal como se ilustra en los triángulos en la Figura 34. Una vez procesada la información correspondiente de cada imagen capturada por el ecosonda, es posible cartografiar dentro de la proyección del cono de haces, cualquier cuerpo con propiedades acústicas contrastantes que se encuentre entre el lecho marino y la embarcación.

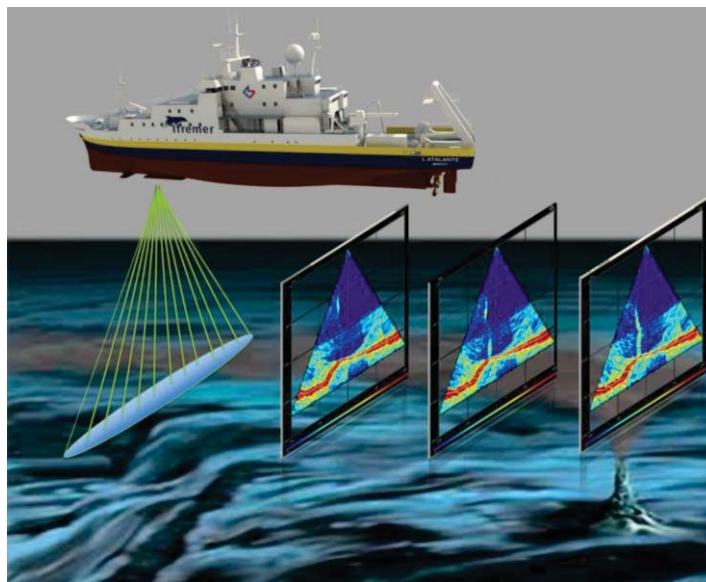


Figura 34. Ilustración del método de localización de plumas de burbuja por medio de imágenes de ecosonda multihaz EM122. Conforme el buque realiza su trayectoria el ecosonda captura imágenes de retrodispersión acústica en columna de agua, las cuales permiten el registro de cuerpos con velocidad acústica contrastante.

A medida que el NO L'Atalante realiza los transectos de navegación, los monitores de la consola de operación del EM122 muestran los datos registrados de la batimetría del lecho marino y la reflexión acústica de columna de agua. Los datos de batimetría son almacenados en una matriz de valores XYZ (latitud, longitud y profundidad), para posteriormente procesar e integrarlos a una carta batimétrica y elaborar los modelos de elevación digital del terreno (DTM). Sin embargo, los datos de batimetría registrados durante BIG10 son solo considerados en el contexto regional, por tratarse de un levantamiento de menor resolución, al objetivo particular de una menor área de estudio.

3.2. Adquisición de Datos

Por su parte, los datos digitales de reflexión acústica de columna de agua no pudieron ser post-procesados por no contar con el software especializado. Por tal motivo, las imágenes desplegadas en tiempo real del registro son capturadas a intervalos discretos, y son desplegadas en serie obteniendo información sobre los artefactos visualizados en las imágenes de interés. De esta forma, se logró obtener un total de 31,895 imágenes, las cuales fueron tomadas con un espaciamiento de 6 segundos entre captura, representando poco más de 53 horas continuas de registro hidroacústico.

Para la navegación, localización y registro de los movimientos precisos en el navío; fue empleado el sensor TSS POS/MV 220. Este sistema de posicionamiento y orientación para embarcaciones marítimas, posee un conjunto de sensores que integran una navegación inercial completa de 6 grados de libertad para el registro de movimiento, posición y orientación de los buques (TSS, MANUAL DE OPERADOR). El sistema de navegación combina datos de una unidad de movimiento inercial compuesto de tres acelerómetros y tres giroscopios de fibra óptica (también conocido como giro-láser), así como dos antenas GPS en la parte superior de la cubierta. Este sistema registra continuamente datos de movimiento del buque (Figura 35), siendo: balanceo (*Pitch*) y cabeceo (*Roll*) a una precisión de 0.02° , variaciones de altitud por oleaje (*Heave*) a una precisión de 5% de la amplitud, rumbo verdadero (*Heading*) a una precisión de $0,1^\circ$.

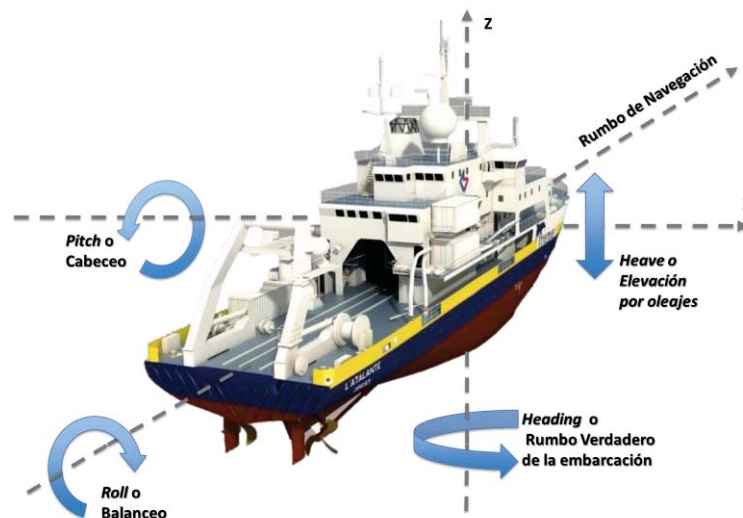


Figura 35. Movimientos de embarcación durante de navegación. Cabeceo (*Pitch*), balanceo (*roll*), rumbo de la embarcación por deriva en dirección de navegación (*heading*), variaciones de altitud por consecuencia de oleaje (*heave*).

3.2.2. CAMPAÑA GUAYRIV10

A partir de los datos de anomalías acústicas que sugieren la presencia de ventilas hidrotermales y de emanaciones frías, observados durante BIG10, surgió el interés en la realización de una investigación más detallada de la región del margen de Sonora, considerando un estudio batimétrico y sismo-estratigráfico que permita la comprensión de los procesos de liberación de dichos fluidos. En tal sentido, los Doctores Carlos Mortera y William Bandy incluyeron estos objetivos científicos dentro de los planes de la campaña GUAYRIV10. Ésta lleva su nombre por la abreviación de “estudio de GUAYmas y placa de RIVERa”, por ser una extensa campaña que buscaba estudiar las anomalías magnéticas de los montes marinos presentes dentro de la Placa Oceánica de Rivera en su primera etapa (Leg 1), así como el estudio de la Cuenca de Guaymas y del margen de Sonora para la segunda etapa (Leg 2) (Figura 36).

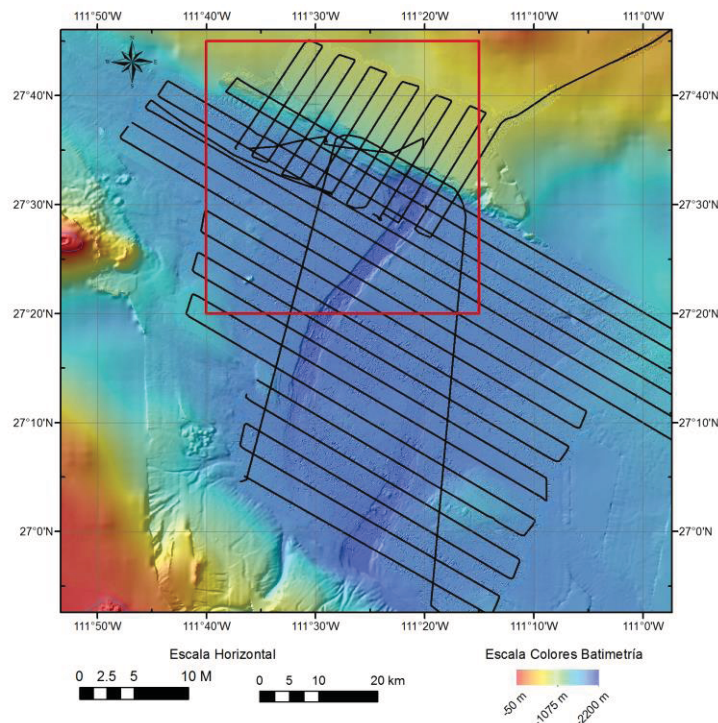


Figura 36. Ruta de navegación durante el LEG 2 de la campaña GUAYRIV10. — Registro de navegación, ■ Área de estudio

3.2. Adquisición de Datos

Debido a la geometría de las estructuras mayores de la Cuenca de Guaymas, como lo son los escarpes del Sistema de Falla de Guaymas en el margen de Sonora, con rumbo aproximado en N60°W, se planteó un levantamiento de 13 perfiles (perfiles L01 a L13) en una orientación ortogonal al margen (NE-SW). Así mismo dada la orientación de N40°E de los ejes de esparcimiento se realizaron 17 perfiles ortogonales (perfiles G01 a G17) con una orientación NW-SE (Figura 36). Solo los datos obtenidos en el cuadrante que cubre el margen son utilizados para el análisis en esta tesis.

Las herramientas empleadas en el desarrollo de esta campaña correspondieron al uso de ecosondas. Estas tienen como objeto el registro de la propagación acústica de una onda en un medio acuático. El sistema de ecosonda opera al emitir un pulso de sonido en el medio acuático cuya velocidad de propagación es conocida, y este al encontrar un súbito cambio en un medio con propiedades acústicas distintas, tal como lo pudiera ser una roca o sedimento, se producirá la descomposición de la onda (Figura 37) en la cual parte de ella es absorbida, transmitida por el nuevo medio, reflejada y sufre una dispersión en otras direcciones de forma irregular.

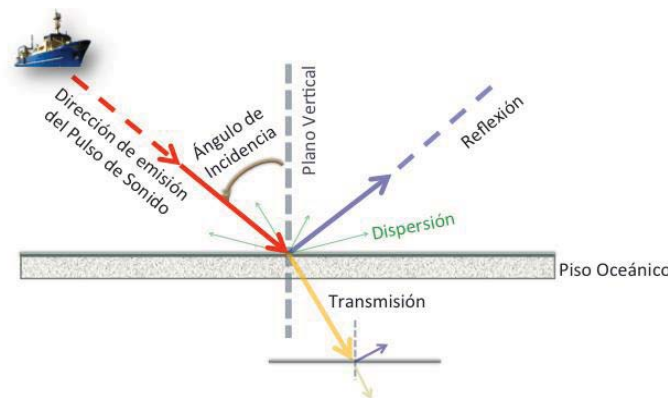


Figura 37. Diagrama de descomposición de un pulso de sonido en un medio acuático

Los ecosondas utilizan la trayectoria directa del haz de sonido que es reflejada (Figura 38). El tiempo que emplea esta trayectoria reflejada al dispositivo emisor/receptor, es empleada en el cálculo de la distancia existente entre dicho dispositivo y la interfaz. Para lo cual solo se requiere conocer la velocidad a la que viajó el pulso acústico; que se obtiene con la relación física $Distancia = Velocidad \times \left(\frac{Tiempo\ de\ viaje}{2}\right)$. Cada ecosonda realizará los algoritmos apropiados, según su configuración de funcionamiento, considerando la condición de movimiento del buque.

3.2. Adquisición de Datos

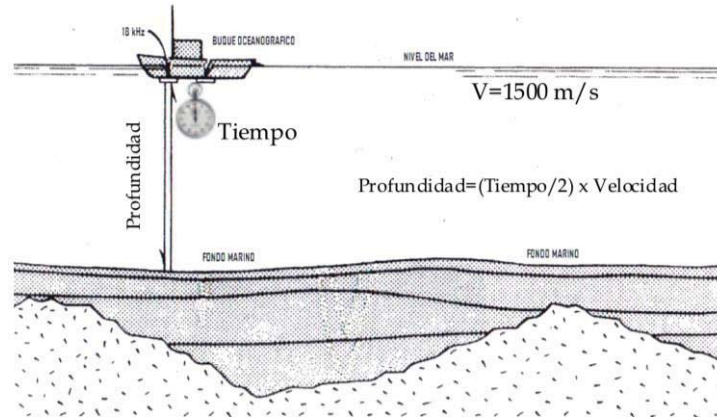


Figura 38. Medición de profundidades con métodos hidroacústicos. Emitiendo un pulso acústico en un medio acuático es posible calcular la profundidad entre la embarcación y el lecho marino, conociendo la velocidad de propagación del sonido en el medio acuático ($\approx 1,500 \text{ m/s}$) y el tiempo transcurrido entre el momento de emisión hasta la recepción del pulso de sonido.

Así mismo, el uso de ecosondas requiere del conocimiento de que la velocidad del sonido en un medio acuático a profundidad varía en función de los parámetros de salinidad, temperatura, densidad y presión, por lo que es necesario conocer el perfil de velocidad de sonido en la región donde se desea realizar el estudio, y así obtener mediciones precisas. Tal como se muestra en la Figura 39, un perfil de velocidad de sonido general del océano, presenta una curva de valores variantes asociados a la estratificación de las masas de agua y al efecto de la presión hidrostática.

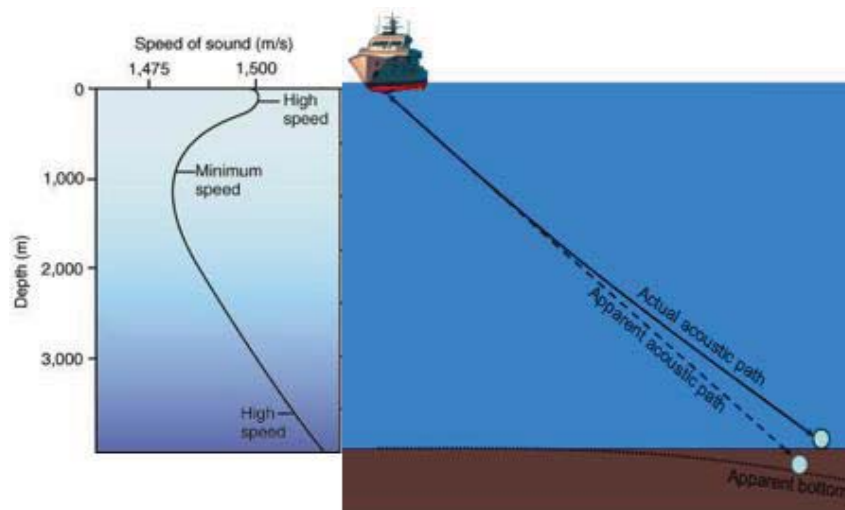


Figura 39. Cambios de la velocidad del sonido en la columna de agua y su efecto sobre las mediciones batimétricas realizadas por medios acústicos. Esquema del efecto geométrico en la trayectoria del haz acústico sufrido por el aumento de velocidad de sonido conforme aumenta la presión (línea azul), las variaciones de temperatura y densidad (salinidad) y su consideración para la estimación de profundidades en un barrido batimétrico multihaz. Tomado de WHOI (1998).

3.2. Adquisición de Datos

Errores en las mediciones de profundidad pueden ocurrir al no considerar estas variaciones de velocidad. En el caso de asumirse valores constantes de velocidad de propagación del sonido para toda la columna de agua (i.e. 1500 m/s empleado en ecosondas monohaz), resultaría que en el rango de profundidades de 500 a 2,500 m, se estará empleando un valor de velocidad mayor, y en consecuencia las profundidades estimadas resultarían más cortas de lo real, produciendo errores como el mostrado en la Figura 39. Este error se iría incrementando en las mediciones de ecosondas con haces emitidos en proyección ortogonal, como las ecosondas multihaz, si no se tuviera en cuenta que la geometría de los recorridos varían acorde a las condiciones ambientales de la columna de agua.

Para solventar dicha situación es empleado un perfilador de velocidad de sonido, también conocido como SVP por sus siglas inglés (*Sound Velocity Profiler*) de la marca Applied Microsystems LTD, modelo SVPlus V2 (Figura 40). Esta herramienta, está equipada con sensores de presión y temperatura y un minúsculo ecosonda que emite un pulso a un espejo a una distancia establecida midiendo el tiempo de su retorno. El SVP realiza mediciones de velocidad a intervalos programados durante su descenso y ascenso, hasta una profundidad máxima que corresponde a una presión de 4000 dBar (Manual de Operador del SVPlus V2). Con estas mediciones se construyen los perfiles de velocidad acústica de la columna de agua para cada área de estudio, los cuales son posteriormente empleados en las mediciones de los ecosondas multihaz.



Figura 40. Sensores empleados durante la campaña GUAYRIV10 para la medición de velocidad de sonido en la columna de agua. Carrusel que soporta en la parte inferior los sensores del CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) y el SVP (*Sound Vertical Profiler*) en la parte superior, abordo del B/O El Puma. Perfilador de Velocidad de Sonido (SVP) empleado para la calibración de las ecosondas en el BO El Puma es de la marca *Applied Microsystems LTD*, modelo SVPlus V2.

3.2. Adquisición de Datos

Alternativamente, estos perfiles de la columna de agua se pueden obtener con el CTD (Figura 40). Este equipo lleva su nombre por las siglas en inglés (*Conductivity, Temperature, Depth*), pues mide la conductividad, temperatura y profundidad en la columna de agua. Sus valores pueden ser integrados a una fórmula empírica que calcula la velocidad del sonido con profundidad.

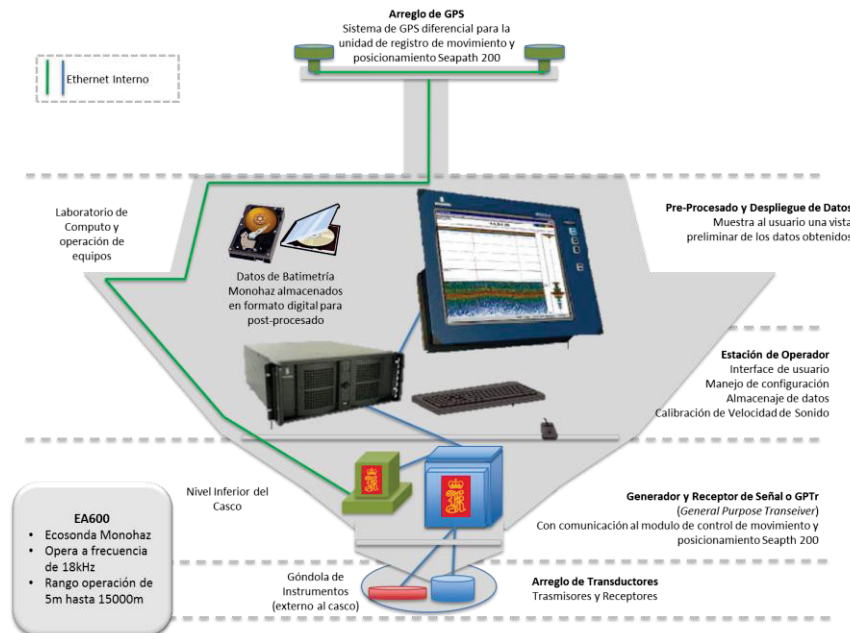


Figura 41. Esquema de configuración del ecosonda monohaz EA600. Integración de los sistemas de navegación y sondeo con el registro de los datos en sección transversal del buque, sistema instalado en el BO El Puma. (Modificado de Kongsberg, Manual de Operador).

También, en esta campaña se realizó un registro de valores de profundidad del piso oceánico, con el ecosonda monohaz de la marca Simrad-Kongsberg, modelo EA-600 (Figura 41). Este ecosonda emplea un transductor de 18 kHz, colocado en el casco del buque. Las profundidades que se pueden medir con este equipo son hasta los 7,000 m (Manual de operador del EA600). Este ecosonda, tal como se muestra en la Figura 41, emite un pulso en el transductor generado por el módulo GPT (*General Purpose Transceiver*). Así mismo, este transceiver al registrar el retorno del pulso, digitaliza la señal, la envía a la consola de control y la despliega gráficamente con perfiles y valores de profundidades. Para esta campaña, la velocidad del sonido en el EA600 a través de la columna de agua es considerada constante, 1,500 m/s, con una precisión de ± 1 m. La utilización de este ecosonda es de referencia para la rápida localización en los rangos de profundidad que los ecosondas TOPAS PS18 y EM300 pudieran operar.

3.2. Adquisición de Datos

De igual forma, utilizando la metodología de Sackett (1977), son empleadas los ecosondas monohaz en la detección de plumas de burbuja, así como cualquier cuerpo de propiedades acústicas contrastantes que se encontrasen dentro del haz de proyección, empleando con un abertura mayor del ángulo de dicho haz, tal como se emplea en los equipos hidrográficos para medir, muestrear u observar las condiciones marinas del lecho y columna.

Para la cartografía batimétrica de la región de GUAYRIV10 una ecosonda multihaz de 30 kHz fue empleada (EM-300, Figura 43). Ésta ecosonda emplea una frecuencia de sonido de entre 30 y 32 kHz, con una cobertura angular de hasta 150° y un total de 135 haces. Debido a que el transductor y el receptor se encuentran sobre una góndola en la parte inferior del casco del barco, el movimiento de la navegación genera una turbulencia que puede afectar la velocidad de la onda enviada, por lo que se debe reducir la velocidad de la navegación a menos de 9 nudos.

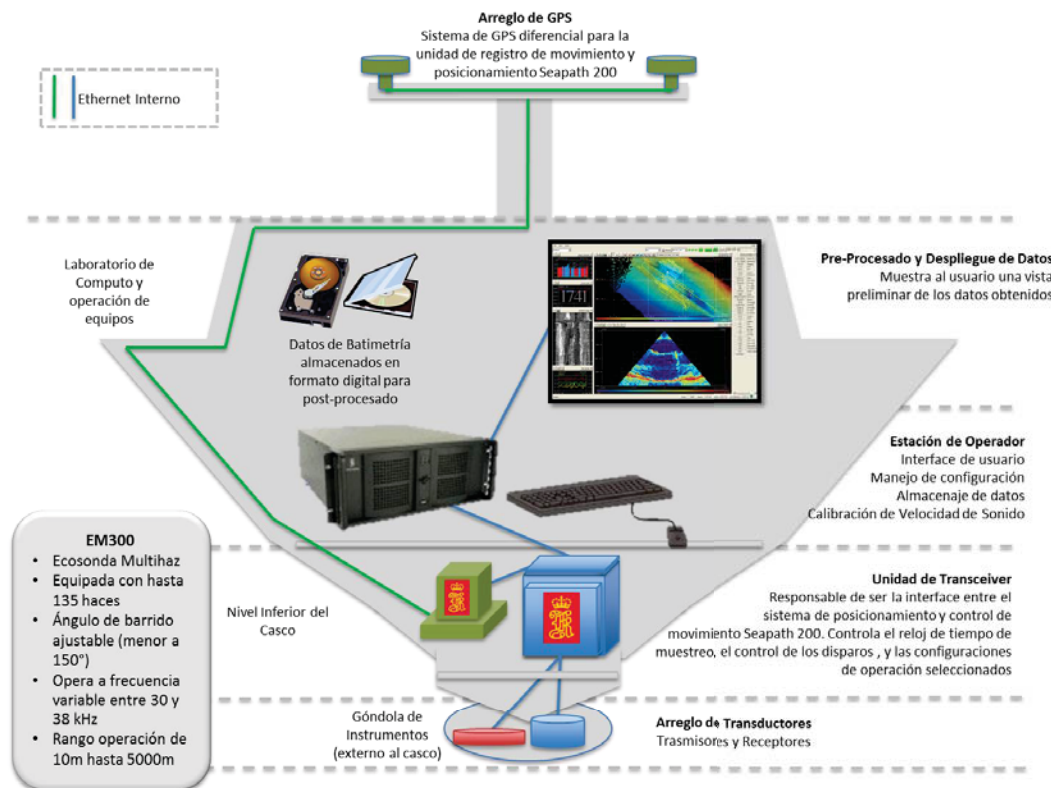


Figura 42. Esquema de configuración del ecosonda multihaz EM300. Integración de los sistemas de navegación y sondeo con el registro de los datos en sección transversal del buque, sistema instalado en el BO El Puma. (Modificado de Kongsberg, Manual de Operador)

3.2. Adquisición de Datos

Esta ecosonda multihaz envía un pulso dado por un conjunto de haces en forma cónica, cuyo ángulo de incidencia es programado, de modo que al interceptar el relieve del lecho marino produzca una reflexión de ondas, y al retornar dicho pulso al navío se registra para después calcular en cuasi-tiempo real valores de batimetría dentro de la franja de sondeo del barrido lateral (Figura 38). En el levantamiento batimétrico con esta ecosonda multihaz, los transectos de navegación del levantamiento son orientados paralelos con una separación tal que se permita el solapamiento de los datos entre un 10 a 20%, con el objeto de que al momento del procesamiento no se tengan zonas sin valores registrados. Para GUAYRIV10 fue empleado un espaciamiento de 4 km entre transectos.

El BO El Puma tiene un ecosonda de penetración, TOPAS PS18 (Figura 18) de la marca Kongsberg, también empleada en GUAYRIV10 para observar indicadores de los fenómenos de liberación de fluidos en esta cuenca. Este ecosonda (o perfilador) provee secciones de sísmica de reflexión de alta resolución de las estructuras geológicas del subsuelo y el lecho marino.

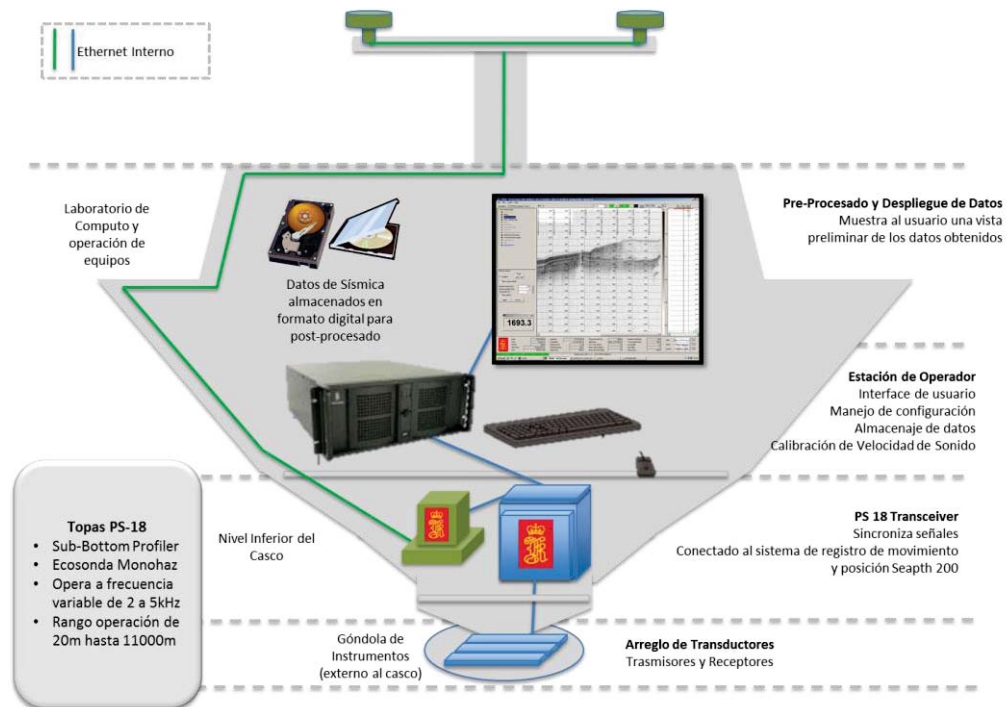


Figura 43. Esquema de configuración de perfilador de subsuelo TOPAS PS18. Integración de los sistemas de navegación y sondeo con el registro de los datos en sección transversal, sistema instalado en el BO El Puma. (Modificado de Kongsberg, Manual de Operador)

3.2. Adquisición de Datos

Este perfilador de subsuelo utiliza un pulso *Chirp* de frecuencia variable entre 2 y 6 kHz. El ecosonda a través de su programa de operación presenta un versátil control de los parámetros del pulso de transmisión mediante filtrado de las señales registradas, el control de ganancia en la recepción de señal y la estabilización electrónica del haz emitido con base a los parámetros geométricos de *Rumbo*, *Heave*, *Roll* y *Pitch*. Mediante un arreglo de transductores en el casco, un pulso *Chirp* es emitido, y según los principios de propagación de ondas en medios sólidos al alcanzar una interfaz contrastante de impedancia acústica, parte de la onda es transmitida al siguiente medio, y otra parte es reflejada, y esto se repite al llegar a la siguiente interfaz. Registrándose el arribo de un tren de datos correspondiente a las interfaces de alternancias estratigráficas (Figura 44). La calidad de los datos (penetración y resolución vertical) de los perfiles sísmicos dependerá de las características de rugosidad, morfología, litología del lecho marino y de la velocidad de navegación. Seis nudos es la máxima velocidad para obtener optimas secciones sísmicas y a mayores velocidades degrada la impresión visual de los registros (Kongsberg, 2007).

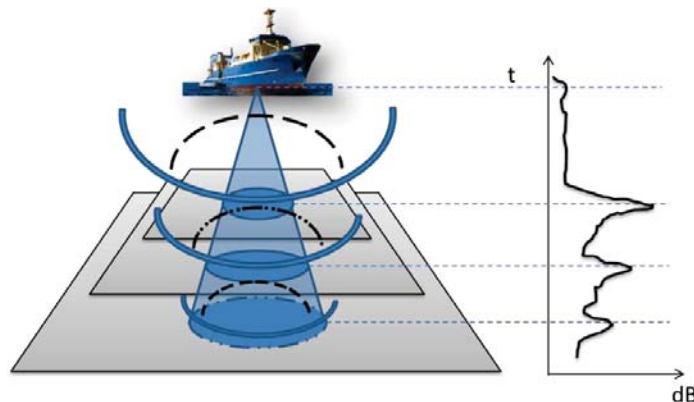


Figura 44. Ilustración de los principios de operación del perfilador de subsuelo TOPAS PS18

Para observar la geometría y magnitud real de las estructuras geológicas presentes en la zona de estudio, es recomendable emplear una orientación de navegación ortogonal a dichas estructuras durante los muestreos sísmicos. Durante el levantamiento de GUAYRIV10, 13 perfiles son orientados en dirección NE-SW, para estudiar las estructuras en los márgenes de la Falla de Guaymas. Los transectos NW-SE son alineados ortogonalmente al *rifts* presente en la Cuenca de Guaymas. La intercepción es de forma cuasi ortogonal, lo cual permite establecer correlaciones entre en las estructuras y unidades estratigráficas que sean identificadas.

3.2. Adquisición de Datos

Durante esta campaña, las coordenadas de navegación y la geo-referencia de los datos son provistos por el sistema de GPS y control de movimientos de la embarcación, del sistema Seapath 200 (Figura 45), que proporciona con alta precisión y en tiempo real las posiciones del buque y de los datos registrados, el rumbo de la embarcación, y los movimientos de navegación (*pitch*, *roll* y *heave*). La alta tasa de datos de movimiento obtenidos de IMU, Unidad de Mediciones inercial (*Inertial Measurements Unit*); y los datos precisos de posicionamiento, dados por la dupla de antenas GPS que conforman el sistema diferencial, son integrados en un filtro de Kalman dentro de la unidad de procesamiento Seapath. Estos datos son empleados para las mediciones realizadas por los ecosondas EM122, EA600 y el perfilador TOPAS PS18.

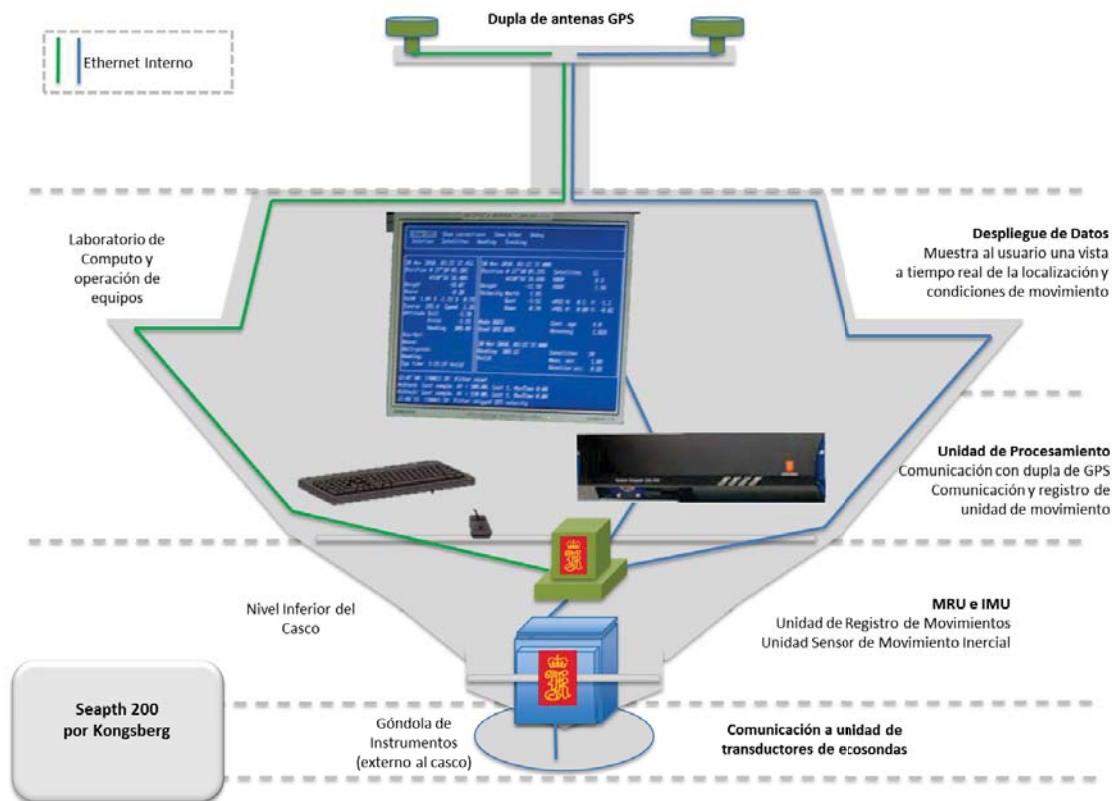


Figura 45. Sistema de navegación y movimiento Seapath 200. Esquema de instalación y funcionamiento de sistema de registro de movimiento, instalado en el BO El Puma. (Kongsberg, Manual de Operado)

3.3. PROCESAMIENTO

Registros continuos de los dos cruceros oceanográficos son seleccionados para el desarrollo de esta investigación, que conforman una base de datos compuesta de 17 perfiles sísmicos de reflexión de alta resolución (perfiles L01 a L13, y perfiles G01 a G04), 31,895 imágenes de retrodispersión acústicas de la columna de agua correspondiente a 53 horas de registro multihaz, y datos de batimetría multihaz obtenido en la campaña GUAYRIV10, que cubre un área aproximada de 4,956 km².

El software y equipos de cómputo empleado durante el desarrollo de esta investigación, provienen del Laboratorio de Procesamiento de Datos Geofísicos Marino en el Instituto de Geofísica, UNAM. Los paquetes de software que se emplearon para el procesamiento de los datos son:

- (1) ARCGIS 10 (ESRI) para la visualización georeferenciada de los datos y construcción de capas de datos y cartas geológicas (ESRI 2012).
- (2) ArcScene 10 (ESRI) para la integración de los datos geofísicos y geológicos en un modelo de elevación digital de terreno 3D (ESRI 2012).
- (3) GeoMapApp para la consulta de la base de datos de geofísica marina en el Golfo de California, (Ryan and et al. 2009) y que agrupa datos de NOAA, NASA, USGS, UGA, WHOI (*Woods Hole Oceanographic Institution*), Universidad de Texas (UTIG), entre otros.
- (4) CARAIBES (IFREMER) para el procesado de los datos de batimetría multihaz, generación de un modelo digital de terreno y en la conversión de datos XYZ a cartas batimétricas (IFREMER 2012).
- (5) TOPAS-REPLAY (Kongsberg) para el post-procesado de los perfiles sísmicos de alta resolución (Kongsber 2006).

3.3.1. LOCALIZACIÓN DE PLUMAS DE BURBUJA

Para la localización de los sistemas de emanación de fluidos presentes dentro de la Cuenca de Guaymas, fueron empleados las imágenes digitales de captura de pantalla de reflexión acústica de la columna de agua, obtenidos mediante el ecosonda EM122, durante BIG10. Una revisión minuciosa de las 31,895 imágenes capturadas permitió una

3.3. Procesamiento

selección de 1,210 imágenes que documentan algún tipo de información en la presencia de plumas de burbujas (Figura 46). El levantamiento de la campaña BIG10 proporciona un solapamiento entre los perfiles paralelos superior al 80%, lo cual produce una redundancia de datos que favorece a la calidad de los mismos.

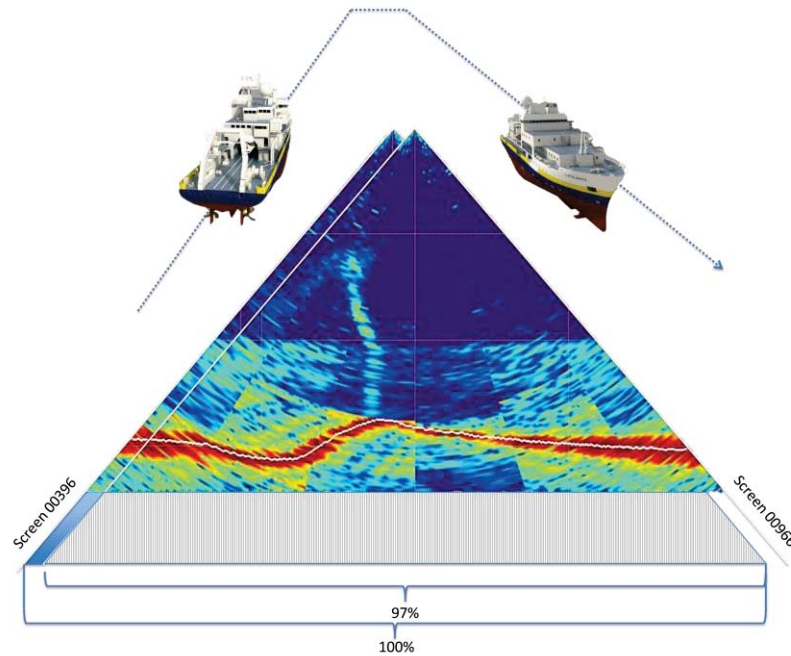


Figura 46. Cobertura de solape entre imágenes acústicas multihaz. Cobertura de hasta 97% obtenido entre imágenes Screen00966 y Screen00396.

Se considera que la proyección multihaz presenta una forma cónica muy estrecha, como en el caso del ecosonda EM122, éste tiene una geometría cuyo ángulo máximo de apertura en dirección del transecto de navegación (*along track*) es de 1° y 150° en la dirección ortogonal al eje del barco (*across track*). Con este ángulo en dirección del eje del barco, a profundidades promedio de 2,000 m, la resolución espacial que brindan es de casi 35 m; como se muestra en la Figura 47. Si se considera que la velocidad navegación es entre los 3 a 5 nudos, y la captura de los datos fue hecha a intervalos 6 segundos, resultando que se tiene un espaciamiento de 12 m entre cada imagen se obtiene un denso catálogo con repetición de imágenes, por lo cual, se optó por procesar imágenes a intervalos de 12 segundos y algunas ocasiones se aumentó el intervalo a 18 segundos, cuando se redujo la baja velocidad, y finalmente solo 204 imágenes presentaron indicadores del ascenso de plumas.

3.3. Procesamiento

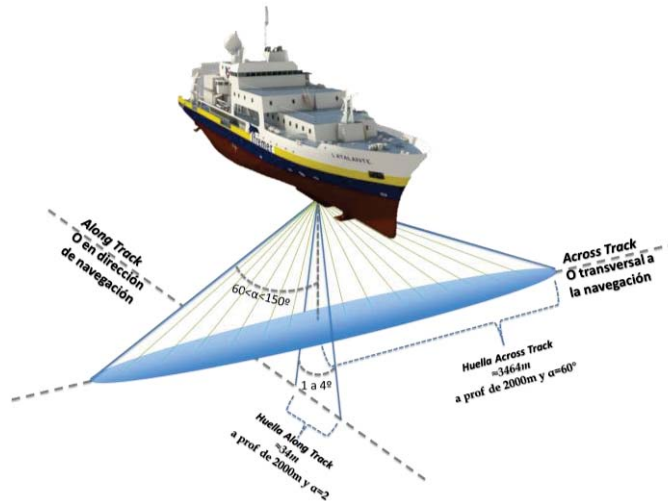


Figura 47. Configuración angular y de cobertura para el ecosonda EM122. Usando como ejemplo una profundidad de 2000m y una apertura angular de 60° across track (ortogonal al buque) y 2° along track (a lo largo del buque) se obtiene una huella de 3464 m y 34 m respectivamente.

Para el procesado de estas imágenes se empleó el software PAINT (Windows). Este software permite visualizar el sistema de coordenadas en pixel para cada imagen. Según lo cual, cada imagen de captura de pantalla analizada posee un marco de escala horizontal y de escala vertical que delimita el área de datos. Se estableció una relación entre el sistema de coordenada en pixeles con PAINT (Figura 48), y la escala métrica propia de cada imagen, para lo cual, son empleados dos puntos medidos sobre un eje vertical para la escala vertical. De forma similar, se realizaría para estimar la relación pixel-metro para el eje horizontal.

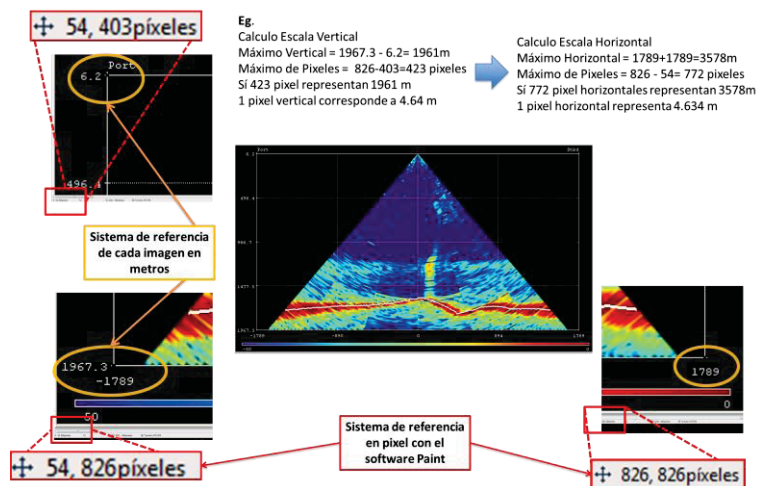


Figura 48. Composición de imágenes de columna de agua. Mediante el software PAINT se establece un sistema de referencia entre las equivalencias pixel-metros, integrando la escala de la imagen con la descomposición de pixeles de la misma.

3.3. Procesamiento

Es importante señalar, que el programa de adquisición SIS, del cual son obtenidas las imágenes, va realizando constantes cambios de escala conforme varía la profundidad, con el fin de poder mostrar en tiempo real, todo el campo del sondeo de la columna de agua, por lo cual se hace necesario definir un sistema de referencia para cada imagen a procesar, dado que cada una muestra escalas métricas distintas sobre una misma resolución de píxeles. Una vez establecido el sistema de conversión pixel-metros de cada imagen, es posible realizar una serie de mediciones directas sobre cada captura de pantalla (Figura 49). Las mediciones directas obtenidas con esta técnica son: distancia horizontal de la proyección del barco al centro de la pluma, altura de la pluma de fluidos, ancho del cuerpo de la pluma, y la profundidad a la que se encuentra el sitio de emanación.

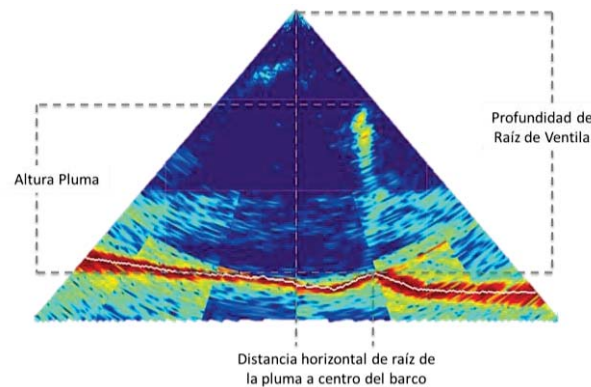


Figura 49. Datos obtenidos por métodos directos sobre las imágenes acústicas multihaz de la columna de agua. Altura de la pluma desde la raíz de la ventila hasta el tope de la pluma observado, profundidad real a la que se encuentra la raíz de dicha ventila, y la distancia horizontal entre la raíz de la pluma hasta el centro del barco.

Al momento de captura de los datos se tenía como sistema de coordenadas un marco geográfico sexagesimal (GCS, por las siglas de *Geographic Coordinate System*). Conociendo que el sistema de proyecciones UTM (*Universal Transversal Markator*) corresponde a un plano horizontal isométrico, una conversión de unidades GCS a UTM permitiría conocer de forma directa las coordenadas de localización de cada pluma de burbuja. Teniendo en cuenta que las coordenadas indicadas en cada imagen corresponden a la posición de la embarcación al momento de captura de la imagen, siendo necesario conocer la dirección a la cual se encuentra dicha emanación, para proyectar su ubicación con la distancia previamente calculada. Para esto, debemos considerar dos variables fundamentales y son el rumbo verdadero del navío o *heading*, la posición relativa respecto al barco (babor o estribor).

3.3. Procesamiento

Tal como se observa en el ejemplo ilustrado en la Figura 50, es posible calcular las coordenadas de proyección de esta pluma de burbujas mediante relaciones trigonométricas; empleando para ello, la equivalencia de ángulos entre el *heading* y el ángulo entre la proyección del cono de haces con los ejes cartesianos. Adicionalmente, hay que considerar si esta distancia en cada eje deberá sumarse o restarse a las coordenadas originales del navío, según sea el caso correspondiente.

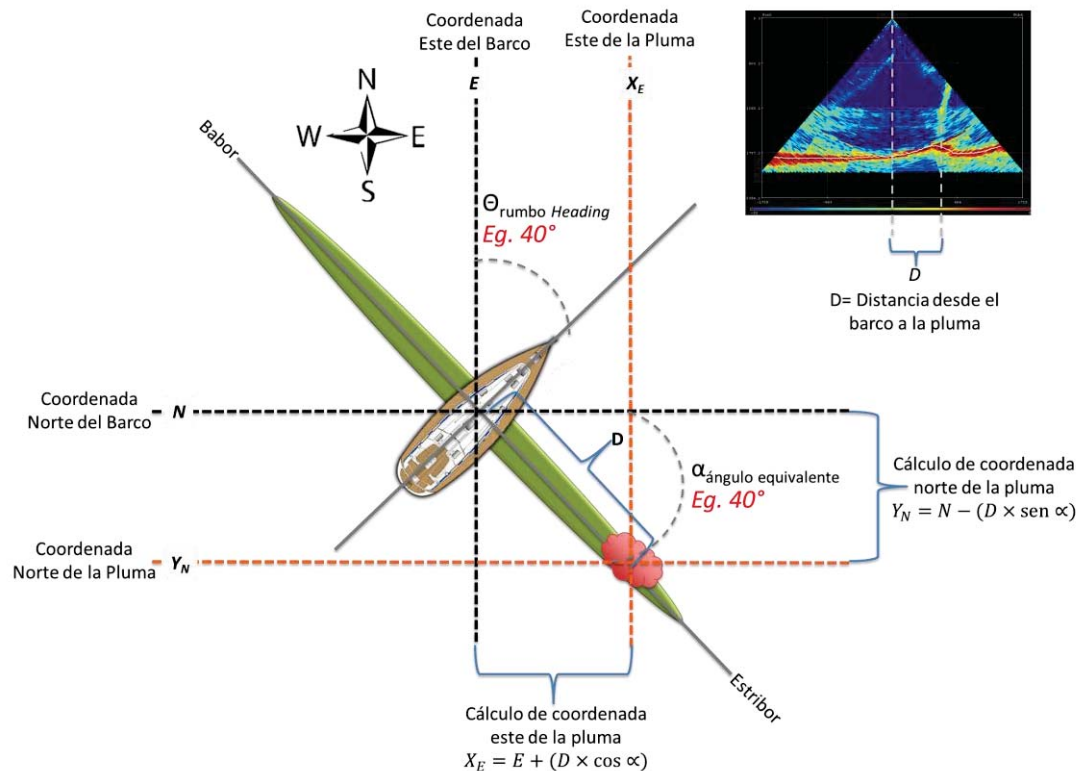


Figura 50. Ilustración de proceso de localización de las plumas de burbuja a partir de las imágenes acústicas multihaz de columna de agua. A partir de las relaciones trigonométricas de los ángulos y la distancia entre la pluma y el navío, es posible el cálculo de las coordenadas de dicha pluma.

Cada medición realizada es integrada a la base de datos, conformada por los estimaciones de localización y otros datos complementarios, como lo son: las coordenadas en grados sexagesimal de la posición del buque, "Heading" (0-360°), "Pitch" (0-180°), "Roll" (0-180°), "Heave" (en metros), velocidad de navegación (en nudos), fecha y hora de captura de la imagen, profundidad sobre el eje central del abanico multihaz (en metros), cobertura del fondo marino (en metros), y finalmente frecuencia del pulso empleado por la ecosonda.

3.3. Procesamiento

Empleando las herramientas del software ArcGis 10, se realiza la proyección cartográfica de las coordenadas de sitios de emanación compilados en la base de datos, que forma parte del sistema de información geográfico creado para esta investigación. Posteriormente, sobre la carta geográfica es posible realizar análisis y discriminaciones estadísticas de datos, como parte de las etapas posteriores.

3.3.2. PROCESAMIENTO DE DATOS DE REFLEXIÓN SÍSMICA

Durante la campaña GUAYRIV 10, 16 perfiles de reflexión sísmica de alta resolución fueron registrados, empleando el perfilador TOPAS PS-18 para el levantamiento del margen de Sonora en la intercepción del Rift Norte en la Cuenca de Guaymas. La Figura 51, muestra los 13 transectos de los perfiles sísmicos dirección ortogonal (NE-SW) a la Falla de Guaymas, y los otros cuatro en dirección paralela (NW-SE) al margen de Sonora. Cada transecto sísmico mantuvo un rumbo constante durante toda su extensión, salvo pequeñas variaciones como consecuencia del oleaje y viento. El registro continuo de la ecosonda se realizó solo a lo largo de los 16 perfiles y se detuvo el registro en el tránsito de un transecto a otro.

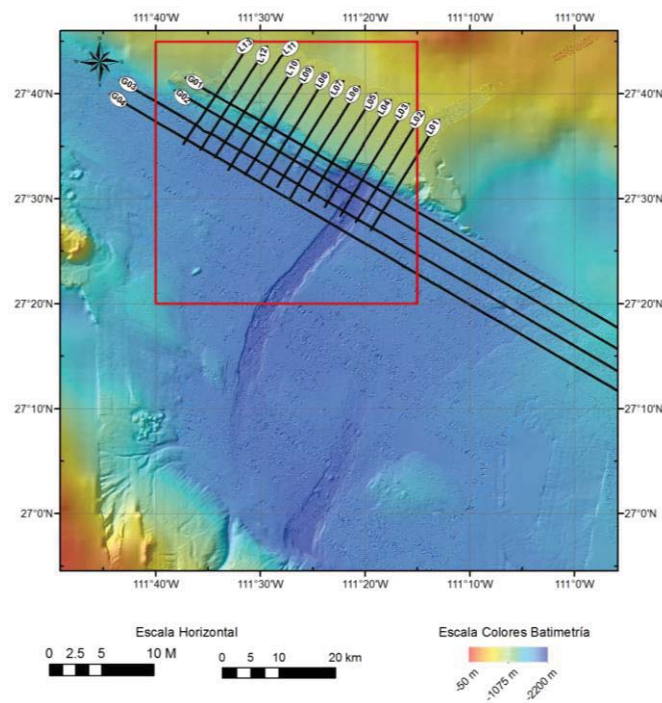


Figura 51. Ubicación relativa de los 16 perfiles sísmicos analizados. Perfiles L01 a L13 con orientación NE-SW y perfiles G01 a G03 con orientación NW-SE.

3.3. Procesamiento

Una vez seleccionados los 17 archivos de los perfiles sísmicos, le fueron aplicados una serie de algoritmos para mejorar las secciones sísmicas de las estructuras. Estos procesos son estándares con el empleo del programa TOPAS REPLAY (Kongsberg 2007). Los procesos más comunes que se utilizaron para mejorar el despliegado de las imágenes sísmicas son los siguientes:

- (1) El Filtro de Emparejamiento (*Matched Filter*): Este filtrado es empleado para mejorar la calidad de los datos adquiridos y resulta de la compresión del pulso de largas secuencias de ondas codificadas con el fin de incrementar la relación de la señal sobre el ruido existente. El filtro es implementado en el dominio de la frecuencia con una respuesta plana y considerando un 100% de transmisión en el ancho de banda pasante con 0% de transmisión en la banda retenida.
- (2) El filtro de “Pasa Banda” (*Band Pass*): Este filtro es aplicado en el dominio de frecuencias, dentro de una estrecha ventana de las frecuencias deseadas, para obtener un mejor contraste en los resultados.
- (3) Variación automática de ganancia (VGA): La ganancia es empleada para optimizar la visualización de las trazas, que amplifica las amplitudes de señal débil, mientras que las fuertes son atenuadas.
- (4) Apilamiento de Trazas (*Trace Stacking*): Este apilamiento de trazas, es empleado para eliminar y reducir el ruido aleatorio registrado.
- (5) Otros procesos son aplicados esporádicamente para reducir múltiplos de ecos en aguas someras (*Dereverbation*) y filtros en trenes de oleaje (*Swell Filetering*).

Una vez realizado este procesado digital, el programa TOPAS REPLAY permite establecer combinaciones de colores para la visualización de los perfiles sísmicos, con base a que cada pixel tiene asociado un valor de intensidad en la onda registrada. Escalas gráficas de colores facilitan el contraste de las estructuras dentro de la sección sísmica. Los horizontes de reflexiones y formas de dispersión por superficies irregulares en estas secciones son digitalizados para posteriormente interpreta geológica y geofísicamente.

3.3.3. PROCESAMIENTO DE BATIMETRÍA MULTHAZ

El objeto principal del procesamiento de los datos batimétricos multihaz es la generación de un modelo digital de terreno a partir del cual se puedan generar cartas batimétricas donde proyectar la información geológica obtenida. El procesamiento de los datos obtenidos en GUAYRIV10 se realizó empleando el Software CARAIBES. El procesado de los datos es hecho de la forma que presenta el flujo de trabajo señalado en la Figura 52. Inicialmente el procesado se enfoca a corregir el gran volumen de valores batimétricos multihaz por errores sistemáticos que fueron introducidos durante la fase de adquisición. Posteriormente las siguientes etapas en el procesado son para filtrar estadísticamente valores imprecisos. Como última etapa en el procesado, el modelo digital de terreno es computado con los valores restantes. El procesado de datos batimétricos multihaz requiere un mayor tiempo para alcanzar el modelo de terreno digital más óptimo. Por falta de tiempo, el modelo digital que se presenta aquí no es concluyente, además, porque se consideró que procesos de filtrado posteriores y suavizado pudiesen eliminar rasgos morfológicos muy pequeños, como lo son las estructuras de las ventilas hidrotermales y los sitios de emanaciones frías.

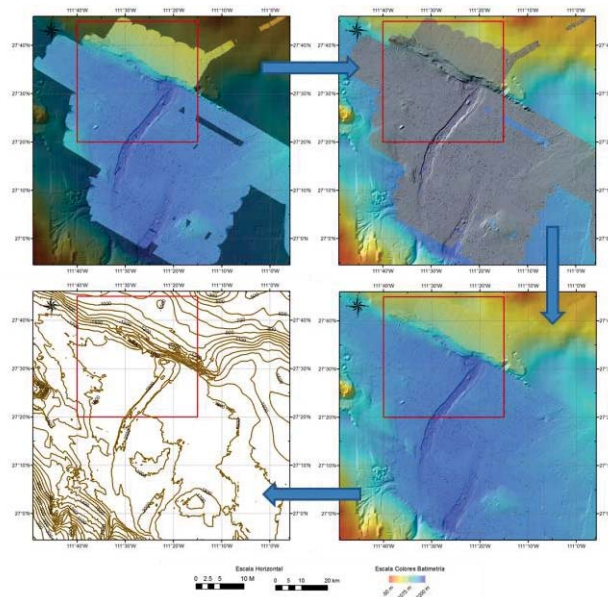


Figura 52. Proceso de integración de datos batimétricos obtenidos en GUAYRIV10 con la base de datos internacionales GMRT (GeoMapApp). Arriba: base de datos de batimetría multihaz a color (derecha) y en relieve gris (izquierda) obtenida en la campaña GUAYRIV10 sobre puesto a la base GMRT. Abajo: contornos de profundidades (izquierda) y carta batimétrica a color (derecha) como resultado de la composición de ambas bases de datos de batimétricos.

3.3. Procesamiento

Regionalmente la base de datos batimétrica multihaz GMRT, por las siglas en inglés de Topografía Global de Multi-Resolución (*Global Multi-Resolution Topography*), sería empleada para la proyección de valores dentro de los espacios de vacíos (Figura 52). Esta batimetría presenta una resolución de proyección variable en función de los datos disponibles en el sector de interés. Esta base GMRT está disponible de forma gratuita mediante el software GeoMapApp (Ryan and et al. 2009).

3.4. INTERPRETACIÓN

Una vez procesados los datos de ambas campañas oceanográficas con los paquetes de software que se tienen en el Laboratorio de Procesamiento de Datos Geofísicos Marinos, los resultados que se obtienen son una carta de batimetría multihaz del relieve del lecho marino en 2D y 3D, y una rejilla de secciones sísmicas de la estratificación de los sedimentos someros en el subsuelo del margen. El catálogo de ventilas hidrotermales de la campaña BIG-10 es integrado con las cartas batimétricas y secciones sísmicas a una base de datos para desplegarse gráficamente con el software ArcGIS. Como último, estos datos son utilizados para proponer el posible modelo geológico en 3D de la tectono-estratigrafía del margen.

4. RESULTADOS

Los datos de las campañas oceanográficas BIG10 y GUAYRIV10, aportaron los resultados fundamentales para el desarrollo de esta tesis. En este sentido, los datos batimétricos multihaz describen la morfología del relieve del lecho marino en la Cuenca de Guaymas y del margen de Sonora, mientras que los resultados de los 17 perfiles sísmicos de alta resolución establecen el marco tectono-estratigráfico somero de la región. Las ubicaciones resultantes de las plumas de burbujas son correlacionadas con los elementos tectónicos y stratigráficos presentes en la región NW de la Cuenca de Guaymas.

4.1. DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA

La campaña GUAYRIV10 cubrió una región de 4,956 km² que abarcan los sondeos batimétricos multihaz de alta resolución de esta campaña, siendo complementada con la base de datos internacional GMRT para generar una extensa carta batimétrica de la Cuenca de Guaymas y de su colindante margen de Sonora (Figura 53).

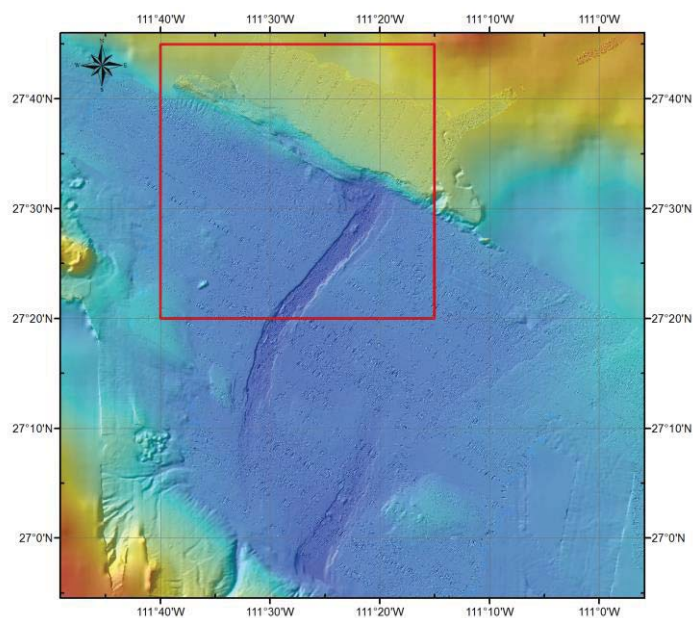


Figura 53. Integración de modelos batimétricos de la Cuenca de Guaymas. Integración de los datos de los modelos digitales de elevación obtenidos en la campaña GUAYRIV10 y la base topográfica GMRT. El cuadro en rojo marca el área de estudio.

Con base a esta carta, la morfología de los principales rasgos de la zona es estudiada (Figura 54). Entre ellas podemos distinguir: plataforma continental del margen de Sonora, planicie de la Cuenca de Guaymas, Rift Norte, Rift Sur. Así mismo, estructuras de menores dimensiones en la carta son identificadas, como: Cuenca de Satélite, Cuenca Nodal, pie de talud y Cordillera del Sistema de Falla de Guaymas. La resultante descripción morfológica del relieve solo abarca la región enmarcada por un área de 2,300 km² en la esquina NE de la Cuenca de Guaymas con el Rift Norte (recuadro rojo de la Figura 53).

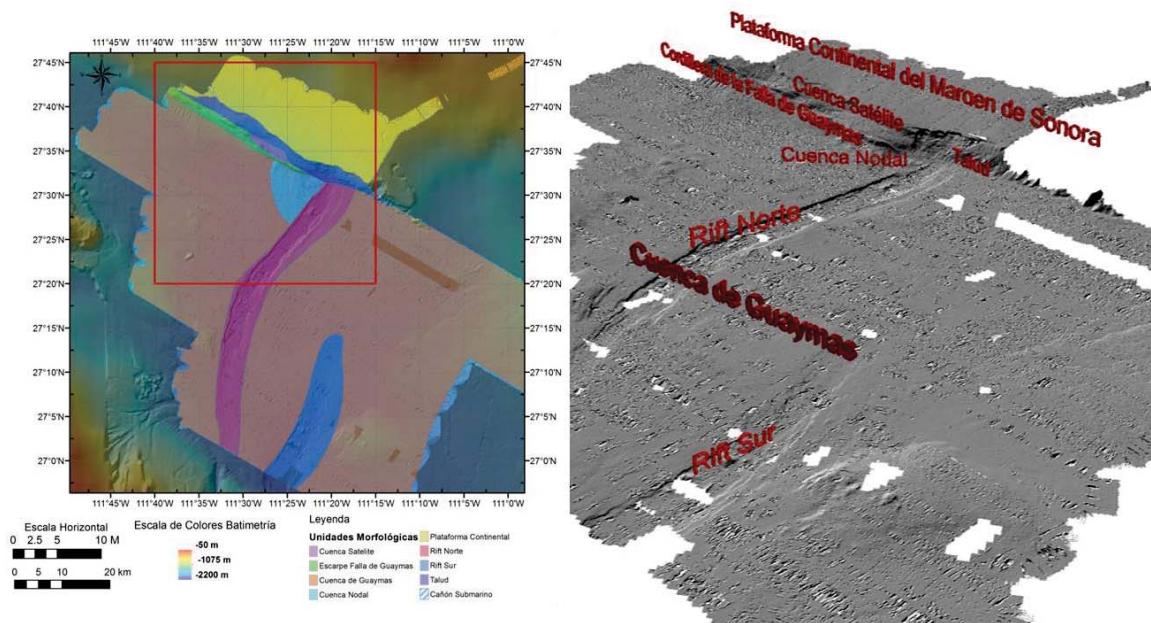


Figura 54. Unidades morfológicas descritas en la el margen de Sonora y la Cuenca de Guaymas. Izquierda: unidades morfológicas dentro de la región de estudio. Derecha: relieve en 3D donde se muestra la expresión morfológica de las unidades. El recuadro rojo en marca el área de estudio.

4.1.1. PLATAFORMA CONTINENTAL DEL MARGEN DE SONORA

De norte a sur, el margen de Sonora es la primera provincia fisiográfica descrita, está ubicada como la porción más distal de la plataforma continental que se extiende desde las costas del Estado de Sonora (Figura 55). Esta provincia exhibe una pendiente promedio de 1.7°, y está caracterizada por un relieve batimétrico muy plano y regular.

4.1. Descripción Morfológica

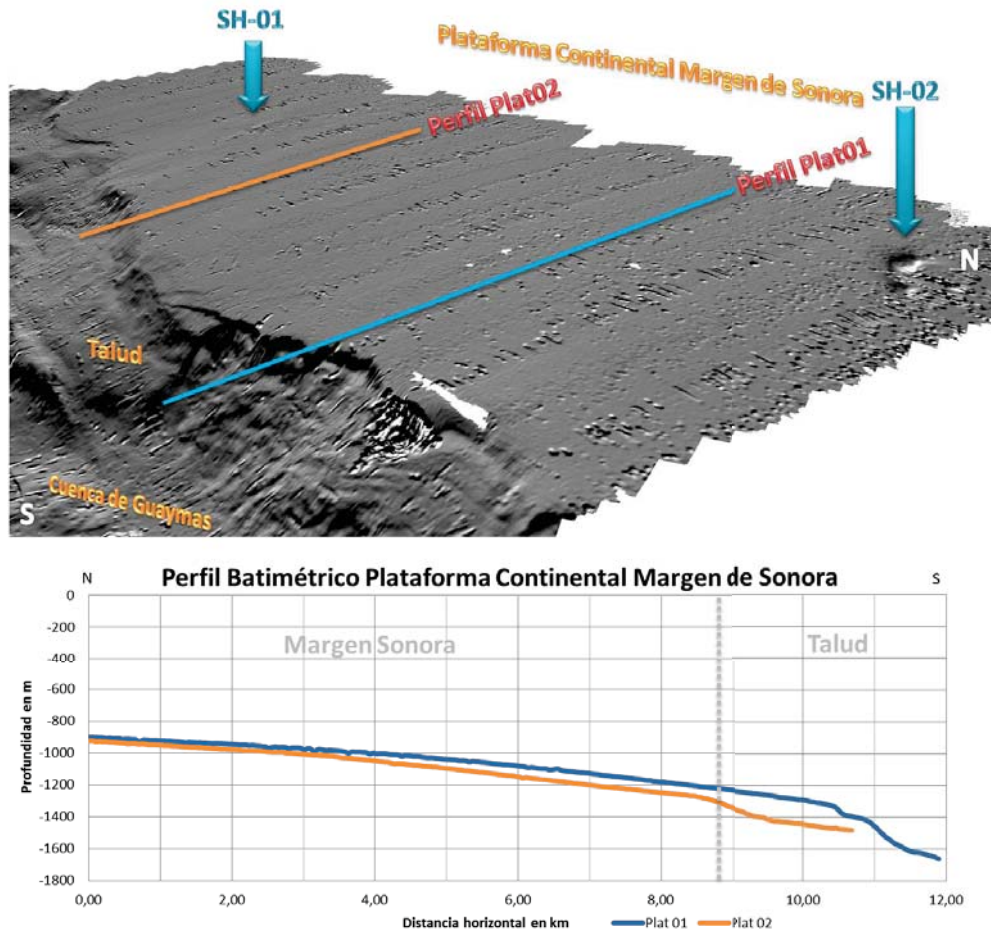


Figura 55. Plataforma continental del margen de Sonora. Arriba: Vista en el modelo de elevación en 3D del relieve de esta unidad, destacando la localización de los perfiles batimétricos Plat-01 y Plat-02; así como la localización de las estructuras SH-01 y SH-02. Abajo: La topografía de los perfiles Plat-01 y Plat-02, destacando la baja pendiente y homogeneidad en su relieve en el margen de Sonora.

Por su parte, se observan dos estructuras de menores dimensiones que interrumpen el relieve homogéneo del margen de Sonora. Estas estructuras están identificadas como SH-01 y SH-02 ($111^{\circ} 26.68' N$ y $27^{\circ} 36.96' E$; y $111^{\circ} 26.68'$ y $N 27^{\circ} 40.171' E$, respectivamente). Estas corresponden a un par de morfologías de relieve negativo con geometría irregular (Figura 55), siendo observadas para descripción sismo-estratigráfica en los perfiles sísmicos L01 y L09. Mientras que la terminación al suroeste de esta plataforma presenta un surco de meandros causado por un cañón submarino (Figura 56). Este cañón está interrumpido por el escarpe generado por la Falla de Guaymas, en su segmento norte.

4.1. Descripción Morfológica

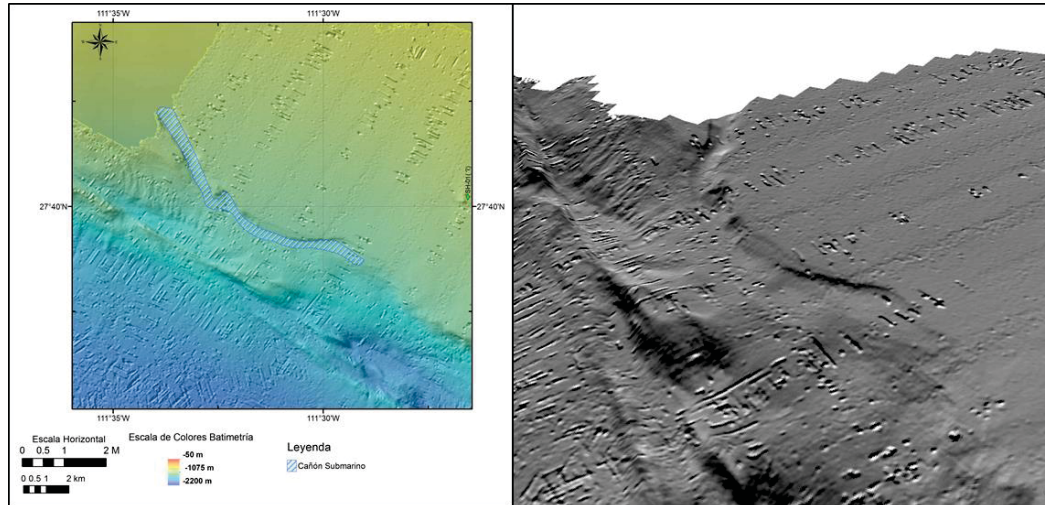


Figura 56. Cañón submarino observado en la plataforma continental del margen de Sonora. Izquierda: relieve batimétrico del margen de Sonora, destacando la localización del cañón observado. Derecha: vista en el modelo digital de terreno 3D del cañón submarino.

La transición entre la Plataforma continental del margen de Sonora y la planicie de la Cuenca de Guaymas es una zona fuertemente afectada por efectos tectónicos, erosión e inestabilidad gravitacional, dentro de la cual, hay tres unidades morfológicas internas de mayor consideración para describirlas aquí: (1) el pie del talud del margen de Sonora, (2) el escarpe del Sistema de Falla de Guaymas, y (3) la Cuenca Satélite.

PIE DE TALUD

El Pie de Talud presenta una morfología muy variable, con pendientes que van desde los 50° hasta 80°, tal como se observa en los perfiles batimétricos Tal-01, Tal-02, Tal-03 y Tal-04 (Figura 57). Ellos muestran en detalle los cambios de relieve en el pie de Talud. Tal como se observa en la Figura 58, en las cercanías del Rift Norte existen grietas semi-circulares que corresponden a estructuras de colapso. Así mismo en la zona central, el talud presenta una forma más regular, teniendo una pendiente homogénea afectada tenuemente por escarpes de fallas lístricas asociados a la propagación de la inestabilidad gravitacional en su extremo sur, mientras que en su zona norte, el pie de talud presenta un estilo muy irregular, producto de la convergencia de los ramales del Sistema de Falla de Guaymas. Significativamente, el límite inferior de esta unidad es definido morfológicamente por la traza del Sistema de Falla de Guaymas con una terminación abrupta al pie del talud.

4.1. Descripción Morfológica

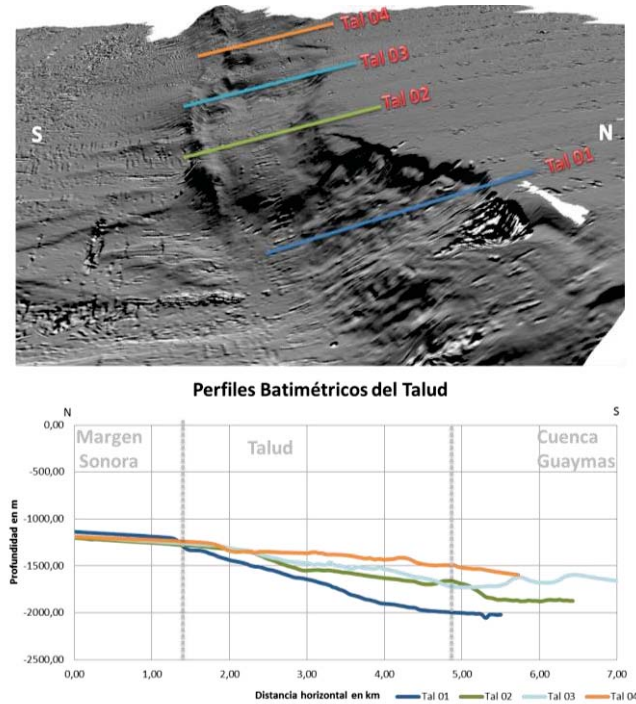


Figura 57. Unidad morfológica de talud en el margen de Sonora. Arriba: vista del modelo de elevación 3D del pie del talud, con la localización de los perfiles batimétricos. Abajo: grafica de los perfiles batimétricos Tal-01, Tal-02, Tal-03 y Tal-04, mostrando las irregularidades en su morfología y constantes cambios de pendiente



Figura 58. Modelo de elevación digital en 3D del talud. Ilustrando los estilos morfológicos variables de norte a sur.

ESCARPE DEL SISTEMA DE FALLA DE GUAYMAS

La unidad morfológica del escarpe del Sistema de Falla de Guaymas marca la transición más notoria entre la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora. El escarpe tiene una expresión estructural en forma de una cordillera con pendientes asimétricas, donde la ladera sur tiene pendientes intermedias de entre 20° y 30° , mientras que la ladera norte es de 60° a 70° , siendo la erosión de las corrientes y el flujos submarino los responsables de esta alta pendiente (Figura 59).

4.1. Descripción Morfológica

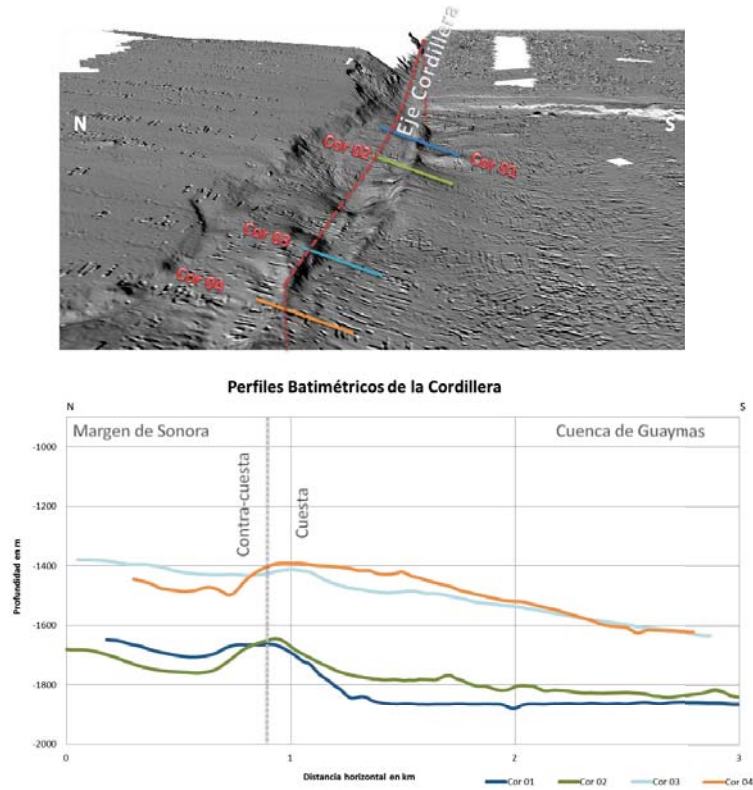


Figura 59. Unidad morfológica de la cordillera de la Falla de Guaymas. Arriba: vista del modelo de elevación 3D del relieve, ilustrando la localización de los perfiles batimétricos. Abajo: grafica de los perfiles batimétricos Cor-01, Cor-02, Cor-03 y Cor-04, que ilustran la morfología de relieve de ambas cuestas.

El relieve de esta unidad tiene una textura muy regular, con la excepción de los lomos que se alinean en su extremo norte; esta zona es identificada como AST01 y AST02. Los modelos digitales de terreno 3D en la Figura 60, exhiben una alineación ortogonal a la cordillera.

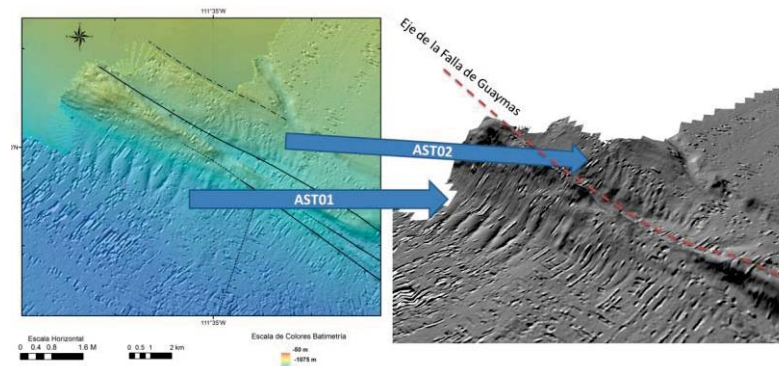


Figura 60. Vistas de los abanicos submarino AST01 y AST02 sobre el pie del talud. Izquierda: mapa batimétrico con rasgos estructurales ilustrando la relación entre estos abanicos y la Falla de Guaymas. Derecha: vista del modelo digital de terreno en 3D de los abanicos submarinos en relación al eje de la falla.

4.1. Descripción Morfológica

Por otra parte, el límite sur de esta unidad corresponde a un contacto transicional con la planicie de la Cuenca de Guaymas, el cual es marcado por el cambio progresivo de pendientes. El límite norte del relieve de esta unidad es definido en forma abrupta por el escarpe de la traza sur del Sistema de Falla Transformante de Guaymas.

CUENCA SATÉLITE

La Figura 61 muestra una depresión morfológica entre la cordillera del escarpe del Sistema de Falla de Guaymas y el pie del talud, que está configurada por una cuenca estrecha y somera de geometría romboidal, referida en la bibliografía como Cuenca Satélite (Paull, et al. 2007). La depresión de esta cuenca se extiende en una área de aproximadamente 9.000 km², teniendo un relieve muy regular y suave. Así mismo, el relieve de la cuenca muestra parte de las estructuras de erosión como consecuencia del drenaje proveniente del cañón submarino del río Sonora. Esta cuenca se encuentra confinada por terminaciones abruptas que corresponden a la traza norte y sur del Sistema de Falla de Guaymas. Dicha depresión estructuralmente tiene la forma de una cuenca de transpresión y referida en la literatura como una cuenca *pull-apart*.

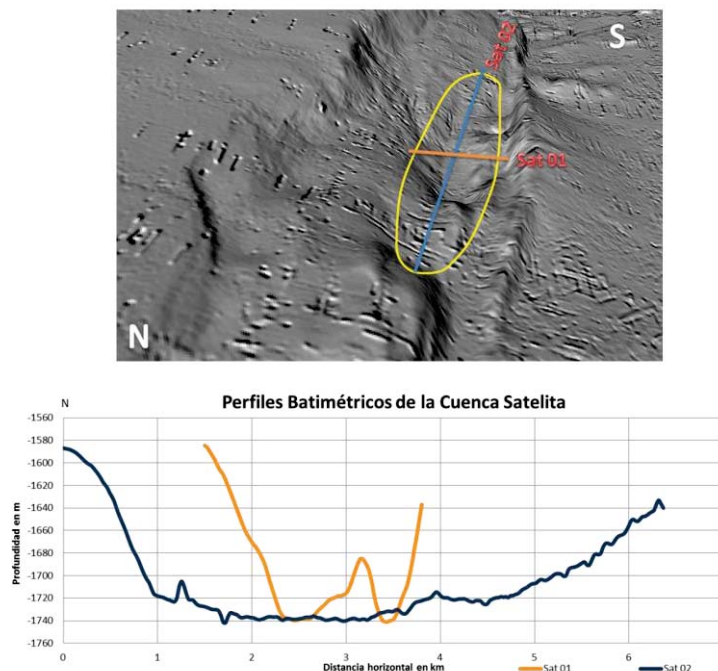


Figura 61. Unidad morfológica de la Cuenca de Satélite. Arriba: Vista en el modelo de elevación 3D del relieve de esta unidad, destacando la localización de los perfiles batimétricos. Abajo: grafica de los perfiles batimétricos Sat-01 y Sat-02, ilustrando la morfología romboidal de la cuenca.

4.1. Descripción Morfológica

4.1.2. PLANICIE DE LA CUENCA DE GUAYMAS

La carta batimétrica en la Figura 62, muestra que al sur de la cordillera del escarpe del Sistema de Falla de Guaymas está la planicie abisal de la Cuenca de Guaymas. Esta planicie tiene una morfología plana semi-horizontal con una profundidad promedio de 1,800 m. Su relieve en el área de estudio presenta una textura muy suave y regular, sólo está accidentado por los *grabens* que componen los Rift Norte y Sur, la depresión de la cuenca nodal, y por los taludes de la Isla Tortuga;, mientras que los perfiles batimétricos y los modelos digitales de elevación, muestran que la planicie de esta cuenca, se encuentra levemente empinada hacia la boca del Golfo de California.

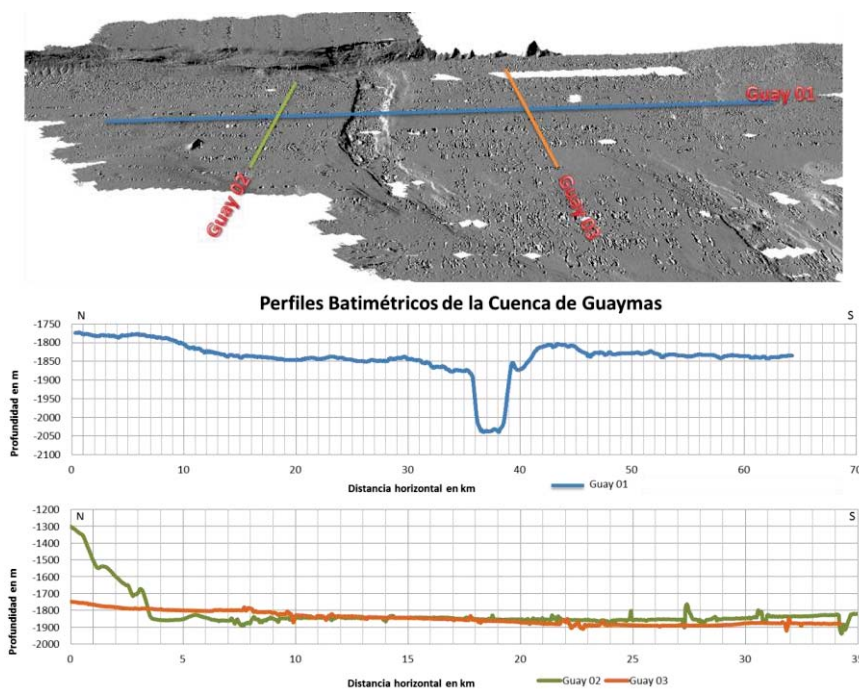


Figura 62. Unidad morfológica de la Cuenca de Guaymas. Arriba: vista del modelo de elevación en 3D del relieve, con la localización de los perfiles batimétricos. Abajo: grafica de los perfiles batimétricos Guay 01, Guay 02 y Guay 03, destacando la morfología semiplana que caracteriza esta región.

CUENCA NODAL

Dentro de los escasos rasgos estructurales que presenta la planicie de la Cuenca de Guaymas existe una depresión en forma triangular (con una área de $\sim 25 \text{ km}^2$) en la zona de intersección entre segmento el norte del Rift Norte y el pie del margen (Figura 63), esta depresión se cataloga como Cuenca Nodal, donde su margen presenta un conjunto de deslizamientos en dirección oblicua al Sistema de Falla de Guaymas y al Rift Norte.

4.1. Descripción Morfológica

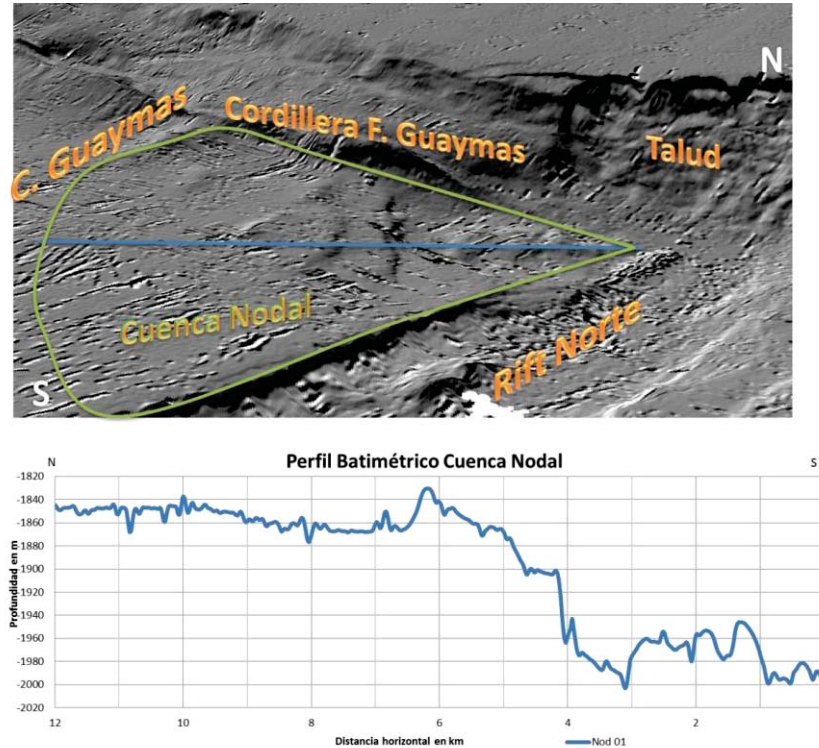


Figura 63. Unidad morfológica de la Cuenca Nodal. Arriba: vista del modelo de elevación en 3D del relieve, con la localización de los perfiles batimétricos. Abajo: grafica de los perfiles batimétricos Cor 01, Cor 02, Cor 03 y Cor 04, destacando la morfología triangular de este sistema de distensión.

A la vez, el perfil batimétrico de la Figura 12 muestra una tendencia clara de la depresión existente en el relieve de la cuenca hacia el vértice de este triángulo. Además, el perfil presenta un conjunto de valores altos y bajos que corresponden a estructuras de menores dimensiones en el lecho marino, que a una distancia de 5 km de la intersección, tiene un rápido hundimiento de más de 150 m dentro de un rango de longitud de 2 km.

RIFT NORTE

Las estructuras morfológicas de mayor significancia bio-geo-química en la planicie de la Cuenca de Guaymas son los *grabens* del sistema de Rift que seccionan el lecho. En el plano horizontal, estos *grabens* forman una geometría cóncava solapante denominada técnicamente como *overlapping*, resultado de la deformación bajo un régimen transtensional (Angelier, et al. 1981). Dentro del área de estudio, la estructura de la terminación norte del Rift Norte, está formada por un *graben* con diferencias de profundidades de hasta unos 200 m en su parte más profunda (Figura 64).

4.2. Sismo-Estratigrafía

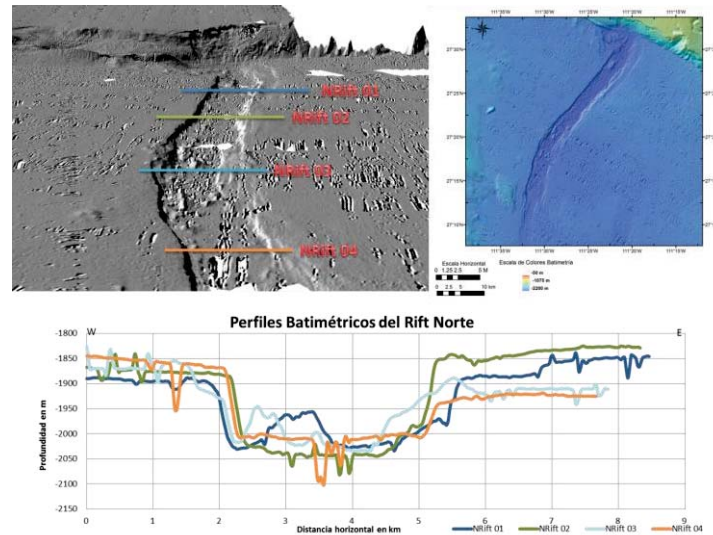


Figura 64. Unidad morfológica del Rift Norte. Arriba: vista del modelo de elevación en 3D del relieve, con la localización de los perfiles batimétricos. Abajo: Grafica de los perfiles batimétricos NRift-01, NRift-02, NRift-03 y NRift-04, ilustrando la morfología de relieve de *graben* asimétrico de esta cuenca.

La pared del margen norte de este *rift* es un escarpe simple con una pendiente superior a los 80° , mientras que la pared del margen sur, exhibe varios escalones, resultado del estilo de fallamiento normal en un *half graben*. El lecho marino en el interior del *graben* presenta algunos altos topográficos asociados a estructuras volcánicas; sin embargo, domina un relieve plano cuasi-horizontal como consecuencia de la alta tasa de sedimentación que existe en esta región. Esta sedimentación cubre parcialmente las estructuras asociadas al vulcanismo y de deformación tectónica asociadas al proceso de apertura oceánica.

4.2. SISMO-ESTRATIGRAFÍA

Los resultados de los perfiles de reflexión sísmica de alta resolución adquiridos con el ecosonda de penetración Topas PS18 son utilizados para la descripción tectono-estratigráfica somera del subsuelo marino en las unidades morfológicas descritas anteriormente. Las secciones sísmicas acá referidas se encuentran en versión extensa en el Anexo A. Por su parte, la ausencia de resultados de datación de muestras de sedimentos o rocas dentro del área de estudio, y la incertidumbre que genera la lejanía de los datos del DSDP, dificultan el establecimiento de posible relaciones crono-estratigráficas entre los bloques tectónicos; por lo cual la descripción se realiza de forma discreta y empleando codificaciones únicas para cada unidad.

4.2. Sismo-Estratigrafía

4.2.1. PLATAFORMA DEL MARGEN DE SONORA

Como resultados de esta región ubicada al NE del área de estudio, se tienen los perfiles sísmicos L01 a L13, los cuales en su extremo norte tienen una penetración acústica entre 200 m y 150 m que permite definir la sísmica de la parte distal de esta plataforma (Figura 65). En ella se muestra una alternancia de binomios en secuencias de rocas clásticas, agrupados en cuatro unidades estratigráficas: CS-04, CS-03, CS-02 y CS-01 (Figura 65). Estas unidades están separadas por discordancias en *onlap* en las proximidades del talud, mientras que hacia el interior de la plataforma estas secuencias se observan con una estratigrafía paralela.

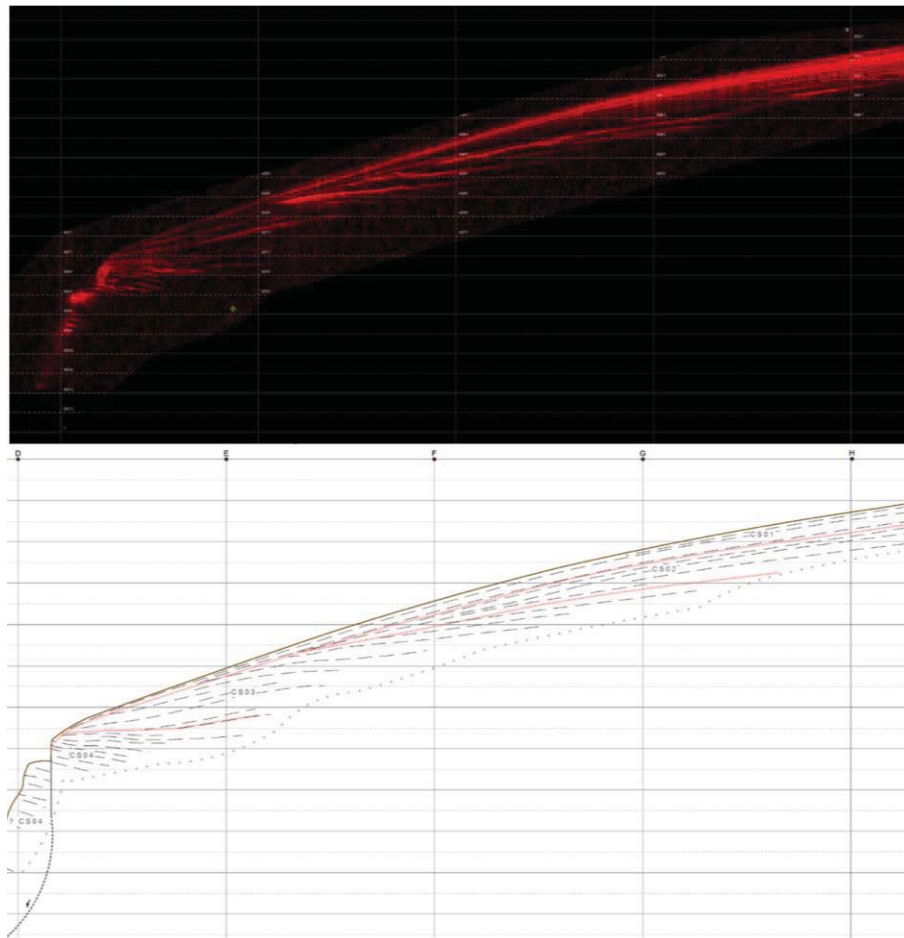


Figura 65. Interpretación sismo-estratigráfica de la plataforma continental del margen de Sonora. Arriba: vista original de la sección sísmica obtenida a lo largo del perfil L05. Abajo: interpretación sismo-estratigráfica del perfil.

4.2. Sismo-Estratigrafía

La geometría que exhiben estas unidades estratigráficas sugiere la alternancia de procesos de progradación y retrogradación en el margen de la plataforma continental. En este sentido, las secuencias CS-03 y CS-02 representan etapas de retrogradación, mientras que la unidad CS-01 representa una progradación reciente que corona la columna estratigráfica en la plataforma. Esta se extiende hasta el talud, donde la ausencia de reflectores impide la distinción de estas unidades.

En esta región no se observan rasgos estructurales de escala regional que puedan correlacionarse con las secciones sísmicas contiguas. Sin embargo, existen algunas estructuras de carácter local dentro de esta región, entre las que destacan las estructuras de deslizamientos por gravedad (*slumping*) en las cercanías del talud que afecta la unidad CS03, mostrados en las secciones L07 y L06, (Figura 66).

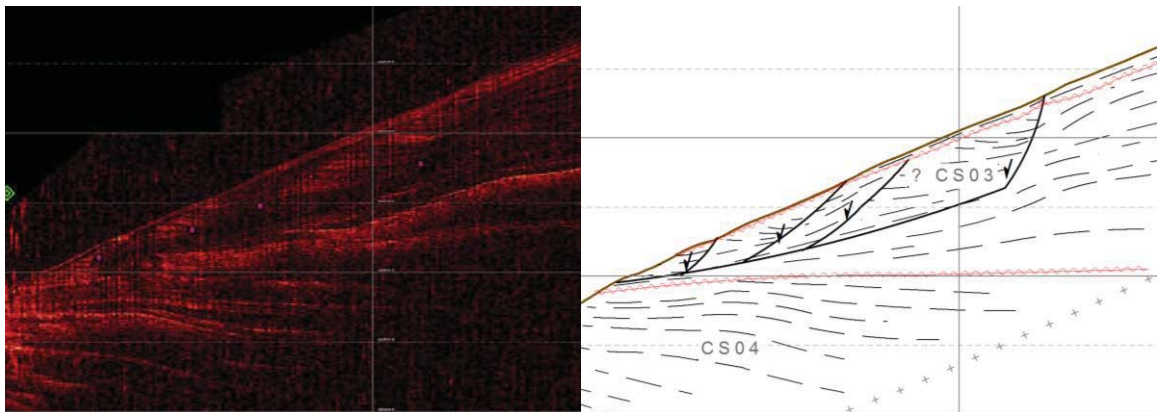


Figura 66. Deslizamientos por gravedad en la parte marginal de la plataforma continental del margen de Sonora. Izquierda: vista original de la sección sísmica del perfil L07. Derecha: interpretación sismo-estratigráfica del perfil.

Por su parte, el perfil L10 en la zona central de la plataforma muestra un conjunto de fallas verticales que deforman la columna sedimentaria, las cuales aparentemente no deforman la unidad CS01 (Figura 67). Estas estructuras no son observadas en las secciones sísmicas contiguas, lo cual sugiere que corresponden a una inestabilidad gravitacional local, previa a la depositación de CS01.

Sin embargo, no es posible observar la respuesta sísmica de las unidades morfológicas en las localidades SH-01 y SH-02 (Figura 68). En ambas localidades los reflectores parecen plegarse en forma de sinclinal simétrico, y en cuyo eje destaca una zona de transparencia acústica y atenuación de los reflectores sísmicos. Esta deficiencia de señal sísmica sugiere la presencia de fluidos que saturan la secuencia sedimentaria,

4.2. Sismo-Estratigrafía

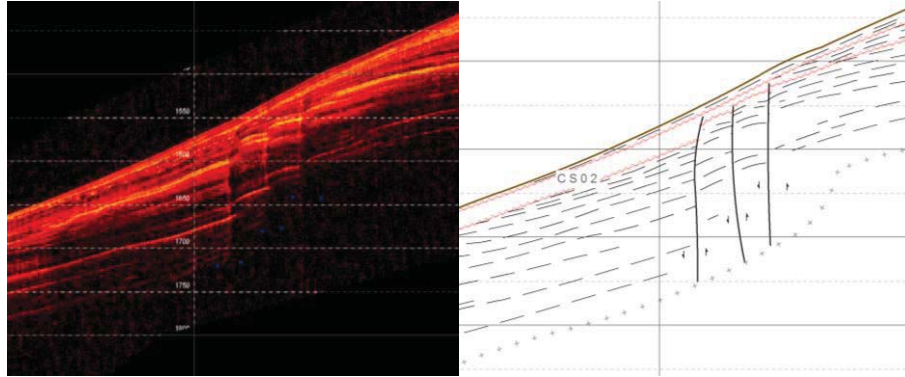


Figura 67. Sistema de fallas verticales en el interior de la plataforma continental del margen de Sonora. Izquierda: vista original de la sección sísmica del perfil L10. Derecha: interpretación sismo-estratigráfica del perfil.

los cuales al ubicarse en las cercanías de la superficie del lecho marino pueden producir la licuefacción de los mismos, y posteriormente generar el colapso del lecho, dejando depresiones como lo son los *sink holes* observados en otras zonas de actividad hidrotermal o emanaciones frías (*cold seeps*).

Sin embargo, no es posible observar la respuesta sísmica de las unidades morfológicas en las localidades SH-01 y SH-02 (Figura 68). En ambas localidades los reflectores parecen plegarse en forma de sinclinal simétrico, y en cuyo eje destaca una zona de transparencia acústica y atenuación de los reflectores sísmicos. Esta deficiencia de señal sísmica sugiere la presencia de fluidos que saturan la secuencia sedimentaria, los cuales al ubicarse en las cercanías de la superficie del lecho marino pueden producir la licuefacción de los mismos, y posteriormente generar el colapso del lecho, dejando depresiones como lo son los *sink holes* observados en otras zonas de actividad hidrotermal o emanaciones frías (*cold seeps*).

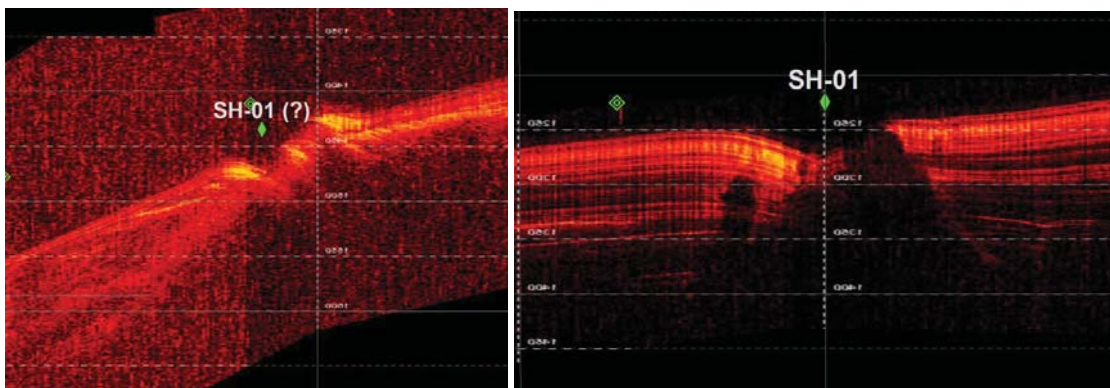


Figura 68. Estructuras de colapso con morfología sinclinal en las localidades SH-01 (izquierda) en el perfil L12 y SH-02 (derecha) en el perfil L01.

4.2.2. CUENCA DE GUAYMAS

En la Cuenca de Guaymas se tiene una amplia cobertura con todos los perfiles sísmicos de alta resolución adquiridos en la campaña GUAYRIV10. La estratigrafía somera de esta región está bien definida por reflectores continuos en toda su extensión (Figura 69). La señal sísmica logró una penetración en el subsuelo hasta 130 m. La estructura de la secuencia estratigráfica presenta una flexión sinforme hacia la dorsal del Sistema de Falla de Guaymas, mientras que los espesores de los estratos aumentan gradualmente desde la parte alta de la dorsal, hacia el depocentro de la cuenca.

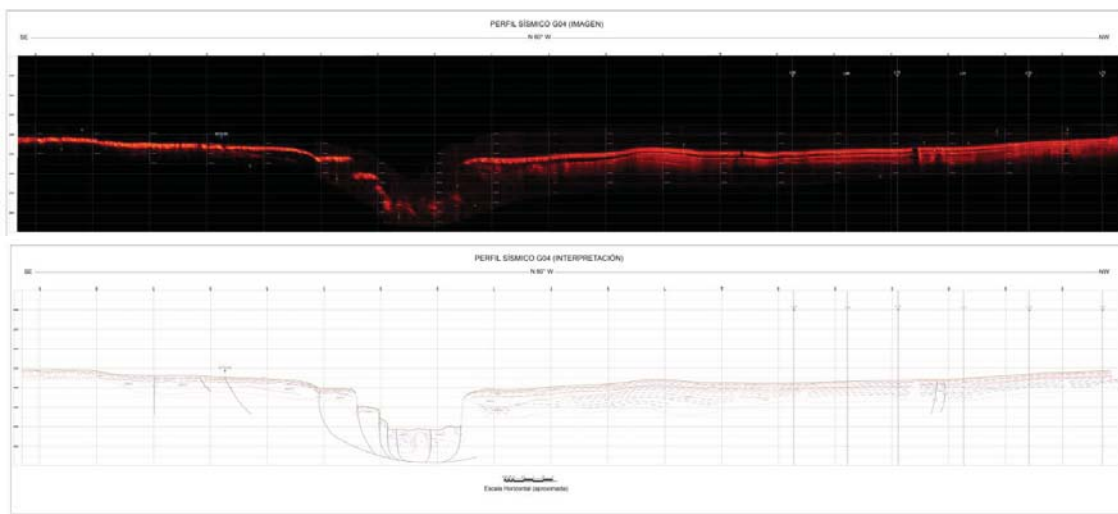


Figura 69. Interpretación sismo-estratigráfica de la Cuenca de Guaymas, cortando el Rift Norte. Arriba: sección sísmica del perfil G04. Abajo: interpretación sismo-estratigráfica del perfil G04.

La Figura 70 reúne las relaciones estratigráficas de las unidades someras en la Cuenca de Guaymas. La secuencia más antigua en esta región es la unidad GB03. Esta unidad exhibe una alternancia de binomios de dureza característicos de sedimentos turbidíticos bajo ambiente de energía intermedio, seguido por un periodo de no depositación. Tal discordancia está definida por la base de la secuencia GB02, la cual presenta un ángulo suave de erosión, haciéndose paralela y concordante hacia el depocentro de la cuenca.

4.2. Sismo-Estratigrafía

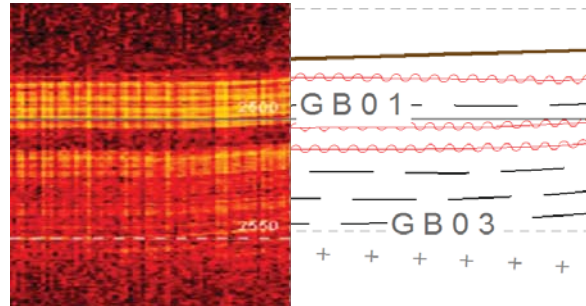


Figura 70. Unidades estratigráficas someras observadas en las secciones sísmicas de la Cuenca de Guaymas. Izquierda: ejemplo de sección sísmica. Derecha: interpretación sismo-estratigráfica.

La unidad GB02 se caracteriza por la ausencia de reflectores sísmicos en toda su extensión que sugiere una estratificación masiva no laminada. Dado el ambiente tectónico actual, estos sedimentos pueden corresponder a depósitos turbidíticos. Posteriormente, la estructura marca un periodo de erosión y no depositación que genera el acuñamiento de la unidad GB02 y de las capas suprayacentes, encima de las cuales, se depositó una secuencia turbidítica con una alternancia de binomios de dureza identificado como GB01, muy similar a GB03. Sobre esta unidad se logran observar algunos reflectores débiles con estratificación masiva identificada como QSa, por ser considerada como resultado de sedimentos cuaternarios no consolidados.

En la zona norte del área de estudio, fuera del recuadro seleccionado se observa una secuencia de turbiditas sin planos de estratificación notables (Figura 71). Esta secuencia se encuentra discordante sobre la unidad GB03, y cortada por un contacto abrupto vertical con las unidades GB01 y GB02.

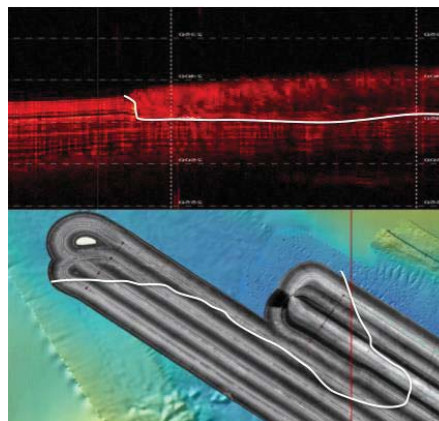


Figura 71. Turbiditas observados en la región norte de la Cuenca de Guaymas. Arriba: la capa de turbiditas en la sección sísmica del perfil L13. Abajo: el contraste de turbiditas y sedimento pelágico observado en la imagen del IM30 obtenida por Lizarralde et al. (2007). Los límites de las turbiditas están marcados con una línea blanca.

4.2. Sismo-Estratigrafía

En la planicie de la Cuenca de Guaymas se observan escasos rasgos estructurales (salvo los pertenecientes al Rift Norte y a la Cuenca Nodal). A ambos márgenes del Rift Norte se observa una serie de discontinuidades sísmicas verticales (Figura 72), sin expresión en la morfología, que parecen corresponder con la propagación de la deformación extensional del esparcimiento oceánico.

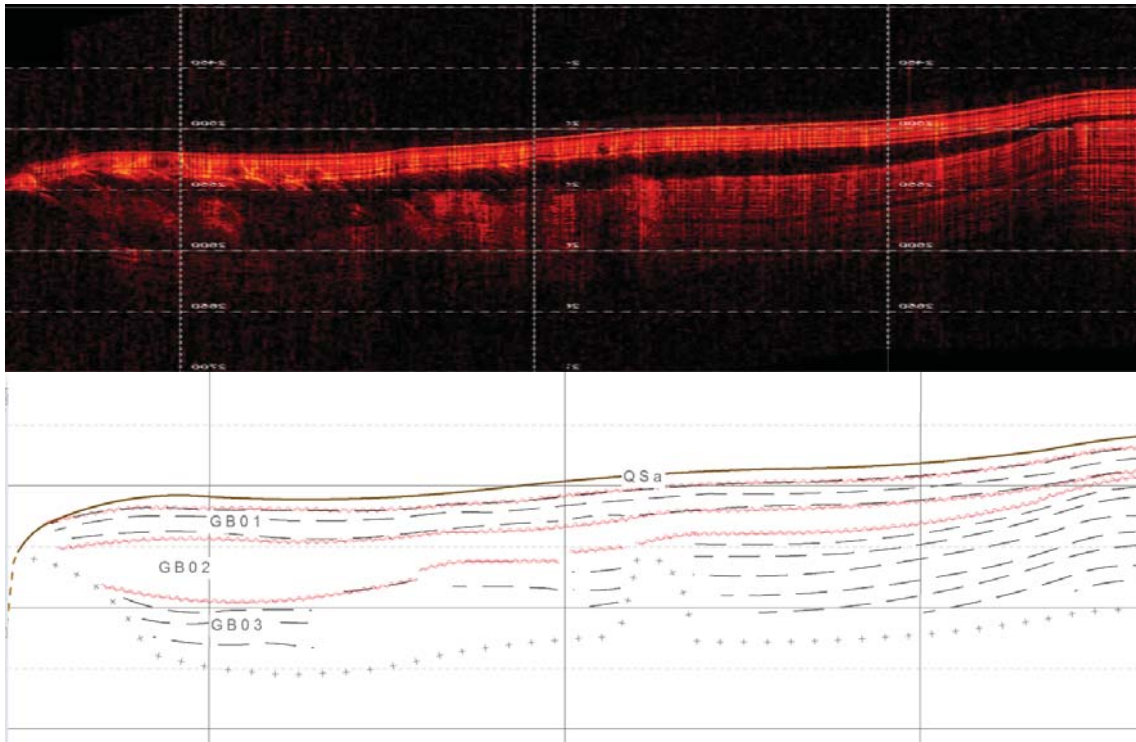


Figura 72. Secuencia de discontinuidades irregulares verticales en el margen sur del Rift Norte. Izquierda: sección sísmica del perfil G04. Derecha: interpretación sismo-estratigráfica del perfil.

Así mismo, se observan cuerpos intrusivos fuera de los ejes de esparcimiento oceánico, como lo es la intrusión II-01 (Figura 73). Éste se observa en el perfil G03 en la cercanía con la intersección del perfil L05. En esta localidad se presenta una zona de reflectores difusos a transparentes de unos 500 m de ancho, la cual se encuentra plegando las capas de la unidad GB01 y QSa, así como una alteración en las unidades GB03 al generar que los reflectores de esta unidad se muestren difusos.

4.2. Sismo-Estratigrafía

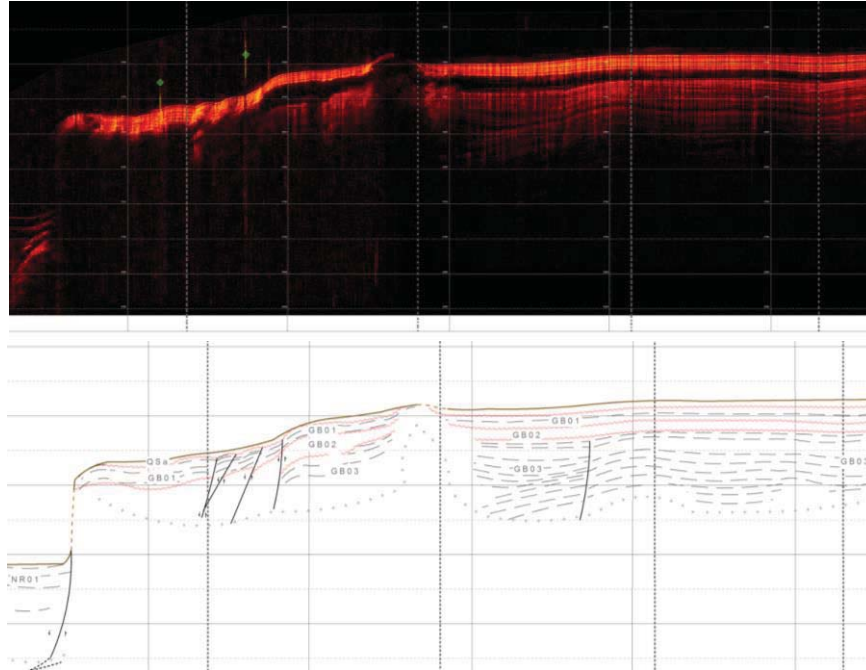


Figura 73. Cuerpo intrusivo II-01 o zona de escape que deforman la secuencia sedimentaria en la Cuenca de Guaymas, fuera del rift. Arriba: sección sísmica del perfil G03. Abajo: interpretación sísmo-estratigráfica del perfil.

En las proximidades de la dorsal del Sistema de Falla de Guaymas, los perfiles L08, L09 y L10, presentan un reflector sísmico de baja amplitud (Figura 74), con un paralelismo al relieve batimétrico y discordante a los reflectores identificados en la unidad estratigráfica GB03. Este horizonte sísmico podría ser un Reflector Simulador de Superficie, referido también como BSR (*Bottom Simulator Reflector*). Esta superficie se interpreta como la base del nivel de estabilidad de los hidratos de metano dentro de la secuencia sedimentaria.

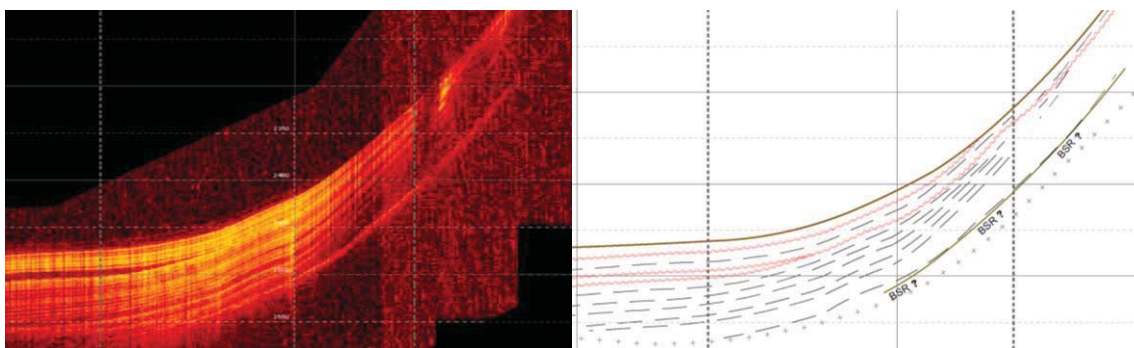


Figura 74. Posibles BSR en la Cuenca de Guaymas cercanos a la cordillera. Arriba: sección sísmica del perfil L08. Abajo: interpretación sísmo-estratigráfica del perfil.

4.2. Sismo-Estratigrafía

RIFT NORTE

Dada la orientación ortogonal de los perfiles sísmicos en relación al Rift Norte, las secciones sísmicas G01 a G04 presentan rasgos sismo-estratigráficos característicos que la definen. La Figura 75 muestra que la ladera norte del *graben* del *rift* presenta un estilo estructural simple de un escarpe, producto de una sola falla normal vertical dominante y algunas fallas incipientes con un desplazamiento menor, mientras que la ladera sur del *graben* exhibe un conjunto de escalones, producto de fallas normales con un desplazamiento promedio de 50m.

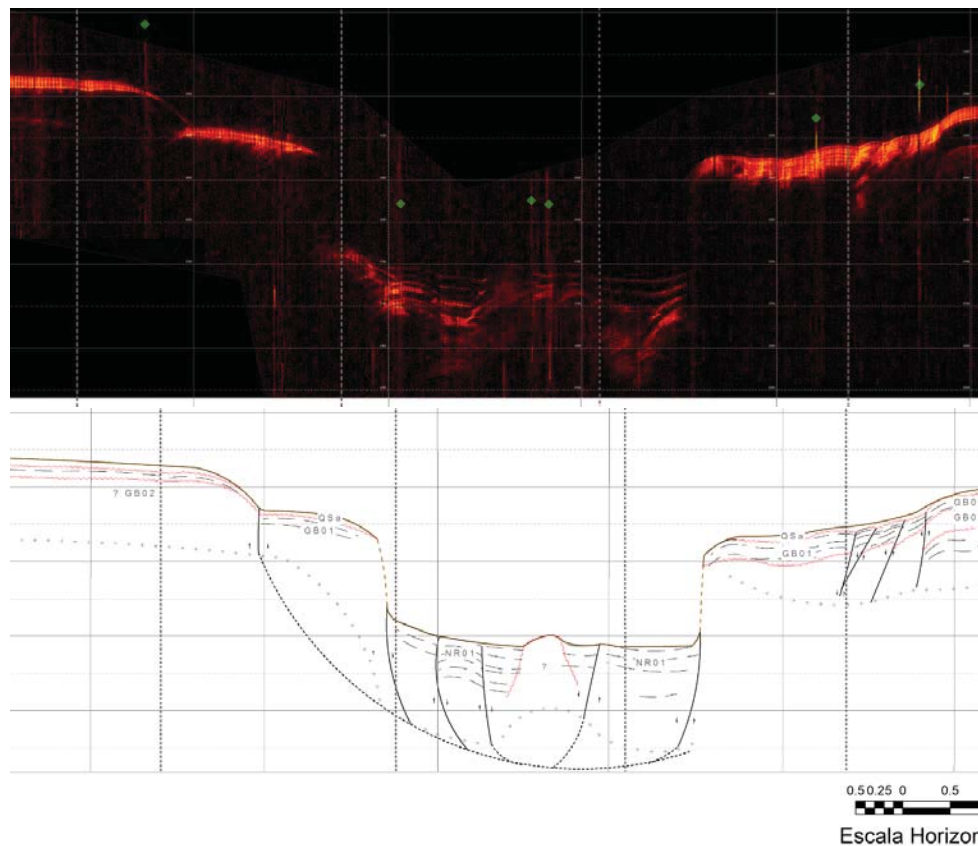


Figura 75. Interpretación sismo-estratigráfica de la cuenca del Rift Norte. Arriba: sección sísmica del perfil G03. Abajo: interpretación sismo-estratigráfica del perfil.

En ambas laderas de este *graben*, las secciones sísmicas que cruzan el *rift* muestran claramente horizontes de las unidades GB01 y GB02. Sin embargo, en la ladera sur estas unidades se encuentran afectadas por la acción de las fallas normales, mostrando un incremento del espesor en las proximidades del eje del *rift*. Estas unidades son difícilmente identificables en el interior del *graben*, que sugieren una actividad sedimentaria syntectónica con las etapas de desarrollo del *rifting*.

4.2. Sismo-Estratigrafía

En el interior del *graben*, se observa un conjunto de reflectores más espaciados y con un amplitud reducida que corresponden a sedimentos recientes no consolidados. Esta secuencia sedimentaria es referida como NR01 (Figura 75), probablemente corresponde a sedimentos cuaternarios, descansando sobre un basamento desconocido con escasos reflectores difusos, pertenecientes a una unidad no identificada. Adicionalmente, en el eje central de este *rift* es posible observar la deformación causada por intrusiones ígneas masivas en forma de diques a la unidad NR01. Estos diques no presentan reflectores y su contacto con las unidades discordantes resulta difuso, sugiriendo que esta intrusión es reciente y ha causado una alteración metamórfica de contacto con la unidad NR01.

CUENCA NODAL

Al sur de la intersección del Sistema de Falla de Guaymas con el Rift Norte, se observa una depresión que forma una cuenca nodal. Esta es producto de esfuerzos distensivos que deforman un área de aproximadamente 25 km². Tal distensión es en dirección angular y ortogonal a ambas estructuras, presentando una serie de fallamientos normales, acompañados por desplazamientos de grandes volúmenes de sedimentos (Figura 76).

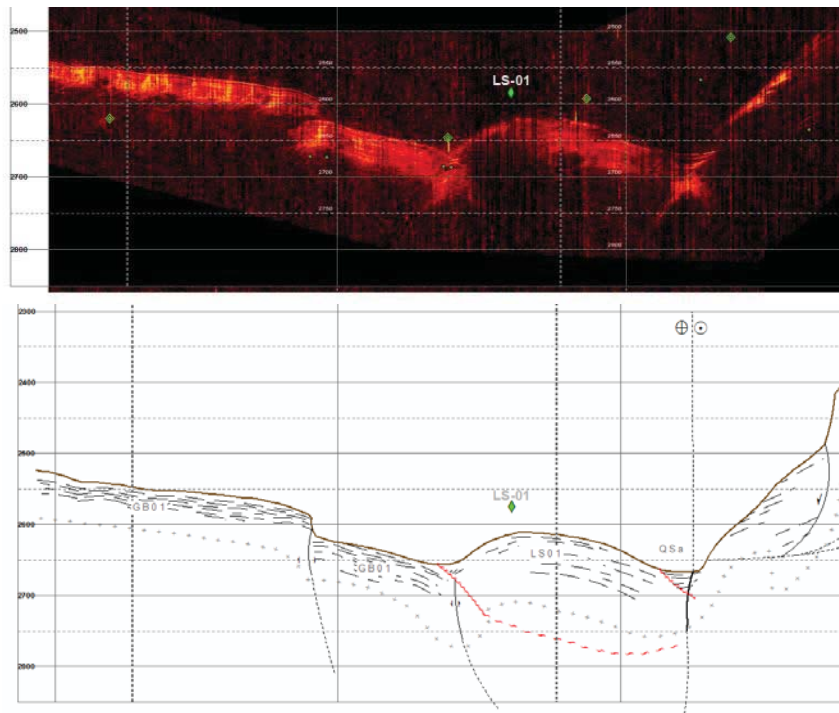


Figura 76. Interpretación sismo-estratigráfica de la cuenca nodal. Arriba: sección sísmica del perfil L04. Abajo: interpretación sismo-estratigráfica del perfil.

4.2. Sismo-Estratigrafía

Rasgos estructurales de esta pequeña cuenca en el lecho de la Cuenca de Guaymas sólo son observados en los perfiles L04, G02, y G03. En el depocentro de la cuenca, las secciones muestran un bloque de grandes dimensiones de un deslizamiento submarino. Este bloque identificado como LS-01 es caracterizado por reflectores difusos sin un plano de estratificación preferente, lo cual indica el estado caótico de su emplazamiento y que su litología corresponde a la alteración de las unidades GB01 y GB02, al ser desplazadas por la ladera. Estos deslizamientos parecen ser recientes por presentar aun las texturas en forma de herradura, propias a un deslizamiento submarino. Sin embargo, el vigente movimiento vigente de la Falla de Guaymas, ha formado un escarpe en este bloque deslizante LS-01 (Figura 77).

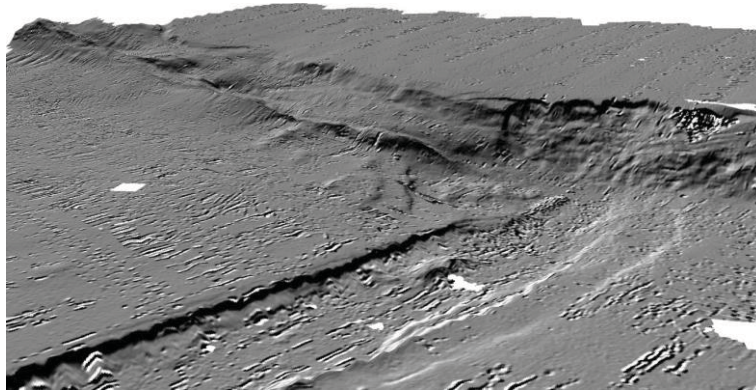


Figura 77. Delimitación de la cuenca nodal por la terminación del Rift Norte y la Falla de Guaymas

CUENCA DE SATÉLITE

Esta estrecha depresión estructural, nombrada Cuenca Satélite, está ubicada entre la plataforma continental y la Cuenca de Guaymas, estando limitada por dos trazas transcurrentes, paralelas a la Falla de Guaymas (Figura 78). Este régimen de transpresión entre el par de fallas genera una cuenca *pull-apart*. Resultados de las secciones sísmicas L08 y L09 en esta región, muestran muy poco detalle sismo-estratigráfico, debido a las estrechas dimensiones de la cuenca.

Dada la carencia de muestras directas de las secciones sedimentarias, y al gran desplazamiento generado por los sistemas de fallas presentes, no es posible establecer las relaciones estratigráficas entre los sedimentos presentes en esta cuenca y en los de las regiones contiguas. En esta región se pudo definir la unidad SB01 caracterizada por la presencia de reflectores horizontales, con aparente alternancia de binomios de dureza en paquetes compactos.

4.3. Sitios de plumas de burbujas

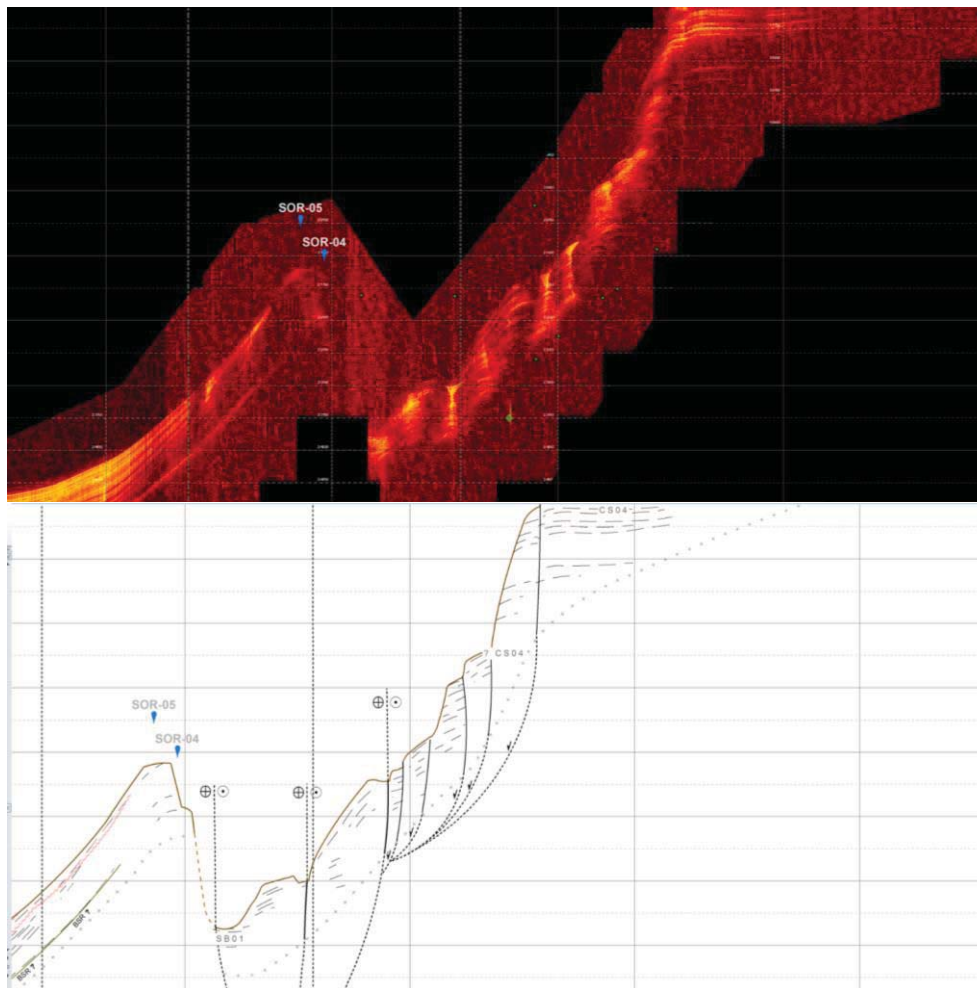


Figura 78. Interpretación sismo-estratigráfica de la Cuenca Satélite. Arriba: sección sísmica del perfil L08. Abajo: interpretación sismo-estratigráfica del perfil.

4.3. SITIOS DE PLUMAS DE BURBUJAS

Como resultados de las 31.895 imágenes digitales adquiridas, de los datos acústicos de columna de agua en el NO L'Atalante se tiene una robusta base datos de las emanaciones activas en esta región debido a que el recorrido efectuado es extenso y cubrió las principales estructuras de la región (Figura 32, p. 40); este registro se efectuó desde el día 8 hasta el 11 de junio de 2010.

Las coordenadas de localización de la raíz de cada pluma de burbujas identificadas en las imágenes acústicas de columna de agua, son ubicadas sobre la carta batimetría en la Figura 79. Las coordenadas de los sitios son calculadas según los procedimientos señalados en la metodología, y compiladas en la tabla de datos del Anexo B.

4.3. Sitios de plumas de burbujas

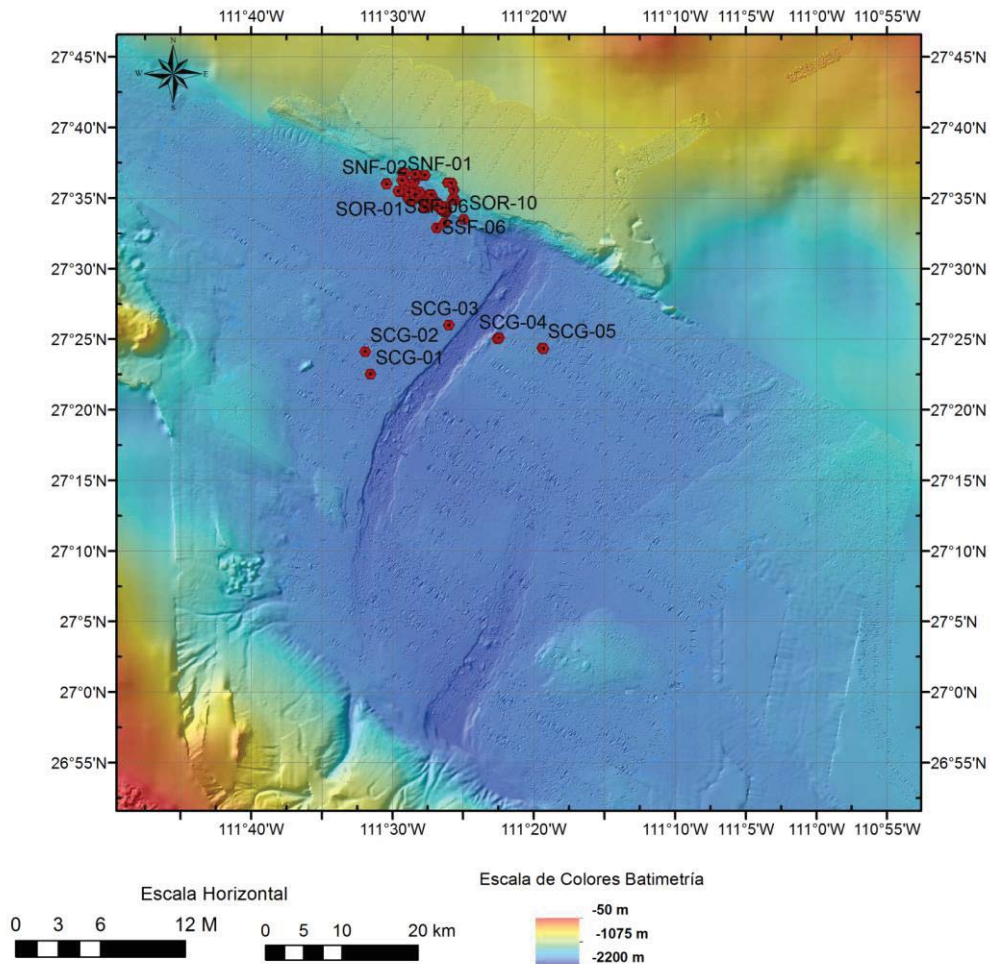


Figura 79. Localización de sistemas de plumas de burbujas observados durante la campaña BIG10.

En función de las características observadas en cada imagen y su distribución, los resultados son clasificados en dos grupos. Estos son: plumas en la Cuenca de Guaymas y plumas asociadas al margen de Sonora. Serán descritos a continuación.

4.3.1. SISTEMAS DE PLUMAS EN LA CUENCA DE GUAYMAS

Cinco plumas de burbuja son observadas en la zona central de la Cuenca de Guaymas, en proximidad al Rift Norte (Figura 80). Estos sitios están constituidos como sistemas de plumas de burbuja aislados y distantes entre sí, ante una batimetría plana sin estructuras morfológicas notables (Figura 81). Los mismos tienen una profundidad promedio de 1,850 m (Tabla 1).

4.3. Sitios de plumas de burbujas

Tabla 1. Sistemas de plumas de Burbuja emanando desde el lecho de la Cuenca de Guaymas

Nombre	Numero de Imagen	Coordenadas UTM de Raíz de Ventila			Profundidad (m)	Altura de la Pluma (m)
		Uso	Norte	Oeste		
SCG-01	21261	12N	447974.63	3028083.56	-1862.69	850.007547
SCG-02	21195	12N	447371.93	3031014.79	-1857.5	531.254717
SCG-03	19012	12N	457153.66	3034456.45	-1875.0	1177.18491
SCG-04	22416	12N	462845.85	3032669.65	-1873.8	1007.33019
SCG-04	22420	12N	462984.89	3032794.21	-1873.8	912.382076
SCG-05	25522	12N	468062.64	3031428.24	-1829.5	418.943396
SCG-05	25524	12N	468188.57	3031345.93	-1829.5	209.471698

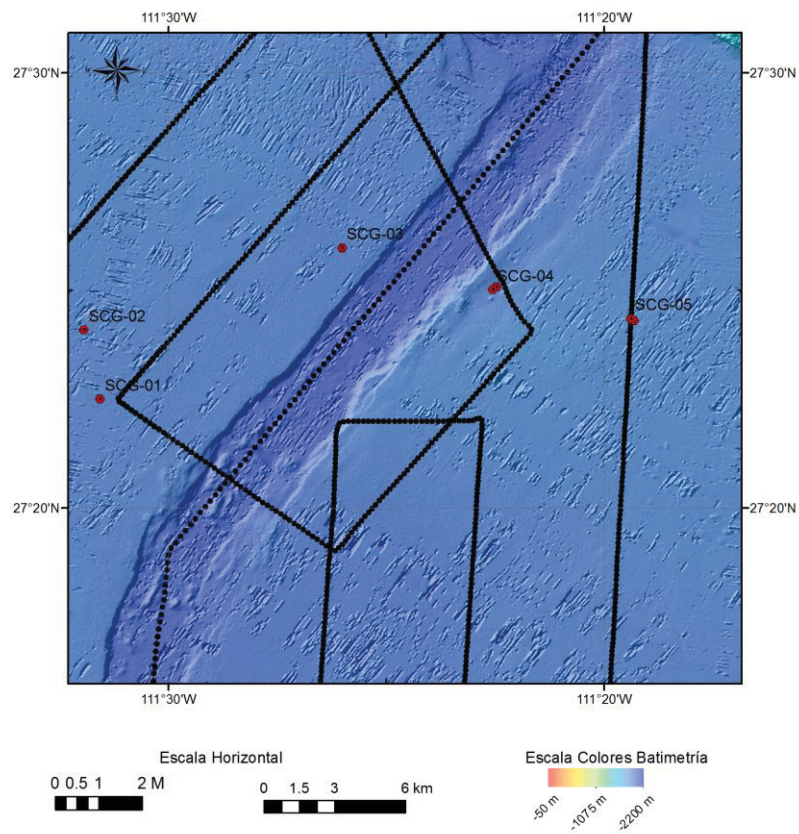


Figura 80. Sistemas de plumas de burbuja emanando desde el lecho de la Cuenca de Guaymas, adyacentes a los márgenes del Rift Norte.

4.3. Sitios de plumas de burbujas

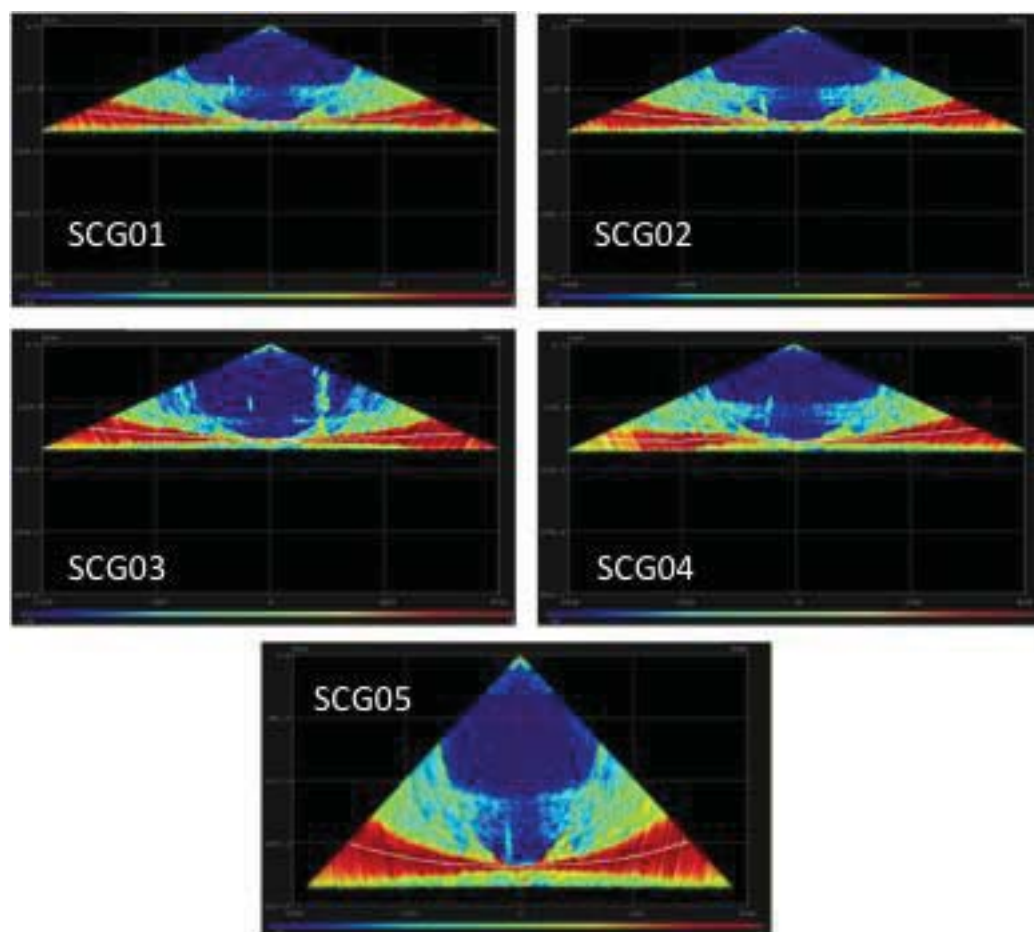


Figura 81. Imágenes de reflexión acústica de la columna de agua con plumas de SCG-01 a SCG-05.

Estas estructuras no muestran un patrón de distribución preferente, más aun al compararlo con los mapas estructurales de la región no se observa ninguna coincidencia entre su distribución y cualquier falla presente. Así mismo, la distancia que existe entre esos sistemas no permite una clasificación grupal por la posible existencia de mecanismos independientes.

4.3.2. SISTEMAS DE PLUMAS EN EL MARGEN DE SONORA

En la interacción entre la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora, fueron observadas una cuantiosa cantidad de plumas de burbuja emanando del lecho marino en un área de 21 km². La detección de esta población de exhalaciones son producto del levantamiento detallado que efectuado en el sector, tal como se muestra en la Figura 82.

4.3. Sitios de plumas de burbujas

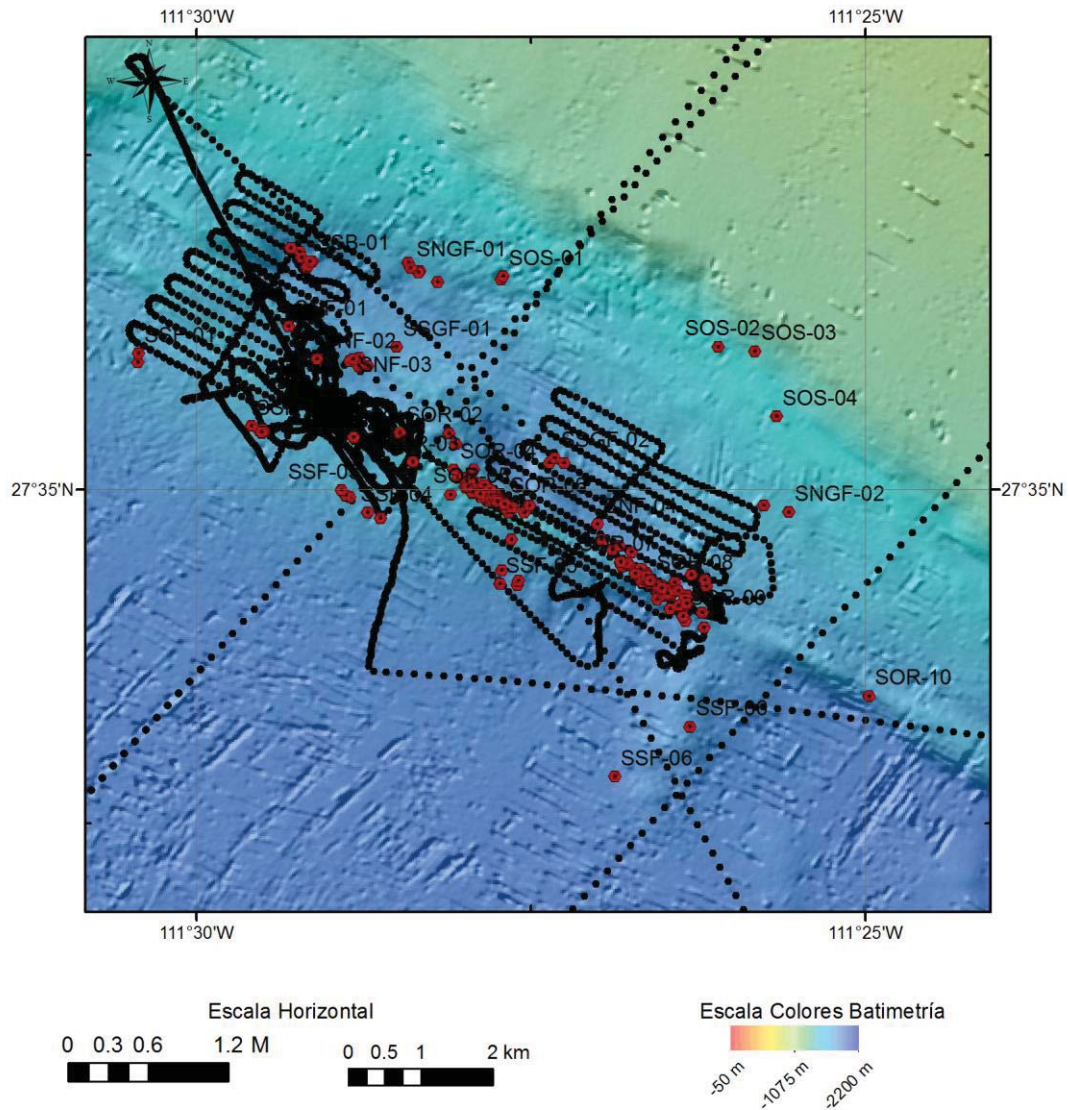


Figura 82. Localidades de plumas de burbujas emanando del lecho, cercanas a la intersección entre la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora

El mecanismo más notable para una clasificación corresponde a su localización en relación a las estructuras tectónicas principales. En este sentido, se observaron grupos de plumas emergiendo desde las siguientes localidades: Dorsal de la Falla de Guaymas (sobre la cresta de la cordillera SOR *Seeps over ridge*, sobre el flanco norte SNF *Seeps Northern Flank*, flanco sur SSF *Seeps Southern Flank*), Cuenca de Satélite (SSB *Seeps Satellite Basin*), escarpe de la Falla de Guaymas (Escarpe Norte SNGF *Seeps Northern Guaymas Fault*, Escarpe Sur SSGF *Seeps Southern Guaymas Fault*) y sobre el talud que lo separa del margen de Sonora (SOS *Seeps Over Slope*).

4.3. Sitios de plumas de burbujas

Estas plumas son observadas en la columna de agua hasta una altura de 1,090 m (sobre el lecho marino). Siendo agrupada de forma estadística, para promediar y sintetizar los distintos valores correspondientes a un mismo sistema de emanación (Tabla 2). Es así como, por ejemplo, en la localidad SSB-01 de un total de siete datos (imágenes 05402, 05396, 05399, 06014, 06017, 06974, y 06977), al conocer la morfología de la pluma y observar que la misma presenta una deriva al sureste, se promediaron los valores dando más peso a las imágenes donde se observa la raíz de la ventila mejor definida.

Tabla 2. Sistemas de plumas de burbuja emanando desde el lecho cercana a la zona de interacción entre la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora

Nombre	Numero de Imagen	Coordenadas UTM de Raíz de Ventila			Profundidad (m)	Altura de la Pluma (m)
		Uso	Norte	Oeste		
SNF-01	23496	12N	451.793,86	3.053.391,71	1.632,69	631,43
SNF-02	23493	12N	452.142,65	3.052.939,20	1.685,80	629,79
SNF-03	5093	12N	452.583,47	3.052.937,26	1.733,50	743,33
SNF-04	2684	12N	455.589,76	3.050.647,91	1.781,00	537,50
SNGF-01	23430	12N	453.299,97	3.054.195,88	1.657,69	668,67
SNGF-02	18918	12N	457.939,28	3.050.807,67	1.732,31	556,20
SOR-01	23375	12N	452.586,68	3.051.859,55	1.597,80	986,85
SOR-02	5245	12N	453.160,13	3.051.915,12	1.583,69	514,07
SOR-03	16649	12N	453.311,67	3.051.515,18	1.582,00	907,42
SOR-04	1754	12N	453.823,18	3.051.407,88	1.572,50	702,68
SOR-05	368	12N	454.145,72	3.051.069,25	1.590,50	851,38
SOR-06	397	12N	454.443,43	3.050.929,10	1.591,59	902,82
SOR-07	2222	12N	455.872,37	3.050.124,10	1.669,80	493,73
SOR-08	620	12N	456.233,60	3.049.862,49	1.678,40	1.197,69
SOR-09	82	12N	456.635,15	3.049.371,52	1.739,00	891,83
SOR-10	24187	12N	458.920,05	3.048.263,40	1.734,30	575,34
SOS-01	16610	12N	454.435,35	3.054.074,89	1.603,50	576,25
SOS-02	19009	12N	457.077,32	3.053.094,11	1.485,59	926,61
SOS-03	19015	12N	457.531,78	3.053.027,40	1.427,69	1.099,78
SOS-04	19009	12N	457.796,46	3.052.126,97	1.495,30	312,12
SSB-01	5402	12N	452.061,53	3.054.292,59	1.706,00	343,22
SSF-01	7487	12N	449.943,62	3.053.027,62	1.677,69	326,46
SSF-02	5263	12N	451.331,65	3.052.017,26	1.670,09	838,80
SSF-03	5109	12N	452.438,93	3.051.129,66	1.669,19	342,41
SSF-04	23325	12N	452.754,89	3.050.816,05	1.687,90	682,53
SSF-05	4906	12N	454.379,30	3.049.825,76	1.739,30	440,72
SSF-06	18857	12N	455.786,11	3.047.161,13	1.761,40	791,75
SSF-06	24113	12N	456.711,62	3.047.845,57	1.837,90	260,32
SSGF-01	23317	12N	453.125,02	3.053.104,52	1.723,30	995,21
SSGF-02	2398	12N	455.060,55	3.051.560,28	1.732,50	479,97

4.3. Sitios de plumas de burbujas

Otra característica observada en este conjunto de datos (Figura 83), es que los sistemas de plumas que emanan desde el flanco sur de la dorsal de la falla y el talud, son sistemas aislados y distantes entre sí. Mientras que aquellos asociados a la cresta de la dorsal presentan una gran actividad de emanación mostrando una alineación de plumas en forma casi continua, como en los sitios: SOR-05, SOR-06, SOR-07, y SOR-08.

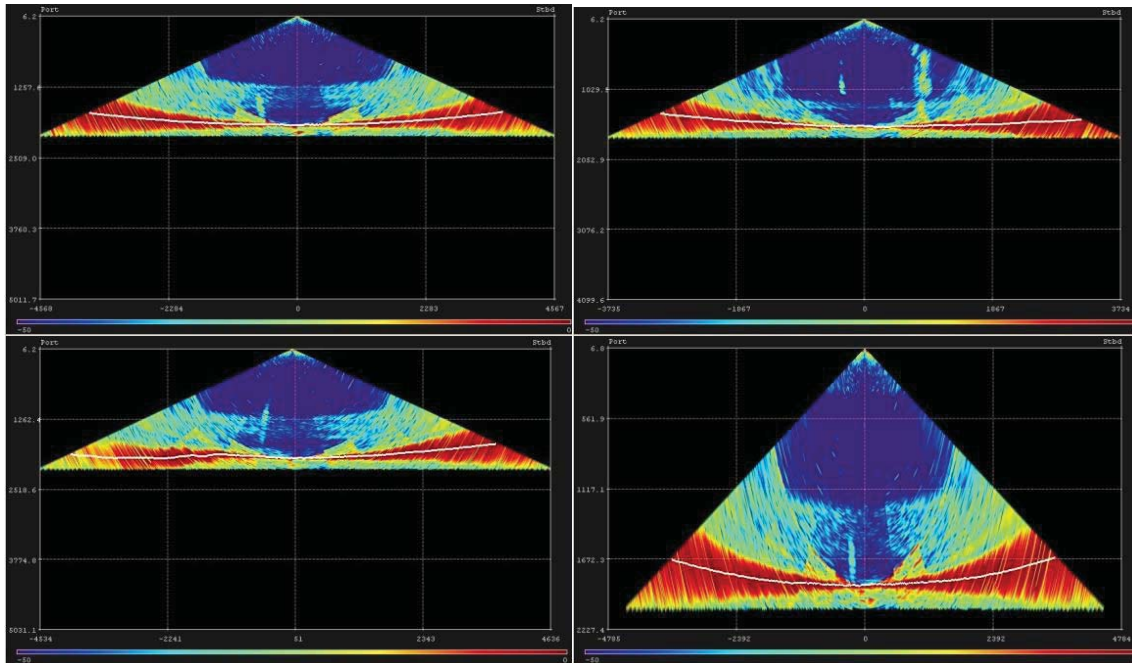


Figura 83. Imágenes de reflexión acústica de la columna de agua con sistemas de pluma que emanan del lecho en la zona de interacción entre la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora.

Los perfiles sísmicos analizados en esta investigación, tienen cobertura dentro de esta zona de emanaciones de burbujas. Los perfiles L06 a L10, y G01 y G02 (Figura 84) interceptan alguna de estas filtraciones, los cuales son utilizados para establecer relaciones entre la estratigrafía y las estructuras geológicas involucradas en la liberación de estos fluidos (Figura 84). Sin embargo, las localidades donde fueron reportadas algunas de plumas de burbuja la calidad de las secciones sísmicas disminuyen notablemente, con reflectores difusos o carentes de señal sísmica. Por otra parte, las zonas de transparencia acústica interrumpiendo la secuencia estratigráfica, típicas de las emanaciones de fluidos, no se observan en esta región del margen de Sonora. Los perfiles L07 a L09 presentan posiblemente un horizonte BSR.

4.3. Sitios de plumas de burbujas

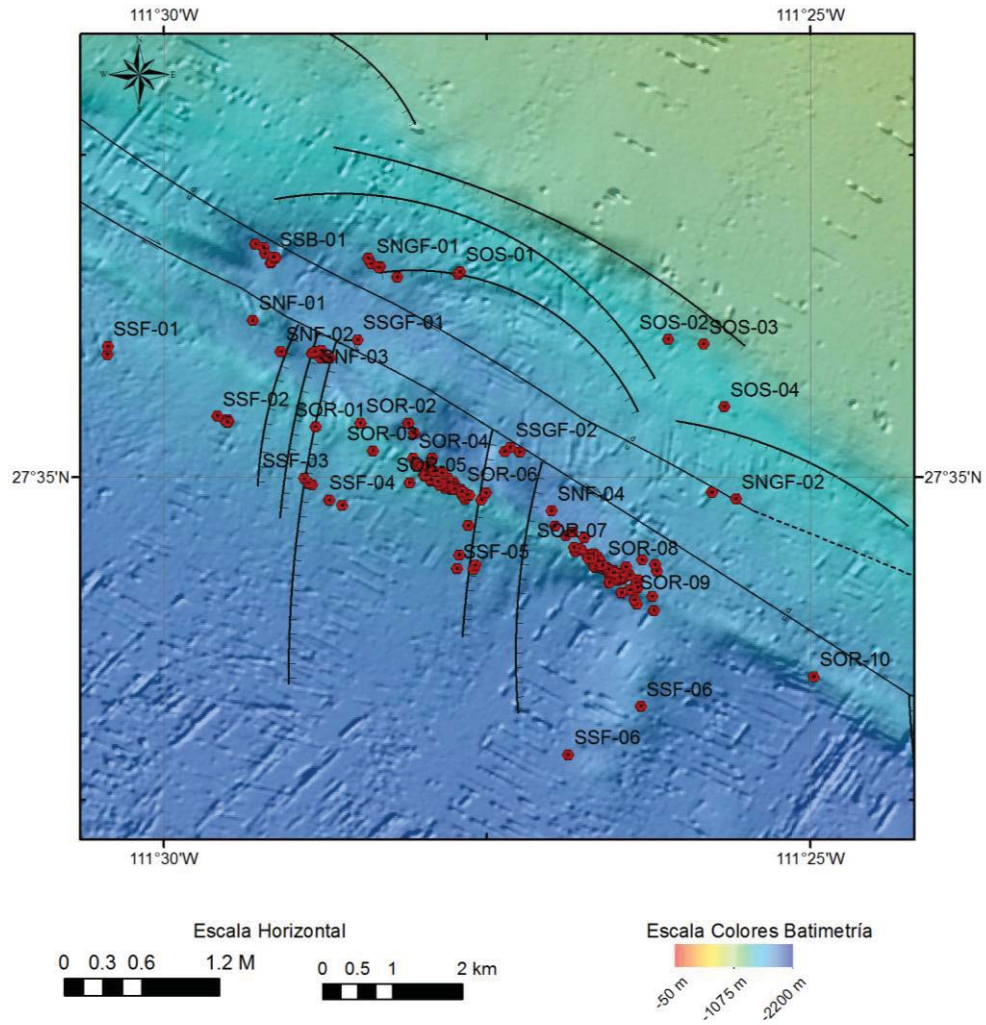


Figura 84. Rasgos tectónicos en el lecho marino en la región de la intersección entre el margen de Sonora y la Cuenca de Guaymas, con las localidades de los sistemas de liberación de burbujas.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las campañas oceanográficas BIG10 y GUAYRIV10, aportaron los datos fundamentales para el desarrollo de esta investigación, siendo complementados por la información científica publicada hasta el momento. La discusión de los resultados de esta tesis se enmarcan dentro de los siguientes conceptos: (1) el marco tectónico, (2) la estratigrafía, (3) los sistemas de emanación de fluidos y (4) el modelo de evolución tectono-estratigráfica del área de estudio.

5.1. MARCO TECTÓNICO

A partir de la interpretación de los perfiles sísmicos de reflexión de alta resolución y el estudio de morfología de GUAYRIV10, se realizó una compilación de los rasgos estructurales que definen la zona de estudio. Esta compilación mostrada en la Figura 85, fue comparada con los modelos tectónicos realizados en años anteriores (e.g., Bischoff and Hanyey 1974, Lonsdale 1989, Aragón-Arreola, et al. 2005), en búsqueda de su validación y de ser posible, complementar el modelo. De este modo, se logró la definición de los rasgos estructurales dominantes del (1) Rift Norte, y (2) Sistema de Falla de Guaymas.

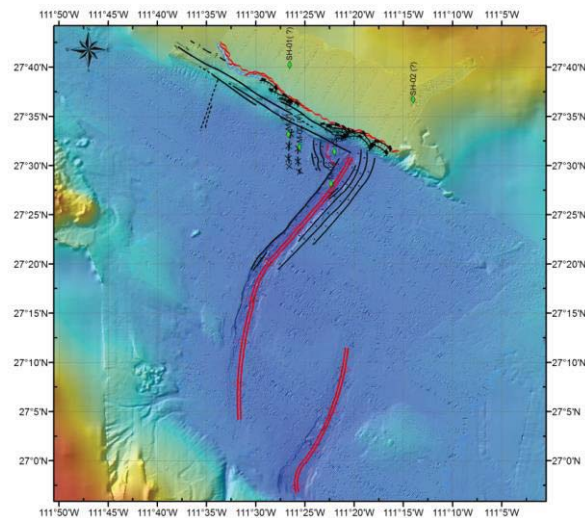


Figura 85. Interpretación tectónica del margen de Sonora con la Cuenca de Guaymas. A partir de la Interpretación de los perfiles de subsuelo de GUYARIV10.

5.1.1. RIFT NORTE

Se corroboró la definición de un proceso de esparcimiento oceánico en la zona central de la Cuenca de Guaymas (Figura 85), por la presencia de un *rift* en dos segmentos en forma *overlapping* (Rift Norte y Rift Sur), concordante a trabajos regionales anteriores (Lonsdale 1985, Aragón-Arreola, et al. 2005, Paull, et al. 2007). Esta definición de disposición en *overlapping* contradice lo señalado por Lonsdale (1980), donde se infiere la presencia de una falla transformante sinistral que segmenta el eje de *rift*; tal como sucede en las dorsales oceánicas (Byrne and Emery 1960, Lonsdale, Bischoff, et al. 1980, Angelier, et al. 1981).

La sísmica de reflexión somera de GUAYRIV10, y los datos de publicaciones anteriores, sugieren que la estructura del posible esparcimiento corresponde a un *rift* estrecho (Buck 1991, Lizarralde, Axen, et al. 2011). Observando en ella un estilo estructural de *half graben*, con la ladera sur escalonada y con una falla dominante al norte, con la carencia de cordilleras en sus flancos (Figura 75). Sobre el eje de este *rift* se han observado estructuras volcánicas como evidencia superficial de la actividad magmática propia de un *rift* activo (Lonsdale 1985, Lizarralde, Axen, et al. 2011), en donde tal como lo señalan los datos estratigráficos, la alta tasa de sedimentación enmascara los rasgos estructurales menores que pudiesen existir en la superficie de su valle (Chase, et al. 1970).

En la intersección entre el Rift Norte y el Sistema de Falla de Guaymas, debido a la sumatoria de las direcciones de deformación que ejercen ambas estructuras, tiene lugar un régimen distintivo local que permite la apertura de una cuenca tipo nodal (Figura 63) (e.g., Karson, et al. 1984, Basile and Brun 1999). Está definido por un fallamiento normal activo con dirección ortogonal al *rift* y a la transformada, lo cual genera el colapso de las masas de sedimentos en forma de deslizamientos, correspondiente a los modelos de cuenca nodal (Figura 76) (Basile and Brun 1999). El contacto de esta unidad con la unidad morfológica de la Cuenca de Guaymas resulta transicional, lo cual dificulta la identificación y cartografía de dicho límite. Esto se debe a que las estructuras distensivas que definen el relieve de esta cuenca presentan una menor expresión o magnitud en su deformación a medida que incrementa la distancia a la intersección del *rift* y falla (Figura 63).

5.1.2. SISTEMA DE FALLA DE GUAYMAS

El Sistema de Falla de Guaymas, se exhibe como un sistema de al menos cuatro fallas paralelas transformantes (Figura 86), con movimiento horizontal dextral bajo un régimen de transtensión (Angelier, et al. 1981, Atwater 1989, Morandi, et al. 2002, Waldron 2005). Estas fallas con el Sistema de Falla de Pedro Nolasco y la Falla de Yaqui pueden corresponder a un sistema mayor de fallas con estructura de flor negativa, como se ilustra en la Figura 16 (Lonsdale 1989, Aragón-Arreola, et al. 2005), siendo enmascarada por los sedimentos provenientes del margen de Sonora.

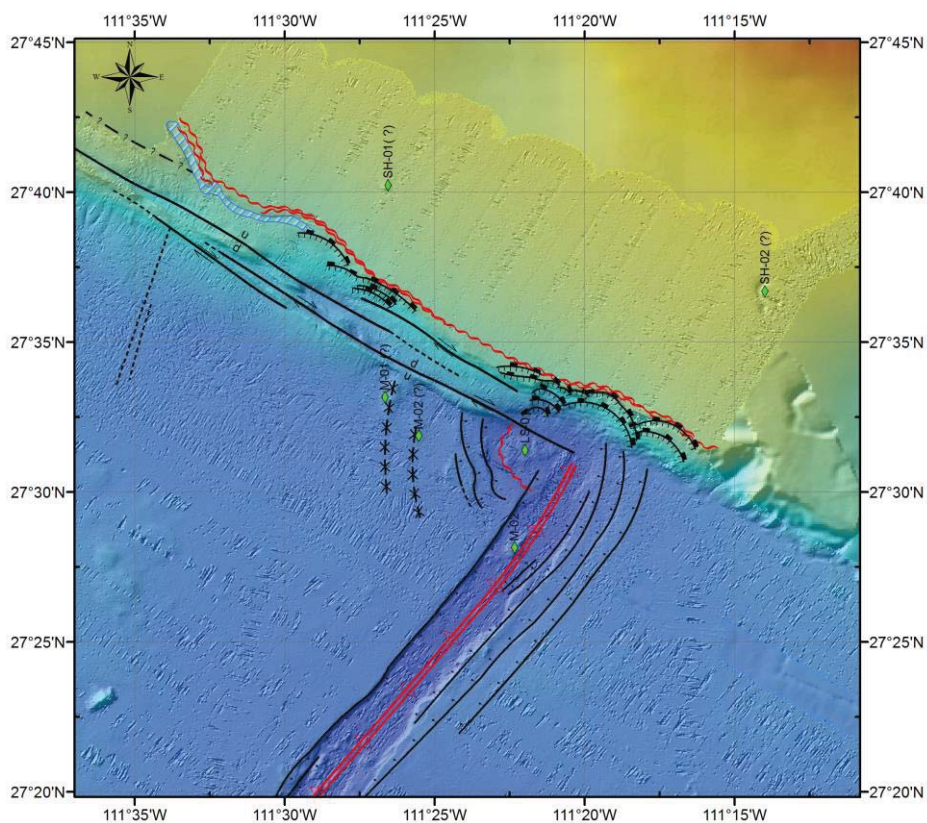


Figura 86. Mapa tectónico del Sistema de Falla de Guaymas, en la interacción con el Rift Norte.

La expresión morfológica del Sistema de Falla de Guaymas dentro de la región de estudio, presenta en su traza norte estructuras de colapso y deslizamientos rotacionales sobre el pie del talud. Mientras, en la traza central se manifiesta como un ligero escarpe atenuado por la sedimentación activa en la región. Así mismo, su traza sur presenta un escarpe con un desplazamiento vertical de al menos 100 m.

5.1. Marco Tectónico

Esta traza sur, ha sido descrita en trabajos preliminares como una cordillera definida por el plegamiento tectónico de los sedimentos de la Cuenca de Guaymas contra el eje del sistema de falla (Lonsdale 1985). Sin embargo, la flexura y sedimentación sin-tectónica observada en los sedimentos sobre los perfiles sísmicos sugiere que esta cordillera forma parte del antiguo talud que separaba la Cuenca de Guaymas de la Plataforma del margen de Sonora. Tal como lo sugiere la Figura 87, donde la vista de dos perfiles contiguos (L12 y L08), muestra una evolución de un sistema de talud fallado por una cizalla y cubierto por sedimentos, al norte; y un talud separado hasta 2 km del actual pie de talud en la zona sur. En este sentido, la deformación causada por el sistema de falla dextral, y su estructura en flor, origina la extensión expuesta.

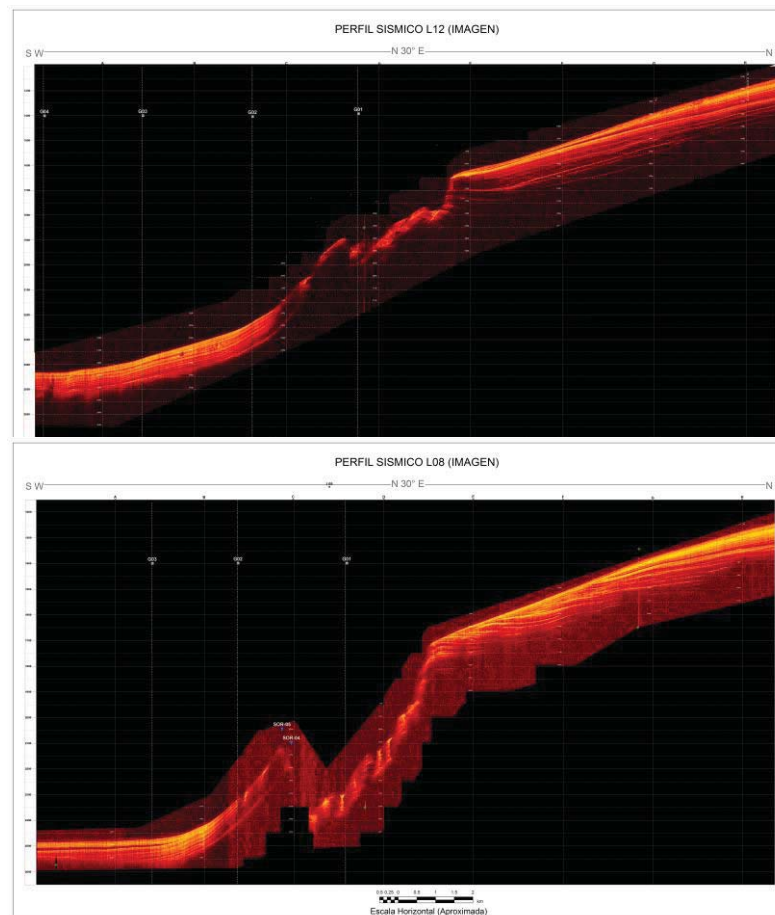


Figura 87. Cambios en el estilo estructural del pie de talud. Donde el efecto de cizalla y estructura en flor permite la apertura de una estrecha cuenca separando la hoy Cordillera de Guaymas del pie de talud. Vista de los perfiles L12 y L08.

5.1. Marco Tectónico

La sección sísmica de los lomos observados (AST01 y AST02), al norte de la zona de estudio (Figura 60), sugiere que esta estructura corresponde a flujos detríticos, producto de un abanico submarino cuya fuente probablemente sería el cañón existente en la plataforma del margen de Sonora. Como también lo sugiere la batimetría de la Figura 88, que el origen de este cañón pudiera deberse a los flujos que llegan desde el delta del Río Sonora.

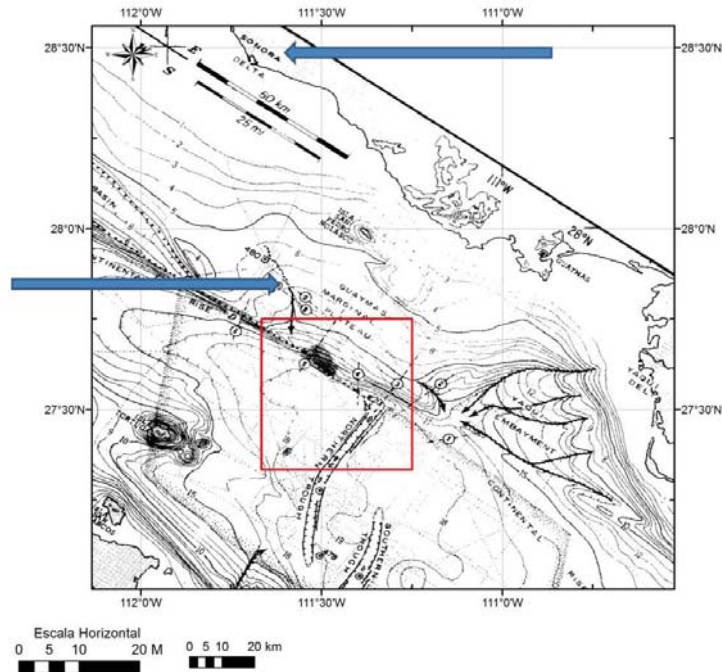


Figura 88. Aparente correlación de cañón submarino observado en la plataforma del margen de Sonora y los flujos del delta del Río Sonora. Mapa de la Cuenca de Guaymas de Lonsdale (1985) señalando la presencia de un sistema de cañones que se extiende desde el delta del río Sonora hasta la Cuenca de Guaymas. Recuadro en rojo el área de estudio. Las fechas indican la desembocadura y partes inferior del cañón submarino del Río Sonora. (Lonsdale 1989).

Estos abanicos se encuentran separados entre sí por el escarpe de la traza central del Sistema de Falla de Guaymas. Si bien no se cuenta con datos directos de estos abanicos, tal como se muestra en la Figura 89, la distancia horizontal es de casi 4 km entre ellas, medida sobre la traza de la falla. Este desplazamiento tiene un sentido dextral concordante con el movimiento conocido de esta falla; en la cual AST01 representaría la parte distal del abanico, y AST02 la parte proximal. Así mismo se observa un desplazamiento vertical de hasta 100 m sobre el escarpe de la falla, que sugiere un movimiento concordante correspondiente a la estructura en flor sugerida (Lonsdale 1989).

5.1. Marco Tectónico

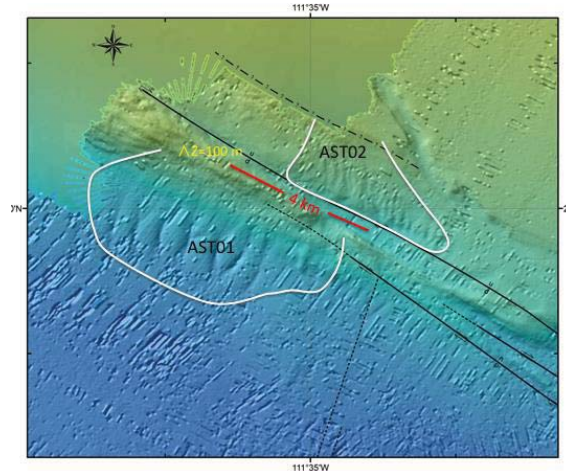


Figura 89. Abanicos submarinos AST01 y AST02 observados al norte de la Cuenca de Guaymas. La geometría dispuesta sugiere que corresponden a un mismo *slumping* aparentemente desplazado por la Falla de Guaymas.

La interacción de la cuenca de Yaqui y la Cuenca de Guaymas al sur del Rift Norte es un área poco estudiada, sobre la cual se han realizado distintas interpretaciones sin contar con información sísmica (e.g., Bischoff and Hanyey 1974, Aragón-Arreola, et al. 2005). Estos autores infieren que la Falla Transformada de Guaymas se prolonga hacia el sur de dicho *rift*, tal como se plantea en la Figura 15, marcando el límite con la Cuenca de Yaqui. Sin embargo, se considera que dicha falla por sus características de transformante debería tener su terminación sur en la intersección del eje del Rift Norte; con lo cual, de existir alguna estructura vertical en esta región correspondería al escarpe dejado por el desplazamiento del bloque sur del Rift.

Por su parte, la evolución en la definición del sistema de Falla de Guaymas ha permitido identificar nuevas estructuras en la región. Tal es el caso de la Cuenca de Satélite (Paull, et al. 2007), lo que sugiere que los modelos tectónicos, la geometría romboidal que exhibe la depresión de esta cuenca (Figura 18), así como su disposición entre un par de trazas de la Falla de Guaymas, permite definirla como una cuenca de origen *pull-apart* (Basile and Brun 1999, Waldron 2005, Gúrbüz 2010). Las fallas menores internas, que controlaron la formación de la depresión, no pudieron observarse en la sísmica analizada como consecuencia de la geometría de las reflexiones, producto de la dispersión causada por las paredes de la cuenca. Así mismo la espesa secuencia sedimentaria junto a la alta tasa de sedimentación inferida para esta región, enmascara los rasgos estructurales menores manteniendo así un relieve plano en su depocentro (Figura 61).

5.2. SISTEMAS SEDIMENTARIOS

Las características tectónicas observadas en esta investigación, permiten establecer una aproximación de correlación entre la sismo-estratigrafía proveniente de los datos de GUAYRIV10, con la estratigrafía derivada de los núcleos del DSDP (Figura 20). Esta estratigrafía regional está dominada por factores de clima templado, en el cual se tiene un aporte sedimentario terrígeno de gran volumen durante los periodos de tormenta (Wilson 1955, Roden 1958, Byrne and Emery 1960), que junto al aporte de los grandes florecimientos de productores primarios que favorece las altas concentraciones de materia orgánica observadas en la región (Curry, et al. 1982). De este modo, se discute en forma detallada las siguientes regiones tectono-estratigráficas mayores: (1) Plataforma del margen de Sonora, (2) a la planicie de la Cuenca de Guaymas; así como las estructuras internas observadas en ellas: Rift Norte, Cuenca de Satélite y Cuenca nodal.

5.2.1. PLATAFORMA DEL MARGEN DE SONORA

Empleando el perfil L08 (GUAYRIV10) como ejemplo en la región norte de la plataforma continental del margen de Sonora, se estableció una correlación sismo-estratigráfica con los datos disponibles del DSDP (Curry, et al. 1982). Esta correlación identifica de forma directa los reflectores A, C, D y F; de las perforaciones 479 y 480 en el perfil sísmico L08 (Figura 90); mientras que los restantes reflectores fueron inferidos por relaciones de impedancia acústica, razón por la que se asume que la estratigrafía observada en ambos sitios corresponde a las mismas unidades.

Las cuatro unidades estratigráficas definidas dentro de la plataforma del margen de Sonora (CS01, CS02, CS03 y CS04), de acuerdo a la correlación mencionada, fueron depositadas durante el Pleistoceno Tardío. Por lo tanto, las discontinuidades angulares que definen el contacto entre dichas unidades, son definidas como discordancias intra Pleistoceno. Estas discordancias se deben a respuesta a cambios morfológicos, y a los procesos de progradación y retrogradación en la depositación de aportes terrígenos en la plataforma. En este sentido, tal como se observa en la Figura 65, la base de CS03 y CS02 corresponde a eventos de retrogradación, limitados por la secuencia progradante CS01.

5.2. Sistemas sedimentarios

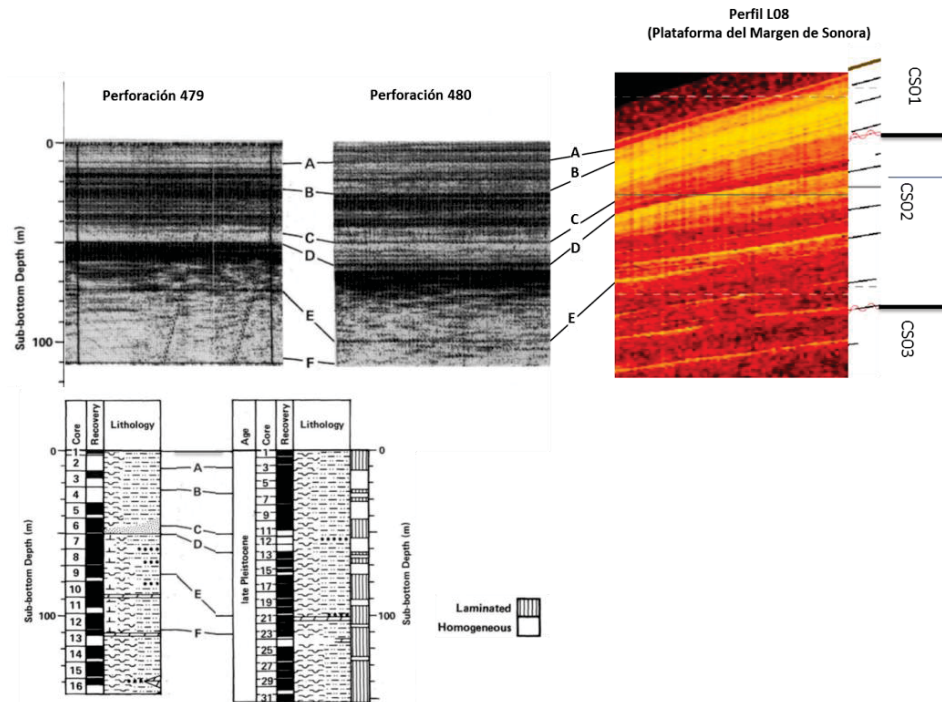


Figura 90. Correlación sismo-estratigráfica somera de la plataforma del margen de Sonora. Correlación establecida entre la sísmica monocal y los datos de las perforaciones 479 y 480 obtenida durante el DSDP (Curry, et al. 1982), con la sísmica de reflexión obtenida en GUAYRIV10.

Los datos sedimentarios someros (en los primeros 150 m) de los núcleos en los sitios 479 y 480 del DSDP, permiten limitar las unidades CS01, CS02, CS03 y CS04; que corresponden a alternancias entre dos litologías (Curry, et al. 1982). Una de ellas corresponde a lodos ricos en exoesqueletos de diatomeas en laminaciones rítmicas marrón, con láminas de color olivo pálido y capas amarillo moderado. La otra litología corresponde a estratos homogéneos de lodos ricos en exoesqueletos de diatomeas, y arcillas limosas, con ocasionales interrupciones de arenas y lutitas dolomíticas.

El paleoambiente asociado a los lodos laminados corresponden a la parte externa de la plataforma en condiciones hemipelágicas, caracterizadas por zonas de surgencia que favorecen una alta productividad primaria por parte de diatomeas, en presencia de una zona de mínimo de oxígeno, alternado con secuencias homogéneas de lodos que definen ambientes de menor producción de diatomeas, incluso pudiendo ser estéril, con posibles cambios de nivel de mar que favorecen la formación de carbonatos diagenéticos (Curry, et al. 1982, Barron, Bukry and Bischoff 2004), depositados con una tasa de sedimentación alta, que oscila entre los 500 y 625 m/my (Curry, et al. 1982).

5.2. Sistemas sedimentarios

La Cuenca de Satélite, como una de las estructuras internas a esta plataforma, ha sido poco estudiada, pese a la actividad de liberación de fluidos que en ella tiene lugar. Únicamente contamos con datos hidroacústicos que permiten la definición del relieve y la localización de los sistemas de emanación. La baja calidad de los datos sísmicos obtenidos durante GUAYRIV-10 en esta región (Figura 78) dificulta una caracterización sismo-estratigráfica. Tampoco existen elementos bibliográficos o propios, para establecer relaciones de litología en las y secciones sísmicas; sólo se infiere la presencia de capas estratificadas poco compactadas que rellenan la base de la cuenca, identificadas como SB01.

Las corrientes de alta velocidad que se producen en esta región del Golfo de California (Badan-Dangon, Koblinsky and Baumgartner 1985, Marione and Ripa 1988), pueden ocasionar flujos de erosión de dimensiones importantes. Existen claras evidencias de esta erosión en la plataforma; la más notable corresponde al cañón submarino del Río Sonora. Este presenta cerca de 500 m de ancho y con un valle de hasta 20 m de profundidad. Así mismo, los eventos de depositación asociados a este cañón, se observan en los sedimentos turbidíticos de desborde que actualmente ocupan parte del pie de talud, pudiendo ser la fuente de los sedimentos que rellenan la Cuenca de Satélite, y esto posiblemente se debe en que se emplea como nuevo cauce el cañón formado entre el pie de talud y la cordillera. Esta canalización sugiere una alta tasa de sedimentación con aportes terrígenos para esta cuenca, que deberá superar a la reportada para la plataforma del margen de Sonora, y aproximarse a las señaladas de casi 1,000 m/Ma para las secuencias suprayacentes de la planicie de la Cuenca de Guaymas (Curry, et al. 1982).

5.2.2. CUENCA DE GUAYMAS

La estratigrafía de la Cuenca de Guaymas dentro de la zona de estudio resulto ser la más compleja de analizar, aunque se tiene la información de las perforaciones 477, 478 y 481 del DSDP dentro de las mismas unidades tectónicas, estas son afectadas por su proximidad con el margen de Baja California bajo la influencia de aportes terrígenos distintos a los del margen de Sonora, tal como lo evidencian los cañones y abanicos submarinos observados en esta región (Figura 19). Si se considera las posibles variaciones litológicas laterales, la sismo-estratigrafía de los datos de GUAYRIV10 son

5.2. Sistemas sedimentarios

correlacionados con las perforaciones 478 y 481, que brindan información de la Cuenca de Guaymas y del Rift Norte respectivamente.

En el mismo contexto, Curray *et al.* (1979) realizan una correlación sísmico–litología con el sitio 478 del DSDP (Figura 91) en la zona de interacción entre el Rift Norte y Rift Sur. En los datos del DSDP destaca que el ruido y la baja calidad de las secciones sísmicas, le dificultan su análisis. Sin embargo, ante la poca variabilidad litológica observada en las secciones de GUAYRIV10, asumiendo que la estratigrafía somera de la perforación 478 es representativa de la estratigrafía en la Cuenca de Guaymas.

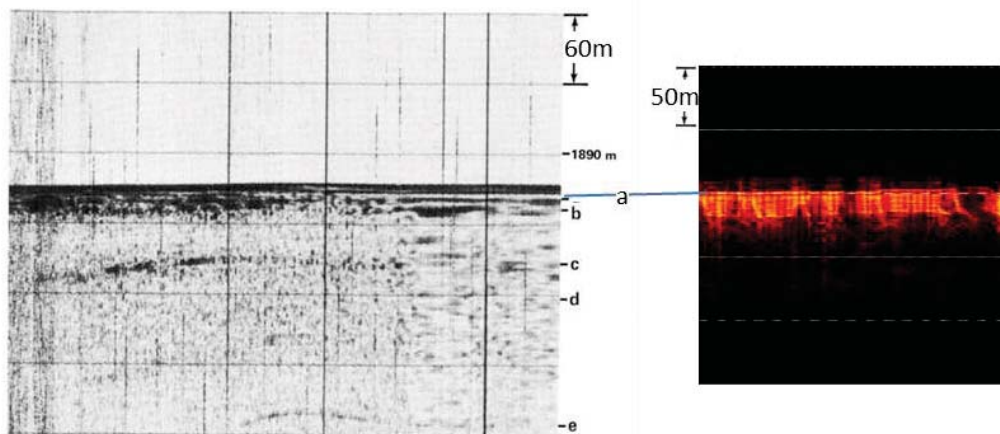


Figura 91. Correlación sísmo-estratigráfica somera del lecho de la Cuenca de Guaymas. Correlación establecida entre la sísmica monocal y los datos de las perforaciones 481 obtenida durante el DSDP (Curray, et al. 1982), con la sísmica de reflexión obtenida en GUAYRIV10.

En este sentido, la estratigrafía de la Cuenca de Guaymas (Figura 20) es considerada como compuesta por una secuencia de sedimentos no consolidados lodosos con exoesqueletos de diatomeas (QSa). Esta secuencia suprayace a una secuencia de estratos lodosos con restos de diatomeas, ocasionalmente intercaladas con sedimentos gradados de arenas, que representan los primeros 188 m de la columna sedimentaria de la región, que son GB03, GB02 y GB01. Todas estas unidades han sido datadas del Cuaternario Tardío (Curray, et al. 1982), sin ser posible definir las divisiones de unidades menores, por lo que, la discontinuidad observada en el contacto entre GB02 y GB03 puede definirse como una discordancia de bajo ángulo intra Cuaternario.

Hay que destacar que en el núcleo del sitio 478 carece de la unidad masivamente estratificada, que presenta al menos 40 m de espesor, correspondiente a la unidad GB02 identificada en las secciones sísmicas de GUAYRIV10. Esta ausencia puede deberse a

5.2. Sistemas sedimentarios

un acuñamiento del estrato a consecuencia de condiciones paleo-morfológicas. Los modelos sedimentarios anteriores sugieren que la fuente sedimentaria local se encuentra al noreste, aprovechando la inclinación general del Golfo de California (Byrne and Emery 1960, Calvert 1966, Curray, et al. 1982, Lonsdale, Geology and tectonic history of the Gulf of California 1989, Alvarez, et al. 2009). En este sentido, flujos turbidíticos se han cartografiados en la región norte de la Cuenca de Guaymas, identificados como TF01 en la Figura 71 (Lizarralde, Soule, et al. 2010); en la que resulta concordante con una fuente ubicada al noreste.

Los modelos de flujos de corrientes marinas indican cambios estacionales, de norte a sur durante el verano, cambiando al norte durante el invierno (Rosas Cota 1977, Marione and Ripa 1988, Lavín, Gaxiola-Castro and Robles 1995). Estos cambios de corriente pueden incidir en la estratificación de los lodos hemipelágicos, permitiendo una estratificación cruzada en “espina de pescado” de pequeña escala (Suter 2006). Parte de las corrientes de alta velocidad que se producen en esta región del golfo, corresponden a los flujos de surgencia. Tal como lo reportan Calvin *et al.* (1966), esta surgencia permite una abundante proliferación de una biota de productores primarios, entre los que destacan la diatomeas, las cuales representan una fuente importante de sedimentos, por la sedimentación de sus exo-esqueletos (Byrne and Emery 1960, Calvert 1966, Curray, et al. 1982, Lonsdale 1989).

Este registro estratigráfico está enmarcado por un paleoambiente hemipelágico con abundancia de flujos turbidíticos (Curray, et al. 1982). Así mismo, sería definido una tasa de sedimentación considerada como rápida a muy rápida superando los 1,200 m/Ma (Curray, et al. 1982), reportándose valores de hasta 2,700 m/Ma (van Andel, 1964).

Así mismo, existen condiciones locales con características particulares para las estructuras internas de esta cuenca. En este sentido, la perforación 481 (Curray, et al. 1982) efectuada sobre el eje de este *rift*, se obtiene una completa y detalla descripción litológica de esta localidad (Figura 20). Sin embargo, la resolución de la sísmica a través de esta localidad dificulta la definición de estructuras, más allá de la intercalación de sedimentos no consolidados NR01 (Figura 93), y en el caso del DSDP un par de reflectores difusos sin correlación (Curray, et al. 1982). La baja resolución obtenida es consecuencia del efecto de dispersión lateral que causan las paredes del *rift*. Por lo que

5.2. Sistemas sedimentarios

no fue es posible establecer una correlación sísmica entre ambos estudios, y se asume ante la carencia de datos que la columna estratigráfica obtenida en el sitio 481 es válida para esta localidad.

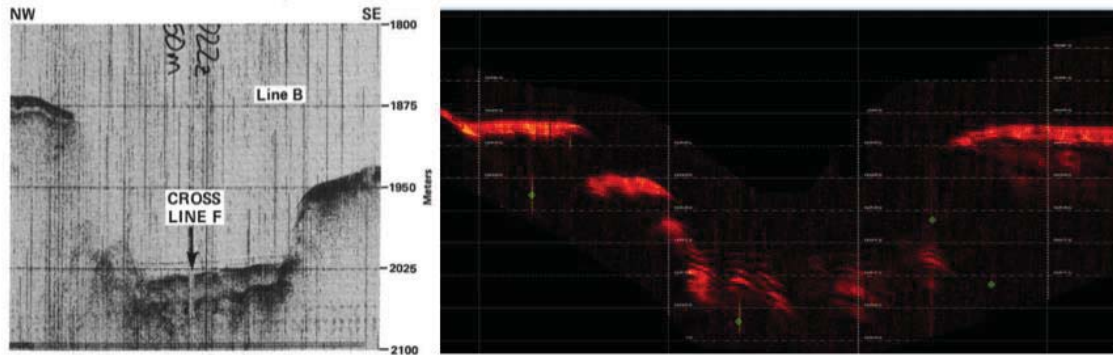


Figura 92. Correlación sismo-estratigráfica somera del lecho del Rift Norte. Correlación establecida entre la sísmica monocanal y los datos de las perforaciones 479 obtenida durante el DSDP (Curry, et al. 1982), con la sísmica de reflexión obtenida en GUAYRIV10.

La estratigrafía somera del Rift Norte, que incluye la unidad NR01 vagamente identificada en esta investigación, corresponde a sedimentos del Cuaternario Tardío (Curry, et al. 1982), como se muestra en la columna litológica de la Figura 20. La litología corresponde a intercalaciones de lodos con exoesqueletos de diatomeas con secuencias de turbiditas a megaturbiditas, que suprayacen a intercalaciones de intrusiones ígneas propias del sistema de *rift* activo, pasando progresivamente, mediante intercalaciones, a una secuencia metamórfica e ígnea, con características propias de un sistema de *rifting*.

5.3. SISTEMAS DE LIBERACIÓN DE FLUIDOS

El empleo de las técnicas hidroacústicas multihaz en la detección de plumas de burbuja asociadas a sistemas de liberación de fluidos, resulta muy eficiente para sistemas activos. Esto se evidencia en la cantidad de plumas de burbujas observadas durante BIG10, y la precisión en su localización en relación a las estructuras geológicas y a los datos reportados para la región (Figura 93) (Curry, et al. 1982, Lonsdale 1985, Merewether, Olsson and Lonsdale 1985, Paull, et al. 2007, Lizarralde, Soule, et al. 2010).

5.3. Sistemas de liberación de fluidos

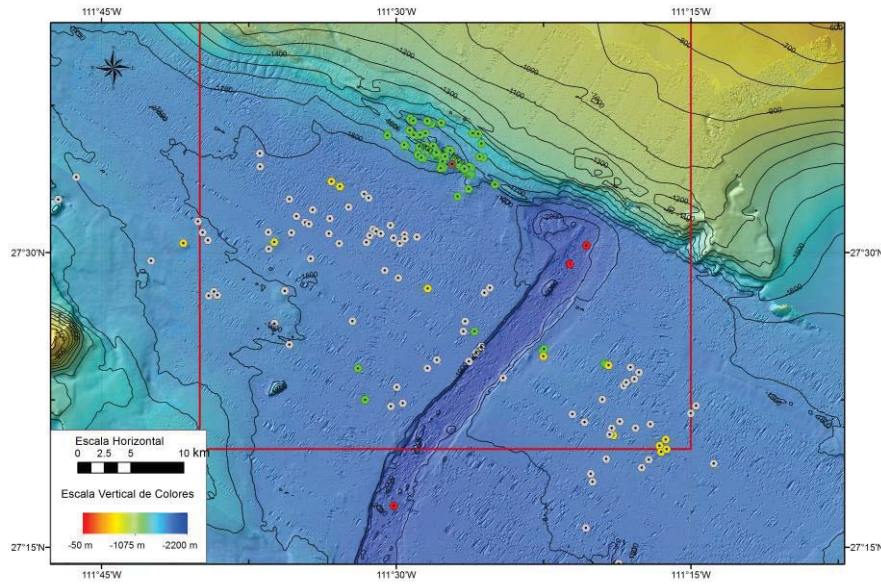


Figura 93. Mapa de distribución de emanaciones de fluidos en la Cuenca de Guaymas. ● Plumas observadas en GUAYRIV10. ● Emanaciones hidrotermales sobre los ejes del Rift Norte y Rift Sur (Lonsdale, Bischoff, et al. 1980), ● Emanaciones frías sobre la cordillera de la Falla de Guaymas (Lonsdale 1989, Paull, et al. 2007), ● Montículos de carbonatos autigénicos asociados a emanaciones frías observados sobre el lecho de la Cuenca de Guaymas (Lizarralde, Soule, et al. 2010), ● Montículos de alta reflectividad acústica considerados posibles sitios de emanaciones frías (Lizarralde, Soule, et al. 2010).

Las ventilas hidrotermales reportadas sobre el eje del Rift Norte no fueron observadas durante la campaña BIG10, como posible consecuencia de que la dispersión acústica generada por las paredes del *rift* o la inactividad que presentaban estos sistemas al momento del levantamiento; sin embargo, no contamos con información para realizar una discusión amplia de estos fenómenos. Por esto sólo fue posible la descripción de los sistemas de emanación de fluidos concentrados en el: (1) margen de Sonora y (2) Cuenca de Guaymas, a distancia del *rift*.

5.3.1. MARGEN DE SONORA

Los datos obtenidos durante BIG10, presentan con gran precisión una correspondencia con las emanaciones frías reportadas en expediciones anteriores (Merewether, Olsson and Lonsdale 1985, Lonsdale 1989, Paull, et al. 2007). Sin embargo, la cobertura y la resolución obtenidas en esta investigación, permiten la definición de nuevas localidades de emanación, ahora abarcando no sólo la cordillera de la falla de Guaymas sino toda la extensión de la Cuenca de Satélite (Figura 84).

5.3. Sistemas de liberación de fluidos

En la sismica de GUAYRIV10, la transparencia de los datos no permite identificar el efecto de flujos de gases dentro de los sedimentos. Sin embargo, mediante sismica multicanal y sismica de reflexión somera se ha observado BSR ascendiendo por la ladera sur de la cordillera (Figura 74) (Lonsdale 1985, Merewether, Olsson and Lonsdale 1985, Paull, et al. 2007), que representan una fuente de gases por la desintegración de dicho hidrato, donde el hidrocarburo más abundante corresponde al metano. Así mismo, se ha señalado una fuente secundaria de gases de dióxido carbono producto de la actividad biogénica que tiene lugar en la Cuenca de Satélite (Paull, et al. 2007).

Las evidencias de la sismica de GUAYRIV10, y la relación tectónica de la localización de estos sitios de emanación (Figura 84), sugieren que el mecanismo de liberación empleado corresponde a los escarpes y trazas de las fallas presentes en esta región. Donde el escarpe de la falla de Guaymas, sobre la ladera norte de su cordillera, deja expuesto la estratigrafía somera de la Cuenca de Guaymas, la cual incluye la superficie del hidrato (Figura 28) (Paull, et al. 2007). Este hidrato, al no tener la carga litostática, sufre una descomposición de su estructura molecular liberando los gases de hidrocarburos contenidos en ella (Lonsdale 1989).

La interpretación tectónica de la cordillera de la Falla de Guaymas sugiere que la las unidades GB03, GB02 y GB01, se encuentran en el pie de talud y bajo la Cuenca de Satélite, estando cubiertas por sedimentos recientes, tras ser desplazados verticalmente por la Falla de Guaymas. En este caso de haber existido el hidrato antes de la separación entre la cordillera y el talud, se conservaría parte de dicho hidrato bajo la Cuenca de Satélite, solo teniendo como mecanismos de liberación las fracturas paralelas del Sistema de Falla de Guaymas (Figura 18) (Angelier, et al. 1981), interrumpiendo la secuencia sedimentaria y permitiendo el intercambio de fluidos entre el océano y el hidrato, y en consecuencia produciendo su disociación molecular y la liberación de gases.

La morfología de deslizamientos gravitacionales observados en el pie de talud, sugieren la presencia de flujo de gases asociados a un hidrato previo al momento de apertura de la Cuenca de Satélite, siendo una posible evidencia de la presencia de un hidrato en la región. Dado que tal como lo señala la USGS, el constante flujo de estos gases en taludes inestables va a permitir una reorganización de sus clastos haciéndolas más vulnerable a la gravedad (Figura 29).

5.3.2. CUENCA DE GUAYMAS

A partir de la base de datos de emanaciones frías reportadas en imágenes de *Side Scan Sonar* (Lizarralde, Soule, et al. 2010), se observó una notable correspondencia entre esta técnica y los datos obtenidos en BIG10. Considerando que el área de levantamiento de ambos estudios coincide en una pequeña área (Figura 93), como es el caso de las plumas SCG04 y SCG05, observadas como activas durante BIG10, las cuales fueron corroboradas como sitios de emanaciones frías (Lizarralde, Soule, et al. 2010). De igual forma, la pluma SCG03, que emerge desde una localidad señalada como posible emanación fría por corresponder a un montículo de alta reflectividad en las imágenes de *Side Scan Sonar*, y que no pudo ser verificado por mediciones directas, permite validarlo como emanación fría por la pluma observada en la imagen de retrodispersión acústica de columna de agua en BIG10 (Figura 93).

Durante el proceso de exanimación del lecho marino realizado por Lizarralde et al (2010), se incluyeron mediciones de anomalías térmicas y obtención de muestras de agua en sedimentos, las cuales permiten definir a estos fenómenos como sitios de emanaciones frías de metano. Con una fuente magmática de ^3He , que apoya la teoría de que las intrusiones de sills son la fuente de calor para la descomposición de la materia orgánica (Curray, et al. 1982, Lonsdale 1989, Simoneit, Lonsdale and Edmond 1990).

Si bien no se cuenta con datos sismo-estratigráficos de las emanaciones de fluidos observadas durante BIG10, se amplía el campo de estudio con la proyección de los sitios de emanación frías verificados y los posibles montículos de carbonato y comunidades quimiosintéticas, sobre los perfiles de sísmica de reflexión de alta resolución de GUAYRIV10. Es así como sobre el perfil G04 observamos la expresión de la liberación de gases en 8 localidades, tal como se muestra en la Figura 94.

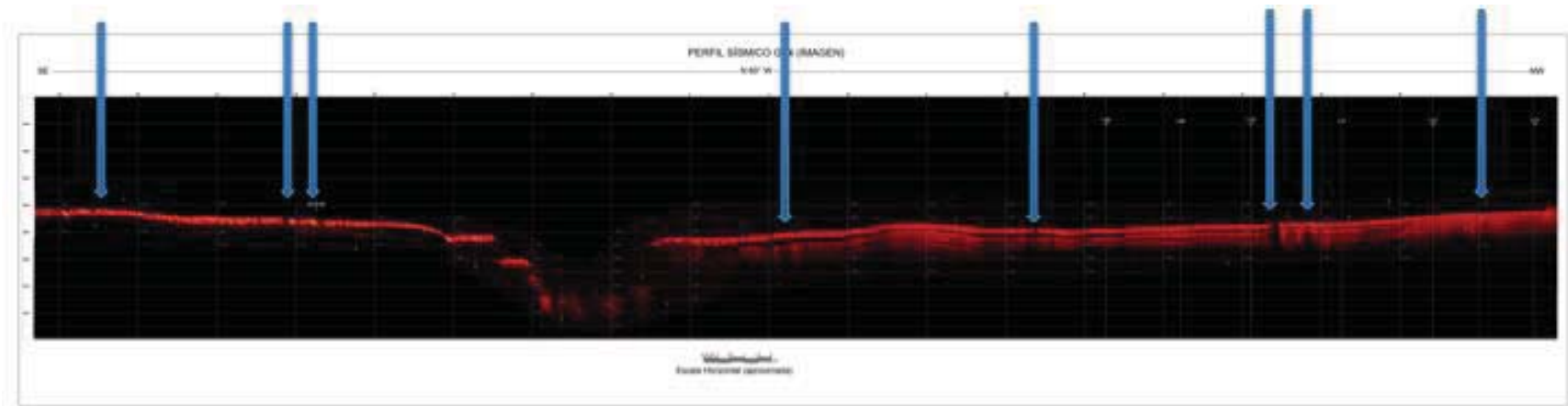


Figura 94. Respuesta sísmica de emanaciones frías en el lecho de la Cuenca de Guaymas. Zonas de transparencia acústica en forma vertical perturbando la columna estratigráfica observada en el perfil G04, en las cercanías de las localidades de emanaciones y posibles emanaciones frías identificadas por Lizarralde y otros (2011).

5.3. Sistemas de liberación de fluidos

La transparencia acústica que produce la sobresaturación de fluidos en la columna sedimentaria de los sitios de emanación, notando que en algunos casos el paso de los fluidos genera una deformación de los sedimentos causando desde una estratificación caótica, hasta pliegues y estructuras de colapso (localidades SGBa, SGBb, SGBc). En localidades como SGBd y SGBe, el mecanismo de liberación de los fluidos corresponde a rasgos estructurales como son los planos de falla o zona de cizalla, donde la porosidad secundaria favorece esta migración de fluidos, con un notable dominio de patrones aleatorios en su distribución en la cuenca. Así mismo, tal como lo señala Lizarralde *et al.* (2010), el proceso de alteración termogénica genera una descomposición de la materia sedimentaria en gases, dejando un vacío molecular que causara un aumento en la porosidad primaria; el cual facilita la liberación de estos fluidos en sistemas dispersos y de menor volumen.

La profundidad de la zona de transparencia acústica al paso de fluidos por la columna sedimentaria, es superior al basamento acústico de esta sección sísmica, lo cual impide identificar la zona de producción de estos gases. Sin embargo, la sísmica multicanal mostrada por Lizarralde *et al.* (2007), muestra un conjunto de intrusiones magmáticas someras en forma de *sills* a escasos 200 m del lecho marino (Figura 95), donde la secuencias de lodos hemipelágicos ricos en diatomeas y demás materia orgánica, es alterada por el calor liberado de estos *sills*. En este proceso tiene lugar la descomposición de la materia orgánica en ambientes anóxicos, generando el metano y dióxido de carbono (Paull, et al. 2007).

Los gases producidos en esta cuenca deben encontrar una estratigrafía que sirva de trampa y permita su acumulación regional. En tal sentido, los BSR observados en el margen de Sonora, deberá adquirir condiciones de estabilidad de hidratos (Lonsdale 1989) al acercarse a dicho margen. Como consecuencia de una relación de presión hidrostática y litostática, condiciones de temperatura y relaciones químicas (Cruz Melo 2008). La unidad GB02, presenta una respuesta sísmica correspondiente a flujos turbidíticos de gran porosidad y contenidos de fluidos, que le dan las propiedades de transparencia acústica; según la cual pudiese funcionar como reservorio para los fluidos emitidos en esta transformación de la materia orgánica. Si consideramos que sobre ella yacen secuencias de lodos hemipelágicos finamente laminados que pueden ejercer la función de sello.

5.4. Evolución Tectono-Estratigráfica

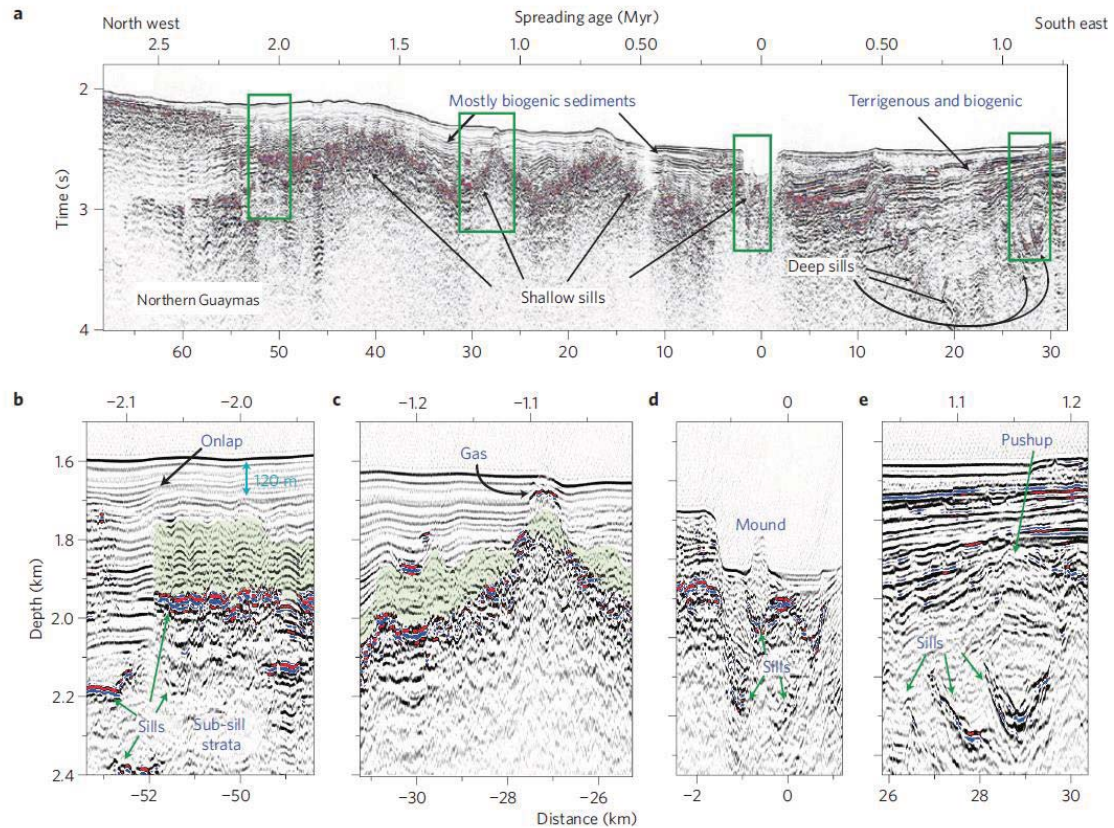


Figura 95. Intrusiones de diques y *sills* en la columna sedimentaria de la Cuenca de Guaymas, como mecanismo de producción de gases hidrocarburos y CO₂. Interpretación realizada por Lizarralde y otros (2011) en sísmica multicanal de la cuenca, donde se identifican las intrusiones someras en relación a loción a los sitios de emanaciones frías.

5.4. EVOLUCIÓN TECTONO-ESTRATIGRÁFICA

Las evidencias observadas en el desarrollo de esta investigación permiten establecer un modelo de evolución de la estratigrafía somera en la interacción entre la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora. Tras el cambio de la dirección de esfuerzos ocurridos hace 7 Ma, el Golfo de California pasa de un *rifting* longitudinal y cizalla pura a lo largo de la trinchera oeste, a un estilo de *rifting* oblicuo (Lonsdale 1985, Paull, et al. 2007, Fletcher, et al. 2007). Las evaporitas observadas permiten señalar que a inicios de este periodo comenzaba a presentarse incursiones oceánicas del Pacífico (Miller and Lizarralde 2012). La transición ocurrida hace 2.5 Ma, cuando se presenta una aceleración de la deformación de cizalla y comienza una rotación en sentido horario, da origen a una serie de nuevas fallas transformantes en échelons oblicuas a la orientación del golfo (Lonsdale

5.4. Evolución Tectono-Estratigráfica

1989). Este evento estuvo acompañado de la rotación de la dirección de extensión de norte a sur en las cuencas *pull apart* continentales, a una nueva dirección del extensión perpendicular a la separación de placas, como ocurre en las dorsales mid-oceánicas (Lonsdale 1989), produciendo así la ruptura continental en un par de *graben* asociados a un *rifting* en estilo *overlapping*.

En este sentido, durante el Cuaternario tardío (>0.93 Ma), ya estaba formada la morfología de la Cuenca de Guaymas en la cual tiene lugar el depósito de los sedimentos descritos en esta tesis. Se considera un modelo morfológico compuesto por una plataforma continental estrecha, que limita en un pie de talud simple con la planicie de la Cuenca de Guaymas. Esta cuenca se encontraba en etapa extensional durante este período; presentando como depocentro a los ejes de los *graben* incipientes del Rift Norte y Rift Sur. La Falla de Guaymas estaba definida por un estilo de cizalla pura, con una traza simple dominante en relación a una serie de fallas en échelon derivadas de esta.

Así, en la plataforma del margen de Sonora durante el Plioceno Tardío ocurrió la sedimentación de la secuencia CS04, la cual, debido a su estratificación aparentemente horizontal, sugiere haberse extendido hasta la planicie de la Cuenca de Guaymas. Posteriormente, los cambios de nivel de mar y de aportes de sedimentos terrígenos, permitieron la sedimentación de dos secuencias retrogradantes (CS03 y CS02). Estas secuencias están separadas por discordancias en *onlap* de bajo ángulo que definen los límites aparentes de estos frentes sedimentarios, por lo que tiene lugar la sedimentación de la secuencia progradante CS01, que parece superar el talud y alcanzar la planicie de la Cuenca de Guaymas.

Las litologías observadas en la plataforma del margen de Sonora y en la Cuenca de Guaymas (Curry, et al. 1982), son consistentes con una misma fuente de sedimentos terrígenos y de materia orgánica hemipelágica. Por lo tanto, el período de sedimentación de las secuencias CS03 y CS02, por representar periodos retrogradantes, puede definir un *hiatus* o en su defecto, una sedimentación muy escasa para la planicie de Guaymas. Esto mismo puede justificar las discordancias de bajo ángulo en *downlap* observadas entre las secuencias GB03, GB02 y GB01 en la planicie. La sedimentación de estas secuencias en la Cuenca de Guaymas, es contemporánea a las etapas de *pre-rifting*.

5.4. Evolución Tectono-Estratigráfica

Posteriormente tuvo lugar la separación de las laderas de *rift*, que permitieron la sedimentación de la unidad NR01.

Durante este periodo de apertura, el régimen transtensivo permite el desplazamiento dextral de la Falla Transformada de Guaymas que aprovecha la zona de mayor debilidad dada por los delgados espesores que existen en el pie de talud. Durante la evolución de este sistema, la componente extensional permitió un desplazamiento rotativo en forma horaria (Lonsdale 1989), con lo cual se produjo la separación del talud, en una cordillera aislada que limita con la Cuenca de Guaymas y un pie de talud con terminación en un escarpe de la Falla de Guaymas.

Conforme evolucione el sistema de Falla de Guaymas, se va a presentar una deformación en flor negativa, de la cual resulta la formación de la Cuenca de Satélite, mientras que en su interacción con el Rift Norte, en su ángulo interno va a dar origen a una cuenca nodal, y en su ángulo externo una inestabilidad gravitacional evidenciada en los deslizamientos rotacionales en el actual talud.

Finalmente la alta tasa de sedimentación asociada a ambas fuentes (terrágenas y biogénicas), tienen su evidencia en la secuencia de sedimentos poco consolidados, que cubren el fondo marino de la región. Contemporáneo el margen de Sonora presenta la erosión submarina en forma de cañón de erosión, proveniente del Río Sonora, erosionando la secuencia CS01. Adicionalmente, el meandro que limita con el talud presenta, evidencias de episodios de desborde que conllevan a la sedimentación de flujos detríticos en forma de abanicos submarinos sobre la planicie

A lo largo del todo el proceso del *rifting*, se ha producido la constante intrusión de cuerpos magmáticos bajo la columna sedimentaria de la cuenca. Reportándose intrusiones alejados de los ejes del *rift* hasta una distancia de 50 km (Lizarralde, Soule, et al. 2010), que permiten el adelgazamiento cortical. Actualmente sirven de mecanismo de generación de gases de hidrocarburos y CO₂, proveniente de la alteración termogénica de la materia orgánica que es rica en la columna sedimentaria de la Cuenca de Guaymas y la plataforma del margen de Sonora.

6. CONCLUSIONES

La técnica de detección hidroacústica multihaz de retro-dispersión en columna de agua es una técnica muy eficiente en la localización de sistemas de emanación de fluidos activos; siendo complementadas en esta tesis, con otras herramientas exitosas como el análisis de las imágenes de retro-dispersión acústica del lecho marino y la sísmica de reflexión de alta resolución. En tal sentido, el uso de dichas herramientas permitió la definición de dos sistemas de emanaciones frías, uno en el margen de Sonora en las proximidades de la Cuenca de Satélite, y el otro en el lecho marino de la Cuenca de Guaymas fuera del *rift*. Ventilaciones hidrotermales reportadas anteriormente en el Rift Norte no son observadas, y esto pudiera ser a una posible inactividad en el escape de flujos y gases por el momento.

Las condiciones que dominan la estratigrafía somera de la Cuenca de Guaymas corresponden a tasas de sedimentación terrígena rápidas, alcanzando máximos de hasta 1,000 m/Ma, teniendo un gran aporte de materia orgánica proveniente de los florecimientos de productores primarios, en un ambiente hemipelágicos bajo condiciones de mínimo de oxígeno. Este gran contenido de materia orgánica representa condiciones potenciales para la generación de hidrocarburos de forma casi instantánea, en cuanto a condiciones geológicas se refiere, debido a la presencia de intrusiones de *sills* distribuidos de forma aleatoria en toda la cuenca, que permiten la transformación termogénica en donde es liberado CO₂ y gases de hidrocarburos.

Las emanaciones frías en el lecho a distancia del *rift* en la Cuenca de Guaymas tienen como expresión superficial en forma de montículos de entre 2 y 5 m de altura, conformados por carbonatos autigénicos y comunidades quimiosintéticas, que producen una respuesta de alta impedancia acústica en las imágenes de retrodispersión del lecho marino mientras que su respuesta sísmica en las secciones sísmicas corresponde a zonas verticales de transparencia acústica de hasta 300 m de espesor, en los cuales la estratificación superior es perturbada, mostrando estructuras de colapso. Las intrusiones magmáticas de *sills* son el mecanismo empleado para la generación de estos gases, donde inmediatamente emergen generando plumas de burbujas, por lo que la distribución

aleatoria de dichas intrusiones permitirá el patrón disperso observado en este conjunto de emanaciones.

En la unidad estratigráfica GB02 en la planicie de la cuenca, la posible gran porosidad y contenido de fluidos inferida en ella, permiten definirla como roca reservorio de los fluidos emergentes, al tener suprayacente la secuencia finamente laminada de lodos hemipelágicos de la unidad GB01 que pudiese servir de sello. Este proceso de entrapamiento, no es efectivo dada la porosidad primaria de GB02, pero puede permitir una acumulación de estos fluidos, por las condiciones de temperatura y presión lito-hidroestática al distanciarse de las intrusiones ígneas, que puedan permitir una estabilización en forma de hidratos.

Estos hidratos se observan en las proximidades de la cordillera en forma de BSR en lo perfiles sísmicos analizados. Los mismos, al quedar expuestos sobre la ladera norte del escarpe de la traza sur del Sistema de Falla de Guaymas, sufren la disociación molecular, liberando de forma continua los gases contenidos en ella. De forma similar, la interacción de las trazas del sistema de Falla de Guaymas en su contexto de estructura en flor, va a permitir que sobre la Cuenca de Satélite y parte del pie de talud sean rutas para el escape de plumas de burbuja activas, donde los hidratos inferidos al oriente de esta cordillera, son alterados por parte de las aguas oceánicas que se filtran por las fallas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, Luis, Francisco Suárez-Vidal, Ramón Mendoza-Borunda, y Mario González-Escobar. «Bathymetry and active geological structures in the Upper Gulf of California.» *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* (Sociedad Geológica Mexicana) 61, nº 1 (2009): 129-141.
- Anderson, C. A., J. W. Durham, F. P. Shepard, M. L. Netland, y R. Revelle. 1940 *E.W. Scripps Cruise to the Gulf of California*". Vol. 43. 1-5 vols. Geo. Soc. Am. Mem, 1950.
- Angelier, J., B. Colleta, J. Chorowicz, L. Ortlieb, y C. Rangin. «Fault tectonics of the Baja California Peninsula and the opening of the Sea of Cortez, Mexico .» *Journal of Structural Geology* (Pergamon Press Ltd) 3, nº 4 (1981): 347.
- Aragón-Arreola, Manuel, María Morandi, Arturo Martín-Barajas, Luis Delgado-Argote, y Antonio González-Fernández. «Structure of the rift basins in the central Gulf of California: Kinematic implications for oblique rifting.» *Tectonophysics* (ELSEVIER), 2005: 19-38.
- Atwater, T. «Plate tectonic history of northeast Pacific and western North America.» Editado por D. Winterer, M. Hussong y R.W. Decker. *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii* (The Geology of North America), 1989: 21-72.
- Badan-Dangon, A., J. Koblinsky, y T. Baumgartner. «Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns.» *Oceanología Acta* (Gauthier-Villars) 8, nº 1 (1985): 13-22.
- Barron, John, David Bukry, y James Bischoff. «High resolution paleoceanography of the Guaymas Basin, Gulf of California, during the past 15 000 years.» *Marine Micropaleontology* (ELSEVIER) 50 (2004): 185-207.
- Bartolomé de la Peña, Rafael. *EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL MARGEN CONTINENTAL OESTE DE MEXICO: FOSA MESOAMERICANA Y GOLFO DE CALIFORNIA (CORTES-P96)*. Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias Físicas, Departament de Geodinàmica i Geofísica, Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera, Barcelona: Universitat de Barcelona, 2002, 300.
- Basile, Christophe, y Jean Pierre Brun. «Transtensional faulting patterns ranging from pull-apart basins to transform continental margins: an experimental investigation.» *Journal of Structural Geology* (Pargon), 1999: 23-37.
- Batiza, R. «Geology, petrology, and geochemistry of Isla Tortuga, a recently formed tholeiitic island in the Gulf of California.» *Geological Society of America Bulletin* (The Geological Society of America) 89, nº 80904 (Sept. 1978): 1309-1324.
- Beker, E.T. , J.W. Lavelle, R.A. Feely, G.J. Massoth, y S.L. Walker. «Episodic venting of hydrothermal fluids From the Juan de Fuca Ridge.» *Journal of Geophysical Research* (The American Geophysical Union) 94 (1989): 9237-9250.
- Bischoff, J. L., y T. L. Hanyey. «Tectonic elements of central part of the Gulf of California.» *Geological Society of America Bulletin* 85 (1974): 1893-1904.
- Blatsford, C. W. «Geological notes on the west coast of Mexico .» *Engineering & Mining Journal* 89 (1910): 223-224.
- Bohrmann, G., y M. E. Torres. «Gas hydrates in marine sediments.» *Marine Geochemistry* (Springer), 2006: 481-511.
- Bray, N. A., y J. M. Robles. «Physical Oceanography of the Gulf of California.» En *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, de J. Paul Dauphin y Bernard R. T.

- Simoneit, 511-554. California: The American Association of Petroleum Geologists, 1991.
- Buck, Roger. «Modes of Continental Lithospheric Extension.» *Journal of Geophysical Research* (American Geophysical Union) 96, n° B12 (November 1991): 20161-20178.
- Byrne, Jhon V., y K. O. Emery. «Sediments of The Gulf of California.» *Bulletin of The Geological Society of America* (The Geological Society of America) 71, n° 7 (1960): 983-1010.
- Calvert, S. E. «Accumulation of diatomaceous silica in the sediments of the Gulf of California.» *Geological Society of America Bulletin* 77 (1966): 569-596.
- Canet, Carles, y otros. «Mineralogical and geochemical characterization of hydrocarbon seep sediments from the Gulf of Mexico .» *Marine and Petroleum Geology* (Elsevier Ltd.) 23 (2006): 605-619.
- Carranza, A., L. Rosales, J. E. Aguayo, R. Lozano, y Y. Hornelas. «Geochemical study of hydrothermal core sediments and rocks from the Guaymas Basin, Gulf of California.» *Applied Geochemistry* (Pergamon Press) Vol. 5 (1990): 77-82.
- Chase, C. G., H. W. Menard, R. L. Larson, G. F. Sharman , y S. M. Smith. «History of sea-floor spreading west of Baja California.» *Geological Society of America Bulletin* 81 (1970): 491-498.
- Cruz Melo, Carlos Eleazar. *Análisis de la presencia de hidratos de metano con los horizontes sísmicos BSR al suroeste de la península de Baja California, México*. Tesis para obtención de grado de Maestro en Ciencias, Postrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.
- Curry, David Moore, Eduardo Aguayo, Marie-Piere Aubrie, y Geirhard Einsele. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*. Editado por Jan Blakeslee, Lawrence Platt y Larry Stout. Vol. 64. Washington: JOINT OCEANOGRAPHIC INSTITUTIONS FOR DEEP EARTH SAMPLING, 1982.
- Curry, y otros. «GUAYMAS BASIN: SITES 477, 478, AND 481.» Editado por Jan Blakeslee, Larry N. Stout y Lawrence W. Platt. *Deep Sea Drilling Project Initial Reports*. (NATIONAL SCIENCE FOUNDATION) Volumen 64 (Oct. 1982): 211-415.
- Cyranoski, David. «Japanese test coaxes fire from ice. First attempt to extract methane from frozen hydrates far beneath the ocean shows promise.» *Nature News* (Nature) 496 (April 2013): 409.
- Dando, P.R., y M. Hovland. «Environmental effects of submarine seeping natural gas.» *Continental Shelf Research* (Pergamon Press Ltd.) 12, n° 10 (1992): 1197-1207.
- Delgado Argote, Luis Alberto. *Evolución Tectónica y Magmatismo Neógeno de la Margen Oriental de Baja California Central* . Tesis, Instituto de Geología , Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico: Posgrado en Ciencias de la Tierra, 2000, 175.
- Dick, Gregory, Lee Yifan, y Bradley Tebo. «Manganese(II)-Oxidizing Bacillus Spores in Guaymas Basin Hydrothermal Sediments and Plumes.» *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY* (American Society for Microbiology) Vol.72, n° 5 (May. 2006): 3184-3190.
- Duhaime, Melissa, Robert Vrijenhoek, y Joe Jones. «Phylogenetics of Vestimentiferan Symbionts from Guaymas Basin Using the 16S and RuBisCO Genes.» *M B A R I* (Monterey Bay Aquarium Research Institute), 2003.
- Einsele, G., y K. Kelts. «Pliocene and Quaternary mud turbidites in the Gulf of California; Sedimentology, mass physical properties and significance.» Editado por Curry et al. *Initial reports of the Deep Sea Drilling Project* (National Science Foundation) 64 (1982): 1169-1178.

- Etioppe, Giuseppe, y Ronald Klusman. «Geologic emissions of methane to the atmosphere.» *Chemosphere* (Elsevier Science Ltd.) 49 (2002): 777-789.
- Fletcher, John, Marty Grove, David Kimbrough, Oscar Lovera, y George Gehrels. «Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas .» *GSA Bulletin* (The Geological Society of America) 111, nº 11/12 (December 2007): 1313-1336.
- Frez, J., González-García, A Nava, J. Acosta , H. Fabriol, y M. Alvarez. «Studies of seismic structures and seismotectonics in Northern Baja California.» *Rupturing of the Continental lithosphere in the Fulf of California and Salton Through Workshop, Abstract Volume*, 2000: 42-43.
- Fuis, G. S., y W. N. Kohler. «Crustal structure and tectonics of the Imperial Valley Region, California.» Editado por C. A. Rigsby. *The Imperial Basin Tectonics, Sedimentation and Thermal Aspects. Pacific Section S.E.P.M.*, 1984: 1-13.
- Galimov, Erick M., y Bernd R. Simoneit. «GEOCHEMISTRY OF INTERSTITIAL GASES IN SEDIMENTARY DEPOSITS OF THE GULF OF CALIFORNIA, DEEP SEA DRILLING PROJECT LEG 641.» Editado por Jan Blakeslee, Larry N. Stout y Lawrence W. Platt. *Deep Sea Drilling Project Initial Reports.* (NATIONAL SCIENCE FOUNDATION) Volumen 64 (Oct. 1982): 781-787.
- García, E. 'Climas' (*clasificación de Koppen, modificado por García*). *Escala 1:1000000. México.* Mapa, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 1998.
- Gastil, Gordon, Jay Neahauss, Michael Cassidy, Judith Terry Smith, James Ingle, y Daniel Krummenacher. «Geology and Paleontology of Southeastern Isla Tiburon, Sonora, México.» *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* (Sociedad Geológica Mexicana) 16, nº 1 (1999): 1-34.
- Gieskes, Joris M., Miriam Kastner, Gerhard Einsele, Kerry Kelts, y Jeffrey Niemitz. «HIDROTHERMAL ACTIVITY IN THE GUAYMAS BASIN GULF OF CALIFORNIA: A SYNTHESIS.» Editado por Curray et al. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 1979: 1159-1167.
- Gieskes, Joris M., Timothy Shaw, Thomas Brown, Ann Sturz, y Andrew C. Campbell. «Interstitial Water and Hydrothermal Water Chemistry, Guaymas Basin, Gulf of California.» Cap. 36 de *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, de J. Paul Dauphin y Bernd R. T. Simoneit, 753-780. Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists, 1991.
- Grenwingk, C. «Beitrag zur Kenntniss der geognostischen Beschaffenheit Californiens.» *Mineralogischeskor Obschestvo*, 1848: 142-162.
- Gürbüz, Alper. «Geometric characteristics of pull-apart basins.» *Lithosphere* (Geological Society of America) 2 (2010): 199-206.
- Harrison, J. C., y S. P. Mathur. «Gravity anomalies in Gulf of California.» Editado por T. van Andel y G. G. Shor. *Marine geology of the Gulf of California* (American Association of Petroleum Geologists Memoir 3), 1964: 76-89.
- Hornbach, M., L. Lavier, y C. Ruppel. «Triggering mechanism and tsunamogenic potential of the Cape Fear Slide complex, U.S. Atlantic coastal margin.» *Geochem. Geophys. Geosyst.* (G-cubed) 8 (2007).
- Hubbs, C. L., y G. I. Rodden. «Oceanography and Marine life along the Pacific Coast of Middle America.» *Handbook of Middle American Indians* (University of Texas), 1964: 43-186.

- Jones, Nicola. «Gas-hydrate tests to begin in Alaska. US team will pump waste carbon dioxide into natural-gas well to extract methane.» *Nature News* (Nature), January 2012.
- Karson, J.A., y otros. «The Geology of the oceanographer transform: The Ridge-Transform Intersection.» *Marine Geophysical Research* (Reidel Publishing Company) 6 (1984): 109-141.
- Kastner, Miriam. «Evidence for two distinct hydrothermal systems in the Guaymas Basin.» Editado por Curaray et al. *Initial Reports of Deep Sea Drilling Project* (U.S. Government Printing Office) 64 (1982): 1143-1157.
- Kaucke, Ingo, y otros. «Acoustic investigation of cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea .» *Marine Geology* (Elsevier Ltd.) 231 (2006): 51-67.
- Kawka, Orest, y Bernd Simoneit. «Hydrothermal pyrolysis of organic matter in Guaymas Basin: I. Comparison of hydrocarbon distributions in subsurface sediments and seabed petroleum.» *Organic Geochemistry* (Elsevier Science) Vol. 22, nº 6 (1994): 947-978.
- Kongsberg. *Topas SW. Replay and processing*. Nouega: Kongsberg, 2007.
- Köppen, W. «Das geographische system der klimate.» *Handbuch Der Klimatolgia* (Borntraeger) 1 (1936): 44p.
- Laberg, J. S., K. Andreassen, y S. Knutsen. «Inferred gas hydrate on the Barents Sea shelf — a model for its formation and a volume estimate .» *Geo-Marine Letters* (Springer -Verlag) 18 (1998): 26-33.
- Lanza-Espino, Guadalupe, y Luis A. Soto. «Sedimentary geochemistry of hydrothermal vents in Guaymas Basin, Gulf of California, Mexico.» Editado por R. Fuge. *Applied Geochemistry* (Pergamon) Vol. 14 (1999): 499-510.
- Larson, R. L. «Bathymetry, magnetic anomalies, and plate tectonic history of the mouth of the Gulf of California.» *Geological Society of America Bulletin* 83 (1972): 3345-3360.
- Lavín, M. F., G. Gaxiola-Castro, y J. M. Robles. «Winter water masses and nutrients in the northern Gulf of California .» *Journal of Geophysical Research* (American Geophysical Union) 100, nº C5 (May. 1995): 8587-8605.
- Lawver, Lawrence, John Sclater, Thomas Henyey , y J. Rogers . «Heat flow measurements in the southern portion of the Gulf of California.» *Earth and Planetary Science Letters* (North-Holland Publishing company) 12 (1973): 198-208.
- Lizarralde, Daniel, Adam Soule, Jeff Seewald, y Gioria Proskurowski. «Carbon release by off-axis magmatism in a young sedimented spreading centre.» *Geoscience* (Nature) 4 (December 2010): 50-54.
- Lizarralde, Daniel, y otros. «Variation in styles of rifting in the Gulf of California.» *Nature Geoscience* (Nature) 4 (January 2011): 50-54.
- Lonsdale. «A Transform Continental Margin Rich in Hydrocarbons, Gulf of California.» *The American Association or Petroleum Geologists Bulletin* (The American Association or Petroleum Geologists) 69, nº 7 (July 1985): 1180.
- Lonsdale. «Geology and tectonic history of the Gulf of California.» Editado por D. Hussong, E. L. Winterer y R. W. Decker. *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii (The Geology of North America, N)* (Geological Society of America), 1989: 499-521.
- Lonsdale, Peter, J. L. Bischoff, V. M. Burns, M. Kastner, y R. E. Sweeney. «A HIGH-TEMPERATURE HYDROTHERMAL DEPOSIT ON THE SEABED AT A GULF OF CALIFORNIA SPREADING CENTER.» *Earth and Planetary Science Letters* (Elsevier Scientific Publishig Company) 49 (1980): 8-20.

- Lonsdale, Peter, y L. A. Lawver. «Immature plate boundary zones studies with a submersible in the Gulf of California.» *Geological Society of America Bulletin* Vol. 91, nº Part I (Sept. 1980): 555-569.
- Marione, S. G., y P. Ripa. «Geostrophic flow in the Guaymas Basin, Central Gulf of California.» *Continental Shelf Research* (Pergamon Journals) 8, nº 2 (1988): 159-166.
- Merewether, Ray, Marks S. Olsson, y Peter Lonsdale. «Acoustically Detected Hydrocarbon Plumes Rising From 2-km Depths in Guaymas Basin, Gulf of California.» *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH* (American Geophysical Union) 90, nº B4 (1985): 3075-3085.
- Miller, Nathaniel, y Daniel Lizarralde. «Thick evaporites and early rifting in the Guaymas Basin, Gulf of California.» *Geology* (The Geological Society of America), December 2012.
- Morandi, Maria, Manuel Aragón-Arreola, Luis Delgado-Argote, y Antonio González. «EVOLUCIÓN DE LA CASCADILLA YAQUI Y GUAYMAS, A PARTIR DE LA INTERPRETACIÓN DE LA SISMICIDAD DE REFLEXIÓN MARINA.» *XI Congreso Venezolano de Geofísica*. Caracas: Sociedad Venezolana de Geólogos, 2002.
- National Oceanography Centre. «WHAT ARE COLD SEEPS? ?» *National Oceanography Centre, Southampton, University of Southampton*. s.f. http://www.noc.soton.ac.uk/chess/docs/seep_poster.pdf (último acceso: 1 de Febrero de 2012).
- Nix, Rebekah. *The Gulf of California, a physical, geological & biological study*. Dallas, Texas: The University of Texas at Dallas, 2004.
- Núñez-Cornú, F., y otros. «Un modelo de la Estructura de la Corteza para el Sistema de Fallas de San Andrés en la Zona Fronteriza México-EEUU.» *Geotermia* (Revista Mexicana de Geotermia) 12, nº 1 (1996): 43-51.
- Oremland, Ronald S., Charles Culbertson, y Bernd R. Simoneit. «METHANOGENIC ACTIVITY IN SEDIMENT FROM LEG 64, GULF OF CALIFORNIA.» Editado por Jan Blakeslee, Larry N. Stout y Lawrence W. Platt. *Deep Sea Drilling Project Initial Reports* (NATIONAL SCIENCE FOUNDATION) Volume 64 (Oct. 1982): 759-762.
- Paull, Charles K., y otros. «Authigenic carbon entombed in methane-soaked sediments from the northeastern transform margin of the Guaymas Basin, Gulf of California.» *Deep-Sea Research II* (ELSEVIER), 2007: 1240-1267.
- Pearson, A., J. S. Seewald, y T. I. Eglinton. «Bacterial incorporation of relict carbon in the hydrothermal environment of.» *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Elsevier) Vol. 69, nº 23 (Jul. 2005): 5477-5486.
- Phillips, R. P. «Reconnaissance geology of some of the northwestern islands in the Gulf of California [Abs].» *Geological Society of America (Special paper 101)*, 1968: 327.
- Phillips, R. P. «Seismic refraction studies in Gulf of California.» Editado por T. van Andel y G. G. Shor. *Marine geology of the Gulf of California* (American Association of Petroleum Geologists Memoir 3), 1964: 90-25.
- Roden, Gunnar I. «Oceanographic and Meteorological Aspects of the Gulf of California .» *PACIFIC SCIENCE* (University of Hawai'i Press) 12, nº 1 (1958): 21-45.
- Rosas Cota, Armando. «CORRIENTES GEOSTRÓFICAS EN EL GOLFO DE CALIFORNIA EN LA SUPERFICIE Y A 200 METROS, DURANTE LAS ESTACIONES DE INVIERNO Y VERANO.» *CALIFORNIA COOPERATIVE OCEANIC FISHERIES INVESTIGATIONS (CALCOFI) REPORTS* 19 (1977): 89-106.
- Ryan, W. B., y et al. «GeoMapApp.» *Global Multi-Resolution Topography synthesis Geochem. Geophys. Geosyst.* 10. Editado por Marine Geoscience Data System. 2009.

- Sackett, William. «USE OF HYDROCARBON SNIFFING IN OFFSHORE EXPLORATION.» *Journal of Geochemical Exploration* 7 (1977): 243-254.
- Saunders, A. D., D. J. Fornari, y M. A. Morrison. «The composition and emplacement of basaltic magmas produced during the development of continental-margin basins: the Gulf of California, Mexico.» *Journal Geological Societe*, 1982: 335-346.
- Schneider von Deimling, J., J. Brockhoff, y J. Greinert. «Flare imaging with multibeam systems: Data processing for bubble detection at seeps.» *Geochem. Geophys. Geosyst.* (American Geophysical Union) 8, n° 6 (June 2007).
- Schwartzlose, Richard, y Saúl Alvarez-Borrego. «The History of Oceanography along the Mexican Pacific Coast.» Editado por Keith Benson y Philip Rehbock. *OCEANOGRAPHIC HISTORY: The Pacific and Beyond* (University of Washington Press), 2002: 167-173.
- Servicio Mareográfico Nacional. «Servicio Mareográfico Nacional.» *Información*. 2012. <http://www.mareografico.unam.mx/Mareografico/> (último acceso: 14 de Abril de 2013).
- Shepard, F. P. «Sea-Floor valleys of the Gulf of California.» Editado por T. van Andel y G. G. Shor. *Marine geology of the Gulf of California* (American Association of Petroleum Geologists Memoir 3), 1964: 157-192.
- Simoneit, B. R., P. F. Lonsdale, y J. M. Edmond. «Deep-water hydrocarbon seeps in Guaymas Basin, Gulf of California.» *Applied Geochemistry* (Pergamon Press) Vol.5 (1990): 41-49.
- Simoneit, Bernd. «Petroleum Generation in Submarine Hydrothermal Systems: An Update AN UPDATE.» *Canadian Mineralogist* 26 (1988): 827-840.
- Spencer, J. E., y W. R. Normark. «Tosco-Abreojos fault zone: a Neogene transform plate boundary within the Pacific margin of southern Baja California, Mexico.» *Geology* 7, n° 11 (1979): 554-557.
- Sturz, A. A., A. E. Sturdivant, R. N. Lief, B. R. T. Simoneit, y J. M. Gieskes. «Evidence for retrograde hydrothermal reactions in near surface sediments of Guaymas Basin, Gulf of California.» *Applied Geochemistry* (Elsevier Sciences) 11 (1996): 645-665.
- Suter, John. «Facies Models Revisited.» *SEPM Special Publication* (Society for Sedimentary Geology), n° 84 (2006): 339-397.
- Sverdrup, Harald U. «The Gulf of California: Preliminary discussion of the cruise of the "E. W. SCRIPPS" in February and March, 1939.» *6th Pacific Sci. Cong. Proc.* (Pacific Science), 1940: 161-166.
- Teske, Andreas, Ashita Dhillon, y Mitchell L. Sogin. «Genomic Markers of Ancient Anaerobic Microbial Pathways: Sulfate Reduction, Methanogenesis, and Methane Oxidation.» *Biology Bulletin* (Marine Biological Laboratory) 204 (Apr. 2003): 186-191.
- Teske, Andreas, y otros. «Microbial Diversity of Hydrothermal Sediments in the Guaymas Basin: Evidence for Anaerobic Methanotrophic Communities.» Editado por American Society for Microbiology. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, Apr. 2002: 1994-2007.
- U. S. Navy Hydrographic Office. *Sailing directions for the west coasts of Mexico and Central America. 9th ed.* Vol. 84. U. S. Navy, 1951.
- USGS. «Exploring the deep ocean floor: Hot springs and strange creatures.» *United States Geological Survey*. 1999. <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/exploring.html> (último acceso: 1 de Febrero de 2012).
- . *The U.S. Geological Survey Gas Hydrates Project*. 14 de January de 2013. <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/hydrates/seafloor.html> (último acceso: 1 de February de 2013).

- van Andel, Tj. H. «Recent marine sediments in the Gulf of California.» *American Assoc. of Petroleum Geologist Memoir 3* (AAPG), 1964: 216-310.
- Waldron, John. «Extensional fault arrays in strike-slip and transtension.» *Journal of Structural Geology* (Elsevier) 27 (2005): 23-24.
- Weber, Andreas, y Bo Barker Jorgensen. «Bacterial sulfate reduction in hydrothermal sediments of the Guaymas Basin, Gulf of California, Mexico.» *Deep-Sea Research* (PERGAMON) I, nº 49 (2002): 827-841.
- Whelan, Jean K., y John M. Hunt. «C1-C8 HYDROCARBONS IN LEG 64 SEDIMENTS, GULF OF CALIFORNIA.» Editado por Jan Blakeslee, Larry N. Stout y Lawrence W. Platt. *Deep Sea Drilling Project Initial Reports* (NATIONAL SCIENCE FOUNDATION) Volume 64 (Oct. 1982): 763-779.
- Wilson, I. F. «Geology and mineral deposits of the Boleo copper district, Baja California, Mexico.» *U. S. Geol. Survey Prof. Paper* (U. S. Geol. Survey) 273 (1955): 134.

ANEXO A

Plumas de burbujas observadas durante BIG10

Contenido:

- Tabla A1 Base de datos de plumas de burbujas registradas en BIG10 mediante imágenes de retrodispersión hidroacústicas en columna de agua

ANEXO B

Perfiles sísmicos de reflexión de alta resolución obtenidos en GUAYRIV10

Contenido:

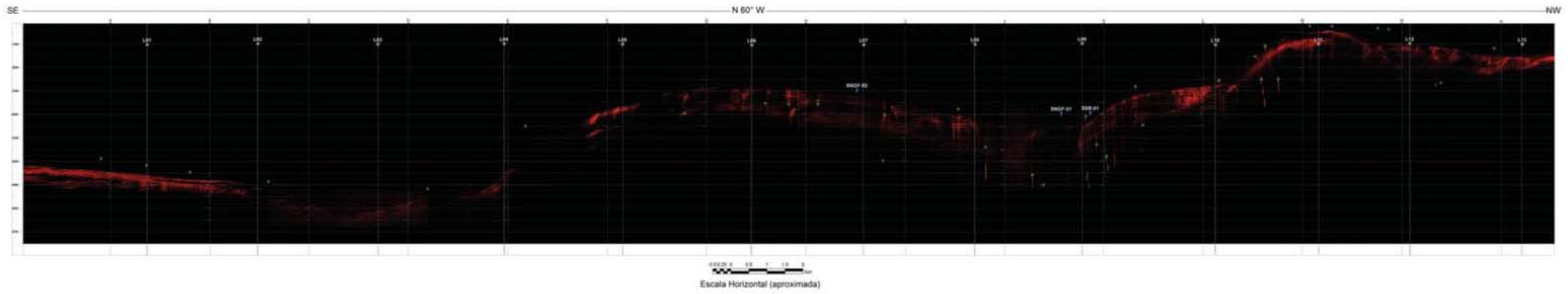
- Perfil sísmico G01 (Imagen)
- Perfil sísmico G01 (Interpretación)
- Perfil sísmico G02 (Imagen)
- Perfil sísmico G02 (Interpretación)
- Perfil sísmico G03 (Imagen)
- Perfil sísmico G03 (Interpretación)
- Perfil sísmico G04 (Imagen)
- Perfil sísmico G04 (Interpretación)
- Perfil sísmico L01 (Imagen)
- Perfil sísmico L01 (Interpretación)
- Perfil sísmico L02 (Imagen)
- Perfil sísmico L02 (Interpretación)
- Perfil sísmico L03 (Imagen)

- Perfil sísmico L03 (Interpretación)
- Perfil sísmico L04 (Imagen)
- Perfil sísmico L04 (Interpretación)
- Perfil sísmico L05 (Imagen)
- Perfil sísmico L05 (Interpretación)
- Perfil sísmico L06 (Imagen)
- Perfil sísmico L06 (Interpretación)
- Perfil sísmico L07 (Imagen)
- Perfil sísmico L07 (Interpretación)
- Perfil sísmico L08 (Imagen)
- Perfil sísmico L08 (Interpretación)
- Perfil sísmico L09 (Imagen)
- Perfil sísmico L09 (Interpretación)
- Perfil sísmico L10 (Imagen)
- Perfil sísmico L10 (Interpretación)
- Perfil sísmico L11 (Imagen)
- Perfil sísmico L11 (Interpretación)
- Perfil sísmico L12 (Imagen)
- Perfil sísmico L12 (Interpretación)
- Perfil sísmico L13 (Imagen)
- Perfil sísmico L13 (Interpretación)

Leyenda

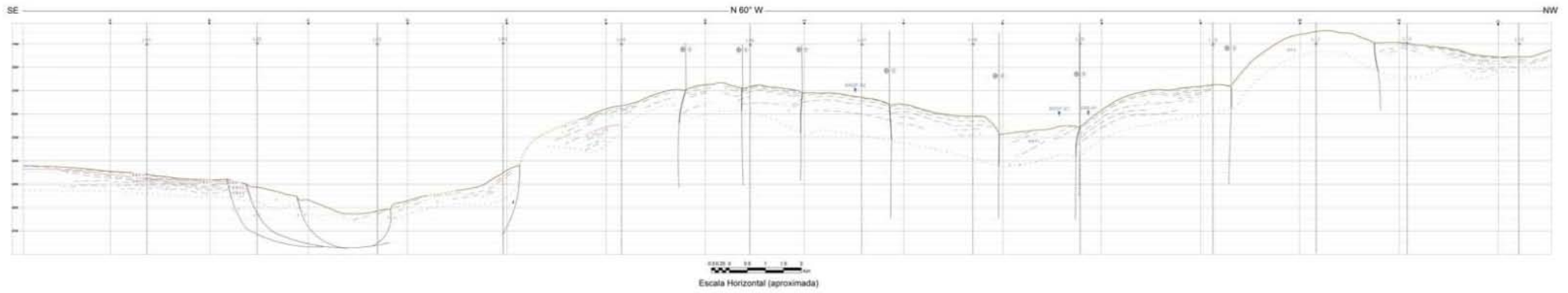
CS01	Unidad Estratigráfica	Basamento acústico
↑	Dirección movimiento vertical	———	Discordancia
⊕ ⊙	Dirección movimiento horizontal	- - - - -	Discordancia inferida
◆	Artefacto	———	Sistema de Falla Transformada de Guaymas
↓	Pluma de burbuja	———	Falla
↙	Falla lístrica	Falla interpretada
▪	Intersección con perfil sísmico	———	Relieve batimétrico
- - - - -	Reflector Sísmico	- - - - -	Relieve batimétrico inferido

PERFIL SÍSMICO G01 (IMAGEN)



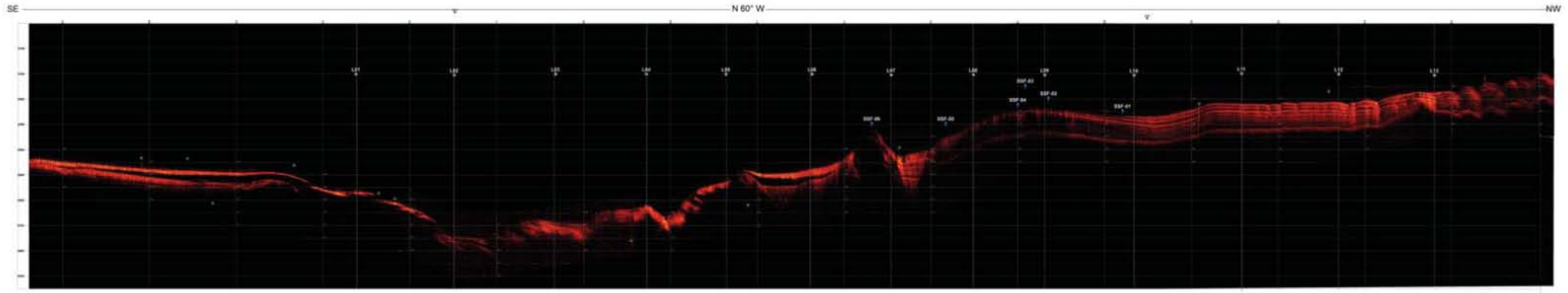
Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SÍSMICO G01 (INTERPRETACIÓN)



Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

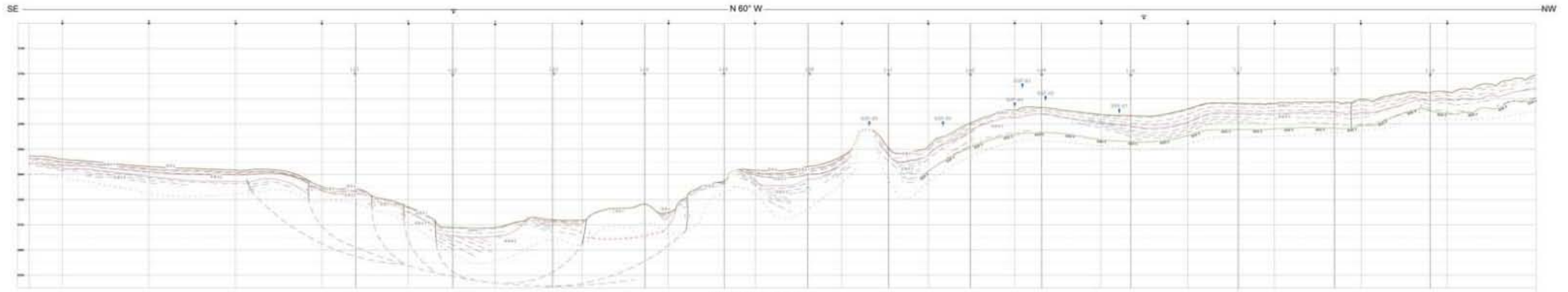
PERFIL SÍSMICO G02 (IMAGEN)



Escala Horizontal (aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SÍSMICO G02 (INTERPRETACIÓN)



Escala Horizontal (aproximada)

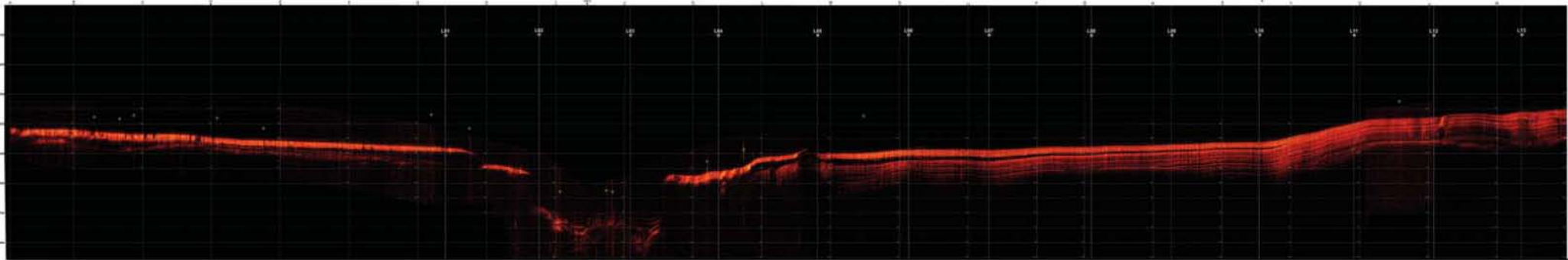
Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SÍSMICO G03 (IMAGEN)

N 60° W

SE

NW

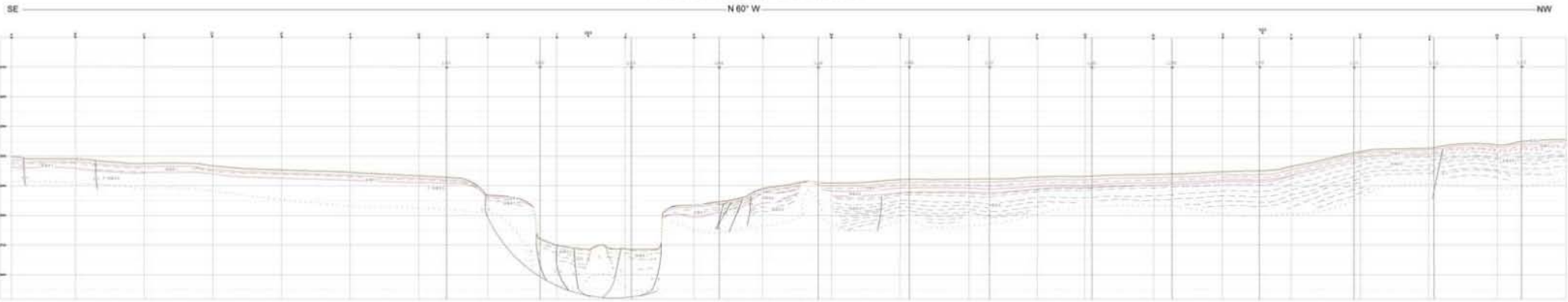


0 0.5 1 1.5 2 km
Escala Horizontal (aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SÍSMICO G03 (INTERPRETACIÓN)

N 60° W



0 0.5 1 1.5 2
Escala Horizontal (aproximada)

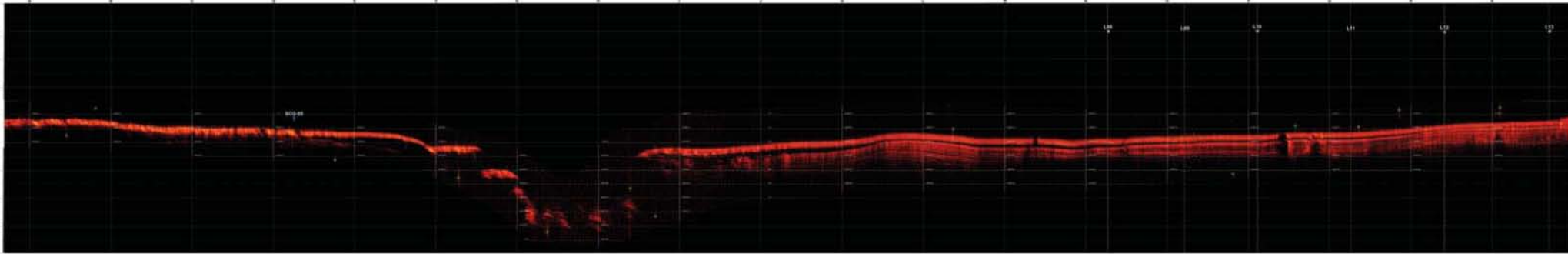
Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SÍSMICO G04 (IMAGEN)

N 60° W

SE

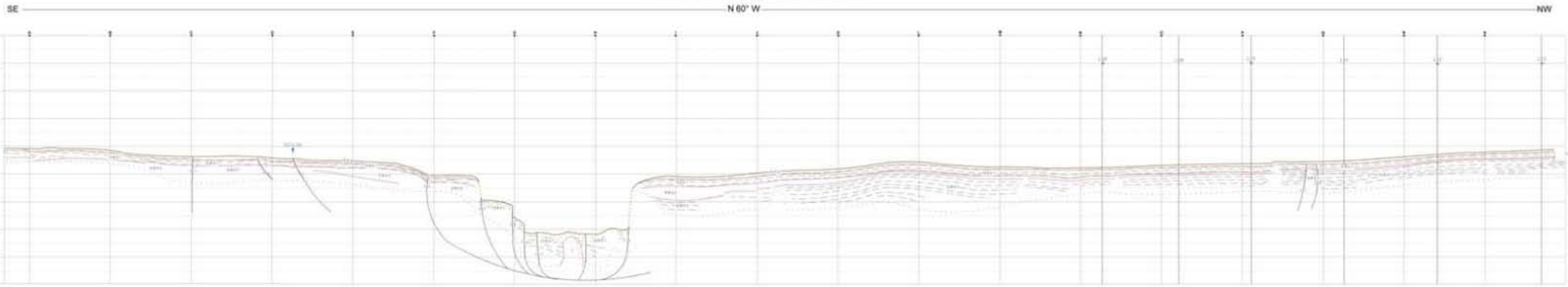
NW



Escala Horizontal (aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SÍSMICO G04 (INTERPRETACIÓN)



0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000

Escala Horizontal (aproximada)

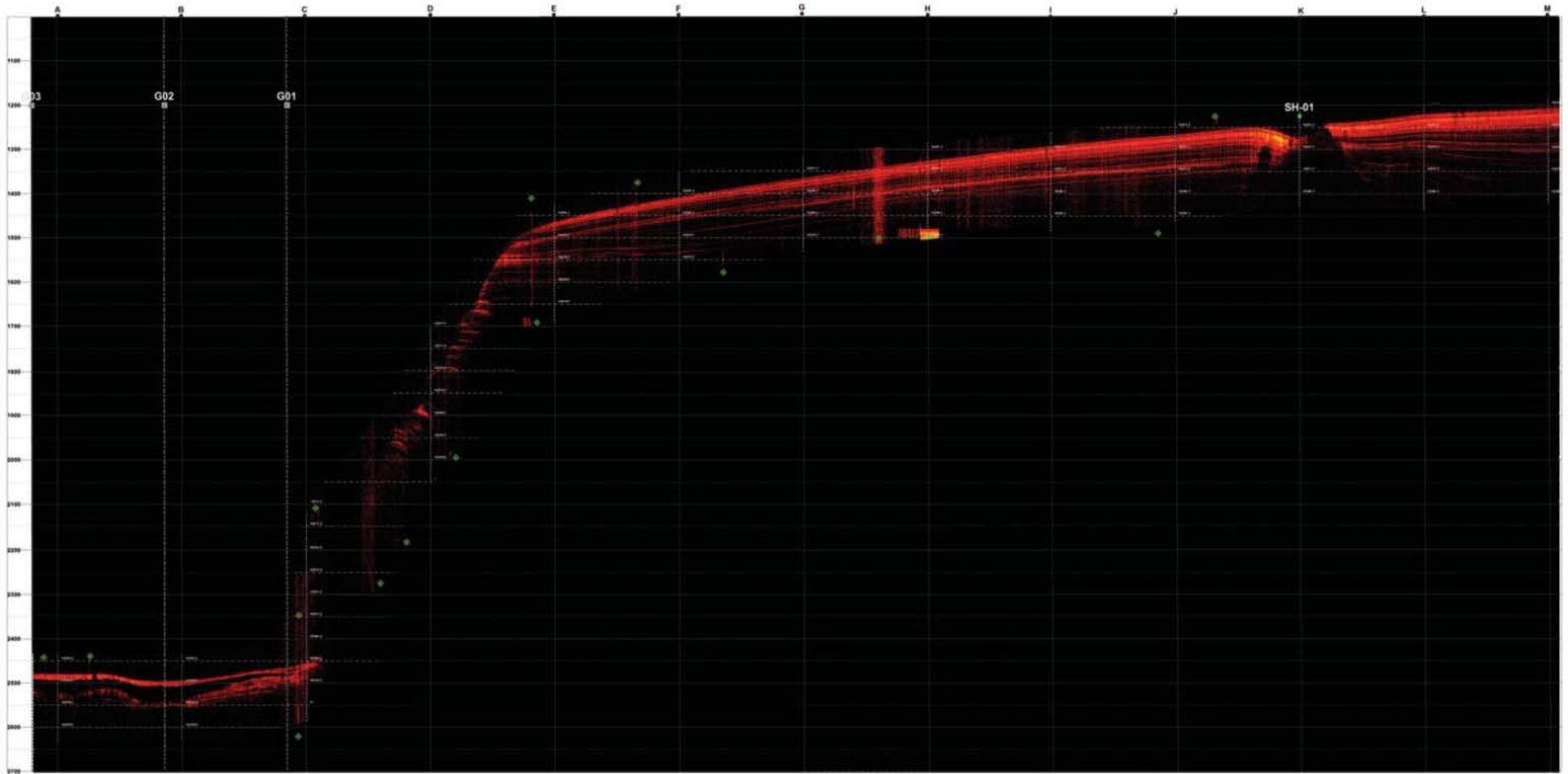
Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L01 (IMAGEN)

SW

N 30° E

NE

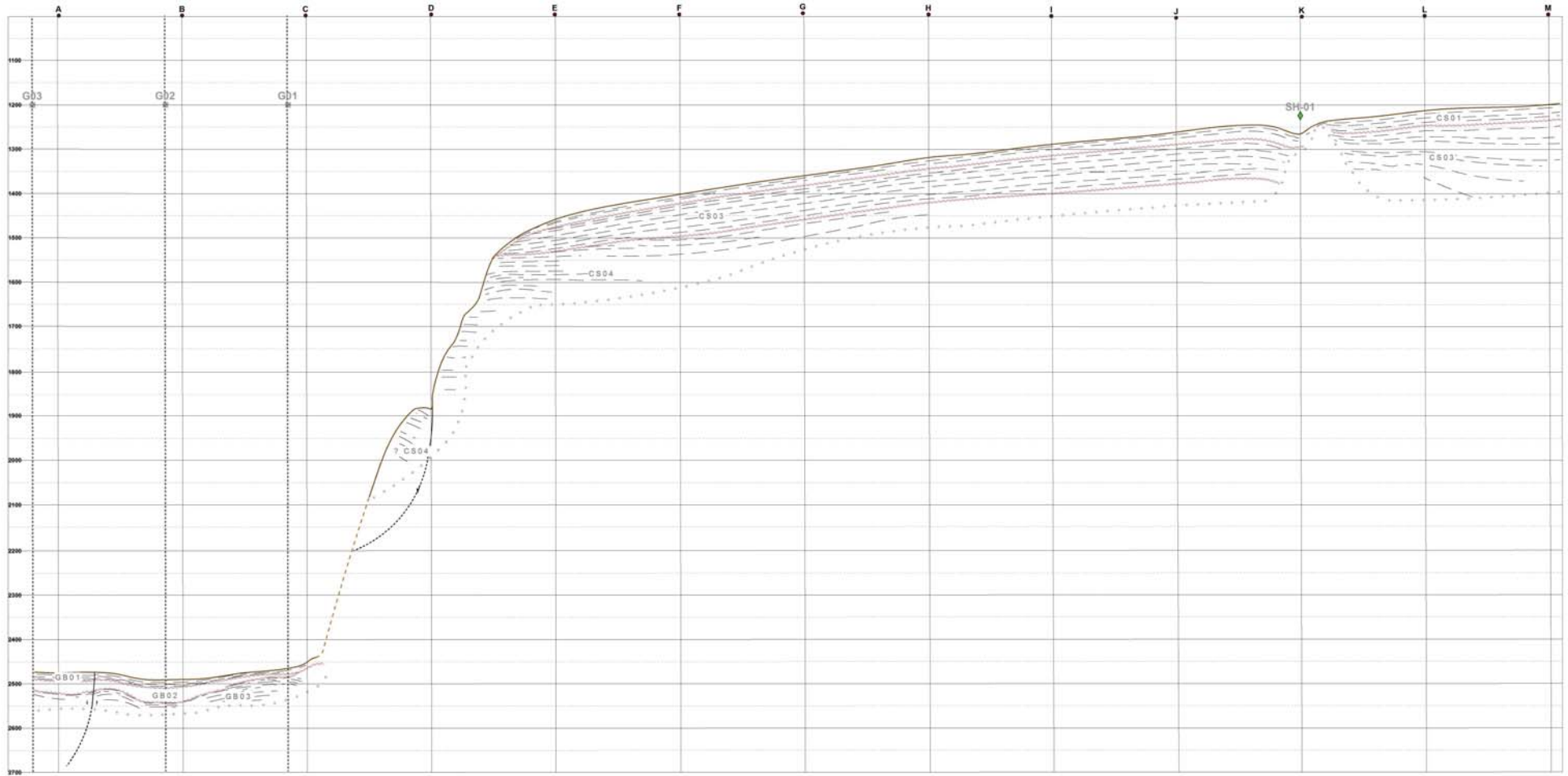


Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L01 (INTERPRETACIÓN)

S W ————— N 30° E ————— N E

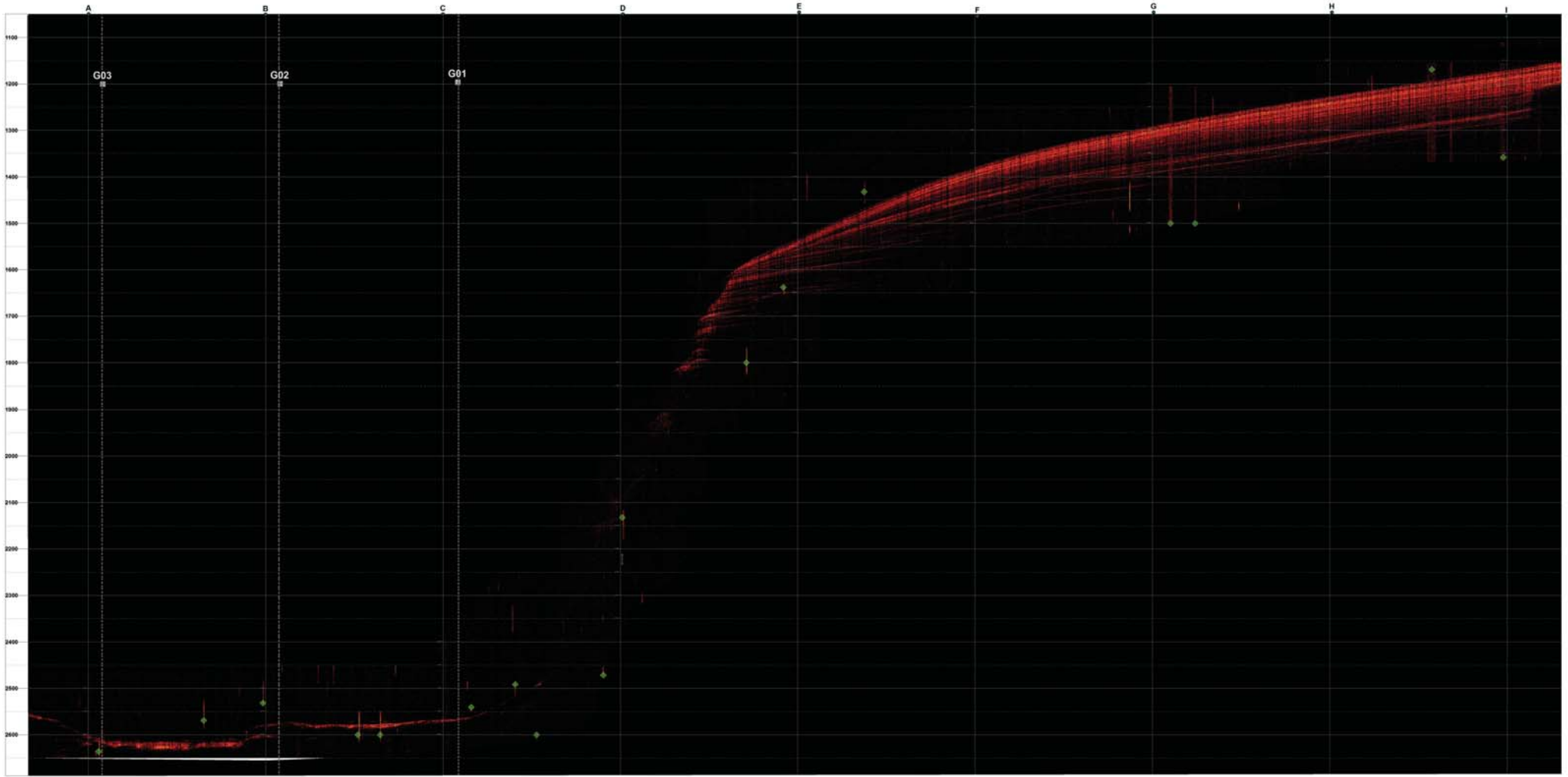


Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L02 (IMAGEN)

SW ————— L02 ————— N 30° E ————— NE

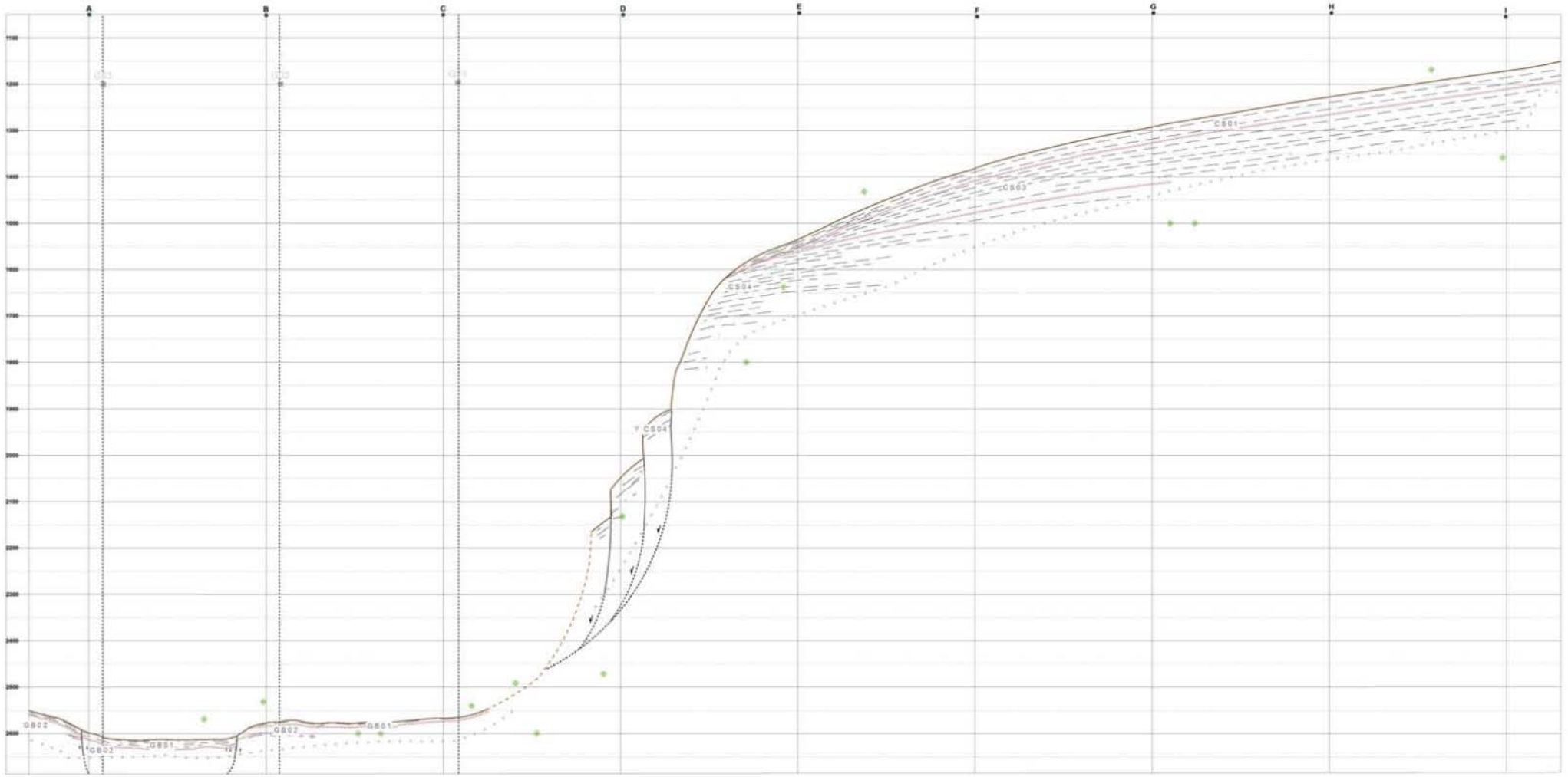


Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L02 (INTERPRETACIÓN)

SW ————— L02 ————— N 30° E ————— NE

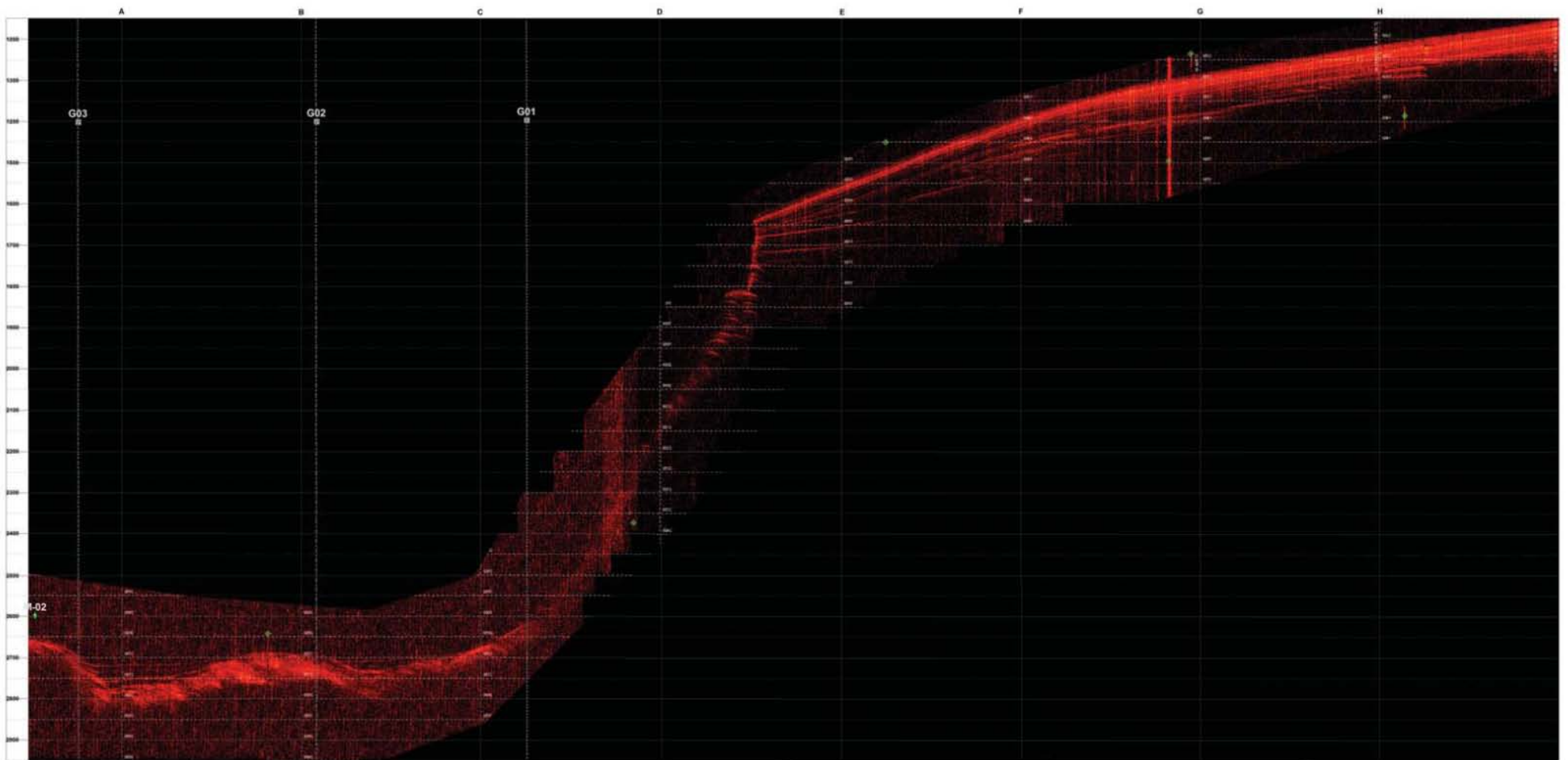


Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L03 (IMAGEN)

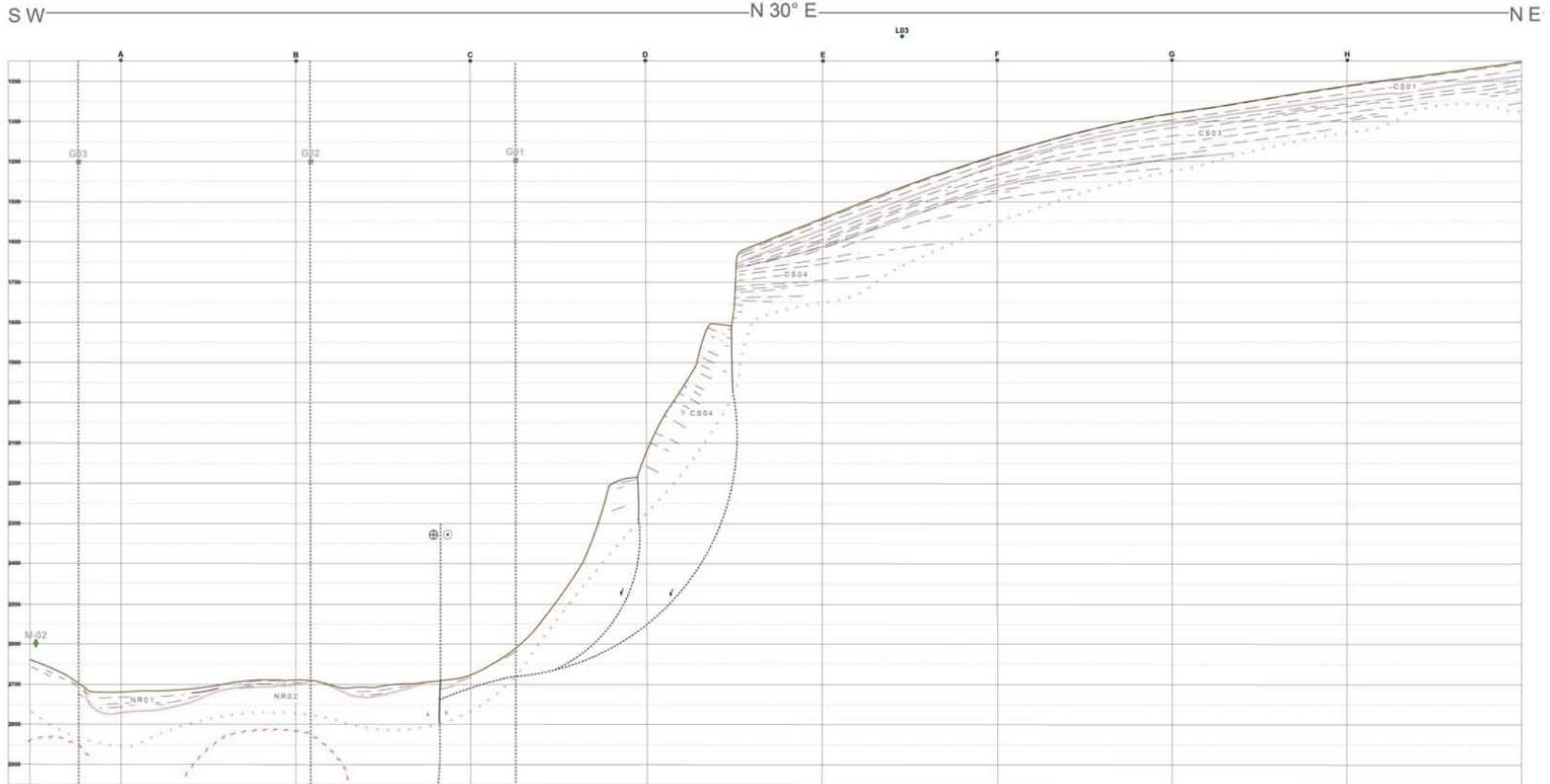
S W ————— N 30° E ————— N E



0.5 0.25 0 0.5 1 1.5 2
Escala Horizontal (Aproximada) km

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L03 (INTERPRETACIÓN)



0.5 0.25 0 0.5 1 1.5 2
km
Escala Horizontal (Aproximada)

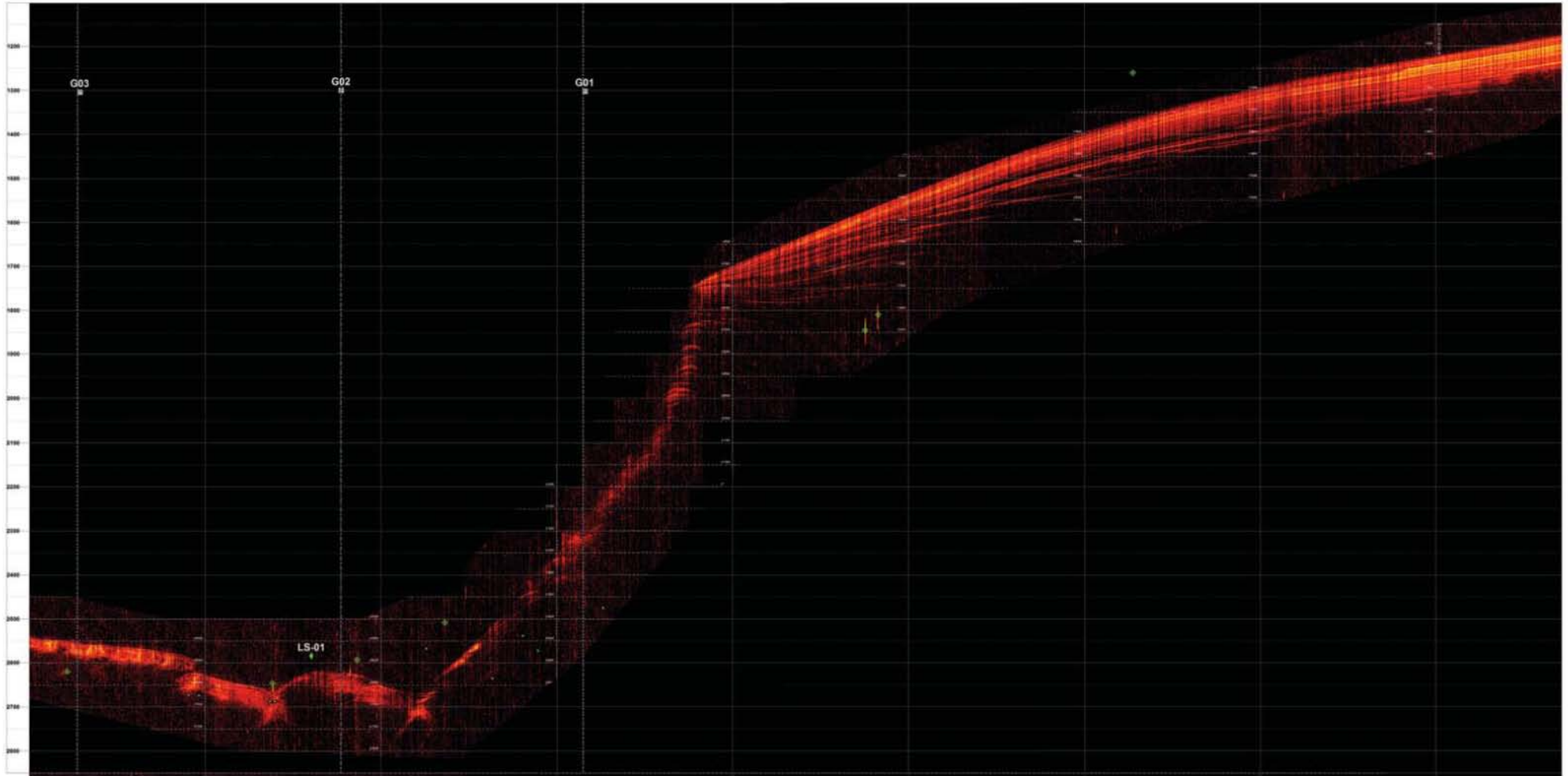
Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L04 (IMAGEN)

S W

N 30° E

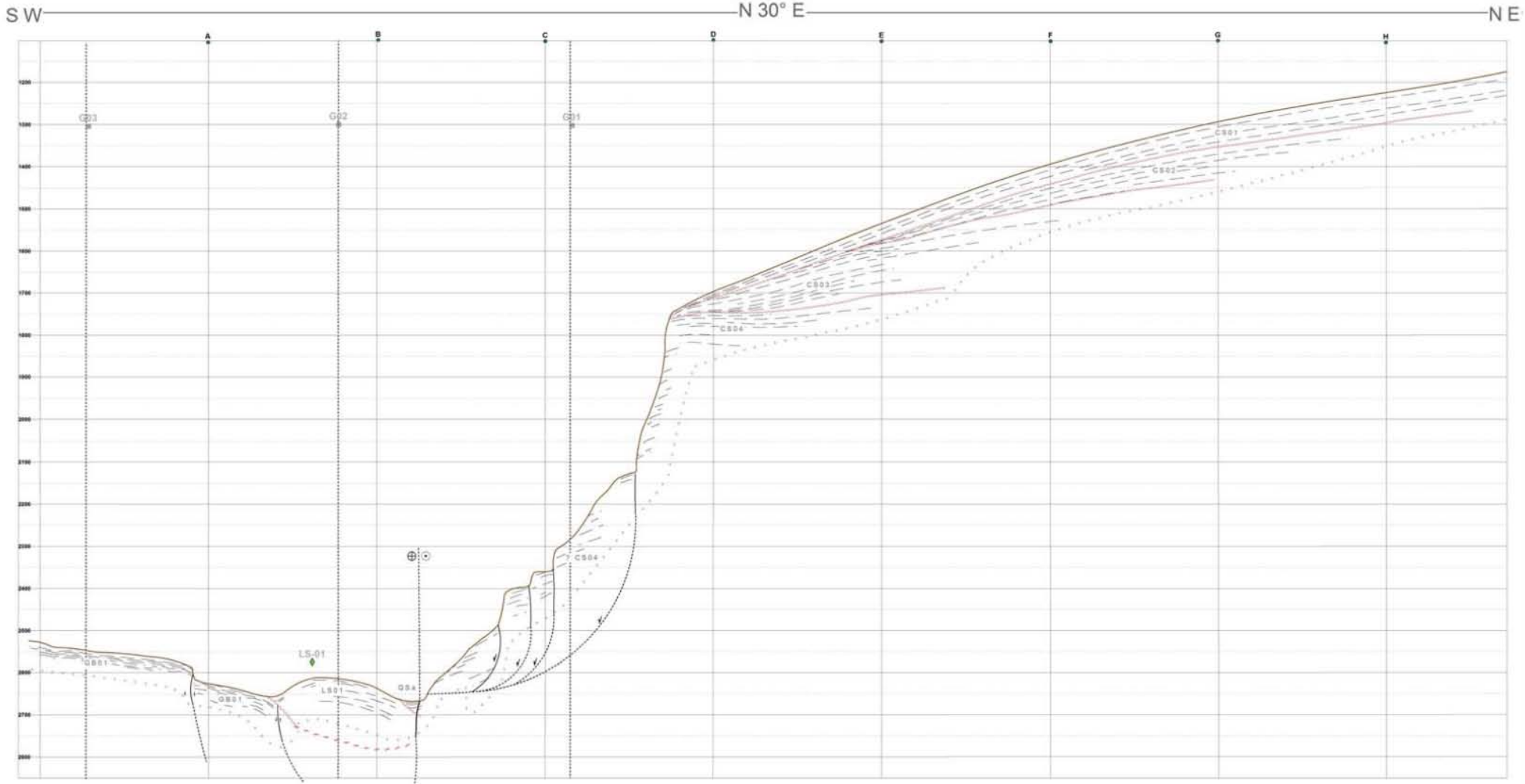
N E



Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L04 (INTERPRETACIÓN)

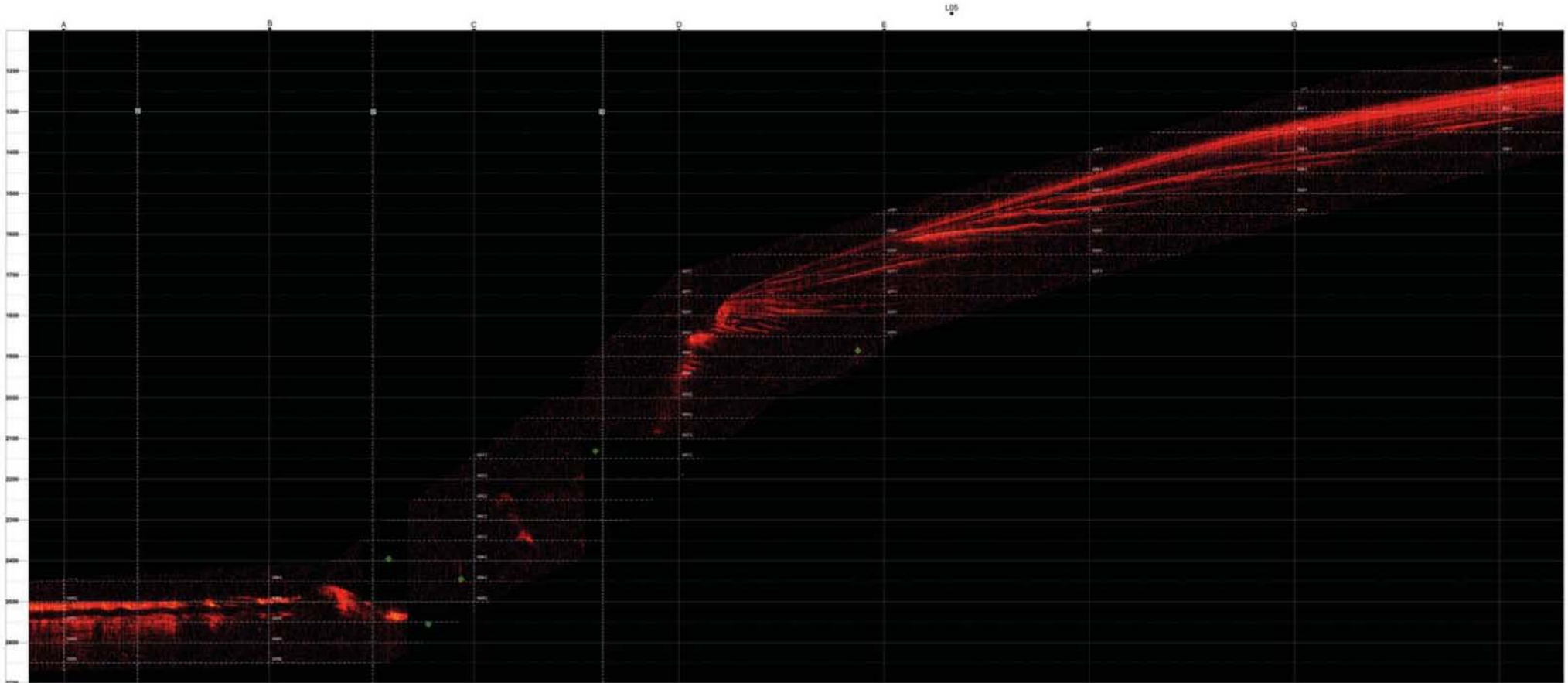


0.5 0.25 0 0.5 1 1.5 2 km
Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L05 (IMAGEN)

S W ————— N 30° E ————— N E

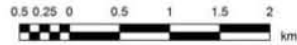
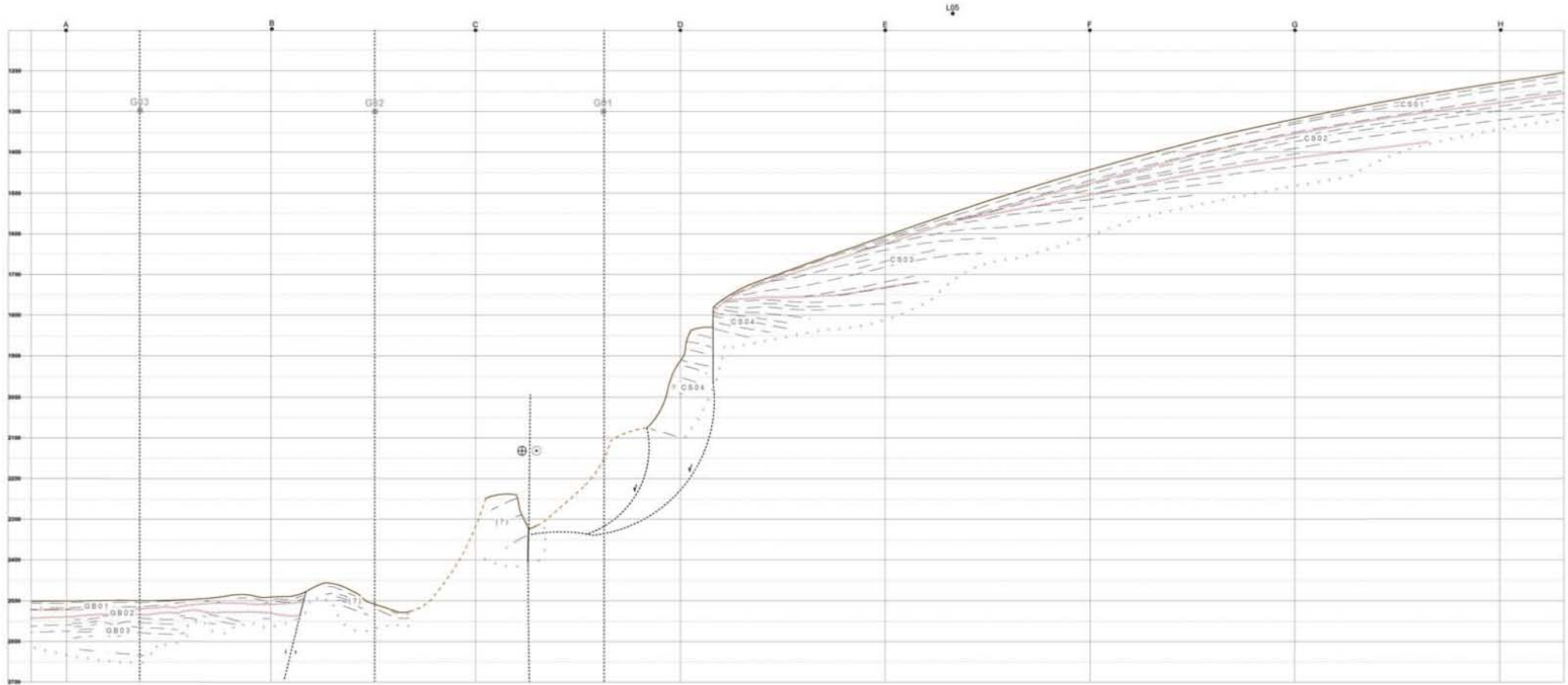


Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L05 (INTERPRETACIÓN)

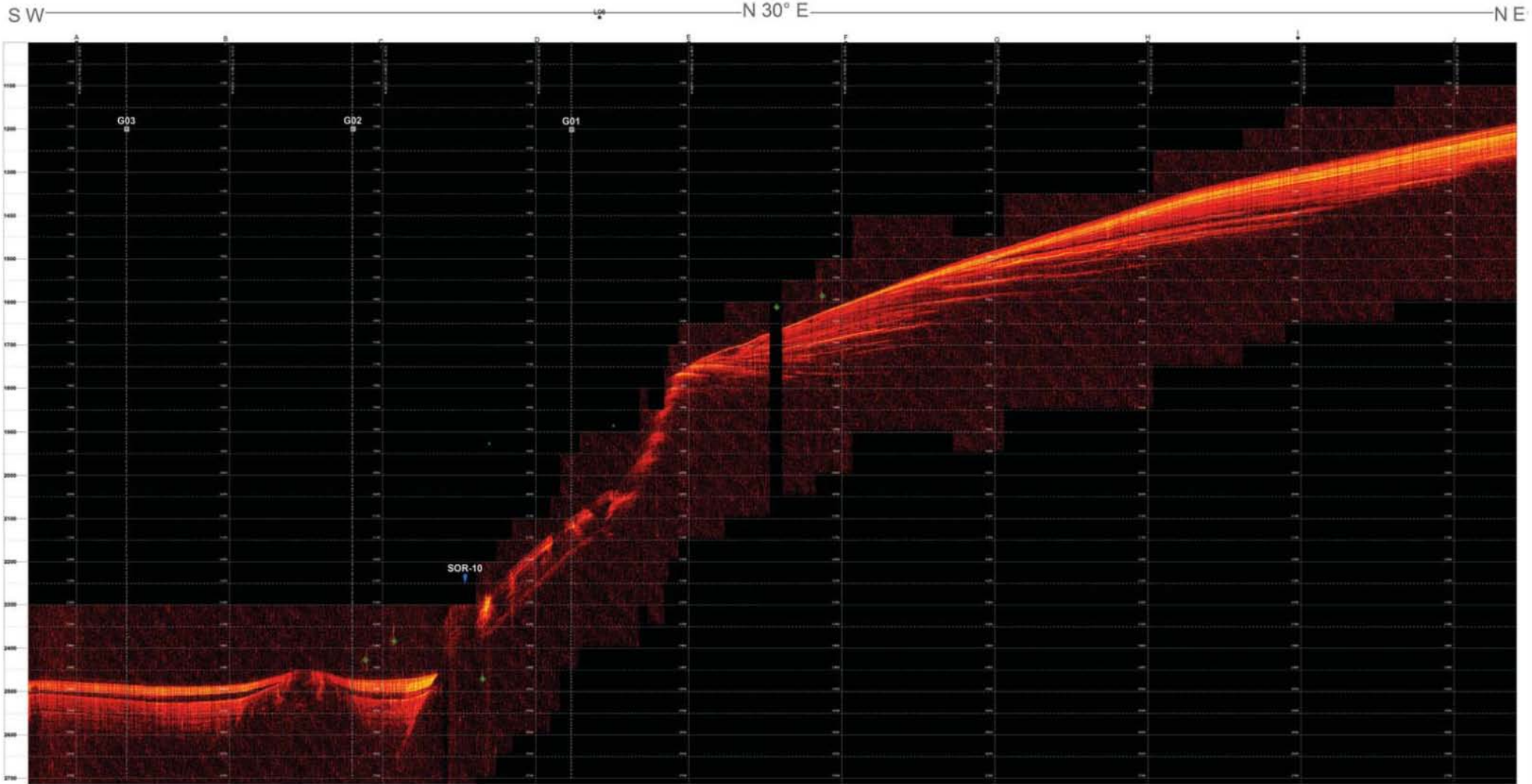
SW ————— N 30° E ————— NE



Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

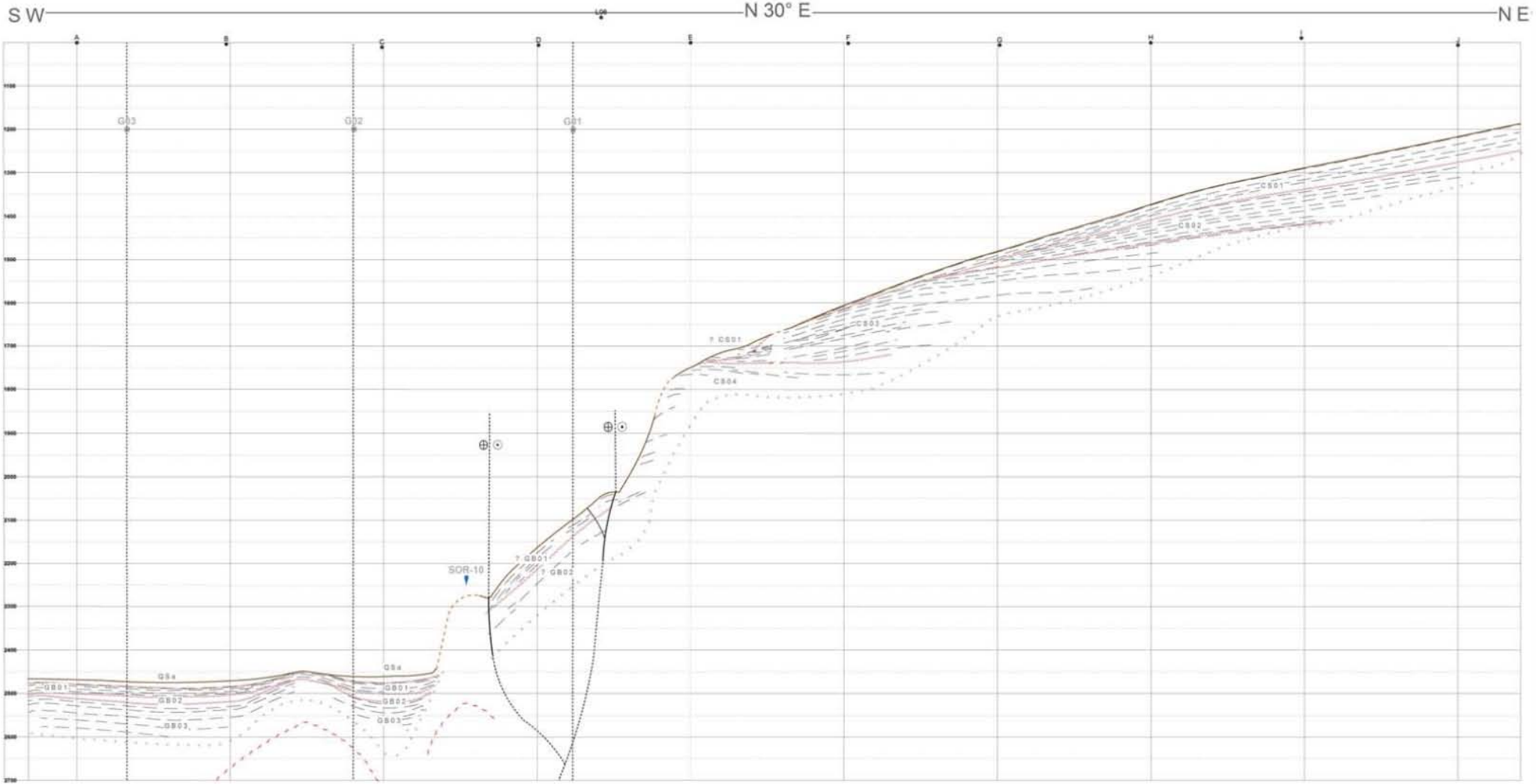
PERFIL SISMICO L06 (IMAGEN)



Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

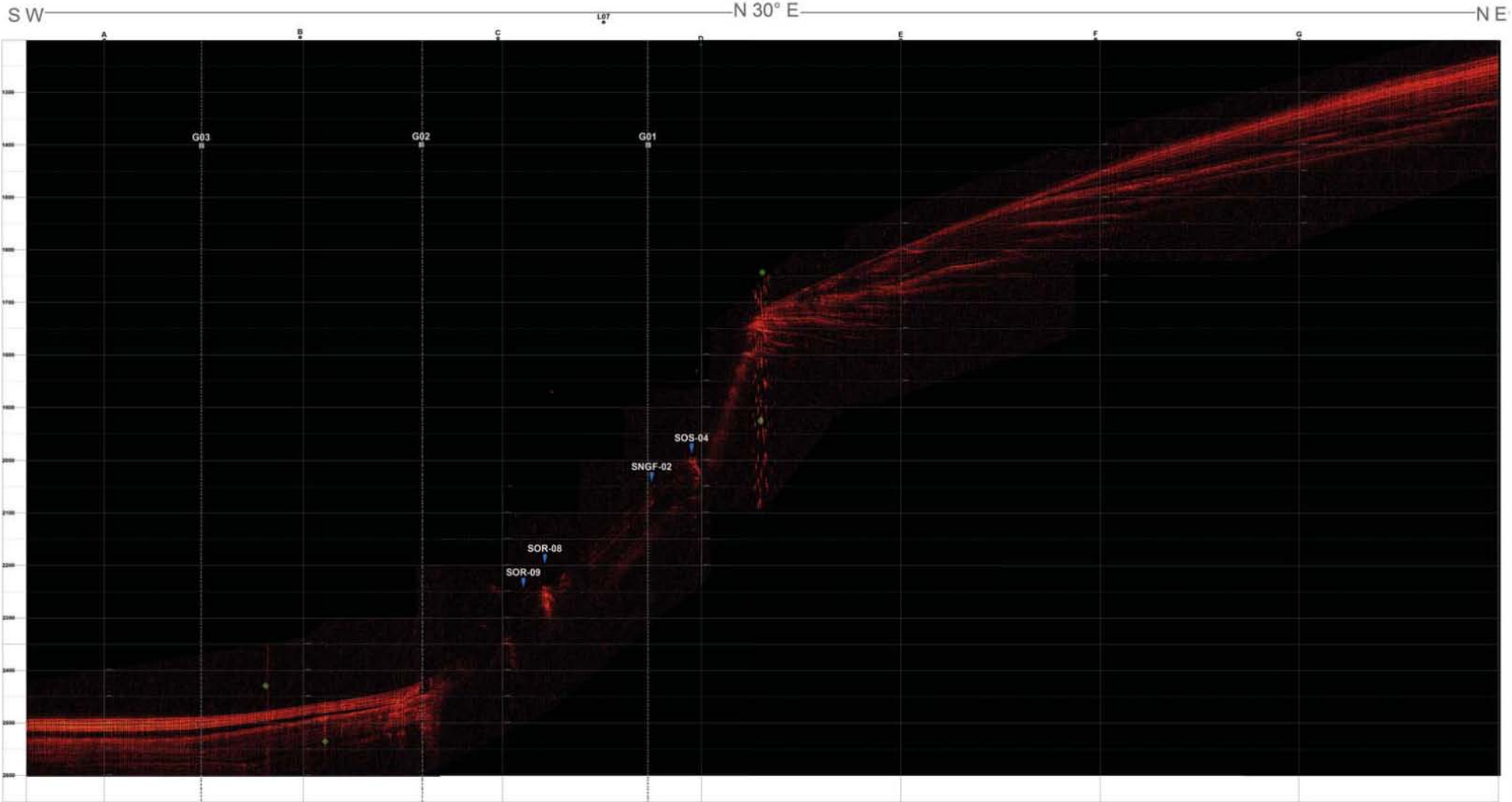
PERFIL SISMICO L06 (INTERPRETACIÓN)



Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

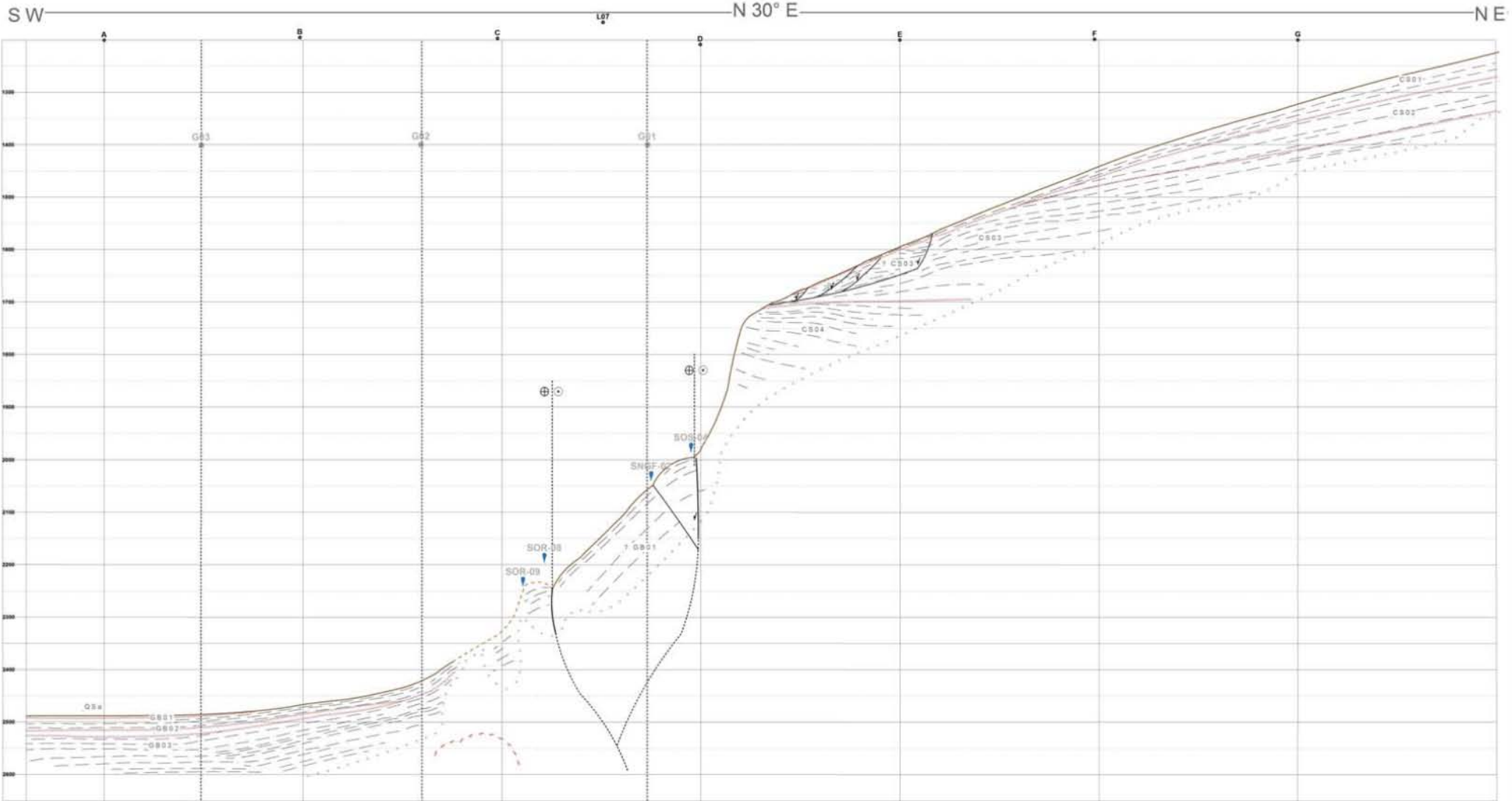
PERFIL SISMICO L07 (IMAGEN)



0.5 0.25 0 0.5 1 1.5 2
Escala Horizontal (Aproximada) km

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L07 (INTERPRETACIÓN)

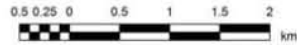
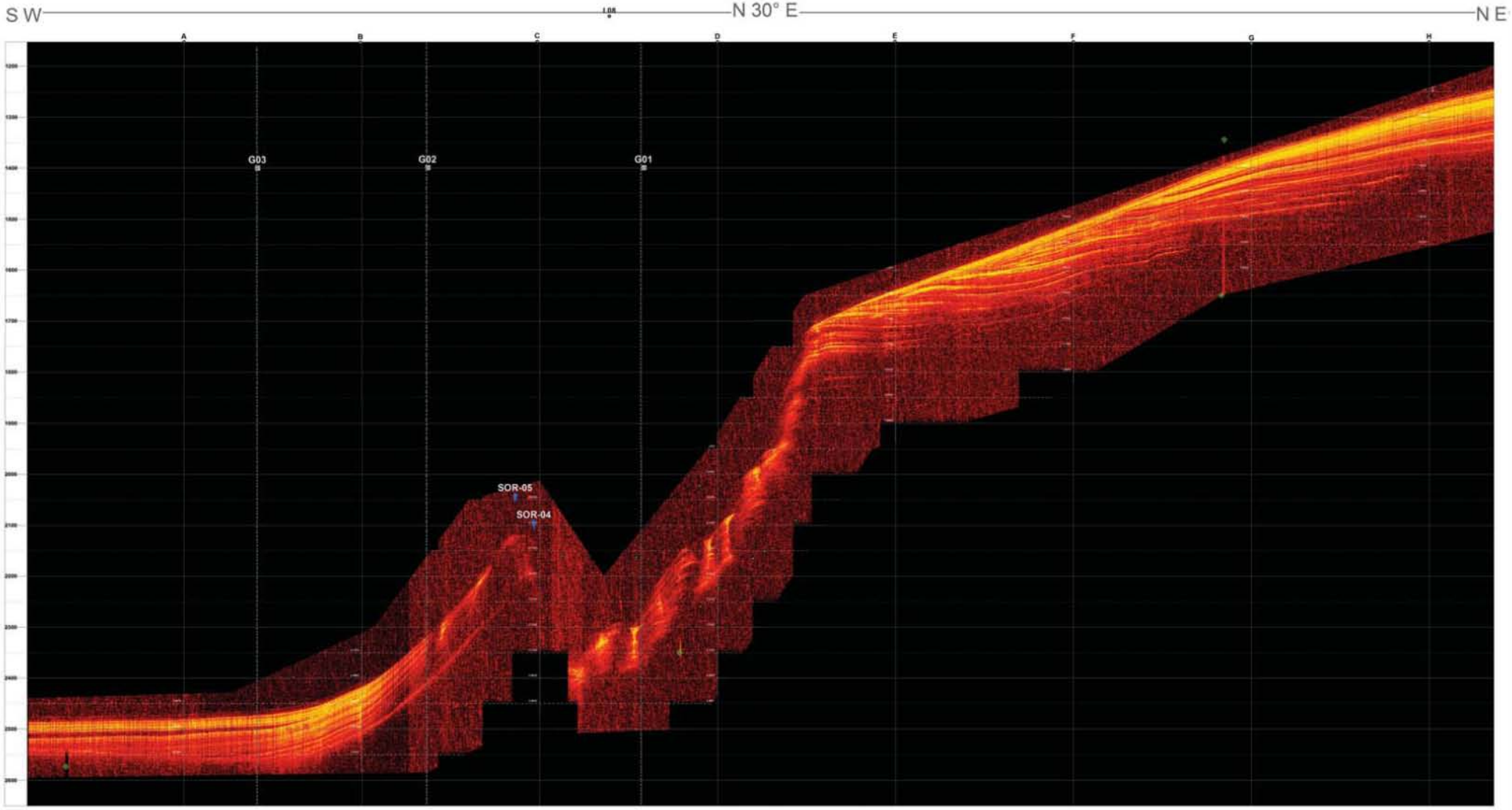


0.5 0.25 0 0.5 1 1.5 2 km

Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

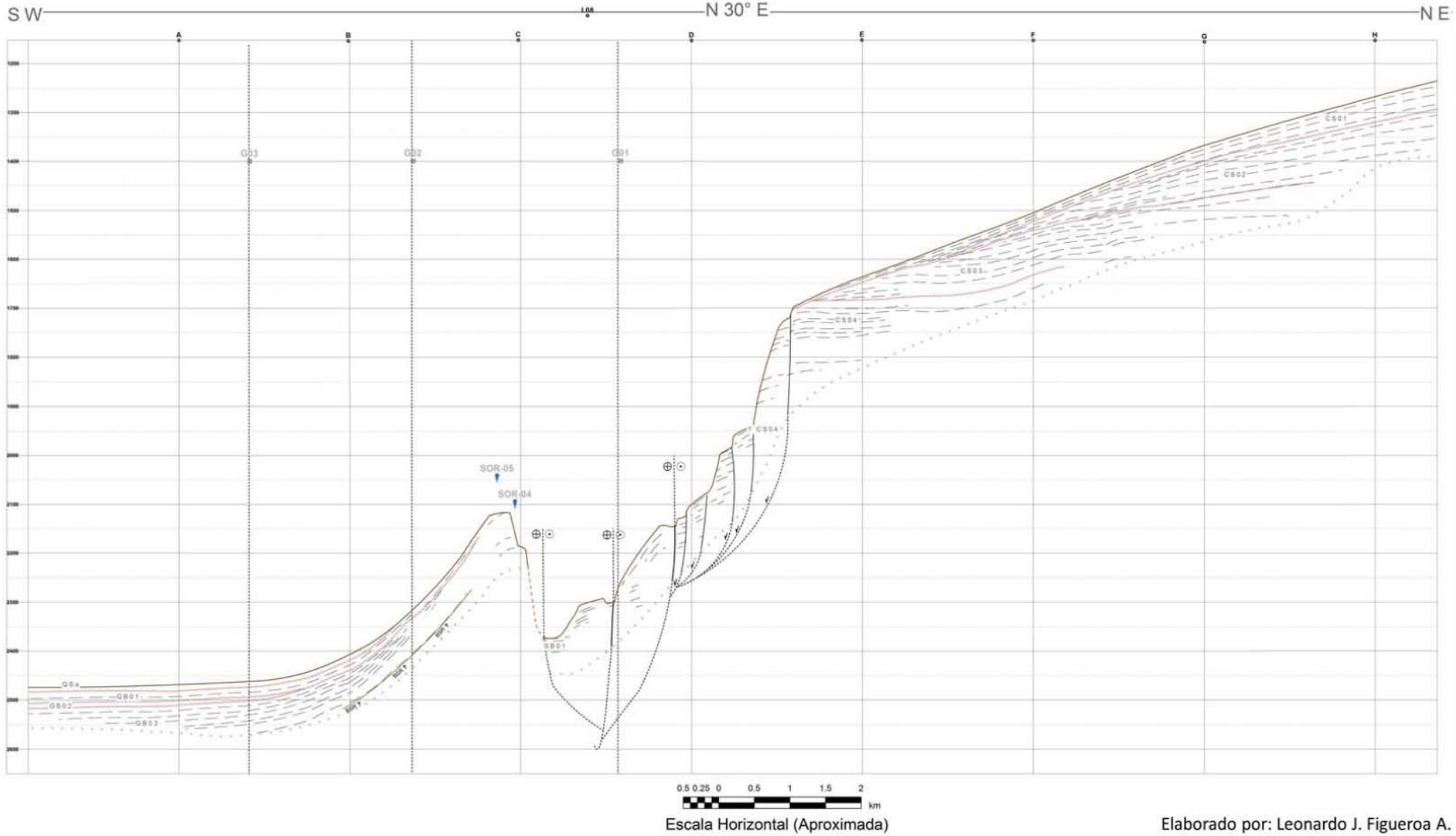
PERFIL SISMICO L08 (IMAGEN)



Escala Horizontal (Aproximada)

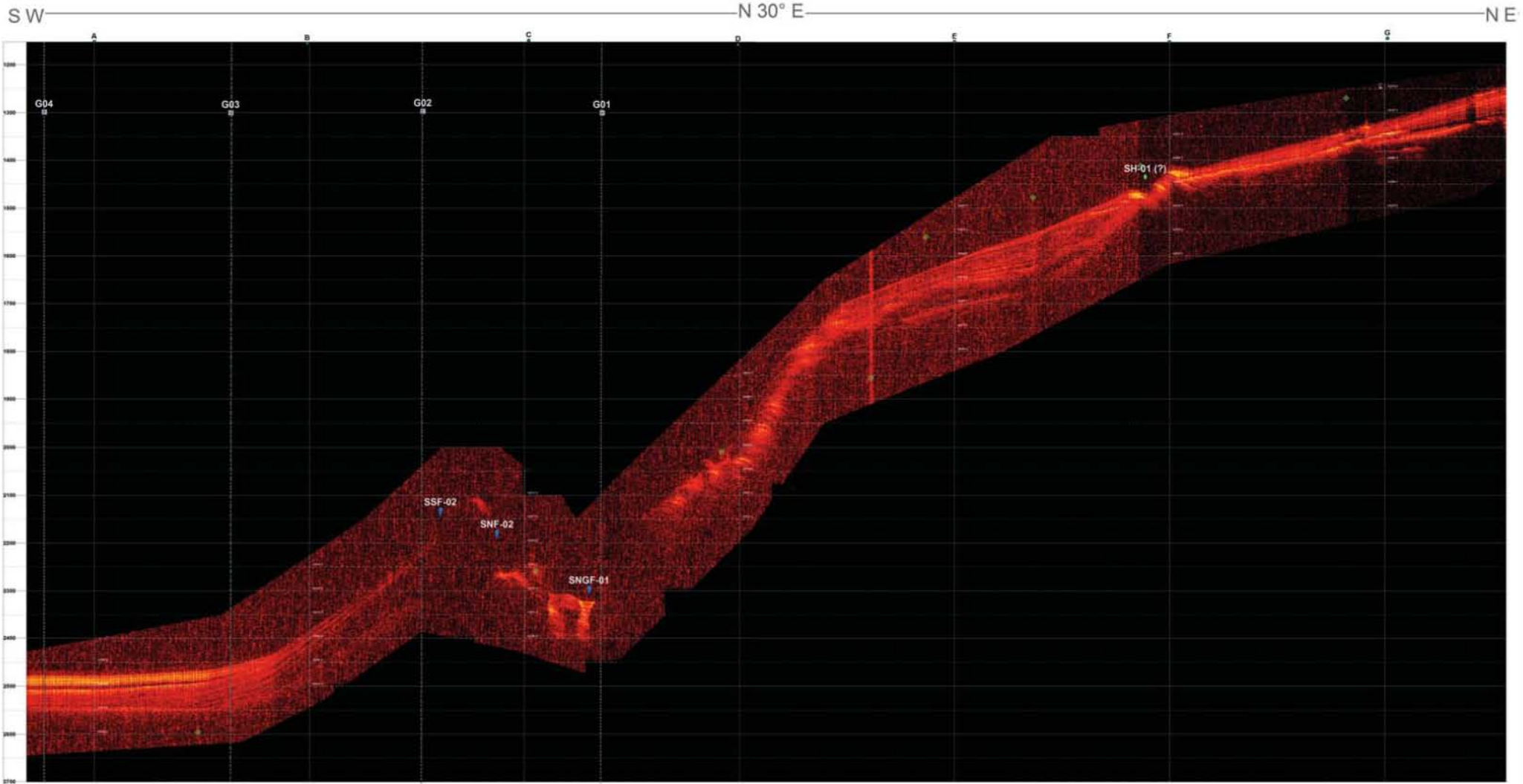
Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L08 (INTERPRETACIÓN)



Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

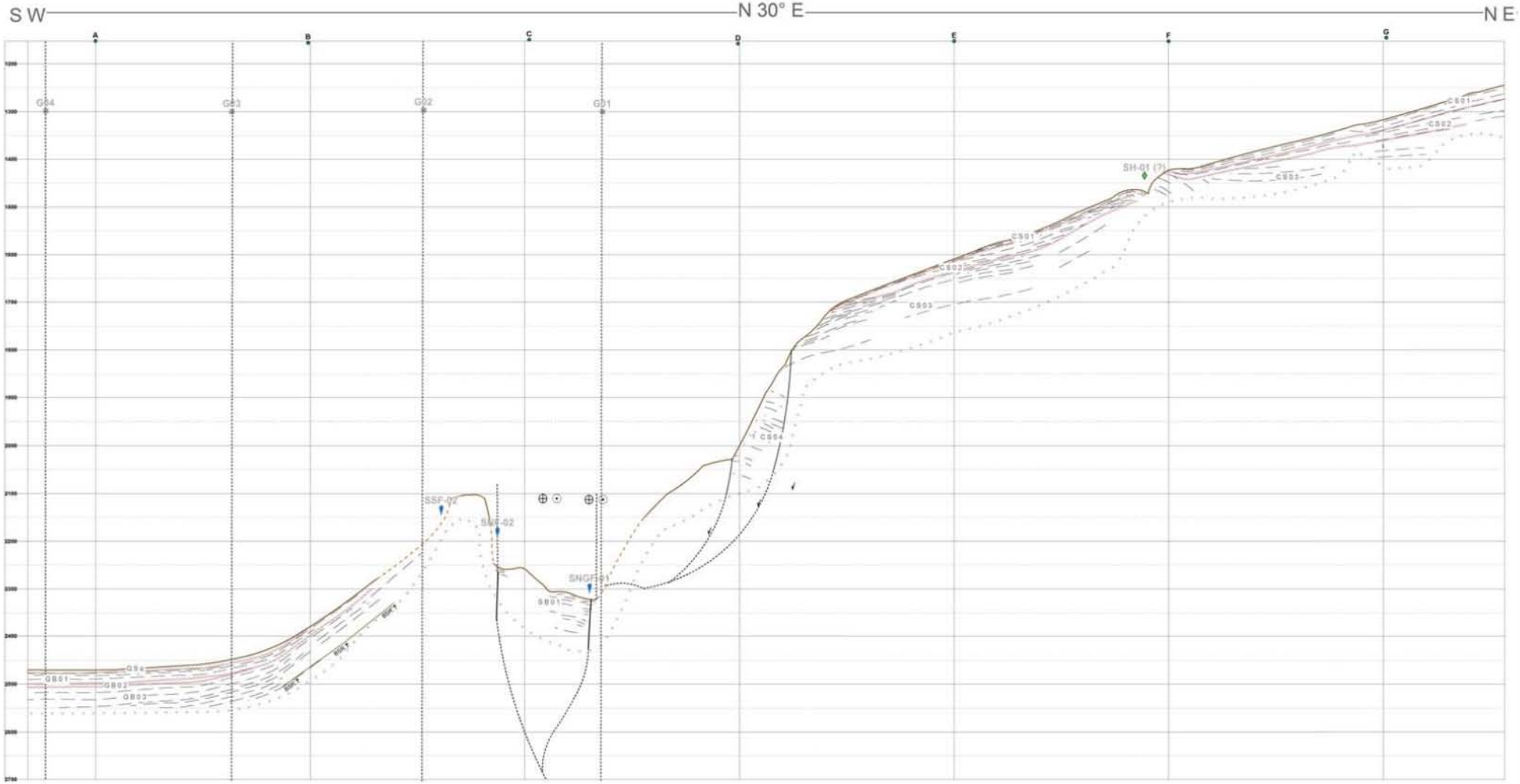
PERFIL SISMICO L09 (IMAGEN)



0.5 0.25 0 0.5 1 1.5 2
km
Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

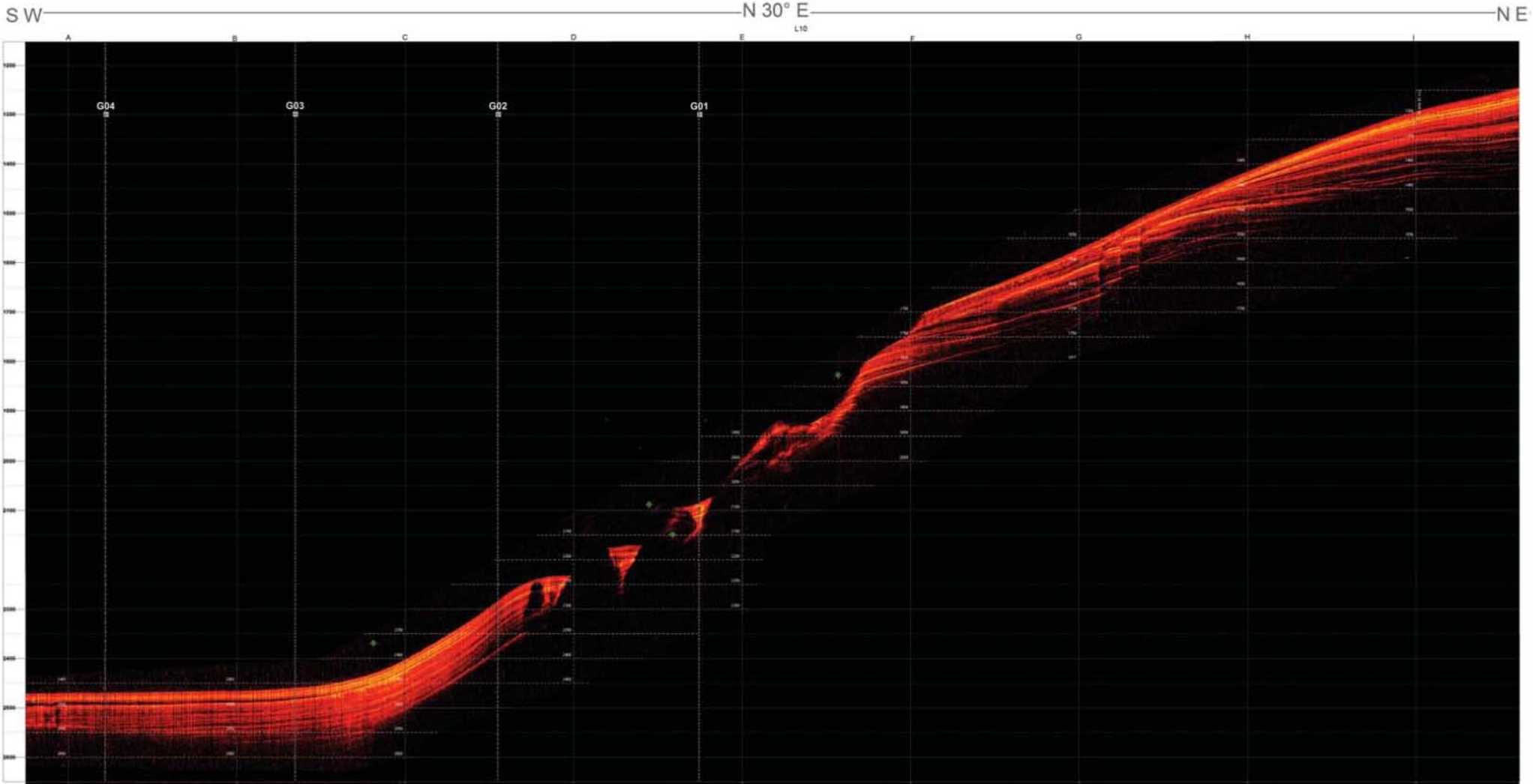
PERFIL SISMICO L09 (INTERPRETACIÓN)



0.5 0.25 0 0.5 1 1.5 2
km
Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

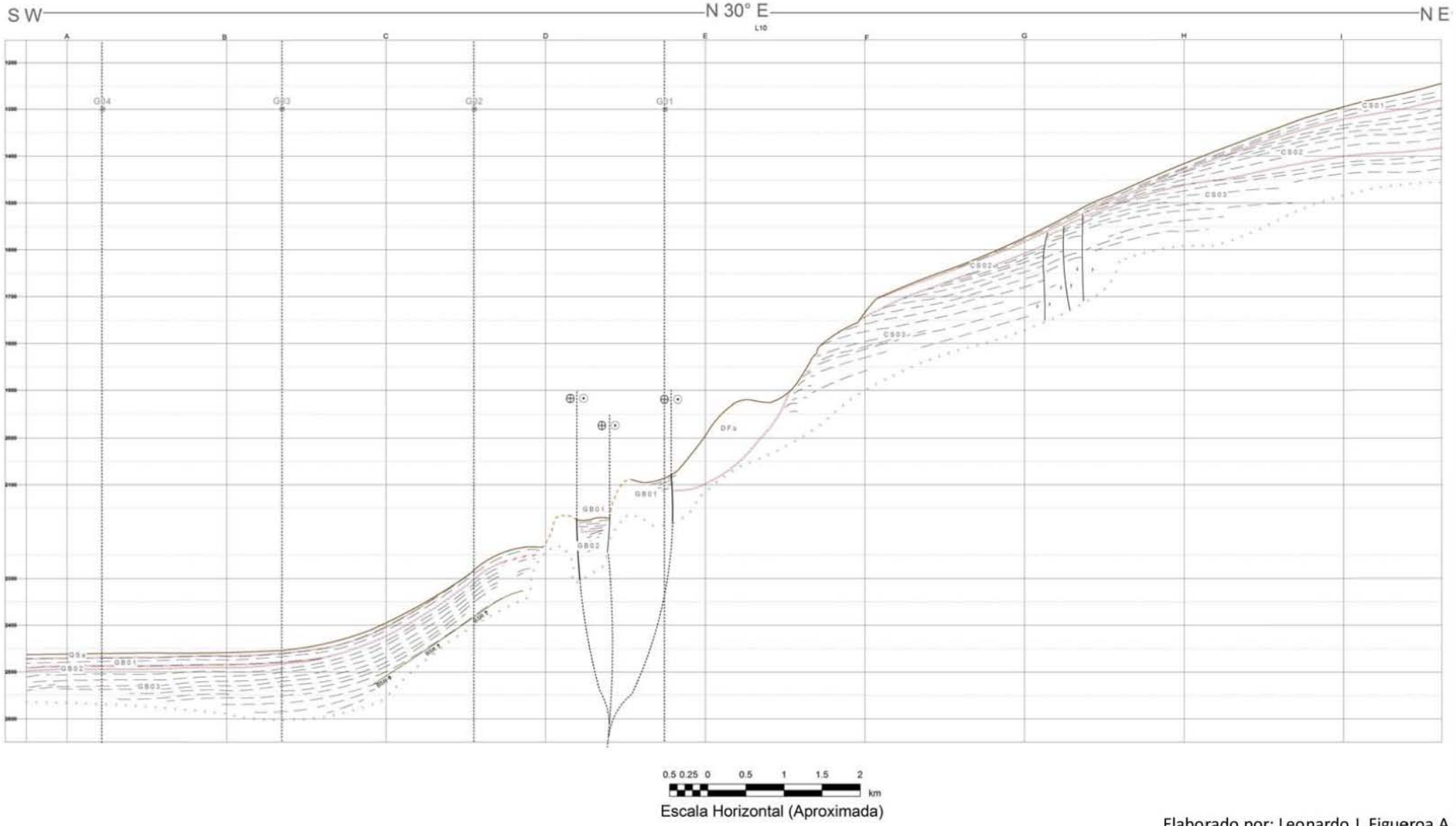
PERFIL SISMICO L10 (IMAGEN)



Escala Horizontal (Aproximada)

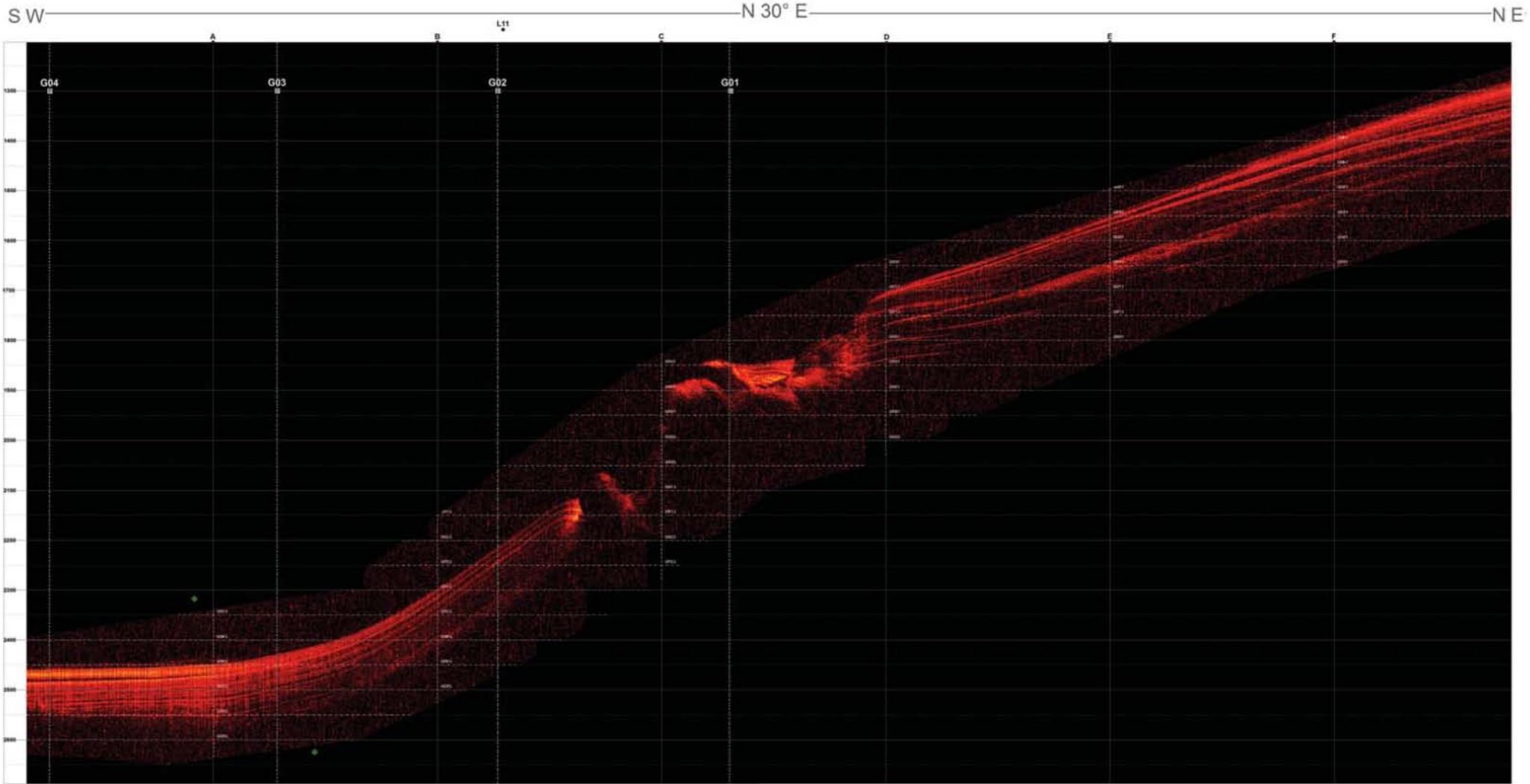
Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L10 (INTERPRETACIÓN)



Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

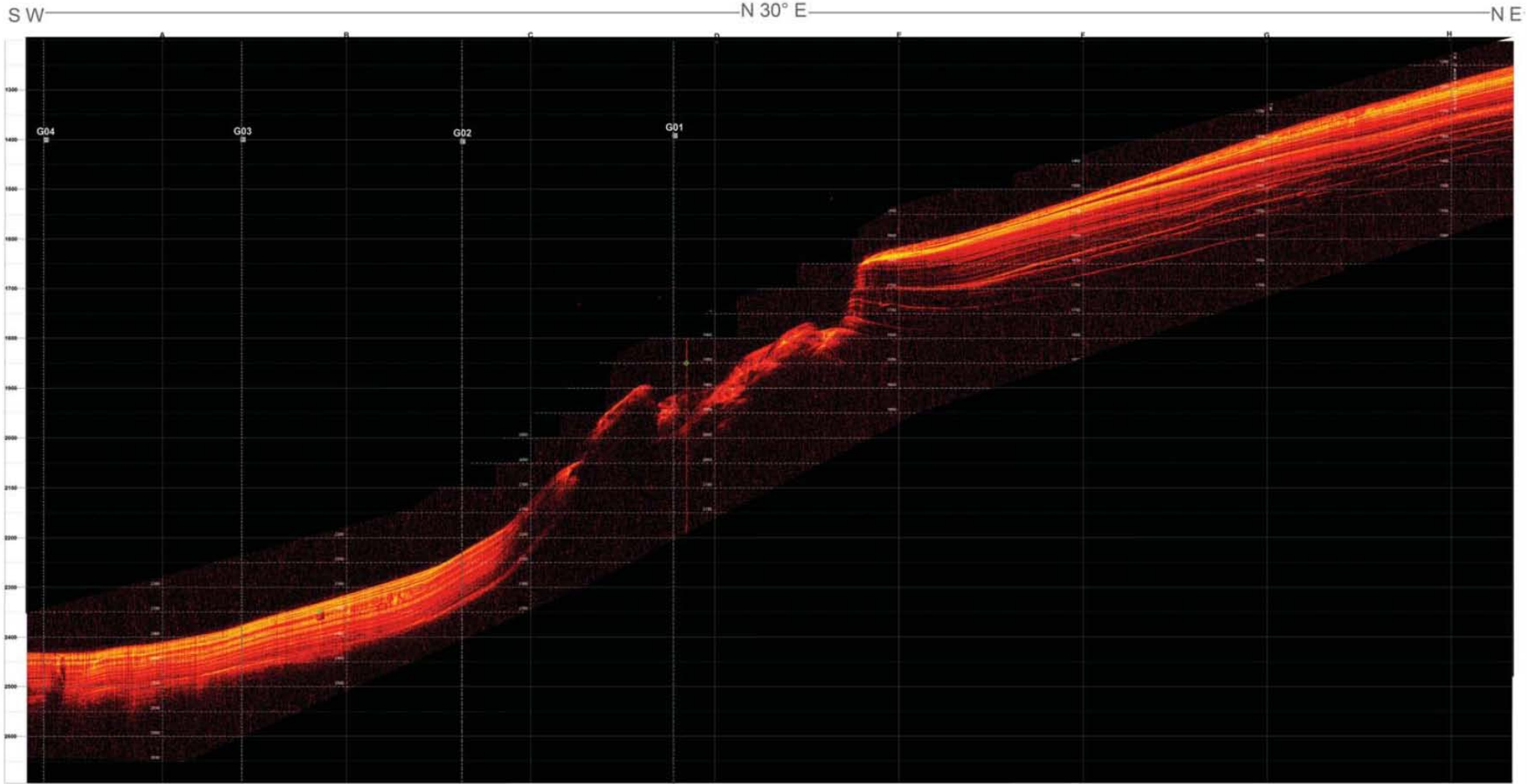
PERFIL SISMICO L11 (IMAGEN)



Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

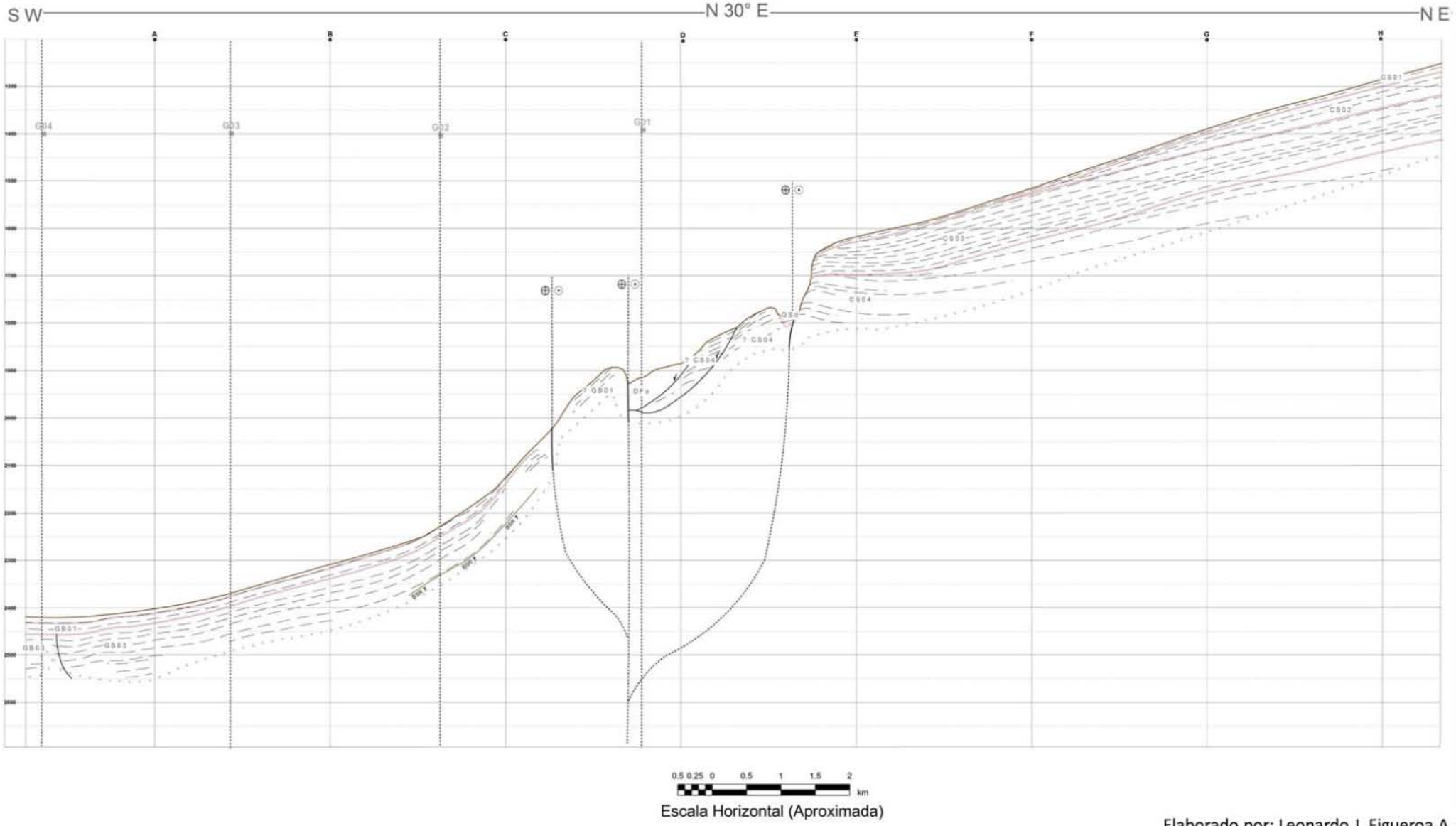
PERFIL SISMICO L12 (IMAGEN)



Escala Horizontal (Aproximada)

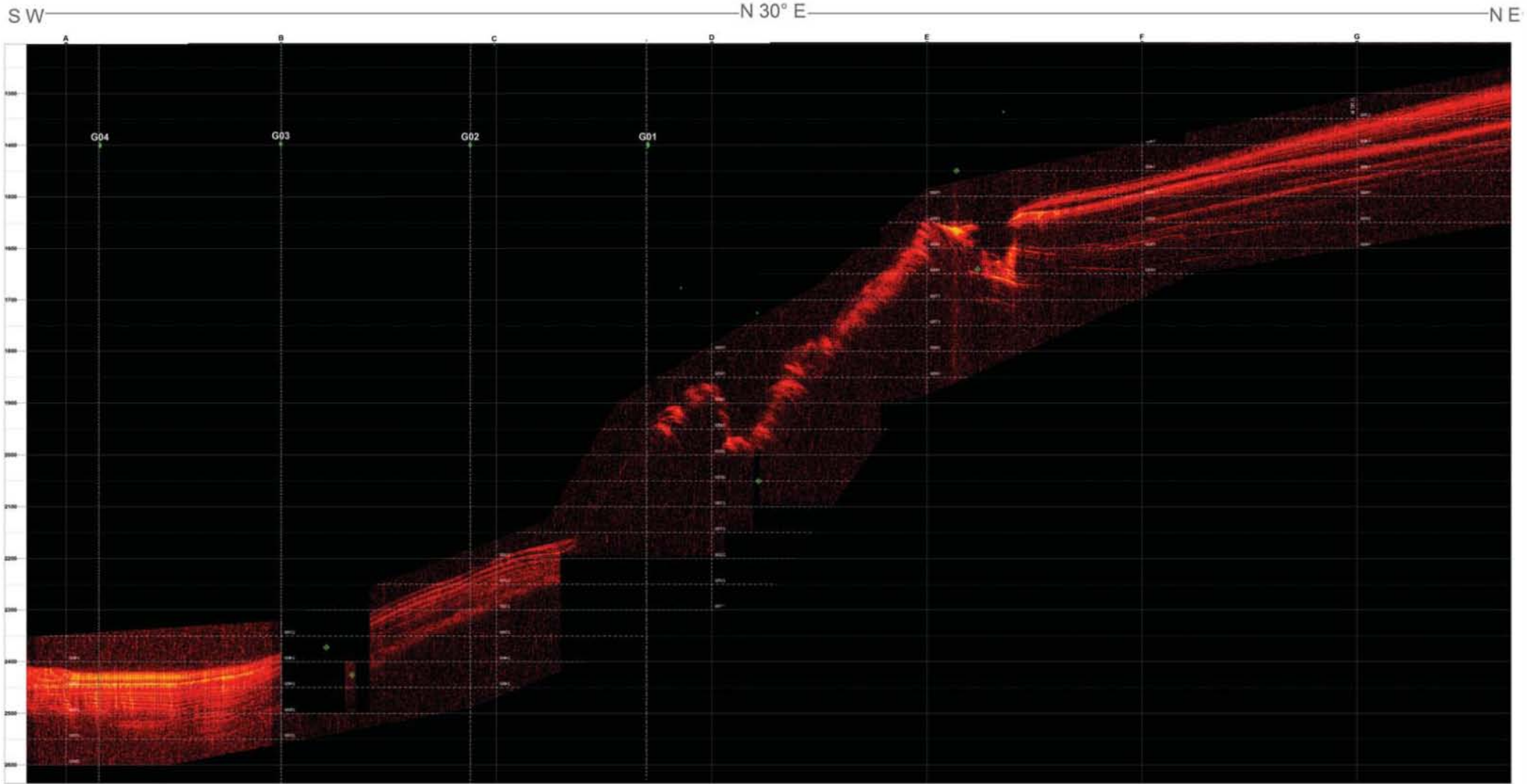
Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L12 (INTERPRETACIÓN)



Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

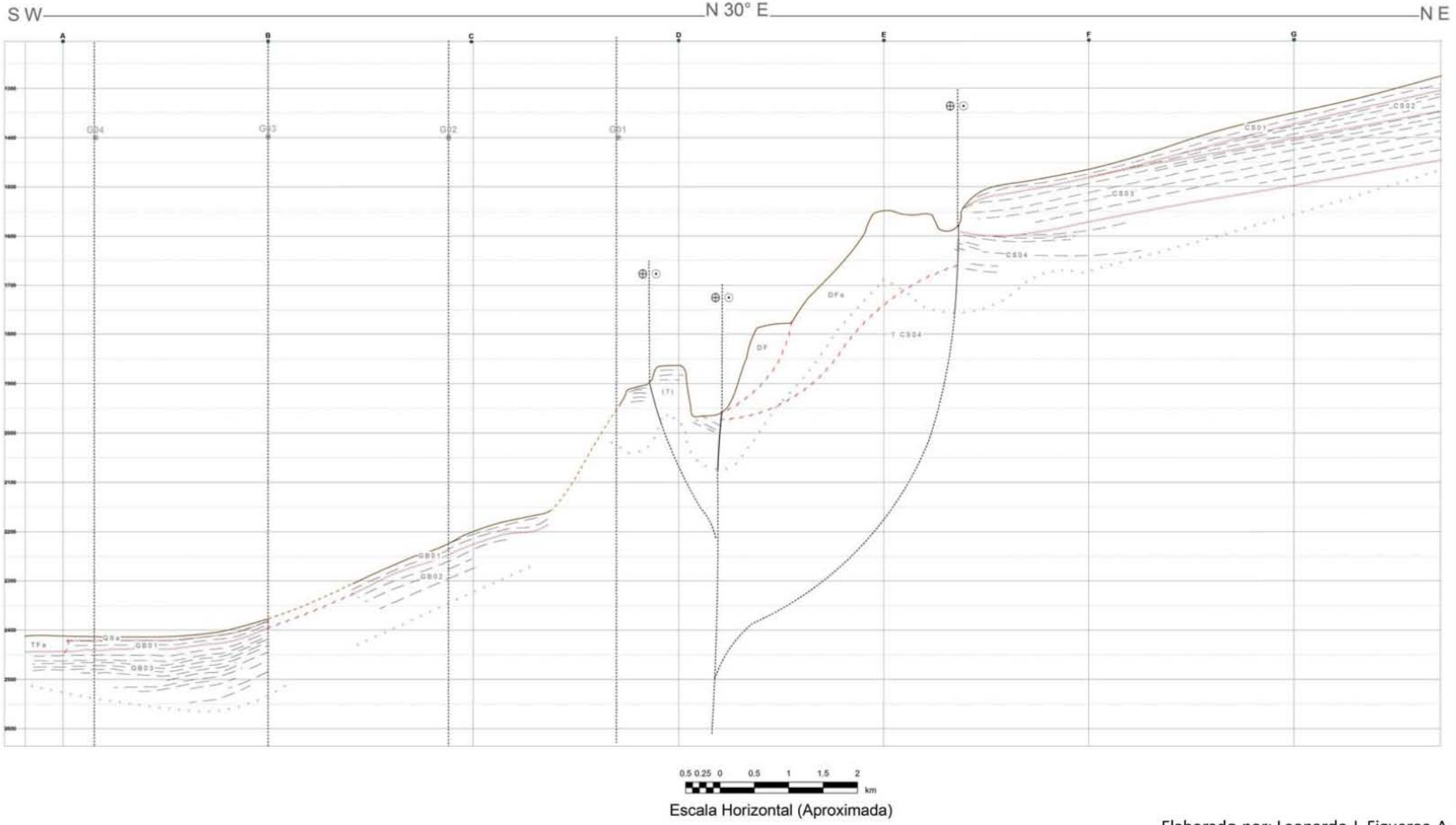
PERFIL SISMICO L13 (IMAGEN)



Escala Horizontal (Aproximada)

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

PERFIL SISMICO L13 (INTERPRETACIÓN)



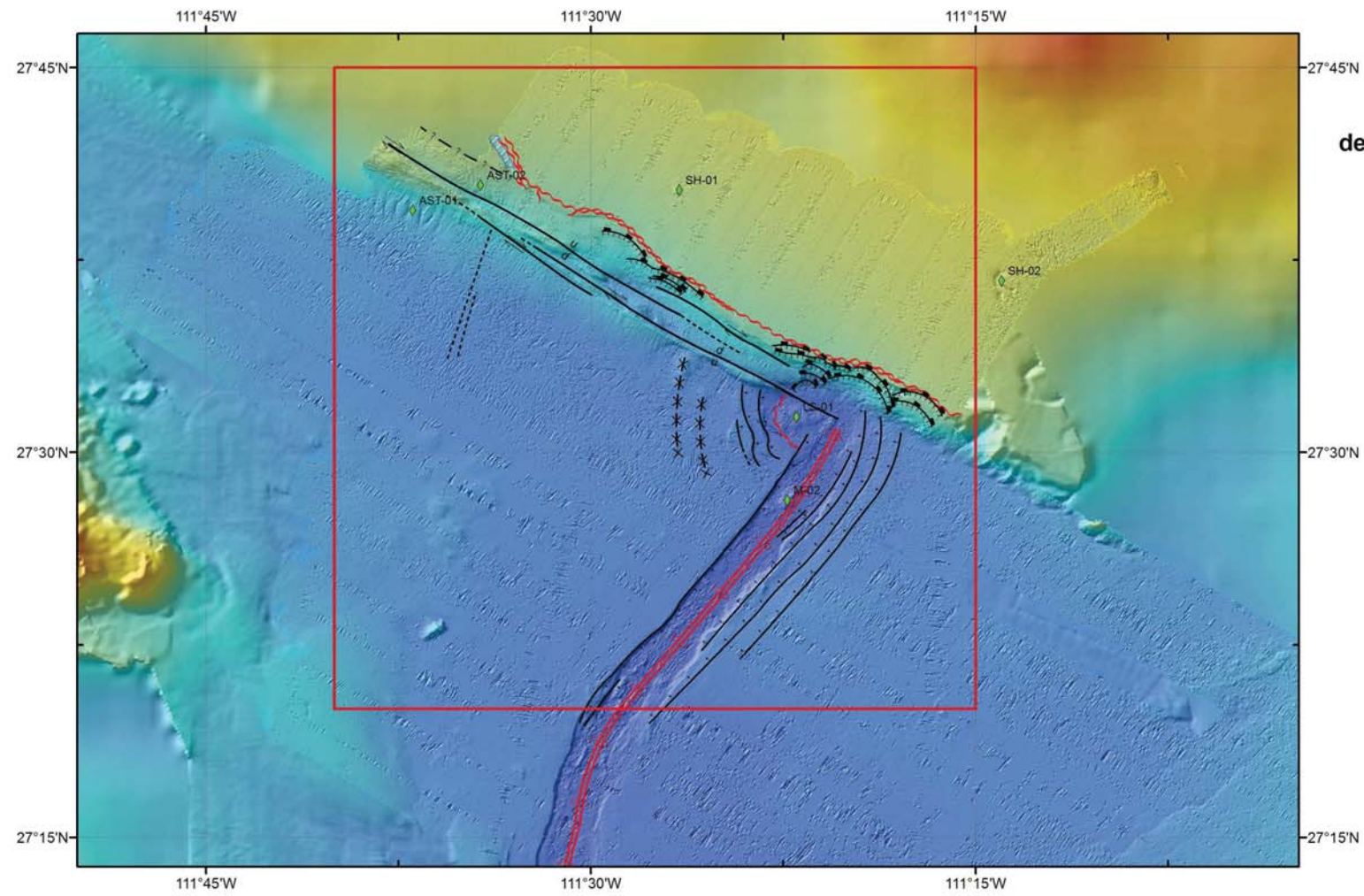
Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

ANEXO C

Perfiles sísmicos de reflexión de alta resolución obtenidos en GUAYRIV10

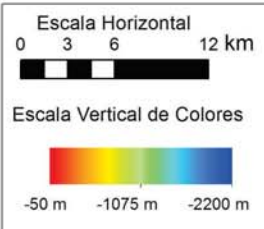
Contenido:

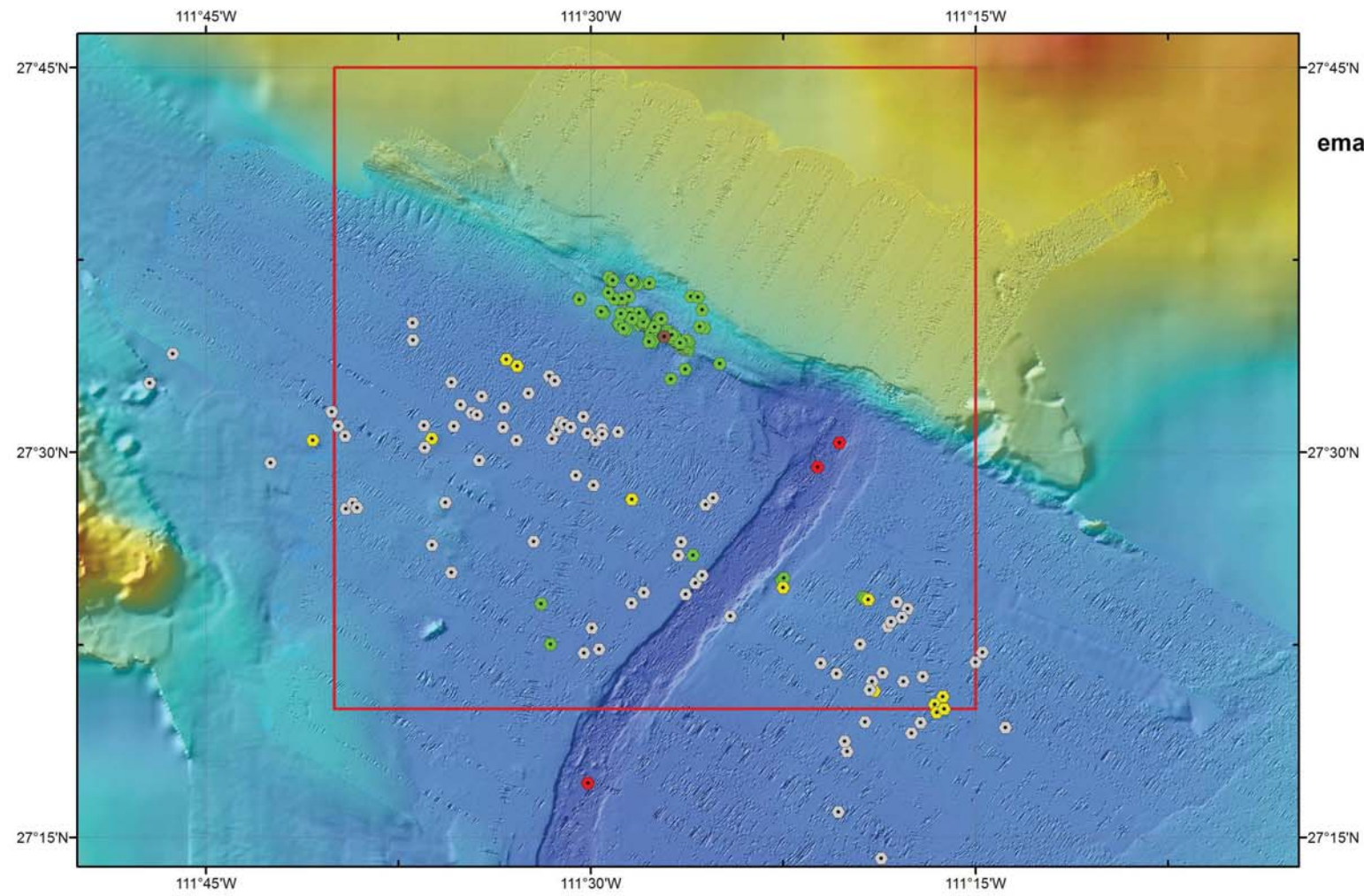
- Mapa de interpretación tectónica de la intersección de la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora
- Mapa de distribución de sistemas de emanación de fluidos en la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora
- Mapa de distribución de Cold Seeps y Ventilas, en relación a los rasgos tectónicos



Mapa de interpretación tectónica de la intersección de la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora
 Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

- Leyenda**
- Cañón Submarino
 - Rasgos Estructurales**
 - Aparente intrusión
 - Sistema de Falla de Guaymas
 - Sistema de Falla de Guaymas
 - Traza inferida por expresión morfológica
 - Traza inferida dudosa
 - Falla Normal
 - Falla listrica
 - Eje de Rift
 - Localidades
 - Discordancia





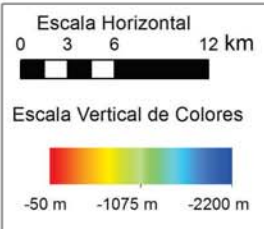
Mapa de distribución de sistemas de emanación de fluidos en la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora

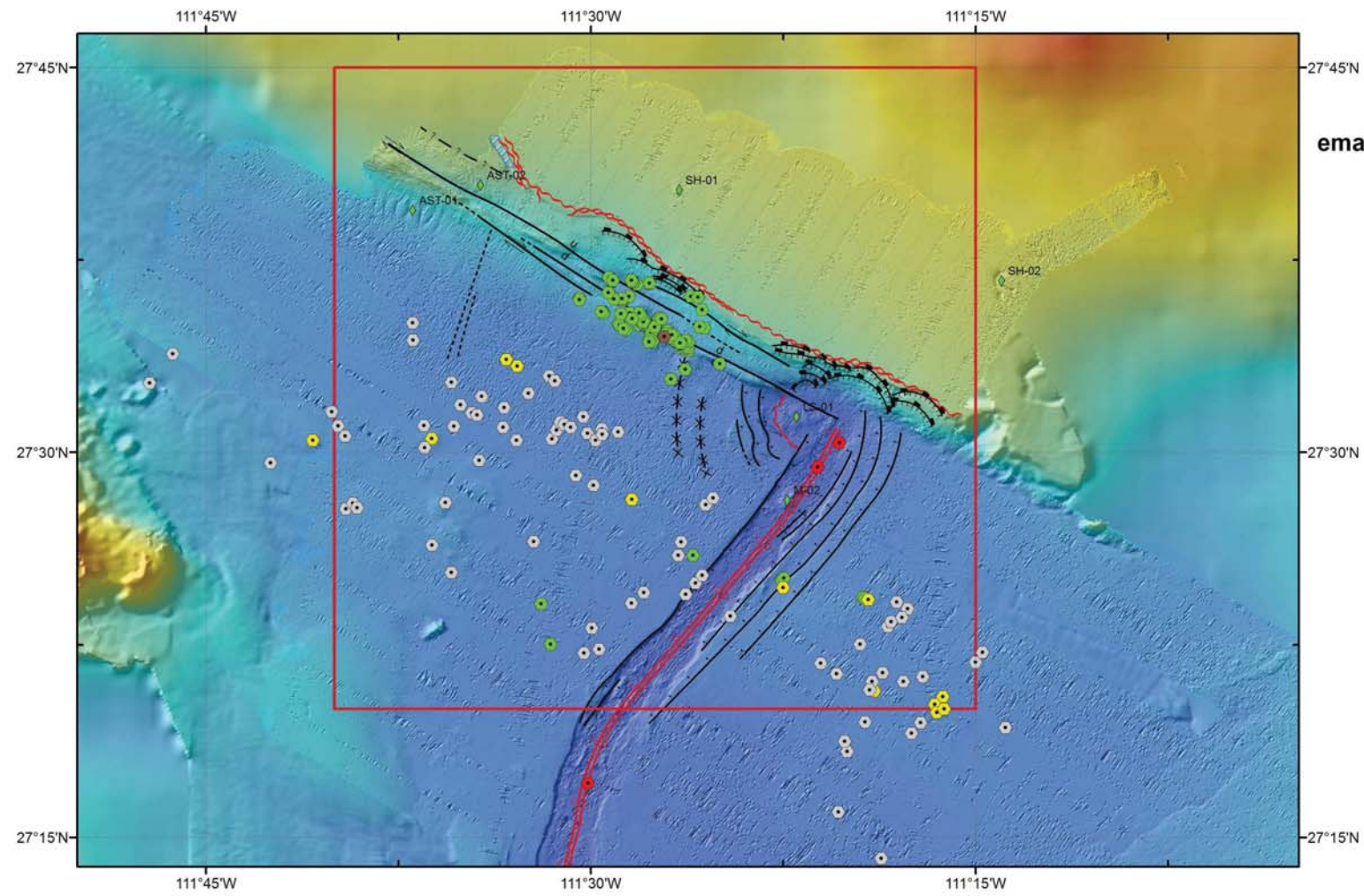
Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

Leyenda

Seeps Site

- Plumas de Burbuja observados en BIG10
- Bibliografía Imagen Hidroacustica (Curry and Moore 1979, Merewether et al 1985)
- Bibliografía ColdSeeps (Lonsdale 1980)
- Bibliografía ColdSeeps verificados (Lizarralde et al 2010)
- Bibliografía Posibles ColdSeeps (Lizarralde et al 2010)





Mapa de distribución de sistemas de emanación de fluidos en la Cuenca de Guaymas y el margen de Sonora, en relación a los rasgos tectónicos

Elaborado por: Leonardo J. Figueroa A.

Leyenda

Seeps Site

- Plumas de Burbuja observados en BIG10
- Bibliografía Imagen Hidroacústica (Curray and Moore 1979, Merewether et al 1985)
- Bibliografía ColdSeeps (Lonsdale 1980)
- Bibliografía ColdSeeps verificados (Lizarralde et al 2010)
- Bibliografía Posibles ColdSeeps (Lizarralde et al 2010)
- ▨ Cañón Submarino

Rasgos Estructurales

- ✖ ✖ Aparente intrusión
- Sistema de Falla de Guaymas
- Sistema de Falla de Guaymas
- - - - Traza inferida por expresión morfológica
- · - Traza inferida dudosa
- Falla Normal
- Falla listrica
- Eje de Rift
- ◆ Localidades
- ~ ~ ~ Discordancia

