



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Anomalías magnéticas en el Cinturón
Plegado de Perdido del Golfo de
México, Polígono 2A**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Ricardo Omar Venegas Sánchez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Carlos Ángel Quintil Mortera Gutiérrez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

DEDICATORIA

*A mi familia, abuelos, tíos y primas por siempre apoyarme
Y en especial a mi padre, madre así como a mi hermano por su
afecto y comprensión.*

“L'homme n'est rien en lui-même. Il n'est qu'une chance infinie. Mais il est le responsable infini de cette chance.”

Albert Camus

Agradecimientos Académicos

A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería, les expreso mi profundo agradecimiento por brindarme la educación necesaria para desarrollarme como profesional. Asimismo, agradezco al Instituto de Geofísica y al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) por proporcionarme un entorno integral para llevar a cabo esta investigación.

Al Dr. Carlos Mortera, mi sincero agradecimiento por confiar en mí y por asesorarme durante todo este proceso en temas de geofísica marina. A la Ing. Carmen Millán, agradezco sus capacitaciones en el LUCO y sus enseñanzas, las cuales han contribuido significativamente a mi desarrollo profesional. Al M.C. Diego Aguilar, mi reconocimiento por sus consejos y su vasta experiencia en geofísica marina. Al Ing. Francisco Ponce, agradezco los conocimientos técnicos que me proporcionó durante las campañas en las que participé.

Expreso mi profundo agradecimiento al Laboratorio Universitario de Cartografía Oceánica (LUCO) por su infraestructura y por brindarme un espacio de trabajo desde mi servicio social. Además, agradezco el apoyo brindado para capacitarme en los métodos de geofísica marina y por proporcionarme los datos magnéticos para el desarrollo de este trabajo. También quiero expresar mi gratitud al Proyecto de FSH-SENER-CONACYT 201441 por la modernización de los sistemas hidroacústicos en el Buque Oceanográfico Justo Sierra y por la realización de la Campaña Oceanográfica Perdido 2 en 2016.

Agradezco a los investigadores a cargo de la campaña, Dr. William L. Bandy, Dr. Carlos Mortera, Dr. David Handschumaker, así como a la Coordinación de Plataformas Oceánicas (COPO) por el uso del Buque Oceanográfico Justo Sierra y a su valiosa tripulación. También reconozco el esfuerzo de los técnicos académicos que apoyaron en la adquisición de datos, como el Ing. Francisco Ponce Núñez, el Ing. Miguel Ángel García Palacios y el M. en C. Daniel Armando Pérez Calderón.

Al M.C. Julián Zapotitla Román, le agradezco su ayuda y orientación para resolver el problema de la huella de adquisición en los datos magnéticos.

Por último, quiero dedicar este agradecimiento a todas las personas que, aunque hayan sido parte de breves momentos en mi vida, dejaron su huella y contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional.

Agradecimientos personales

Agradezco profundamente a mis padres, quienes siempre han demostrado su cariño y confianza en mí. Papá, agradezco tu comprensión y por ser un modelo de bondad. Mamá, gracias por tu constante cuidado y por esforzarte siempre en darme lo mejor. A mi hermano Alejandro, quien ha sido mi protector y guía en este camino de la vida. Gracias por ser un ejemplo de superación ante las adversidades. No podría haber deseado un mejor hermano mayor. Te lo agradezco de corazón.

Expreso mi gratitud a mis amigos de la facultad por acompañarme en esta larga y a veces complicada travesía. A Carlos Romero, con quien he mantenido una larga amistad. Durante todos estos años académicos, has sido un gran amigo, alentándome a no rendirme. A Cos, quien ha compartido el mismo camino académico. Aunque enfrentamos desafíos, nunca abandonamos. A Said, quien y ahora es uno de mis mejores amigos. También agradezco a aquellos amigos con quienes compartí momentos de distracción, alejándome temporalmente de las exigencias académicas. A Maldonado, compañero desde la secundaria, gracias por influir en mi manera de ver el mundo y por todos los buenos momentos que hemos pasado. A Subas, una persona en quien puedo confiar plenamente y con quien siempre coincidimos en momentos importantes. A Max y a Gerardo por esos buenos días en la prepa que no hubieran sido posibles sin ese mítico cambio de turno.

Esta tesis jamás habría visto la luz sin el apoyo y camaradería de mis compañeros del LUCO. A Alex Zárate, agradezco tus consejos que fueron mi guía para completar este trabajo. A Jesús Guízar, gracias por tu energía contagiosa en el laboratorio y por ser un excelente compañero. A Gabriel Castillo, por nuestras conversaciones profundas y por tu sincera amistad. A Jesrel Álvarez, quien fue clave con sus ideas para la resolución de problemas. Y a Juan Albañez, cuya llegada revolucionó el laboratorio y nos actualizó en nuevos métodos.

A mis amigos del Universum, Pepe, Gina, Paloma y Guadalupe, con quienes compartí la divulgación científica y momentos inolvidables. Fueron un bálsamo después de la pandemia, y gracias a ustedes continúo en el camino de la ciencia.

Agradezco a mis primitas Sofía y Diana, quienes siempre me recibían con un abrazo cuando llegaba cansado. Niñas, recuerden siempre creer en ustedes mismas.

Índice General

Resumen	9
Abstract.....	10
1. Introducción.....	11
2. Antecedentes	12
2.1. Área de estudio.....	12
2.2. Marco Fisiográfico.....	13
2.3. Marco Tectónico	15
2.4. Estudios previos	18
2.4.1. Estudios aeromagnéticos.....	19
2.4.2. Litosfera Transicional-Corteza Oceánica.....	20
3. Metodología.....	23
3.1. Magnetismo	23
3.1.2. Magnetización.....	23
3.1.3. Campo terrestre magnético	24
3.1.4. Anomalías magnéticas	25
3.1.5. Índice DST.....	25
3.2. Adquisición de Datos Magnéticos.....	26
3.3. Procesado de Datos	28
3.3.1. Reducción de IGRF	29
3.3.2. Reducción por Variación Diurna	29
3.3.3. Corrección por Rumbo	30
3.3.4. Corrección por Filtro Direccional	32
4. Resultados del procesado	33
4.1. Anomalías Magnéticas y Fisiografía del Relieve	37
4.2. Análisis entre anomalías magnéticas en la zona del Cinturón Plegado de Perdido	39
4.3. Relación entre la anomalía magnética de polígono P2A y el COB (Continent-ocean boundary)	42
5. Conclusiones	45
Referencias.....	46
ANEXO A.....	49
ANEXO B.....	51

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del Polígono Perdido 2A en el margen occidental del Golfo de México.	12
Figura 2. Provincias fisiográficas en el Golfo de México.	14
Figura 3. Etapas de la evolución del Golfo de México. Las ilustraciones despliegan las principales etapas de la evolución de la cuenca, desde 210 Ma hasta el presente	17
Figura 4. Anomalías magnéticas y de gravedad en el margen occidental del Golfo. A la izquierda: anomalía magnética reducida al polo; al centro: anomalía de Bouguer corregida isostáticamente; y a la derecha: estructuras principales en el margen occidental.....	18
Figura 5. Mapa aeromagnético de la intensidad del campo magnético en el Golfo de México.	19
Figura 6. Anomalía magnética del Golfo de México reducida al polo.	21
Figura 7. Propuestas de COB en el margen del Golfo de México.	22
Figura 8. Esquema del campo geomagnético.	24
Figura 9. Grafica de los registros del índice DST durante la campaña, Julio del 2016.....	26
Figura 10. Magnetómetro marino G-877 de la marca Geometrics.	26
Figura 11. Esquema de la adquisición de datos magnéticos marinos.	27
Figura 12. Levantamiento en la adquisición de las 25 líneas magnéticas en el Polígono 2A.	28
Figura 13. Distancia entre el Observatorio Geomagnético de Teoloyucan y el polígono 2A. La distancia entre ambos sitios es de 750 m, siendo este el observatorio más cercano al Polígono. Mapa base del ESRI.	30
Figura 14. Circulo de calibración de la campaña oceanográfica de Sigsbee 11 en el Golfo de México.	31
Figura 15. Carta magnética de campo total en el polígono P2A.....	33
Figura 16. Carta de las anomalías magnéticas en el polígono P2A. Las anomalías son obtenidas solo aplicando la reducción por IGRF.	34
Figura 17. Anomalías magnéticas reducida por Variación Diurna del Polígono 2A.....	35
Figura 19. Anomalías magnéticas corregida con un filtro direccional.....	36
Figura 20. Relieve marino en el Polígono P2A. El relieve del lecho marino es caracterizado en tres zonas	38
Figura 21. Ubicación del polígono P 2A en el mapa aero-magnético del Golfo de México.....	39
Figura 22. Anomalías magnéticas del P2A superpuesta en la carta regional del EMAG2v3. Donde las zonas delimitadas en rojo (I y III) corresponden a altos magnéticos y la zona delimitada en azul (II) corresponde al bajo magnético.	41
Figura 23. Anomalías magnéticas del polígono P2A sobrepuestas en el regional del EMAG2v3. En negro con las líneas punteadas es la propuesta de COB de Curry et al., (2018) y con morado en líneas punteadas en morado es la propuesta de Bird et al., (2015)	43

Figura 24. Anomalías magnéticas del polígono P2A sobrepuesta en el regional del EMAG2v3. En negro con las líneas punteadas la propuesta de COB de Curry et al., (2018), con morado en líneas punteadas en morado la propuesta de Bird et al., 2015 y en blanco la propuesto en esta tesis.	44
Figura A-1. Sección geológica que cruza las provincias de Salina del Bravo y el Cinturón Plegado de Perdido, tomado de Comisión Nacional de Hidrocarburos (2015).	49
Figura A-2. Filtro ideal para atenuar la huella de adquisición. Banda de rechazo (azul), Banda de aceptación (amarillo).	49
Figura A-3. Anomalía magnética del polígono 2A sin filtro f-k	50
Figura B-1: Base de datos Magnéticos, Perdido 2A.	53

Índice de Tablas

Tabla 1. Coeficientes resultantes de la ecuación de (Bullard & Mason, 1961) con los datos registrados del círculo de calibración de la campaña Sigsbee 11.....	31
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Resumen

Los límites de la paleo-expansión (*paleo-rifting*) del Golfo de México es un área de investigación caracterizada por su alta incertidumbre debido a la complejidad geológica del basamento y la falta de datos geofísicos precisos para comprender la transición océano-continente en los márgenes de la cuenca, particularmente en su sector occidental. Con el objetivo de abordar esta complejidad, el grupo de geofísica marina del Instituto de Geofísica en la UNAM realizó la campaña de investigación Perdido 2 en 2016, a bordo del buque oceanográfico Justo Sierra, con el objetivo de estudiar las estructuras en el margen de la provincia del Cinturón Plegado de Perdido, donde posiblemente se sitúa la zona transicional. Durante esta campaña, datos de geofísica marina fueron registrados a lo largo de 25 perfiles magnéticos dentro del Polígono P2A. Estos datos fueron reducidos para obtener las anomalías magnéticas asociadas a las estructuras subyacentes.

Resultados de este procesamiento de los datos magnéticos revelan un refinamiento mayor en la geometría de las anomalías dentro de la provincia de Perdido, donde esta región exhibe dos zonas significativas de altos magnéticos: una en el sector NE del polígono y otra en el sector SW. Además, la carta magnética exhibe una zona transversal de bajos magnéticos con tendencia NW-SE; esta zona está alineada al relieve salino observado en las cartas batimétricas, siendo así se establece una conexión significativa con los modelos regionales propuestos del límite transicional entre las litosferas continental y oceánica en el margen occidental. Este resultado ha permitido refinar el límite transicional dentro de la provincia del Cinturón Plegado de Perdido en el Golfo de México.

Abstract

The limits of paleo-expansion (paleo-rifting) in the Gulf of Mexico signify a research area of great interest because of its high uncertainty due to the geological complexity of the basement and the lack of precise geophysical data to understand its transitional ocean-continental margin, particularly on its western sector. In order to address this complexity, the marine geophysics group at the Institute of Geophysics at UNAM conducted a scientific campaign, called Perdido 2, in 2016, on board the oceanographic vessel B. O. Justo Sierra, aiming to study the structures on the margin of the Perdido Fold Belt province, where the transitional zone may be located. During this campaign, marine geophysics data were recorded along 25 magnetic profiles within Polygon P2A. These data were processed to obtain magnetic anomalies associated with the underlying-deep structures.

This magnetic data processing a refinement on the geometry of the magnetic anomalies in the Perdido province, where this region exhibits two significant zones of high magnetism: one in the NE sector of the polygon and another in the SW sector. Additionally, the magnetic chart shows a transverse zone of low magnetism trending NW-SE; this zone is aligned with the saline seafloor-relief observed in bathymetric charts. Thus, this finding establishes a significant connection with proposed regional models of the transitional boundary between continental and oceanic lithospheres on the western margin. This result has allowed for less uncertainty on the transitional boundary within Perdido Fold Belt in the western margin of the Gulf of Mexico.

1. Introducción

El Golfo de México es una cuenca de que tuvo un proceso de abertura de suma importancia económica para el país es por ello que el mayor número de estudios en la zona ayuda a comprender su importancia, el motivo de este trabajo es analizar la transición de la corteza continental y oceánica a partir de los datos adquiridos en la campaña oceanográfica del Perdido 2 (ver Figura 1) en el área de la provincia fisiográfica del Cinturón Plegado Perdido donde anteriormente diversos autores han señalado que existe un límite entre la corteza oceánica y continental.

La cuenca del Golfo de México, dada su relevancia económica y geológica, ha sido objeto de numerosos estudios destinados a comprender sus características y su influencia en la región. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo principal el análisis de la transición entre la corteza continental y oceánica en esta área geográfica específica. Para llevar a cabo esta investigación, se aprovechan los datos recopilados durante la campaña oceanográfica en 2016, que se centró en la provincia fisiográfica del Cinturón Plegado Perdido. Numerosos autores previos han señalado la existencia de un límite geológico significativo en esta región, lo que motiva un estudio más detallado de esta transición y sus implicaciones en la evolución geológica de la cuenca del Golfo de México. Esta investigación busca contribuir a nuestro conocimiento sobre la dinámica geológica de esta área clave, con posibles repercusiones en la industria y el desarrollo económico de la región.

2. Antecedentes

2.1. Área de estudio

El área de estudio es un polígono en forma romboidal que se sitúa en la región noroeste del Golfo de México (Figura 1), abarcando aguas profundas del talud continental hasta 1500 m, frente a las costas del estado de Tamaulipas, entre latitudes 25.4° y 26° N con longitudes entre 95.3° y 96.3° W. El área del polígono es el bloque norte (colindando con el límite internacional de México y Estados Unidos), referido como Perdido 2A, que conforma parte de los cuatro bloques del levantamiento geofísico que se realizaron en la campaña de Perdido 2 en 2016. Este levantamiento cubre parcialmente las provincias fisiográficas de Salina del Bravo y el Cinturón Plegado de Perdido como lo muestra la Figura 1.

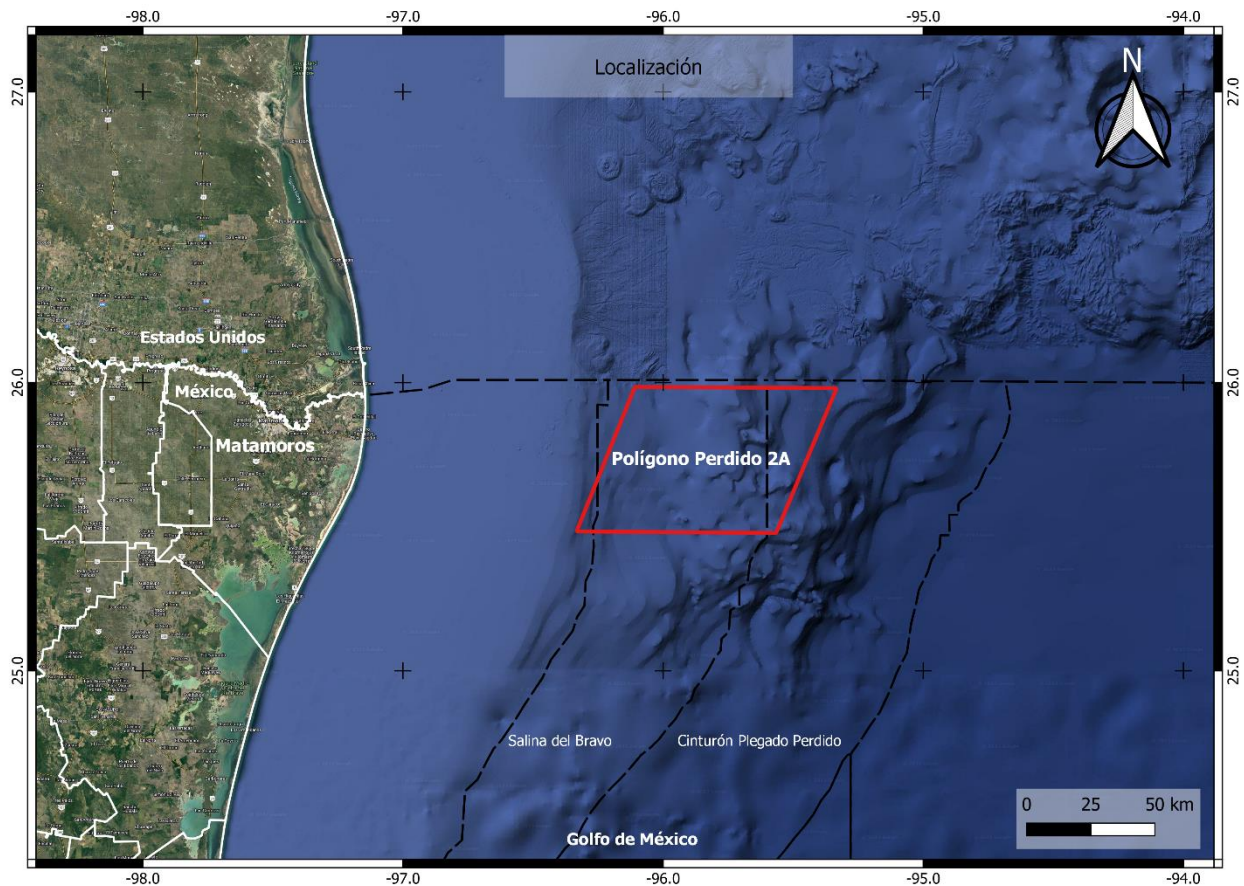


Figura 1. Ubicación del Polígono Perdido 2A en el margen occidental del Golfo de México. El área del polígono está marcada en rojo. La capa base es extraída del Google Satellite Hybrid.

2.2. Marco Fisiográfico

El Golfo de México es una cuenca marginal semicerrada en margen occidental del océano Atlántico, rodeadas por las costas de Cuba, Estados Unidos de América y México (Figura 2). Su margen occidental presenta un relieve de una amplia y suave plataforma continental (80 km de ancho) hasta el rompimiento del talud con la plataforma. El relieve del talud tiene un gradiente promedio de 17.74 km con un lecho marino alterado por los movimientos de cuerpos salinos y la carga del gran volumen de sedimentos depositados desde su inicio de cuenca. La planicie abisal de "Sigsbee" tiene un relieve profundo y suave (poco alterado por cuerpos salinos) y a una distancia del bloque en estudio de casi 70 km. Las capas de sedimentos en esta planicie cubren la corteza oceánica que se formó durante el proceso de abertura (*rifting*) del golfo.

La parte central del golfo la forma la llanura abisal de Sigsbee en que su relieve es una de las superficies más planas de la tierra (Figura 2). La llanura es semicircular tiene 450 km de largo y 290 km de ancho y cubre más de 103 km². La llanura está sustentada por una capa muy gruesa de sedimentos de hasta 9 km. La principal fuente de sedimentos del de los Ríos Grande y Mississippi (Worzel et al., 1973).

En el talud continental occidental del golfo se encuentra las Cordilleras Mexicanas que son una provincia que su relieve está conformado por un cinturón de plegamientos, cuya evolución está relacionada con eventos de compresión asociados con sistemas de fallas de crecimiento normal, a causa del colapso gravitacional en la plataforma y talud continental (Salomón-Mora, 2013). Estas cordilleras están localizadas al oriente de la plataforma continental, frente a la costa de los estados de Veracruz y Tamaulipas, desde la parte Sur de la Provincia Salina del Bravo hasta el Sur del Golfo de México. La provincia se extiende a lo largo de 500 km y cubre cerca de 70,000 km² en tirantes de agua, entre 1,000 y 3,000 m. Su relieve está compuesto de anticlinales simétricos, con leve vergencia hacia el oriente, alargados y angostos (Comisión Nacional de Hidrocarburos, 2015).

También en el margen occidental del talud, la provincia de Salina de Bravo está ubicada en el sector noroccidental del Golfo de México, frente al delta del Río Bravo, en tirantes de agua que varían de 500 a 2,500 m. Su fisiografía del relieve incluye dos subprovincias: 1) Cinturón

Subsalino y 2) Mini-cuencas. El Cinturón Subsalino corresponde a un régimen compresivo de pliegues amplios por propagación de fallas inversas en sus crestas y flancos, con orientación preferencial NE-SW. La subprovincia de Mini-cuencas localizada al occidente, representada por una franja casi paralela al borde del talud continental y en donde se localiza diapiros de sal o arcilla asociados a un régimen extensivo gravitacional (Comisión Nacional de Hidrocarburos, 2015)

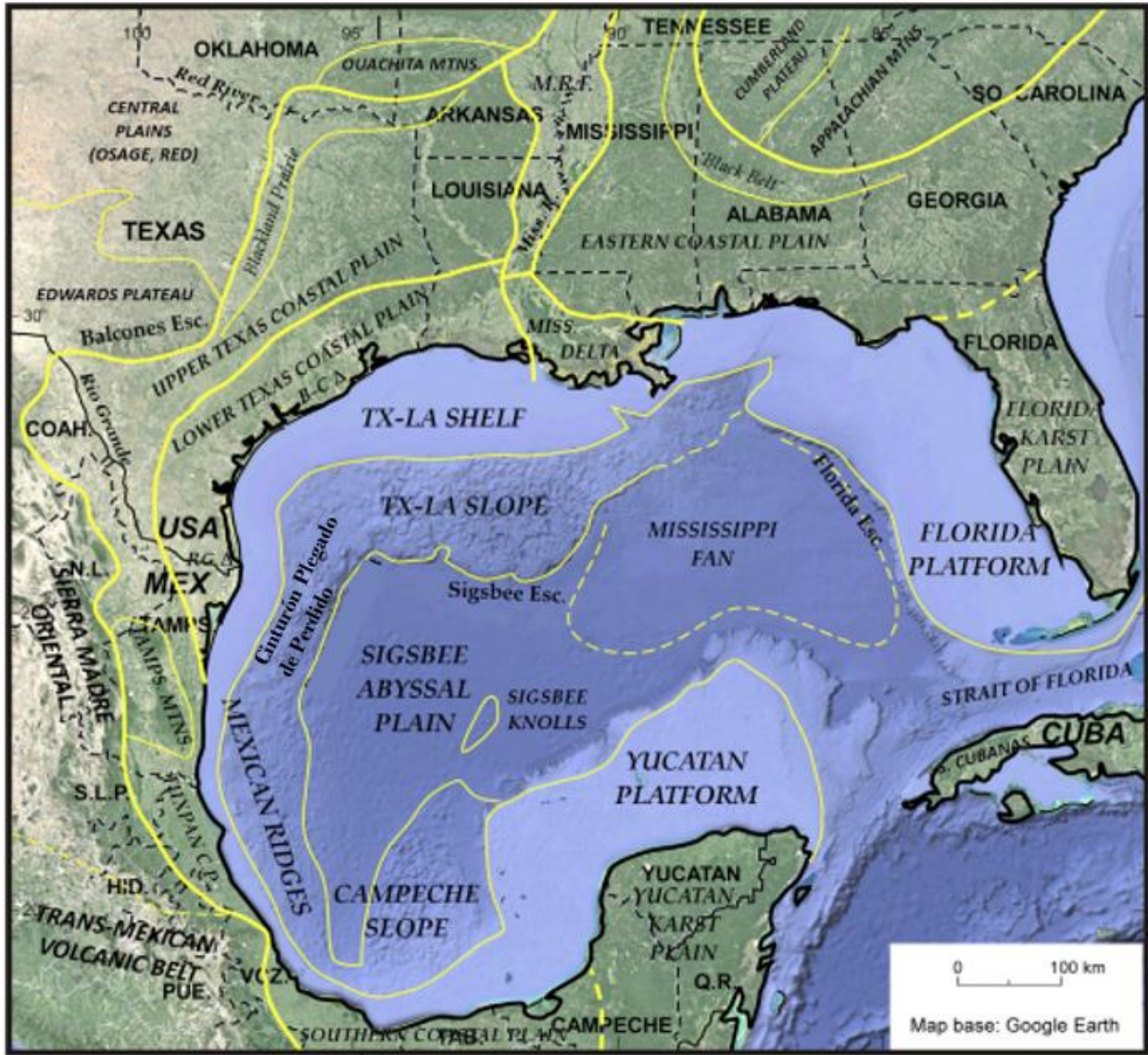


Figura 2. Provincias fisiográficas en el Golfo de México. Los límites en amarillo de las provincias son derivados y modificado de Ewing and Galloway (2019). El mapa base es extraído del Google Earth.

Otra provincia fisiográfica en el talud occidental del margen es la del Cinturón Plegado de Perdido que se localiza al oriente de la Provincia Salina del Bravo. Su relieve está constituido por un conjunto de pliegues, resultados de la propagación de fallas inversas de orientación NE-SW, que despegan de la sal autóctona del Jurásico. El Cinturón Plegado es producto de la compresión y el mecanismo de deformación de la sal originada por la tectónica gravitacional ocurrida al occidente del área. El cinturón de pliegues se extiende hacia la parte estadounidense del Golfo de México (Comisión Nacional de Hidrocarburos, 2015).

2.3. Marco Tectónico

De acuerdo a (Salvador, 1991), el Golfo de México se originó a partir de la fragmentación de Pangea. Este proceso de fragmentación y separación para formar la cuenca del Golfo de México duro casi 46 millones de años, desde el Triásico Tardío (210 Ma) hasta el Jurásico Medio Tardío (169 Ma). Durante esta época, la sedimentación continental estuvo totalmente controlada por los procesos tectónicos de extensión debido a la formación inicial de la cuenca. Las aguas del Pacífico avanzaron hacia el este, invadiendo áreas someras del que sería el actual Golfo de México y formando extensos cuerpos de aguas hipersalinas que constituirían la iniciación de las evaporitas que cubrirían el lecho marino poco profundo.

Durante la etapa temprana del proceso de rifting (Figura 3), es probable que la corteza continental haya estado sujeta a hundimientos lentos y a ensanchamiento de los sistemas de grabenes que poco a poco fueron inundados por las aguas del Pacífico. Aunque el proceso de rifting fue lento, el depósito de sal fue relativamente rápido y se realizó en un lapso de aproximadamente cinco millones de años, durante el Calloviano (166 Ma). La apertura del Golfo de México promovió la incursión de aguas marinas en el oriente de México y la aparición de cuencas y plataformas carbonatadas (Padilla Y Sánchez, 2007).

Para el Tithoniano, la velocidad de subsidencia de la cuenca se hizo más lenta. Los horts formados en el basamento premesozoico bordeando la parte occidental del Golfo de México permanecieron emergidos y aportando sedimentos clásticos cada vez en menores cantidades a medida que el relieve topográfico disminuye. En la provincia del Golfo de México, las cuencas terciarias siguieron evolucionando con subsidencias intermitentes durante el Oligoceno y el Mioceno Inferior (23 Ma) y referencias). En la provincia del Golfo

de México las cuencas terciarias siguieron evolucionando con subsidencias intermitentes durante el Oligoceno y el Mioceno Inferior (Viniegra, 1971).

Durante el Calloviano Tardío, que gran parte de la extensión intracontinental en la región del Golfo de México tuvo lugar hace unos 158 millones de años. Posteriormente, la expansión inicial del lecho marino en el Golfo se produjo, aunque no se tiene una clara definición de la naturaleza del límite entre el continente y el océano en esta zona. Sin embargo, el basamento plano en la parte central del golfo sugiere que se trata de una corteza oceánica normal. Esto es evidenciado por la presencia de reflectores de sedimentos basales que se superponen en una franja central de corteza que se extiende desde el sureste del golfo hasta la cuenca de Veracruz.

La corteza del Golfo de México está enterrada bajo 15 km o más de sedimentos a lo largo de su margen noroeste. Las partes más distales de la cuenca tienen 1 km de sedimento. Se cree que la corteza oceánica del Jurásico está presente en el Golfo de México, pero aún no se conocen anomalías magnéticas correlacionables a la expansión del golfo (Stern & Dickinson, 2010).

Los primeros estudios geofísicos concluyeron que la corteza oceánica subyace al Golfo de México central, y la mayoría de los modelos tectónicos para su origen infieren que un tramo de corteza oceánica en forma de cuña subyace en la parte central del Golfo de México. (Sandwell et al., 2014) mapeo el gradiente de gravedad de la cuenca en el golfo en el que revelo rasgos del centro de expansión oceánica acompañado por numerosas fallas transformantes.

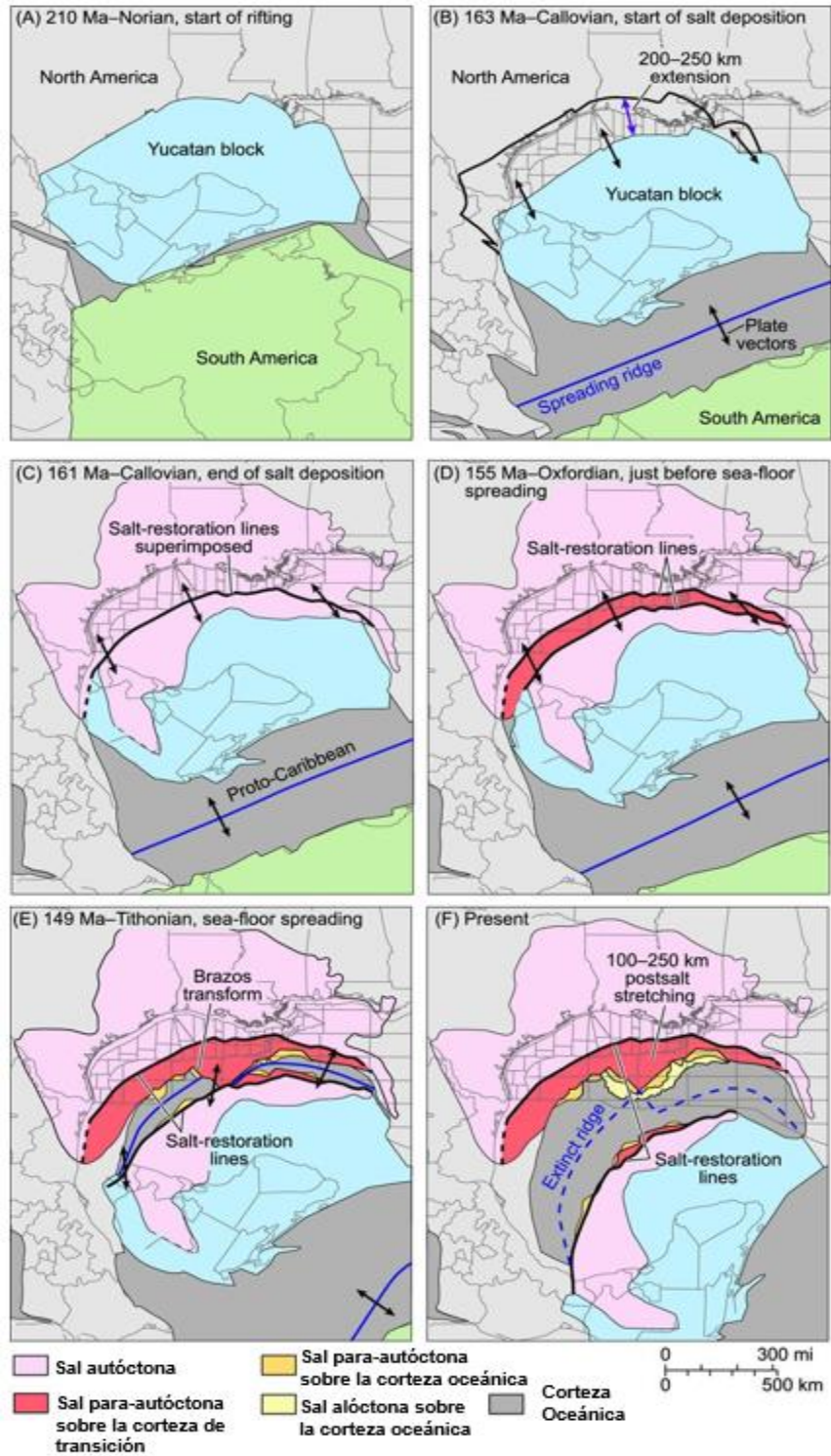


Figura 3. Etapas de la evolución del Golfo de México. Las ilustraciones despliegan las principales etapas de la evolución de la cuenca, desde 210 Ma hasta el presente, modificado de Hudec et al. (2013)

2.4. Estudios previos

De acuerdo con David et al. (2013), la Cuenca de Burgos (abarcando gran parte de la planicie costera y el margen continental del NW de México) tiene una anomalía magnética en forma de “V” (Figura 4), cuyo límite occidental (tierra adentro) de esta geometría está constituida por el alto de Vaquerías donde el basamento es somero; mientras su margen oriental (hacia el golfo) exhibe una anomalía magnética positiva, que corresponde al alineamiento estructural del Cinturón Plegado de Perdido. El cual está constituido por un basamento ígneo-metamórfico, cuya estructura consiste de medios grabenes, horst y grabenes formando cuencas. Estas estructuras en los márgenes de Burgos exhiben altos gravimétricos, mientras que, la anomalía de la cuenca es un bajo gravimétrico en su parte central.

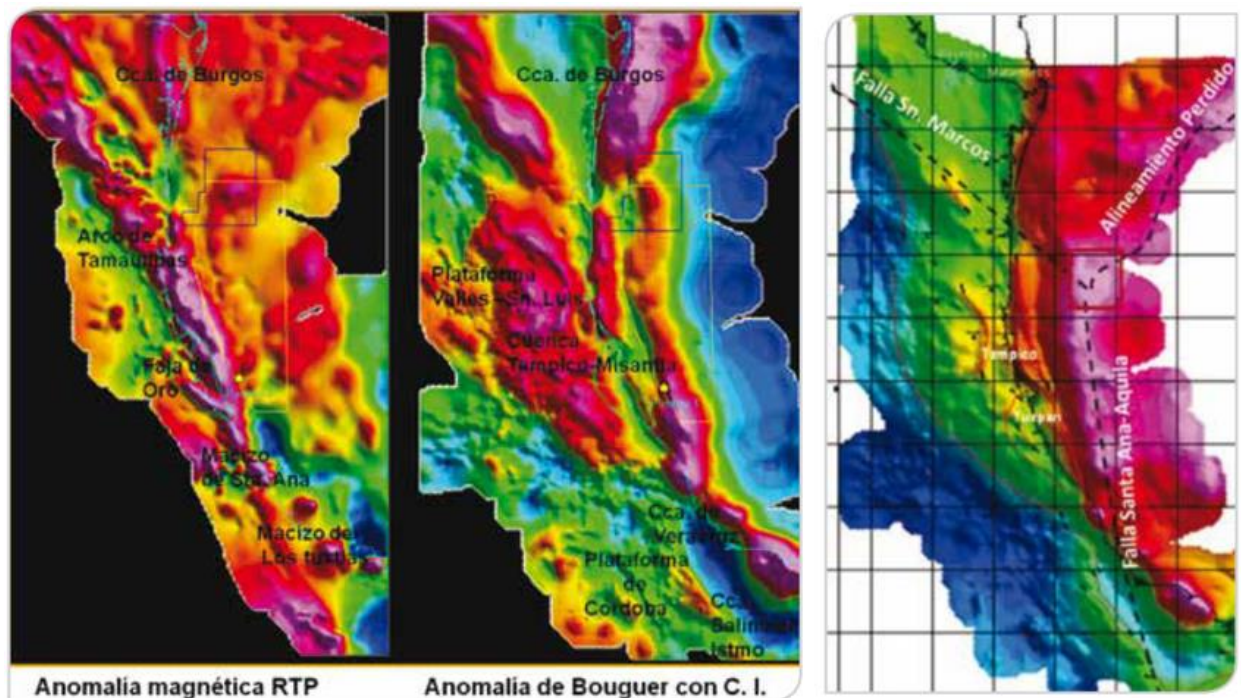


Figura 4. Anomalías magnéticas y de gravedad en el margen occidental del Golfo. A la izquierda: anomalía magnética reducida al polo; al centro: anomalía de Bouguer corregida isostáticamente; y a la derecha: estructuras principales en el margen occidental de David et al. (2013).

2.4.1. Estudios aeromagnéticos

Pindell et al. (2016) integro un mapa aeromagnético regional del Golfo de México que muestra patrones estructurales atribuibles a la expansión del suelo marino y la ruptura continental. En 2003 se llevó a cabo un estudio aeromagnético costa afuera, sobre la porción mexicana del Golfo de México, el levantamiento tuvo un espacio entre líneas de este a oeste de 3 km y un espacio de norte a sur de 9 km a una altitud de vuelo de 300 m. Los datos de este estudio son integrados a un mapa de intensidad magnética total reducido al polo (Baranov, 1957)(Figura 5).

Tres tendencias de anomalías son expuestas en el Golfo de México, la del norte es la más cercana al cinturón plegado de Perdido. El área de Perdido exhibe una unión entre el patrón magnético no rectilíneo (oeste y norte) al rectilíneo (este y sur).

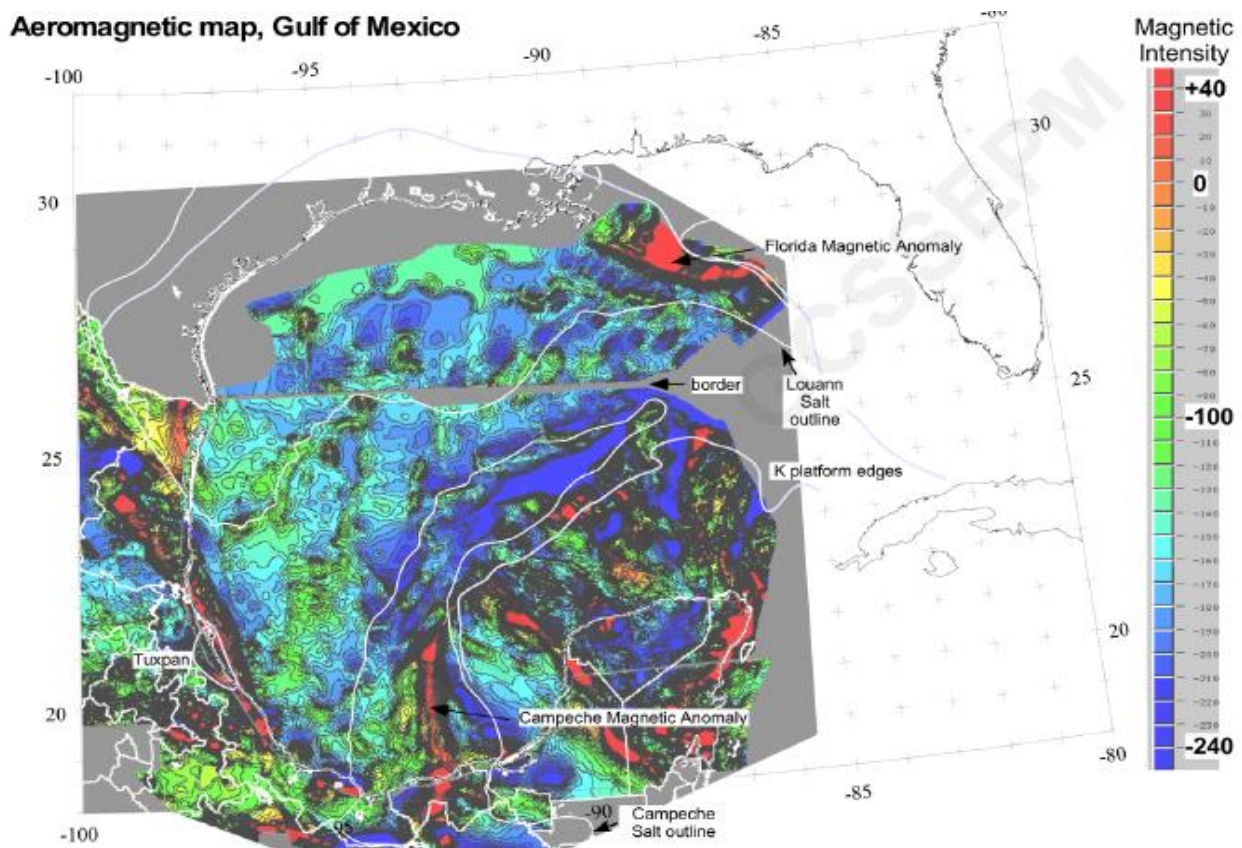


Figura 5. Mapa aeromagnético de la intensidad del campo magnético en el Golfo de México. El mapa muestra las variaciones de la intensidad magnética en la cuenca del golfo Pindel et al. (2016).

2.4.2. Litosfera Transicional-Corteza Oceánica

La zona entre la litosfera oceánica y la litosfera continental (referido en inglés como *Continent-Ocean Boundary*, abreviado COB), es reconocido en la tectónica global por distinguir geológicamente entre las cortezas continentales y oceánicas. El límite del COB sigue siendo objeto de estudio al observar el contraste en el tipo de corteza a lo largo del margen de la cuenca del Golfo de México. En el margen occidental del golfo, la zona del COB ha sido delimitado a partir de datos geofísicos (Figura 6).

(Filina et al., 2022) señala que los métodos potenciales Figura 6 son comúnmente utilizados en el análisis de estructuras en las cuencas sedimentarias, y muestra el lineamiento correspondiente a la anomalía magnética que se observa en el margen del golfo (Bankey et al., 2002). Hemant & Maus, (2005) demostraron que las susceptibilidades magnéticas de la corteza oceánica y continental son muy similares en longitudes de onda largas.

En el Golfo de México, múltiples estimaciones del COB han sido realizadas utilizando diversas fuentes de datos, como lo han descrito varios investigadores. Bird et al. (2005) presentó ocho interpretaciones del COB junto con su propia estimación (Figura 7). Estas interpretaciones son desplegadas.

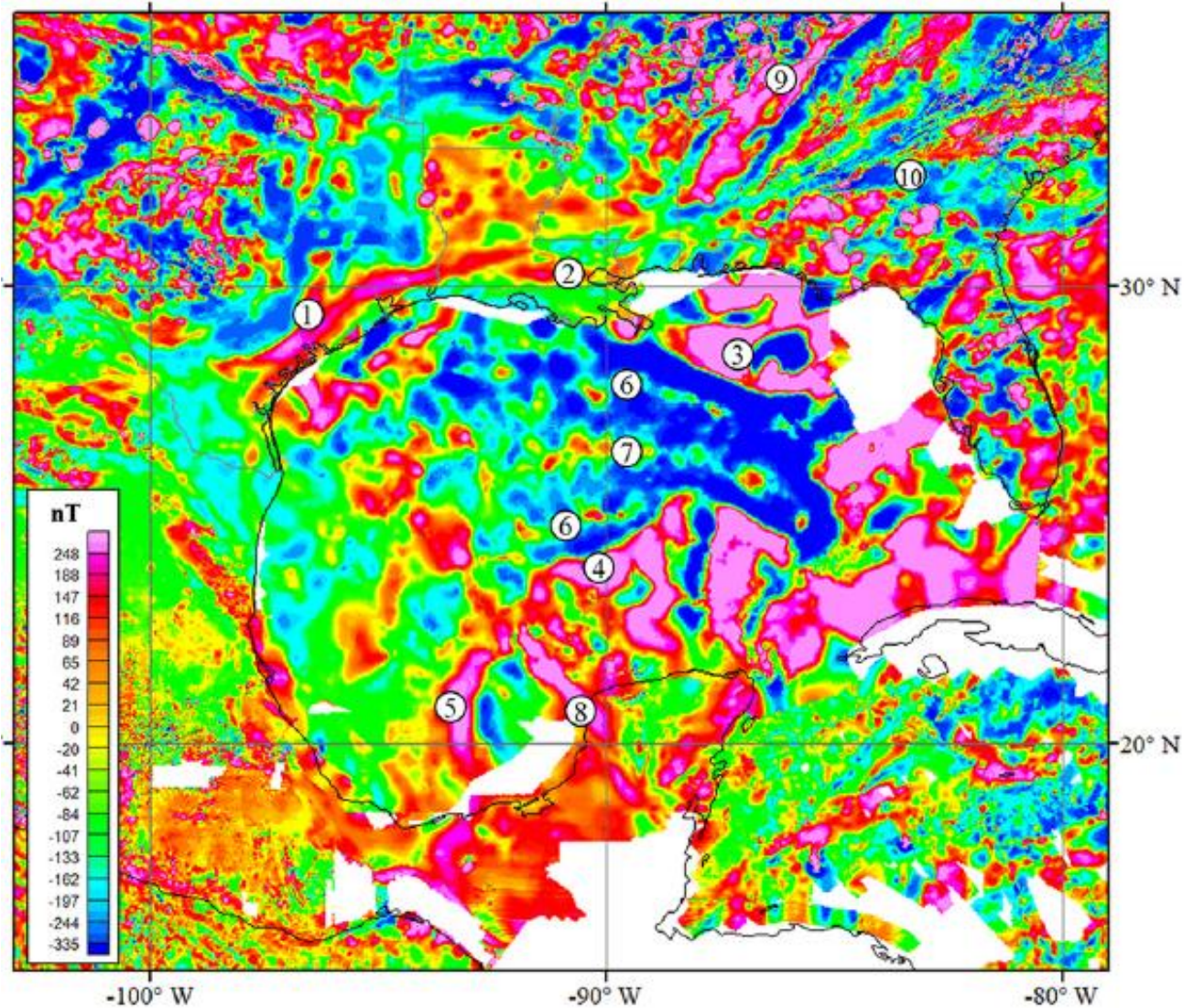


Figura 6. Anomalía magnética del Golfo de México reducida al polo realizada por Bankey et al. (2002) y Minguez et al. (2020) La anomalía magnética de la Costa del Golfo a veces se separa en varias partes: 1) anomalía magnética de Houston, 2) anomalía magnética de Luisiana y 3) anomalía magnética de Florida. La anomalía magnética de Yucatán marcada como 4) se refiere a la altura magnética sobre el borde de la península de Yucatán; la porción occidental de este máximo magnético se conoce como la anomalía magnética de Campeche que se muestra como 5). Las “Anomalías En Echelon” que se muestran con 6), son el par de máximos magnéticos más pequeños (Minguez et al., 2020) simétricos con respecto a las Anomalías de crestas extintas en expansión (ESRA) que están marcadas por 7). 8) y 9) son dos anomalías que pueden usarse para limitar el ajuste previo a la ruptura entre Yucatán y América del Norte. 10) marca la anomalía magnética de Brunswick.

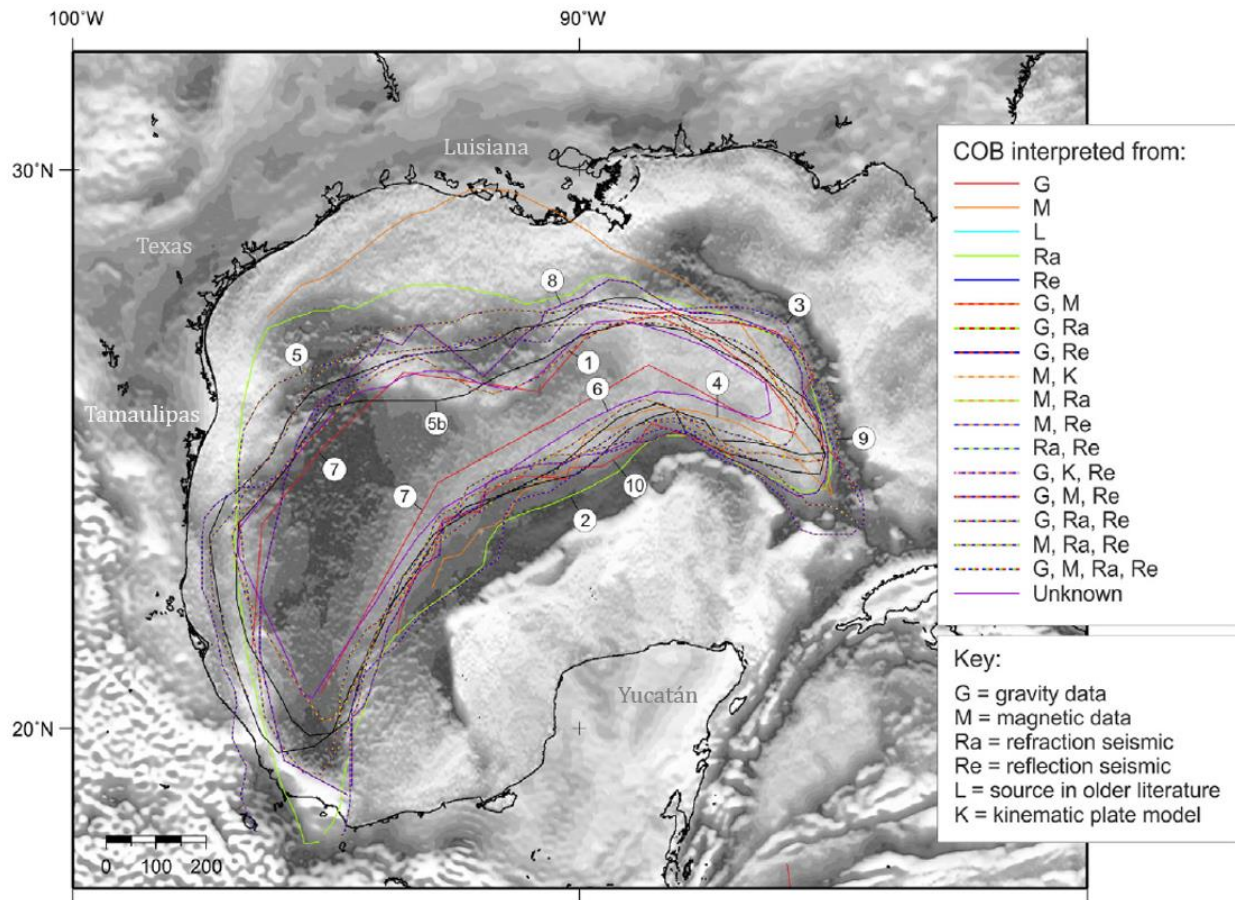


Figura 7. Propuestas de COB en el margen del Golfo de México. La capa base del mapa es la anomalía de gravedad de aire libre (Sandwell et al., 2014). Las del COB son 1: Sawyer et al., (1991); 2: Marton and Buffler (1994); 3: Pindell (1994); 4: Schouten and Klitgord (1994); 5: Bird et al. (2005); 5b: Bird et al. (2005); 6: Bouysse (2014); 7: Seton et al. (2012); 8: Hudec et al. (2013); 9: Christeson et al. (2014); 10: Sandwell et al. (2014). Modificado de Eagles (2015)

3. Metodología

3.1. Magnetismo

La prospección magnética, el método más antiguo de exploración geofísica marina, ha sido utilizada para explorar los recursos naturales en las cuencas oceánicas para la búsqueda de yacimientos petroleros. Como también, el estudio del registro magnético del piso en las cuencas oceánicas de la Tierra fue fundamental para validar la Teoría de Placas Tectónicas. El método también es utilizado para determinar las profundidades del basamento y definir la geometría de las cuencas sedimentarias (Dobrin & Savit, 1988).

3.1.2. Magnetización

Los materiales terrestres están formados por minerales que se comportan como pequeños magnetos que están asociados al movimiento de cargas eléctricas a nivel atómico y se encuentran clasificados en tres grupos (Hinze et al., 2013). Estos materiales magnéticos son clasificados en: 1) diamagnéticos en los cuales su susceptibilidad magnética es negativa y el campo es inducido en direcciones opuestas; 2) Paramagnéticos en los cuales la susceptibilidad es positiva y sus electrones están desalineados del campo inductor y tienden a ser materiales débilmente magnéticos; y 3) Ferromagnéticos en los cuales su susceptibilidad magnética es positiva, donde el campo inducido puede ser 10 veces más grande que el presente campo inductor. Los minerales ferromagnéticos son de susceptibilidad magnética positiva y su magnetización se da incluso sin un campo externo (Kearey et al., 2002). Los minerales más comunes de mayor interés en la exploración son magnetita, limonita y perotita.

Además de la magnetización inducida existe la magnetización remanente donde los materiales en la corteza terrestre retienen una magnetización después de haber sido expuestos previamente a un campo magnético. Esto puede ocurrir durante la formación geológica de las rocas, donde ciertos minerales ferromagnéticos, como la magnetita, adquieren una magnetización remanente que conservan a lo largo del tiempo (millones de años). Estas áreas donde hay estas propiedades magnéticas pueden influir en el campo magnético local (Reynolds, 2011).

La prospección de magnetometría utiliza estas variaciones en la magnetización de las rocas para detectar anomalías magnéticas en la corteza terrestre. Usualmente la prospección marina en geofísica emplea magnetómetros para medir las intensidades en el campo magnético terrestre para identificar áreas con diferentes propiedades magnéticas.

3.1.3. Campo terrestre magnético

El campo magnético de la Tierra (campo geomagnético) es generado por corrientes eléctricas asociadas a movimientos convectivos en su núcleo externo. El campo geomagnético registrado en la superficie terrestre es un producto de varias componentes adicionales de las propiedades magnéticas de los materiales en la superficie de la litosfera y de corrientes eléctricas en la ionosfera. Figura 8 muestra que el campo dipolar magnético y su eje casi coincide con el eje de rotación de la Tierra (Hinze et al., 2013).

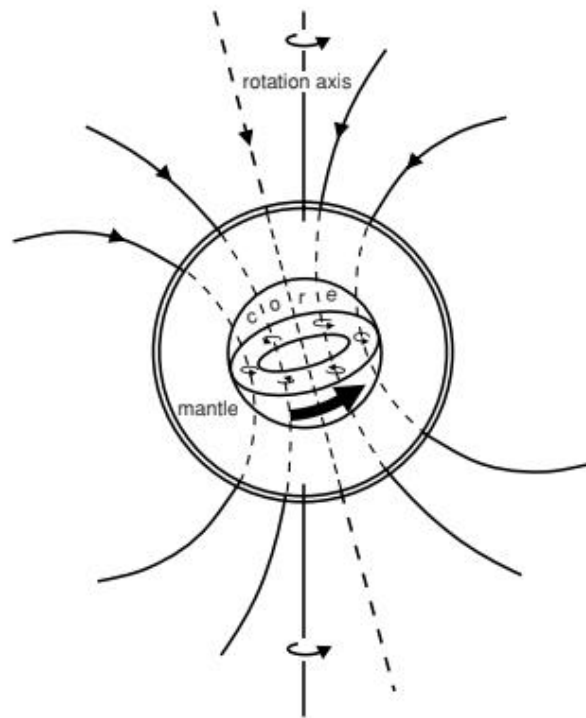


Figura 8. Esquema del campo geomagnético. Tomado de Sharma, (1986)

El campo geomagnético es la suma de varias componentes magnéticas, que varían espacial y temporalmente. El campo principal generado por las corrientes electromagnéticas en el núcleo exterior contribuye casi más del 98%. Adicionalmente lo que resta del campo geomagnético es la componente magnética producto de la contribución del magnetismo

remanente preservado en la litosfera. Los campos externos son altamente afectados por la interacción de la eyección del plasma solar sobre su envolvente (Hinze et al., 2013)

3.1.4. Anomalías magnéticas

Una anomalía magnética se refiere a variaciones inusuales en la intensidad del campo magnético terrestre en una ubicación específica. Estas variaciones pueden ser tanto positivas como negativas con respecto al valor esperado del campo magnético en ese lugar y momento particular. Las anomalías magnéticas pueden deberse a diversas razones, y su interpretación suele proporcionar información valiosa sobre la composición y la estructura geológica de la Tierra en una región determinada en la prospección de magnetometría el cálculo de estas anomalías (ΔF) se realiza con la siguiente ecuación:

$$\Delta F = F_{obs} - F_{IGRF} - F_{VD} - F_Q$$

Donde:

F_{obs} : Es el campo magnético total registrado

F_{IGRF} : Valor teórico del campo total

F_{VD} : Valores de la variación diurna

F_Q : Efecto del rumbo del buque

3.1.5. Índice DST

El Índice Geomagnético DST (*Disturbance Storm Time Index*) del Centro Mundial de Datos de Geomagnetismo (*World Data Center for Geomagnetism*), con base en Kyoto, Japón, es un indicador para cuantificar las perturbaciones en el campo geomagnético causadas por la actividad solar. Además, el índice es utilizado para evaluar el registro de las intensidades magnéticas que no hayan sido afectados por las tormentas solares (Figura 9).

El Índice DST está basado en las mediciones del campo magnético en la región del anillo de corriente auroral, que rodea los polos magnéticos de la Tierra. Mide la desviación del campo magnético de un valor de referencia tranquilo o "quieto" en una escala de tiempo de varios minutos a varias horas.

El Índice DST esta reportado en nanoteslas (nT) y generalmente es registrado en la mayoría observatorios magnéticos distribuidas alrededor del mundo. Una lectura negativa del índice DST indica una inestabilidad en la intensidad del campo magnético, lo que indica que hubo una tormenta solar.

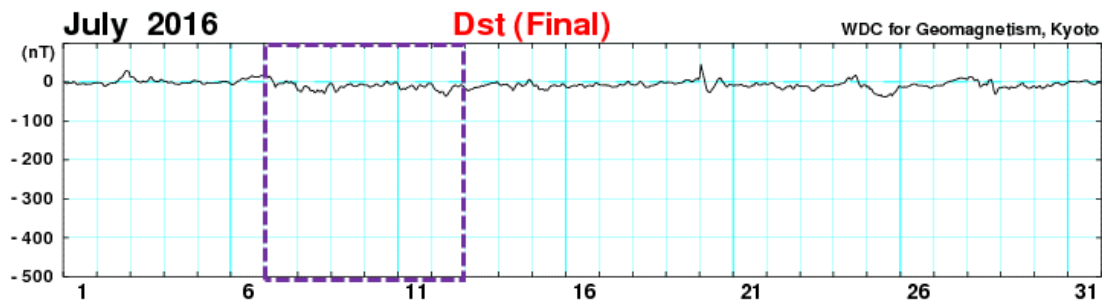


Figura 9. Grafica de los registros del índice DST durante la campaña, Julio del 2016. En el recuadro morado, los días de adquisición de datos durante el registro en el polígono P2A. Reportado por *Word Data Center for Geomagnetism Kyoto*

3.2. Adquisición de Datos Magnéticos

La adquisición marina de datos geofísicos a bordo de un buque es costosa y con tiempo limitado. Para el diseño del levantamiento geofísico, la adquisición de los registros magnéticos es llevada a cabo de acuerdo a los rasgos geológicos de la provincia fisiográfica a mapear. Siguiendo estos conceptos, la adquisición de datos magnéticos durante la campaña oceanográfica de Perdido 2, a bordo del BO Justo Sierra, fue realizada en Julio del 2016. La (Figura 12) exhibe el patrón del levantamiento en el polígono 2A, a lo largo de 25 perfiles se registró datos continuamente a intervalos de mediciones a cada 2 segundos, y de manera secuencial durante las 24 horas de día.



Figura 10. Magnetómetro marino G-877 de la marca Geometrics. Imagen del magnetómetro que fue utilizado en la campaña Perdido 2.

El magnetómetro marino utilizado es de la marca *Geometrics*, modelo G-877 (Figura 10), con un sensor de precisión de protones con una resolución de 0.1 nT en la medición. El registro a lo largo de los 25 perfiles fue llevado a cabo en los 61 kilómetros de cada perfil, los cuales están orientados NE-SW, con una separación espacial entre ellos de ~3.5 km (Figura 12). El magnetómetro es remolcado en la popa del barco, sujetado a un cable coaxial de arrastre y a una distancia de 250 [m] que equivale a cinco veces la eslora del barco (Figura 11). Esta distancia de 250 [m] es con la finalidad de disminuir la interferencia magnética que genera la operatividad del barco.

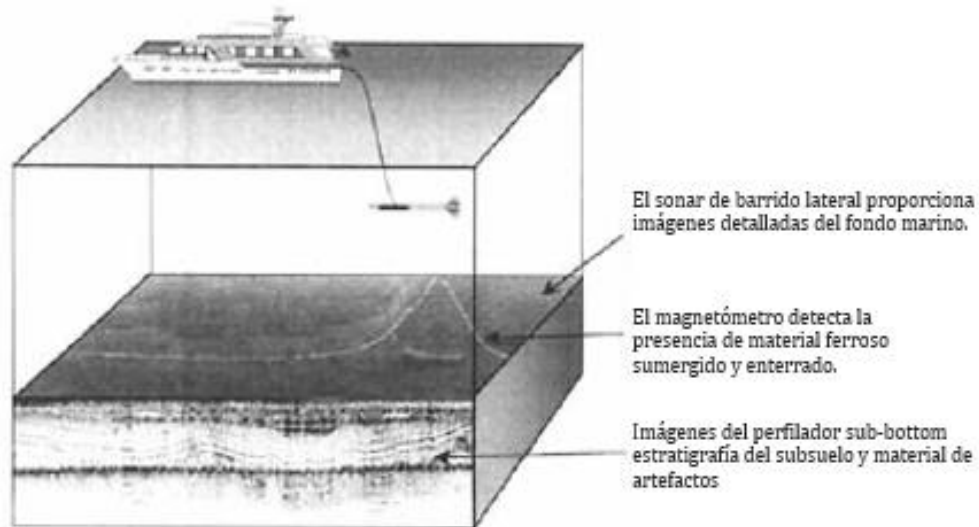


Figura 11. Esquema de la adquisición de datos magnéticos marinos. El magnetómetro es mantenido a 250 m del buque por un cable de arrastre. Tomado de Quinn et al. (2000).

El magnetómetro registra la intensidad del campo total datos medida en el sensor a través de las variaciones y emitidas electrónicamente por medio de la *junction box* y transformadas a valores usando el software *MagLog* de *Geometrics* y la ubicación del sensor es registrado en un archivo que utiliza un interpolador. Los valores son archivados en una base de datos con sus posiciones y tiempos de registros.

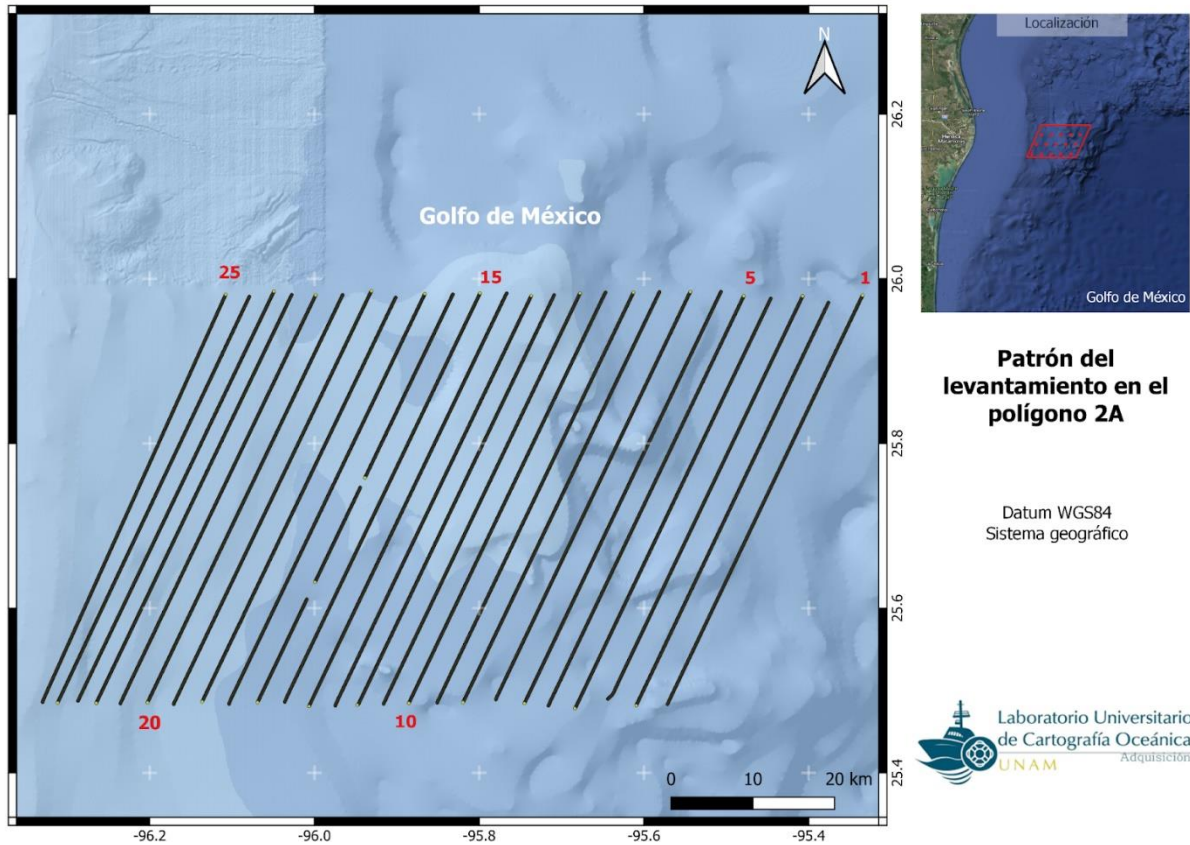


Figura 12. Levantamiento en la adquisición de las 25 líneas magnéticas en el Polígono 2A. La adquisición inicio al Este con línea 1 y termina con la línea 25 al Oeste.

3.3. Procesado de Datos

Las mediciones magnéticas adquiridas en el Polígono 2A durante la campaña Perdido 2 son reducidos para obtener la anomalía magnética del subsuelo. La reducción de estas mediciones es estimada de la diferencia de los valores en el modelo teórico que caracteriza el campo geomagnético del área de adquisición utilizando el marco de referencia internacional del campo geomagnético (IGRF). Además, la reducción de los valores implica las correcciones por las variaciones temporales diurna que afecta el campo geomagnético, como también los efectos inducidos por el rumbo del buque sobre el sensor del magnetómetro.

3.3.1. Reducción de IGRF

La reducción por IGRF constituye la primera etapa del procesamiento de los registros magnéticos marinos donde se sustrae del valor teórico del campo geomagnético, obteniéndose los valores iniciales de la anomalía en el Polígono 2A. Los valores del IGRF son obtenidos de observaciones globales correspondientes a intervalos quinquenales. Para esta reducción, el IGRF utilizado ha el modelo de la 13^a generación publicados en diciembre del 2019 que comprende al periodo de adquisición entre el 7 al 12 de julio del 2016. Los valores del IGRF correspondientes a la posición de cada registro son computados del software Geomag 7.0 que ha desarrollado la comunidad científica de la IAGA (*International Association of Geomagnetism and Aeronomy*).

3.3.2. Reducción por Variación Diurna

El valor del campo geomagnético en un lugar específico varía significativamente por factores atmosféricos durante el transcurso del día. Por los que es crucial, registrar las variaciones temporales del campo geomagnético en una localidad cercana al área donde se realiza el levantamiento magnético marino. Este registro de las variaciones temporales es utilizado para reducir los valores magnéticos por variación diurna. Para Perdido 2a, esta reducción de la variación diurna utilizo los valores del registro en el Observatorio Geomagnético de Teoloyucan (Servicio Geomagnético, UNAM), en el Estado de México, México (Figura 13). Este registro no es más óptimo para utilizarse por encontrarse a una distancia de 750 kilómetros del área marina de la prospección magnética, aun así, se consideró al no tener un lugar de registro más cercano. Dado que medición del campo en el Observatorio de Teoloyucan es a intervalos de cada minuto, este registro requirió computar una serie de tiempo con una interpolación lineal entre dos mediciones para obtener valores magnéticos a cada 2 segundos para empatar la serie de tiempo del magnetismo marino que se adquirió a intervalos de dos segundos.

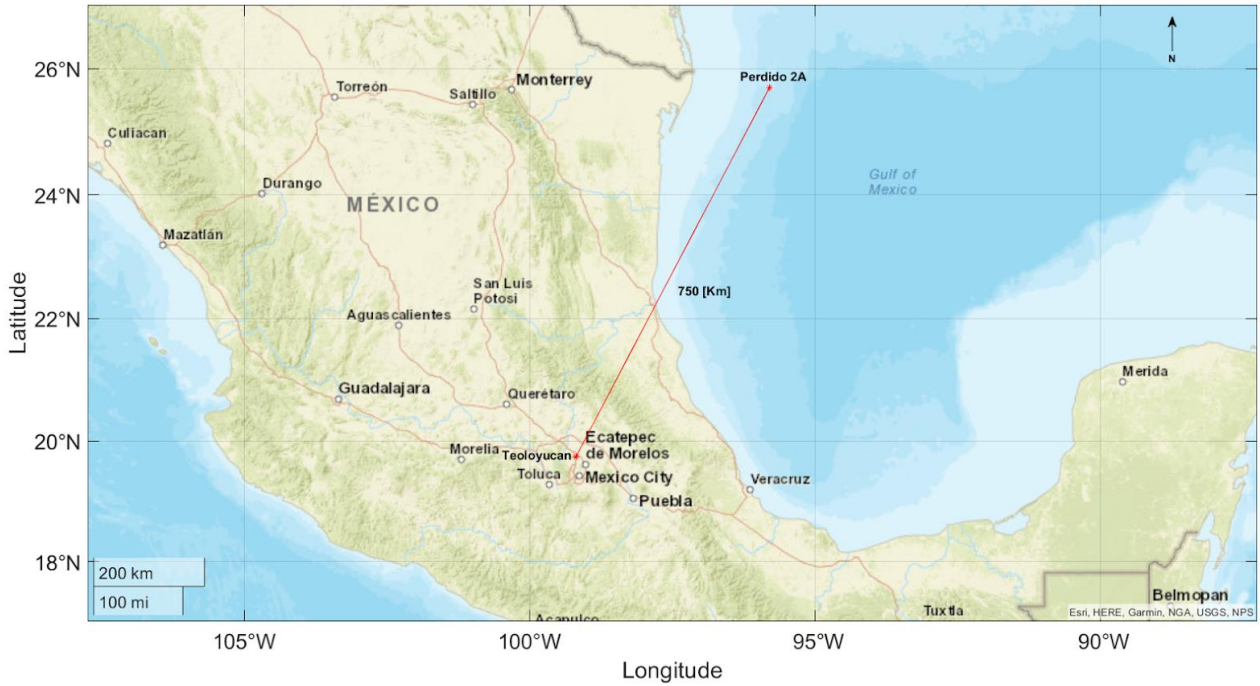


Figura 13. Distancia entre el Observatorio Geomagnético de Teoloyucan y el polígono 2A. La distancia entre ambos sitios es de 750 m, siendo este el observatorio más cercano al Polígono. Mapa base del ESRI.

3.3.3. Corrección por Rumbo

Posterior, las mediciones magnéticas que se registran a bordo del buque requieren ser corregidas por el efecto del campo magnético que induce el buque sobre el sensor del magnetómetro, aunque este es remolcado a 250 m. Este campo inducido es afectado por el rumbo del buque, siendo una desviación del vector magnético producto de la suma del campo presente más el inducido por la embarcación. Esta corrección puede computarse a través de la ecuación propuesta por Bullard & Mason, (1961) establecen una ecuación en función del rumbo, la cual es:

$$F_Q = F + C_0 + C_1 \cos \theta + C_2 \cos(2\theta) + S_1 \sin \theta + S_2 \sin(2\theta)$$

Siendo θ el rumbo de la embarcación, F_Q es el campo medido en el punto Q y C_0, C_1, C_2, S_1 y S_2 son los coeficientes a calcular que dependen de las propiedades magnéticas, geometría y la posición del magnetómetro en el punto Q.

Para emplear la ecuación de Bullard & Mason. (1961), el registro magnético marino es adquirido a lo largo de un levantamiento circular para cubrir los 360° de posibles rumbos,

referido como círculo de calibración y que debiese de ser llevado a cabo en una zona magnéticamente baja, en un horario nocturno donde exista la menor influencia por variaciones diurnas. La campaña de Perdido 2 no realizó el círculo de calibración (Figura 14), por lo que se utiliza el círculo de calibración de la campaña de Sigsbee11 que realizado en 2008 abordo del BO Justo Sierra en el Golfo de México.

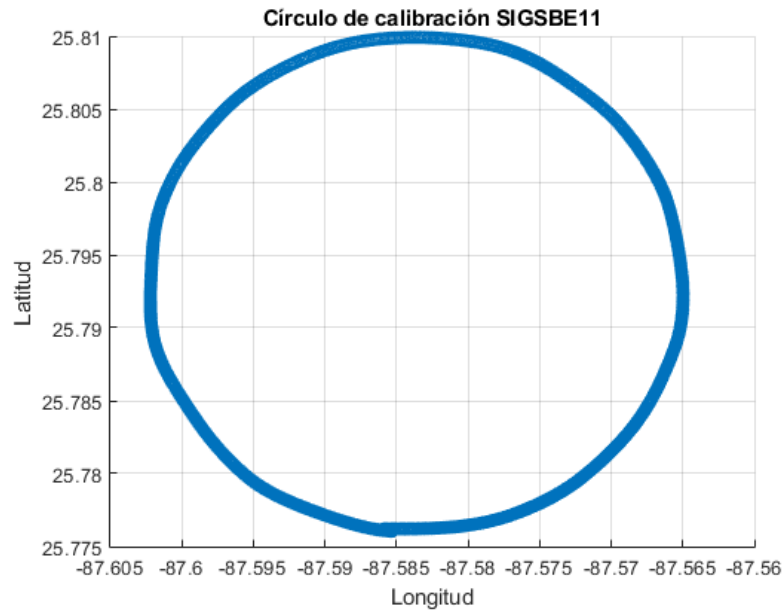


Figura 14. Círculo de calibración de la campaña oceanográfica de Sigsbee 11 en el Golfo de México.

Con los registros del círculo de calibración de Sigsbee11, los coeficientes de la ecuación de Bullard & Mason (1961) es utilizada y empleando el método de mínimos cuadrados para calcular los valores de corrección por rumbo del buque. Los coeficientes del círculo de calibración quedaron así:

C_0	C_1	C_2	S_1	S_2
4.845	1.217	0.757	-3.671	0.118

Tabla 1. Coeficientes resultantes de la ecuación de Bullard & Mason, (1961) con los datos registrados del círculo de calibración de la campaña Sigsbee 11.

3.3.4. Corrección por Filtro Direccional

En caso de que la anomalía magnética reducida aun presente el patrón de la geometría del levantamiento geofísico llevado a cabo, un filtro direccional podrá ser aplicado a los valores de la anomalía para reducir el efecto direccional del levantamiento. Regularmente este filtrado lineal puede hacerse con un el filtro ($f-k$). El filtro está fundamentado al aplicar la transformada de Fourier a la señal adquirida. Este tipo de filtro resulta muy eficaz en la eliminación de ruido coherente que sigue una tendencia direccional. Aplicando este filtro a los valores reducidos por rumbo en el espacio-frecuencia, con dirección de 27° y calculando la pendiente de la dirección dada por el rumbo de la adquisición, resultando una pendiente de 2.1 y en el dominio de las frecuencias la inversa de la pendiente es de 0.46. De esta manera el filtro corrige los valores de este efecto por el rumbo.

4. Resultados del procesado

Al graficar los datos crudos de la población, un alineamiento de los datos en crudo es observado en la carta magnética en dirección a las líneas de adquisición del barco (Figura 15), en donde la ondulación es visualmente mayor en la región de menor profundidad debido a la alta densidad de datos que por el espaciamiento menor entre perfiles. Para la interpolación de datos en las cartas magnéticas, las mallas de valores fueron calculadas usando Matlab (*MathWorks*), con un tamaño de celda 0.001 para obtener un suavizado más fino. A continuación, se muestran los resultados de las correcciones realizadas.

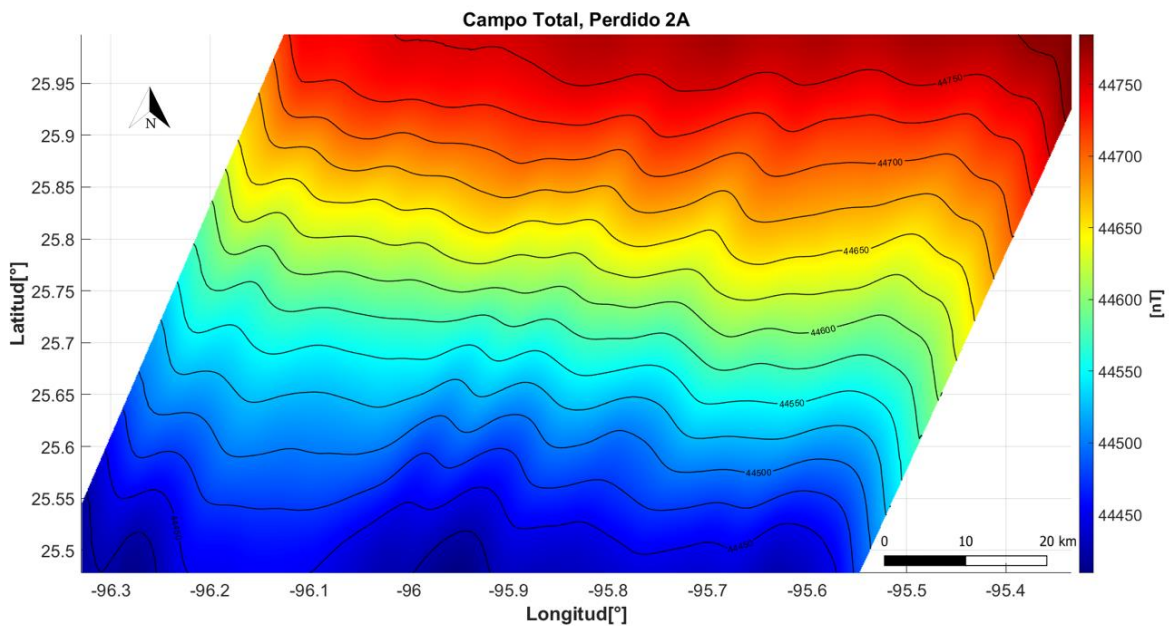


Figura 15. Carta magnética de campo total en el polígono P2A.

La carta en la (Figura 16) corresponde al resultado por la reducción de IGRF, donde se hace una sustracción del valor dado por la fórmula IGRF de generación 13 para cada medición obtenida a lo largo de cada uno de los perfiles. Esta carta muestra una regionalización de las anomalías magnéticas en tres zonas: correspondiendo, 1) valores altos de 0 a -10 nT en la zona NE, 2) la zona central con valores bajos entre -20 a -40 nT y con una tendencia NW-SE, y por último, 3) otro alto circular con valores entre -10 a 0 nT en el sector de la esquina SW.

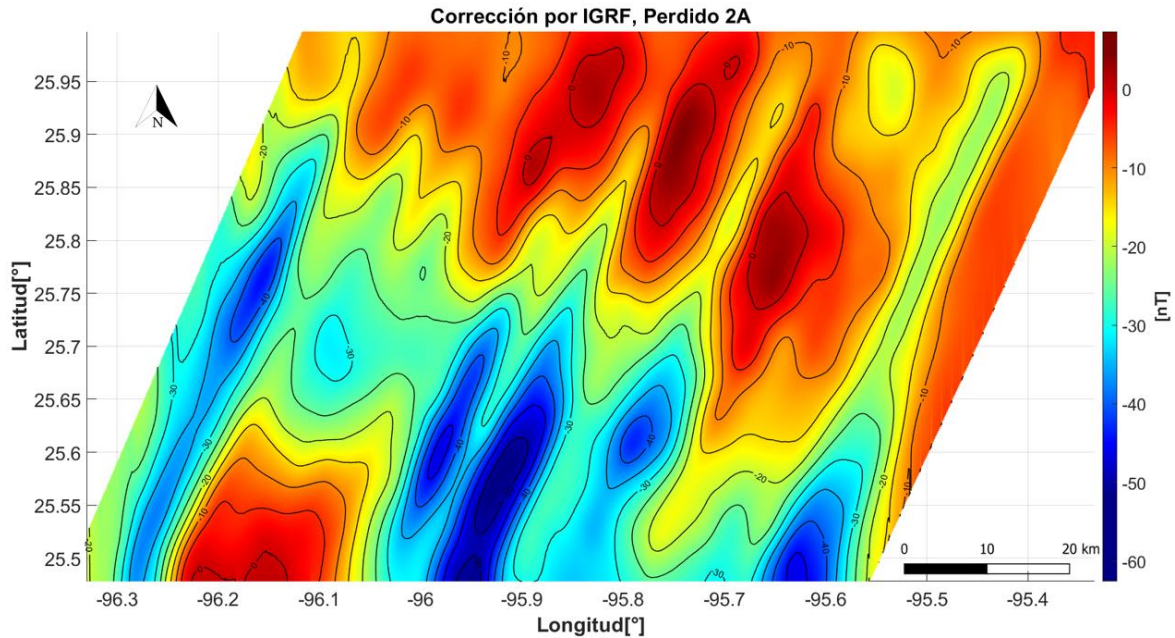


Figura 16. Carta de las anomalías magnéticas en el polígono P2A. Las anomalías son obtenidas solo aplicando la reducción por IGRF.

La Figura 17 muestra la siguiente reducción por variación diurna, donde las geometrías de las anomalías principian a definirse separándose los altos y bajos magnéticos para las tres zonas. Sin embargo, la huella del levantamiento de adquisición aún persiste. Para eliminar este artefacto (huella de levantamiento) en los datos de magnetometría marina, la malla de valores es corregida por el efecto del rumbo de la embarcación a lo largo de cada uno de los 25 perfiles, empleando el método dado por Bullard & Mason (1961). Tomando en cuenta que las direcciones de los transectos tuvieron rumbos a 27° y a 243° , aplicando una reducción aproximada a los ± 5 nT, aun así, perduró la huella de adquisición (Figura 18).

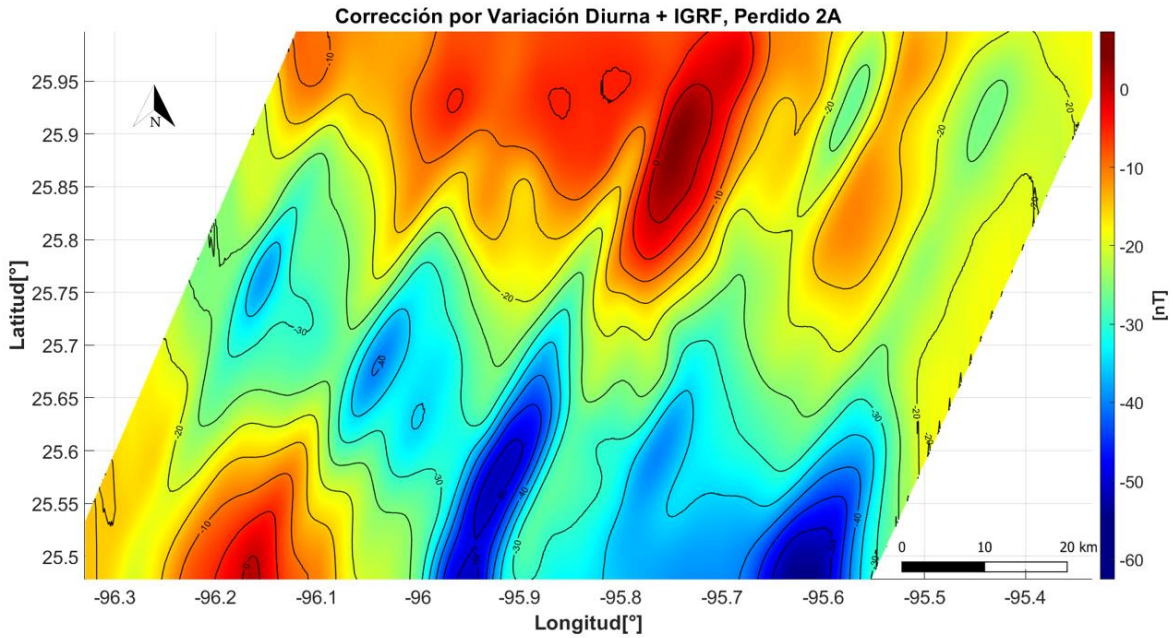


Figura 17. Anomalías magnéticas reducida por Variación Diurna del Polígono 2A.

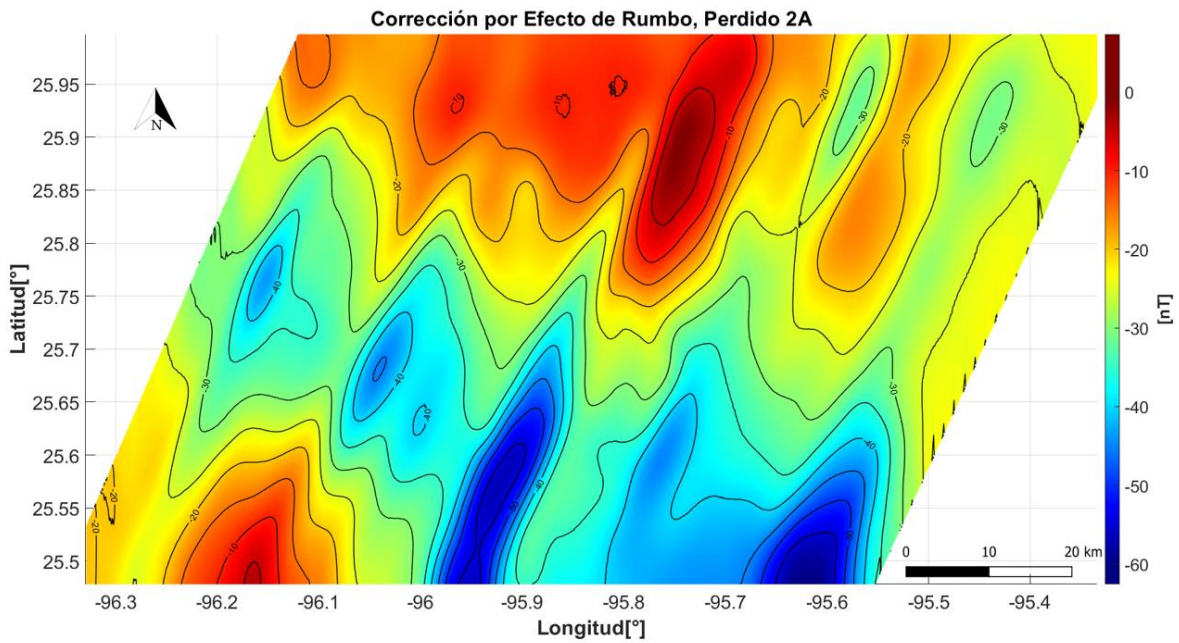


Figura 18. Anomalías magnéticas corregida por rumbo.

Para eliminar el efecto de la huella del levantamiento, la malla magnética reducida por rumbo es corregida al aplicar un filtro direccional en el campo f-k, eliminando las frecuencias próximas a 0.45 en el dominio de f-k. Figura 19 muestra que la huella de adquisición es

reducida y mejora las geometrías de las anomalías de manera más puntual, resaltando las 3 zonas de altos y bajos en las anomalías magnéticas con rangos entre -60 nT a 10 nT. Las tres zonas tienen valores: 1) la zona norte con un alto magnético (entre 25.7°N y 25.9° N, 96.3°W y 95.6°W) que oscila entre -25 [nT] y 10 [nT]; 2) la zona central con un bajo magnético transversal con tendencia NW-SE y de valores -30 nT a -50 nT; y 3) la zona con valores altos entre -25 nT a 10 nT en la esquina SW del bloque P2A (25.5°N a 25.6°N, y -96.3°W a 96.1°W).

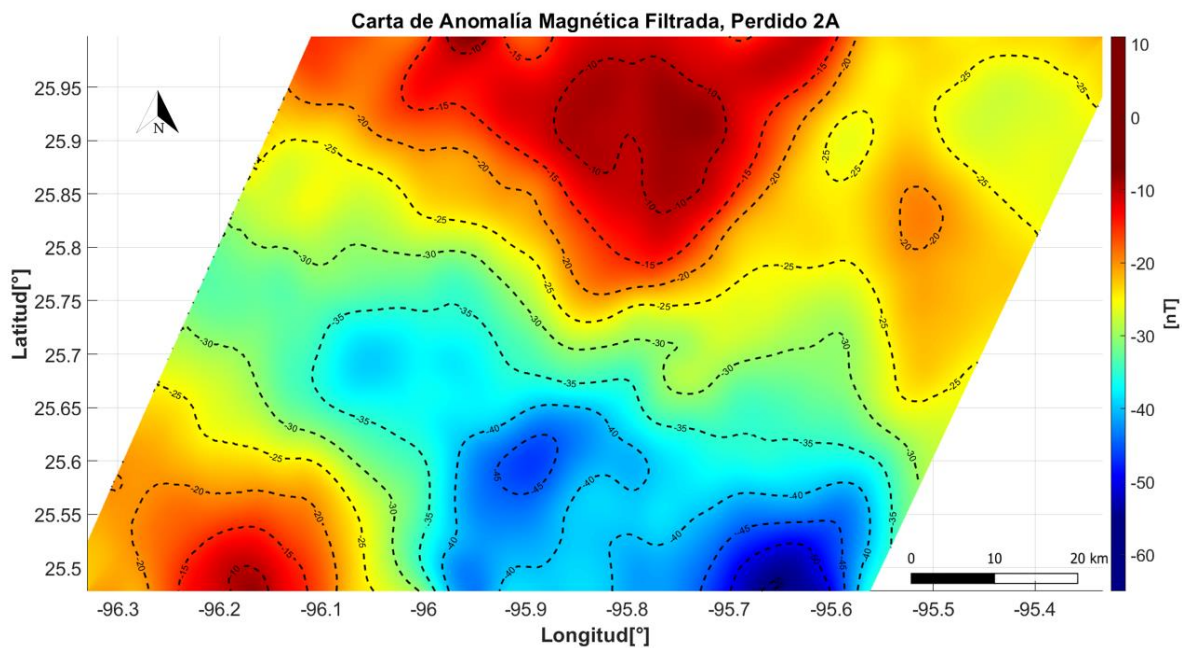


Figura 19. Anomalías magnéticas corregida con un filtro direccional.

4.1. Anomalías Magnéticas y Fisiografía del Relieve

Durante la campaña Perdido 2, datos de batimetría fueron también adquiridos simultáneamente a lo largo de los transectos de los perfiles magnéticos. La adquisición de datos batimétricos con la ecosonda multihaz contribuyó a tener un reconocimiento a detalle del relieve del lecho marino en el Polígono P-2A como parte del proyecto que realizó el Laboratorio Universitario de Cartografía Oceánica (LUCO) en la UNAM.

De la batimetría procesada por el LUCO (Figura 20), la fisiografía del relieve en el polígono P-2A presenta 3 características dominantes, que son:

1) en el sector NE, la fisiografía profunda del lecho presenta un relieve deformado en una zona extensa por diapiros de salinos asociados a la apertura de la cuenca del Golfo de México y similares al relieve exhibido en las regiones Norte y Sur del Golfo de México. Parte de este sector (con profundidades entre los 800 m y 2,200 m) forma parte del talud continental, con tendencia de un escarpe pronunciado y se extiende hacia la planicie abisal de Sigsbee;

2) en la zona central, tres mini cuencas semicirculares forman un lineamiento transversal al bloque con orientación NW-SE con profundidades entre 1,000 m y 1,200 m. Estas cuencas son depresiones en el piso del golfo, con casi 200 m de caída desde sus bordes hasta sus lechos. Sus formas pudieran ser producto del movimiento de cuerpos de evaporitas y arcillas sobre el basamento inicial de la cuenca. El extremo norte del lineamiento es terminado por el Escarpe de Perdido; y

3) al SW en la zona inferior del bloque, la fisiografía del relieve tiene una textura de *hummocking* (pliegues superficiales en forma de arrugas) sobre un lecho con una ligera pendiente, de profundidades entre 500 m y 1100 m. Esta textura del relieve en el lecho posiblemente sea producto de la carga de sedimentos depositados en el margen de la plataforma continental.

Al montar la anomalía magnética (Figura 20) sobre el relieve batimétrico con el objetivo de establecer una relación entre el campo magnético observado y los rasgos del relieve marino, se tiene:

En la parte NE del polígono P2A, la anomalía magnética exhibe un gradiente magnético con un alto de -5 nT y descendiendo hacia el este. Este gradiente ocurre donde hay un cambio de elevación del relieve marino, de un lecho casi plano a 900 m a un escarpe pronunciado hasta los 1,800 m en una distancia de 4 km, donde cambia el ángulo de la pendiente a menores grados (15°) con tendencia hacia la zona de la planicie abisal de Sigsbee.

En la zona central, la zona de los bajos magnéticos con orientación NW-SE esta alineada las tres mini cuencas y con un incremento gradual en el valor de la anomalía hacia el NW en donde el relieve yace en la parte alta del talud.

En la región SW de bloque, el alto magnético presente se encuentra en la parte superior del inicio de talud hacia mar adentro, y donde el relieve exhibe una textura *hummocking*, posiblemente resultado de la carga de sedimentos en la plataforma continental.

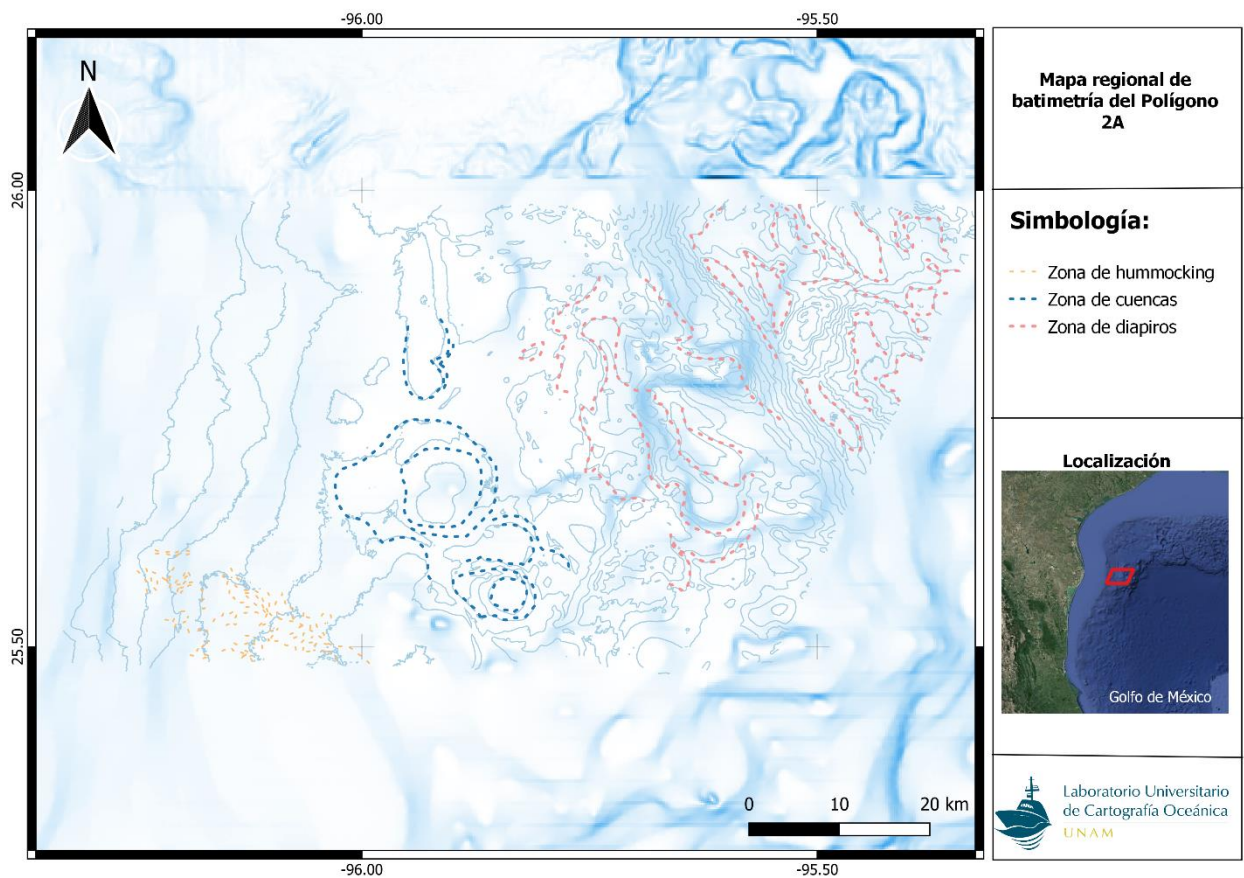


Figura 20. Relieve marino en el Polígono P2A. El relieve del lecho marino es caracterizado en tres zonas, Zona de Hummocking (en amarillo), Zona de cuencas (en azul) y zona de diapiros (en rosa). Mapa base del GMRT.

4.2. Análisis entre anomalías magnéticas en la zona del Cinturón Plegado de Perdido

El levantamiento magnético en el Polígono P2A presenta una resolución más fina de las anomalías magnéticas dentro de la Provincia de Salina del Bravo. Pindell et al. (2016) integro un mapa regional de las anomalías magnéticas en el sector mexicano del Golfo de México (Figura 21) usando datos de PEMEX (aun no disponibles). A grandes rasgos, las anomalías estimadas en este polígono están dentro de la anomalía que Pindell et al. (2016) definió. Esta anomalía corresponde a un límite rectilíneo y el patrón no-rectilíneo (*boundary rectilinear and non-rectilinear pattern in Perdido*) en Perdido como el extremo occidental del paleo-rift del Golfo de México.

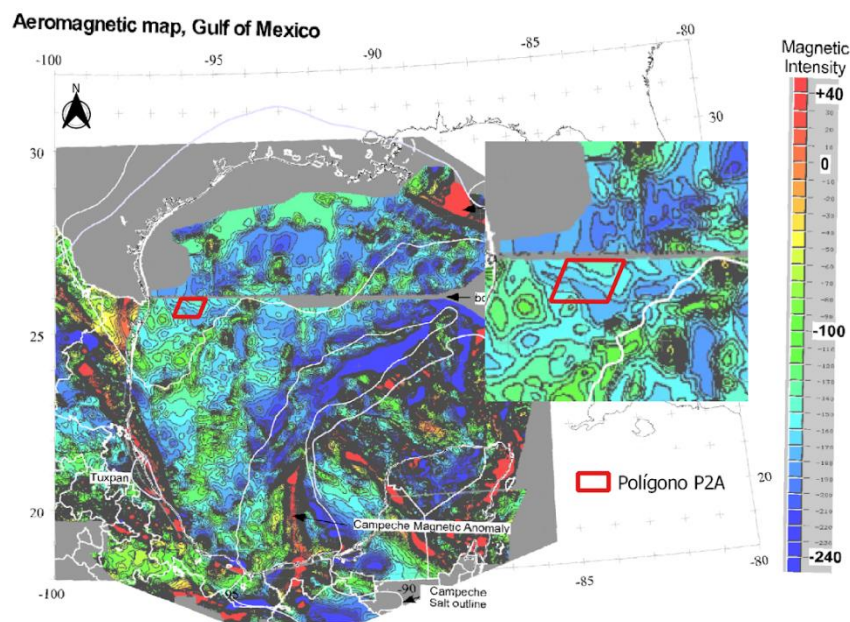


Figura 21. Ubicación del polígono P 2A en el mapa aero-magnético del Golfo de México. En el recuadro de la derecha, la ubicación del polígono P2A es señalado. Modificado de Pindell et al. (2016)

Para realizar una comparación más precisa, recurrimos al EMAG2v3 (*Earth Magnetic Anomaly Grid*, https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.geophysical_models:EMAG2_V3) publicada por Meyer et al. (2017). Esta base de datos en la NOAA es una recopilación de registros magnéticos realizados abordo de buques oceanográficos y aviones. La malla (*Grid*) tienen una resolución de 2 minutos de arco y formando una cuadrícula a nivel del mar.

Comparando las anomalías en P-2A sobre las anomalías regionales, (Figura 22) presenta la anomalía magnética procesada en Perdido sobre la carta magnética del EMAG2v3. Esta comparación muestra que hay al menos cuatro zonas son correlacionable entre sí y las cuales son:

En el sector norte del polígono, la zona I presenta un alto magnético que se extiende hacia el noreste, entre -15 nT a 10 nT. Esta anomalía sobre puesta a la regional mantiene una geometría similar y valores dentro del mismo rango. Hacia el sur, los valores disminuyen gradualmente y se observa que en parte forma una zona de anomalía dipolar.

La anomalía en zona II corresponde a valores magnéticos bajos de una anomalía que coinciden con los valores bajos del regional (-50 nT a -45 nT). Los cuales forman parte de una anomalía amplia que abarca gran parte del sector sureste en el polígono, correspondiente a la zona de mini-cuencas que exhibe el relieve batimétrico en el talud. Esta anomalía tiene una tendencia a disminuir transversalmente en dirección hacia el noroeste.

Mientras que la anomalía de la zona III en la esquina SW del polígono exhibe valores altos (-10nT a -15 nT) que siguen la tendencia de la anomalía regional hacia el suroeste. Al igual que la zona II, las anomalías presentan un dipolo magnético, alineado hacia el sur SE.

En términos generales, al contrastar los datos de magnetometría marina obtenidos durante la campaña Perdido 2 con las cartas magnéticas regional de la NOAA evidencia un mayor detalle espacial en las anomalías. Esto resulta principalmente a causa que la adquisición de datos de magnetometría marina se realizan a nivel del mar, lo que sitúa las mediciones en una cercanía a las fuentes generadoras del campo anómalo en comparación con los estudios aeromagnéticos y satelitales que fueron realizados a altitudes mayores sobre el nivel del mar; además, la densidad de las muestras de magnetometría marina obtenidas en Perdido 2 supera la reportada por los estudios compilados por la NOAA, permitiendo así una mejor definición de las geometrías de las anomalías magnéticas.

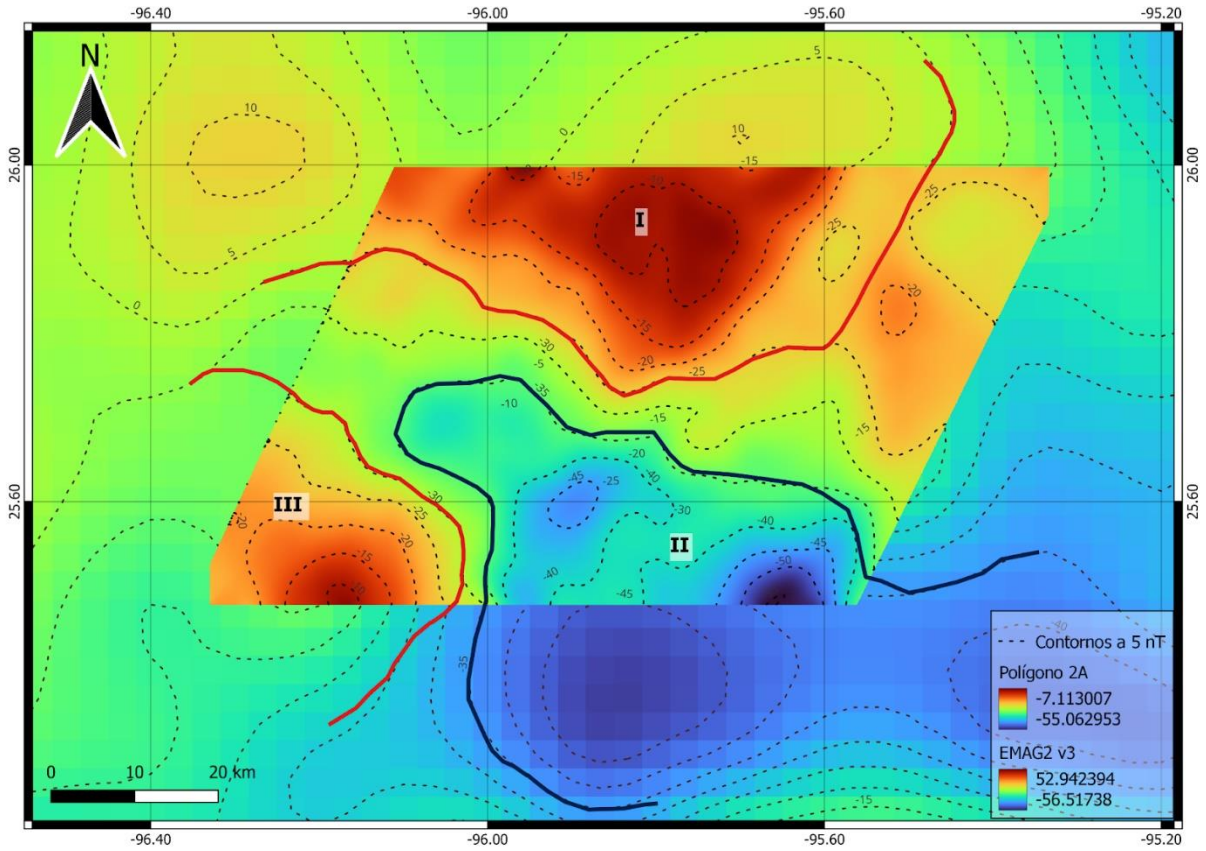


Figura 22. Anomalías magnéticas del P2A superpuesta en la carta regional del EMAG2v3. Donde las zonas delimitadas en rojo (I y III) corresponden a altos magnéticos y la zona delimitada en azul (II) corresponde al bajo magnético.

4.3. Relación entre la anomalía magnética de polígono P2A y el COB (*Continent-ocean boundary*)

La geometría del COB en el Golfo de México ha sido descrita como la zona de transicional entre la corteza oceánica y continental. Su límite hacia la corteza oceánica comúnmente es delineado el interior de la cuenca donde se observan anomalías magnéticas y gravimétricas que han sido interpretadas. Sin embargo, esto es claramente una simplificación el marcarla como líneas, como lo señala Eagles et al. (2015). No obstante, esta aproximación de la geometría en línea de su contorno sigue siendo útil, especialmente para comprender el origen tectónico del Golfo de México y su evolución.

La mayoría de los estudiosos del origen del golfo están de acuerdo en que el basamento en el Golfo de México posee zonas de corteza continental y oceánica debajo de los grandes espesores de sedimentos que rellena la cuenca. Bajo este esquema tectónico, el presente trabajo proporciona un mayor detalle de la geometría del COB en el margen occidental del golfo, en particular en los sectores de las provincias geológicas de las Salinas del Bravo, y del Cinturón Plegado de Perdido.

Para nuestra propuesta (Figura 23) correspondiente límite del COB dentro del polígono P2A, examinamos dos propuestas: 1) Curry et al. (2018) establece una zona de transición basada en perfiles de sísmica de reflexión y además de modelos cinemáticos, donde describen los posibles procesos de *rifting* que dieron lugar a la cuenca, señalando que este límite se encuentra más hacia el continente dentro de la zona del talud y a profundidades superiores a los 2600 metros. 2) Mientras que Bird et al. (2005) propone que este límite se encuentra más hacia el centro de la cuenca, basando su interpretación en datos de reflexión sísmica, gravedad y datos magnéticos, así como reconstrucciones cinemáticas realizadas por Sawyer et al. (1991). Además, estos autores señalan que la geometría del COB esta sobre la isobata de 3,000 m.

Con base a estos límites regionales propuestos y en mayor detalle dado los valores magnéticos obtenidos en P-2A, la geometría del COB (Figura 24) es refinado entre ambas fronteras propuestas de la transición, pasando entre ambas, jalándose hacia el continente y siguiendo las formas de los dos altos y el bajo de valores en la anomalía magnética que pudiese estar asociado a la parte extendida (hacia tierra adentro) de la formación de corteza

y situarse en la zona entre las isobatas de 2,600 y 2,800 m. El lineamiento del COB en P-2A está acorde a la zona de anomalías de bajos gravimétricos con una tendencia hacia el noreste como se observa en los datos de gravedad de Sandwell et al. (2014).

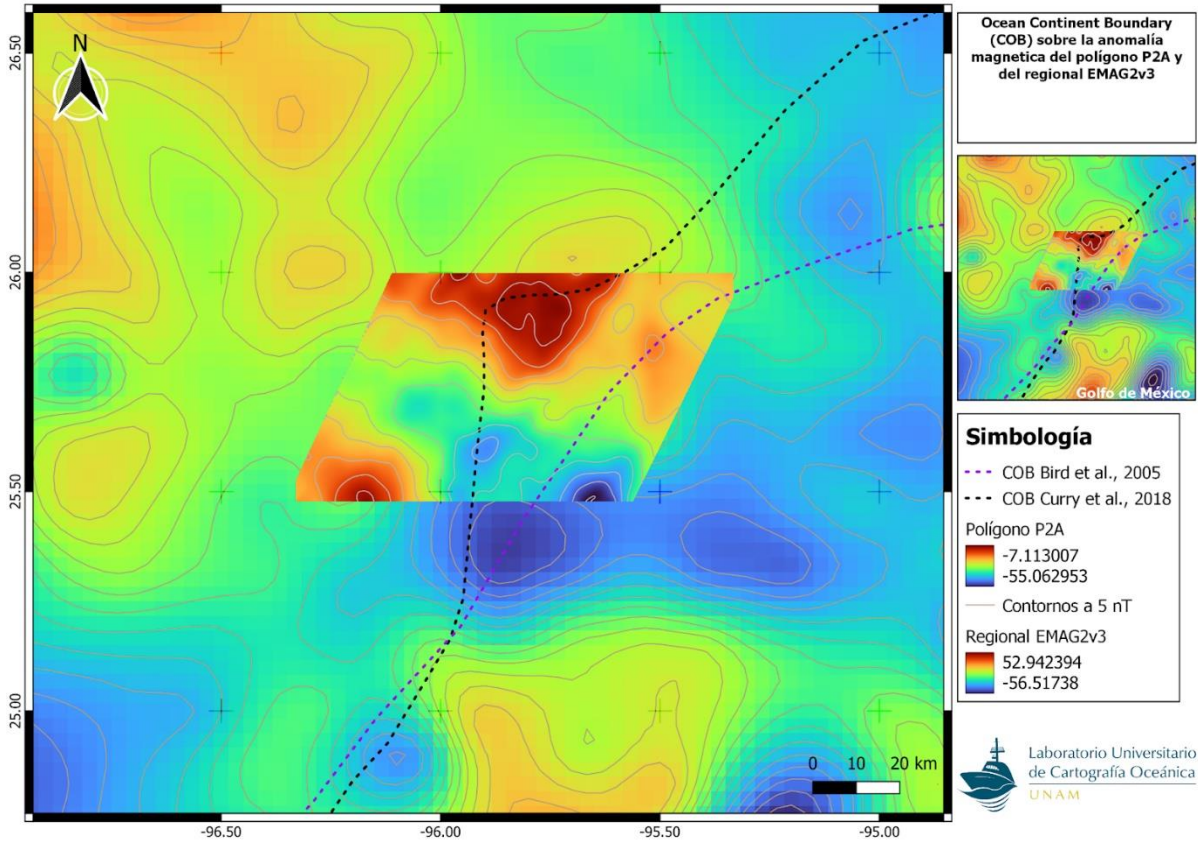


Figura 23. Anomalías magnéticas del polígono P2A sobrepuestas en el regional del EMAG2v3. En negro con las líneas punteadas es la propuesta de COB de Curry et al., (2018) y con morado en líneas punteadas en morado es la propuesta de Bird et al., (2005)

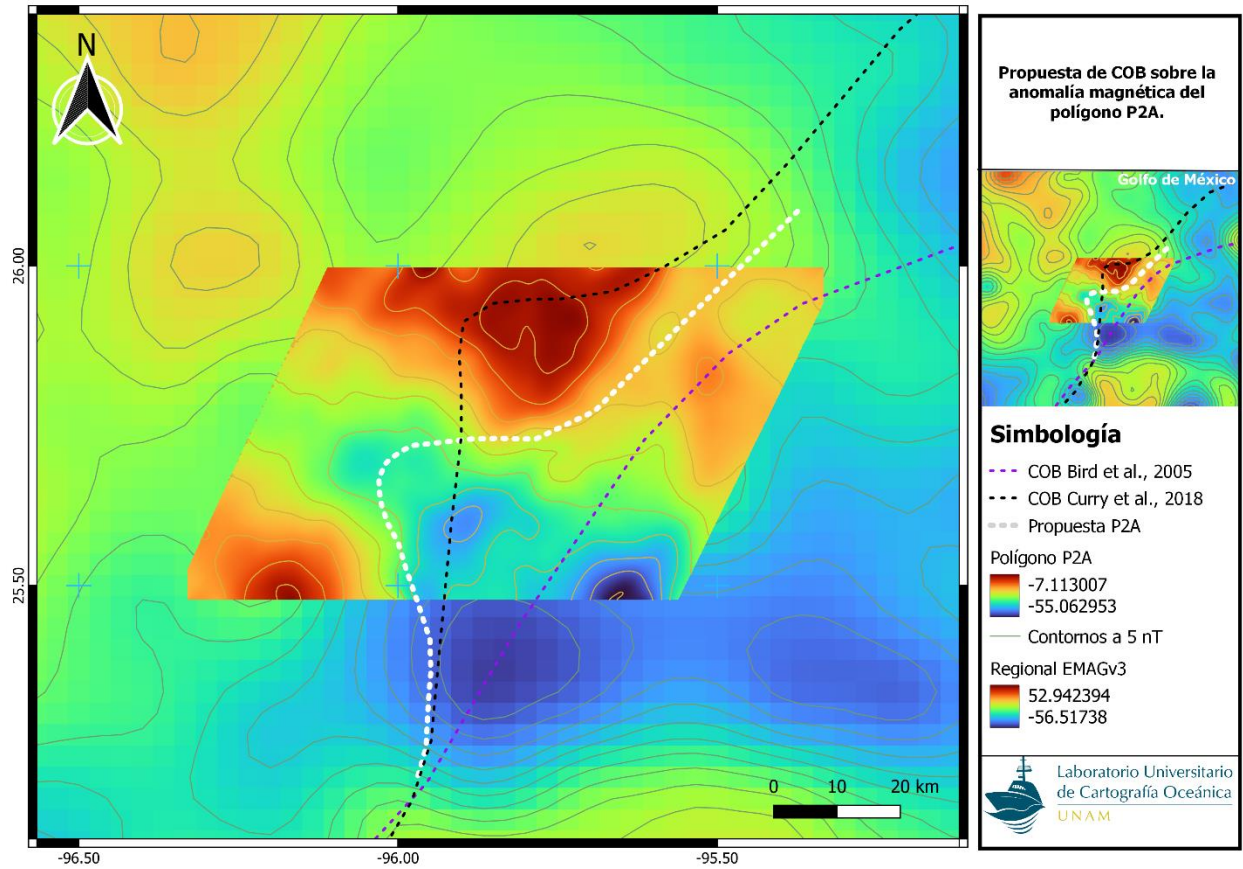


Figura 24. Anomalías magnéticas del polígono P2A sobrepuesta en el regional del EMAG2v3. En negro con las líneas punteadas la propuesta de COB de Curry et al., (2018), con morado en líneas punteadas en morado la propuesta de Bird et al., (2005) y en blanco la propuesto en esta tesis.

5. Conclusiones

Este estudio ha explorado en detalle el magnetismo del polígono P-2A en la provincia fisiográfica de Salina del Bravo y el Cinturón Plegado de Perdido, en el margen occidental del Golfo de México. Los datos recopilados durante la campaña Perdido 2 son utilizados para generar mapas de la anomalía magnética en el Polígono P2A. Mediante la reducción standard de los valores magnéticos y la aplicación de un filtro direccional, tres áreas de mayor interés son identificadas dentro del polígono. 1) En la zona norte, un alto magnético de -10 nT domina; 2) mientras que en la región NW-SE, un bajo magnético transversal cruza casi completamente el polígono, en dirección WNW-EES y sus mínimos entre -35 nT y -45 nT. 3) En el margen SW, otro alto magnético de menor escala domina el área con un máximo de -10 nT.

Al relacionar estos datos con la batimetría y el regional magnético en el margen occidental de la cuenca del Golfo, el límite entre la zona transicional continental y la corteza oceánica (COB) propuestos por Curry et al. (2018) y Bird et al. (2005) son refinados en esta tesis por tener una mayor resolución magnética. La refinación del nuevo COB proporciona una mayor comprensión hasta donde pudiese alcanzar el basamento cortical asociado a la apertura del Golfo de México.

Referencias

- Bankey, V., Cuevas, A., Daniels, D., Finn, C., Hernandez, I., Hill, P., Kuks, R., & Miles, W. (2002). *Magnetic anomaly map of North America*. <https://doi.org/10.3133/70211067>
- Bird, D. E., Burke, K., Hall, S. A., & Casey, J. F. (2005). Gulf of Mexico tectonic history: Hotspot tracks, crustal boundaries, and early salt distribution. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 89(3), 311–328. <https://doi.org/10.1306/10280404026>
- Bouysson, P. (2014). *Geological map of the world* (3rd ed.). Commission For The Geological Map Of the World.
- Bullard, E. C., & Mason, R. G. (1961). The magnetic field astern of a ship. *Deep Sea Research (1953)*, 8(1), 20–27. [https://doi.org/10.1016/0146-6313\(61\)90012-0](https://doi.org/10.1016/0146-6313(61)90012-0)
- Christeson, G. L., Van Avendonk, H. J. A., Norton, I. O., Snedden, J. W., Eddy, D. R., Karner, G. D., & Johnson, C. A. (2014). Deep crustal structure in the eastern Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(9), 6782–6801. <https://doi.org/10.1002/2014JB011045>
- Comisión Nacional de Hidrocarburos. (2015). *Atlas Aguas Profundas Norte*. https://rondasmexico.gob.mx/media/1048/atlas_cpp.pdf
- Curry, M. A. E., Peel, F. J., Hudec, M. R., & Norton, I. O. (2018). Extensional models for the development of passive-margin salt basins, with application to the Gulf of Mexico. *Basin Research*, 30(6), 1180–1199. <https://doi.org/10.1111/bre.12299>
- David, M., Rocha, O., Carlos, E., Caraveo, A., Efraín Méndez Hernández, M., Román, E., & Flores, H. (2013). Los métodos potenciales como evidencia geofísica de la evolución tectónica del norte del Golfo de México. *Ingeniería Petrolera*, 53(2), 89–100.
- Dobrin, M., & Savit, C. (1988). MAGNETIC PROSPECTING: FUNDAMENTAL PRINCIPLES AND INSTRUMENTS. In *Introduction to Geophysical Prospecting* (4th ed., pp. 633–675).
- Eagles, G., Pérez-Díaz, L., & Scarselli, N. (2015). Getting over continent ocean boundaries. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 151, pp. 244–265). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.10.009>
- Ewing, T. E., & Galloway, W. E. (2019). Evolution of the northern gulf of Mexico sedimentary basin. In *The Sedimentary Basins of the United States and Canada* (pp. 627–694). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63895-3.00016-4>
- Filina, I., Austin, J., Doré, T., Johnson, E., Minguez, D., Norton, I., Snedden, J., & Stern, R. J. (2022). Opening of the Gulf of Mexico: What we know, what questions remain, and how we might answer them. In *Tectonophysics* (Vol. 822). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229150>

- Hemant, K., & Maus, S. (2005). Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(12), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2005JB003837>
- Hinze, W., Von Frese, R., & Saad, A. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration Principles, Practices, and Applications*. Cambridge University Press.
- Hudec, M. R., Norton, I. O., Jackson, M. P. A., & Peel, F. J. (2013). Jurassic evolution of the Gulf of Mexico salt basin. *AAPG Bulletin*, 97(10), 1683–1710. <https://doi.org/10.1306/04011312073>
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* (3rd ed.). Blackwell Science.
- Meyer, B., Chulliat, A., & Saltus, R. (2017). Derivation and Error Analysis of the Earth Magnetic Anomaly Grid at 2 arc min Resolution Version 3 (EMAG2v3). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(12), 4522–4537. <https://doi.org/10.1002/2017GC007280>
- Padilla Y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 19–42.
- Pindell, J. L. (1994). Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean. In *Caribbean Geology: An Introduction* (pp. 13–39). Publishers Association/University of the West Indies Press.
- Pindell, J., Miranda C, Cerón, A., & Hernandez, L. (2016). Aeromagnetic Map Constrains Jurassic-Early Cretaceous Synrift, Break Up, and Rotational Seafloor Spreading History in the Gulf of Mexico. In *Mesozoic of the Gulf Rim and Beyond: New Progress in Science and Exploration of the Gulf of Mexico Basin* (pp. 123–153).
- Quinn, R., Cooper, A. J. A. G., & Williams, B. (2000). Marine geophysical investigation of the inshore coastal waters of Northern Ireland. *International Journal of Nautical Archaeology*, 29(2), 294–298. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2000.tb01458.x>
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Wiley-Blackwell. www.wiley.com/go/reynolds/introduction2e
- Salomón-Mora, L.E., 2013, Structure and Tectonics of the Salt and Shale Provinces, Western Gulf of Mexico: Ph.D. Thesis Dissertation, University of Aberdeen, United Kingdom, 476 pp.
- Salvador, A. (1991). Origin and development of the Gulf of Mexico basin. In *The Geology of North América : Vol. J* (pp. 389–444). http://pubs.geoscienceworld.org/books/book/chapter-pdf/3733485/9780813754598_ch14.pdf

- Sandwell, D. T., Müller, R. D., Smith, W. H. F., Garcia, E., & Francis, R. (2014). New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346(6205), 65–67. <https://doi.org/10.1126/science.1258213>
- Sawyer, D. S., Buffler, R. T., & Pilger, R. H. (1991). The Gulf of Mexico Basin The. In *The Geology of North America: Vol. J*. Geological Society of America. http://pubs.geoscienceworld.org/books/book/chapter-pdf/3733464/9780813754598_ch04.pdf
- Schouten, H., & Klitgord, K. D. (1994). Mechanistic solutions to the opening of the Gulf of Mexico. *Geology*, 22(6), 507–510. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0507:MSTT00>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0507:MSTT00>2.3.CO;2)
- Seton, M., Müller, R. D., Zahirovic, S., Gaina, C., Torsvik, T., Shephard, G., Talsma, A., Gurnis, M., Turner, M., Maus, S., & Chandler, M. (2012). Global continental and ocean basin reconstructions since 200Ma. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 113, Issues 3–4, pp. 212–270). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.03.002>
- Sharma, V. (1986). *Geophysical Methods in Geology* (2nd ed., Vol. 12). Elsevier.
- Stern, R. J., & Dickinson, W. R. (2010). The Gulf of Mexico is a Jurassic backarc basin. In *Geosphere* (Vol. 6, Issue 6, pp. 739–754). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/GES00585.1>
- Baranov, V. (1957). A New Method For Interpretation Of Aeromagnetic Maps: Pseudo-Gravimetric Anomalies. *Geophysics*, 22, 359–383.
- Viniegra, O. F. (1971). Age and Evolution of Salt Basins of Southeastern Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 55, 478–494. <https://doi.org/10.1306/5D25CF6B-16C1-11D7-8645000102C1865DCorpus>
- Worzel, J. L., Bryant, W., Beall, A., Capo, R., Dickinson, K., Foreman, H., Laury, R., McNeely, B., & Smith, L. (1973). *Initial reports of the deep sea drilling project*.

ANEXO A

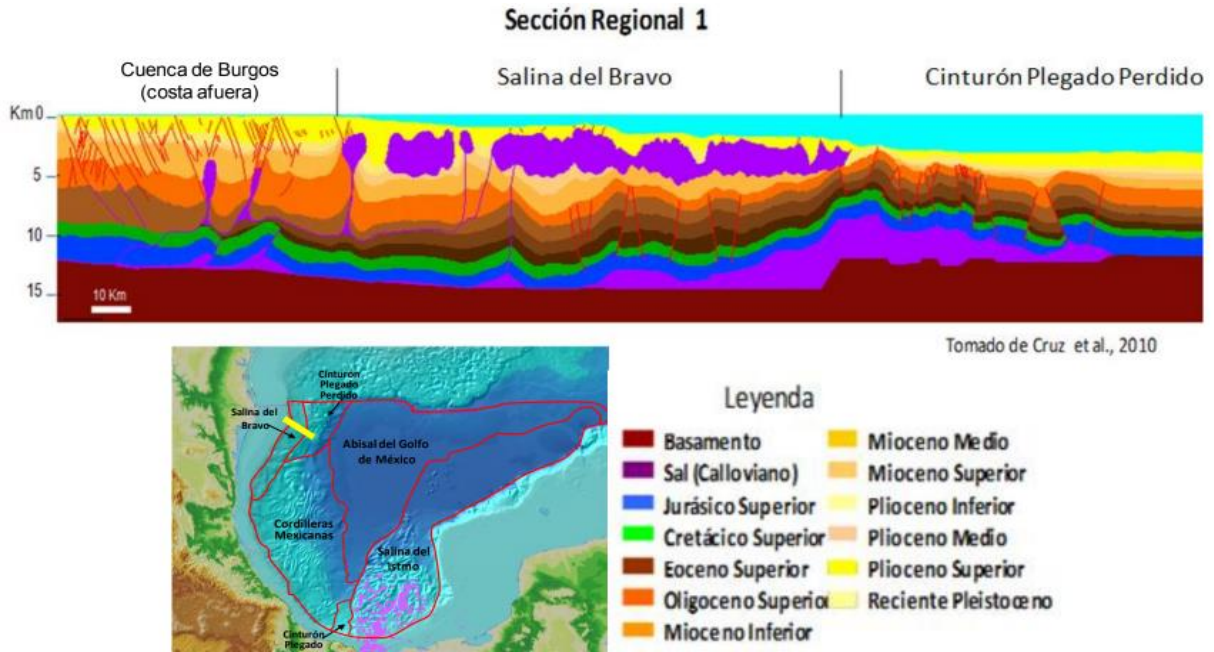


Figura A-1. Sección geológica que cruza las provincias de Salina del Bravo y el Cinturón Plegado de Perdido, tomado de Comisión Nacional de Hidrocarburos (2015).

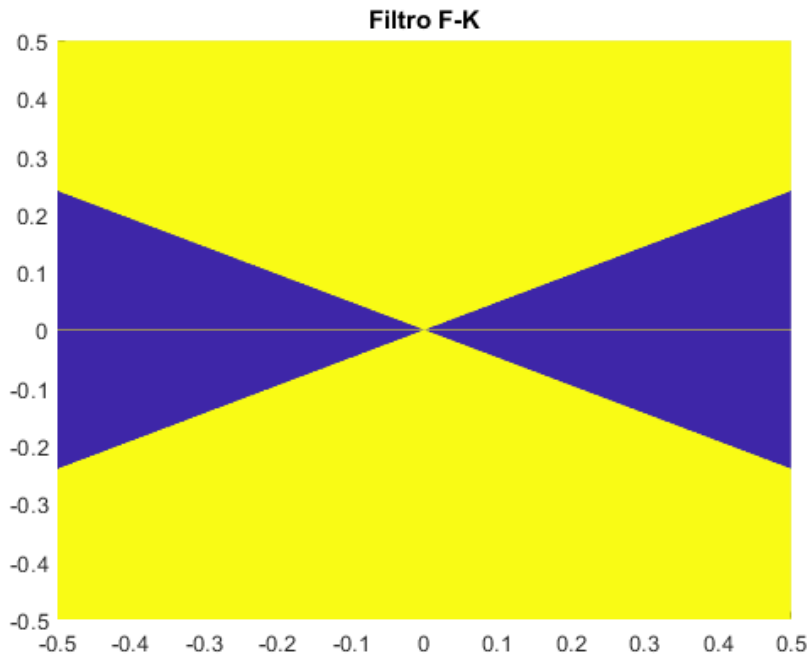


Figura A-2. Filtro ideal para atenuar la huella de adquisición. Banda de rechazo (azul), Banda de aceptación (amarillo).

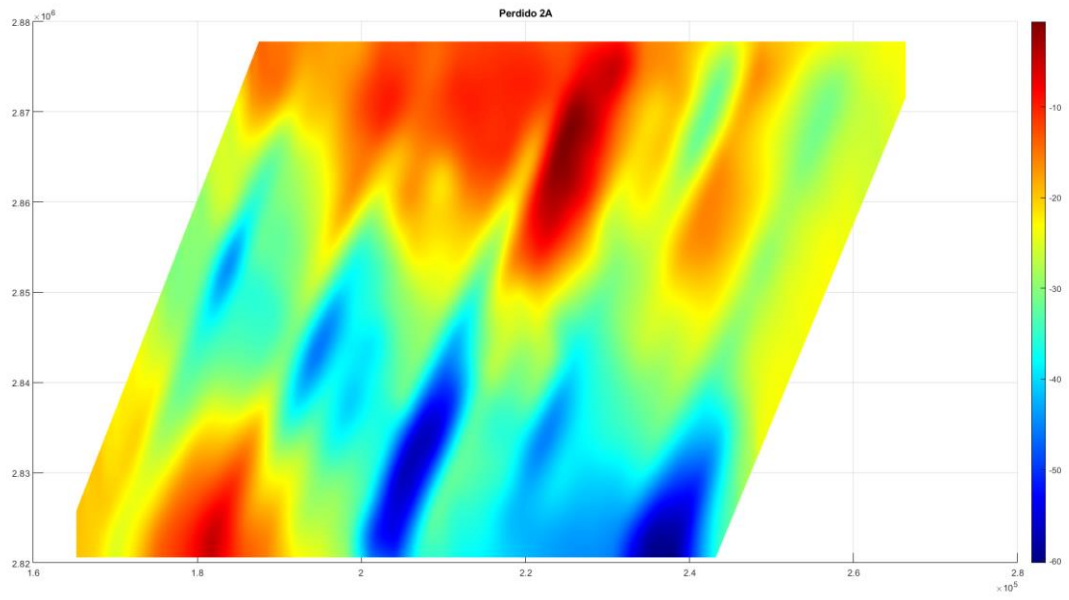


Figura A-3. Anomalía magnética del polígono 2A sin filtro f-k

ANEXO B

La base de datos del Polígono Perdido 2A, resguardada en el Laboratorio Universitario de Cartografía Oceánica, consiste de 3 carpetas que contienen la información respecto al levantamiento magnético llevado a cabo por el BO Justo Sierra en Julio del 2016. Cada carpeta contiene las bitácoras de notas a bordo del buque, registros magnéticos y rutas de navegación de la campaña, y cuyos archivos están ordenados conforme la secuencia de adquisición. Los registros magnéticos están contenidos en archivos con extensión .INT, donde cada dato es desplegado con los siguientes parámetros: Fecha, Hora GMT, numero de línea, profundidad del instrumento, intensidad de la señal, medición magnética de campo total, coordenadas geográficas decimales del magnetómetro (MAG_LON/LAT), coordenadas geográficas decimales del buque (GPS_LON/LAT), coordenadas geográficas decimales de un segundo magnetómetro hipotético paralelo al utilizado (SHIFT_LON/LAT) y distancia del magnetómetro al buque en metros (Layback). El registro magnético completo está contenido en seis archivos .INT que abarcan el periodo de adquisición, descritos en la Tabla de abajo:

Archivo	Fecha [Inicio-Final]	Hora GMT [Inicio - Final]	Tamaño en Disco
PERDIDO2A_SURVEY1	06/07/2016 - 06/07/2016	02:10:37 – 16:06:03	3.04 MB
PERDIDO2A_SURVEY2	06/07/2016 - 07/07/2016	21:33:32 – 21:49:33	5.52 MB
PERDIDO2A_SURVEY3	07/07/2016 - 09/07/2016	22:12:20 – 08:20:53	7.76 MB
PERDIDO2A_SURVEY4	09/07/2016 - 09/07/2016	08:28:26 – 09:42:54	3.10 KB
PERDIDO2A_SURVEY5	09/07/2016 - 11/07/2016	09:56:14 – 08:54:39	10.4 MB
PERDIDO2A_SURVEY6A	11/07/2016 - 12/07/2016	09:49:30 – 04:10:46	4.14 MB

Estos archivos contienen la información de las 25 líneas del registro magnético. A continuación, en la Tabla de abajo, se despliega el número de datos adquiridos de cada línea magnética, y su secuencia de adquisición, de oeste a este (W-E).

#Línea	#Datos	Fecha [Inicio-Final]	Hora inicio [GMT]	Hora Término [GMT]
1	8151	06/07/16 - 06/07/16	07:10:37	11:42:16
2	7289	06/07/16 - 06/07/16	12:00:02	16:02:48
3	7058	06/07/16 - 06/07/16	17:10:50	14:06:32
4	7716	06/07/16 - 07/07/16	21:33:32	01:50:42
5	7335	07/07/16 - 07/07/16	02:08:40	06:13:18
6	9070	07/07/16 - 07/07/16	06:33:54	11:36:13
7	8208	07/07/16 - 07/07/16	11:57:31	16:31:05
8	8495	07/07/16 - 07/07/16	17:06:25	21:49:33
9	7509	07/07/16 - 08/07/16	22:12:20	02:22:36
10	7600	08/07/16 - 08/07/16	02:40:10	06:53:29
11	7476	08/07/16 - 08/07/16	07:15:21	11:24:31
12	7651	08/07/16 - 08/07/16	11:42:33	15:57:33
13	7689	08/07/16 - 08/07/16	16:14:49	20:31:05
14	7753	08/07/16 - 09/07/16	20:52:55	01:11:19
15	7476	09/07/16 - 09/07/16	01:27:59	05:37:09
16	8985	09/07/16 - 09/07/16	06:00:31	11:20:49
17	7898	09/07/16 - 09/07/16	11:46:33	16:09:49
18	8110	09/07/16 - 09/07/16	16:30:27	21:00:45
19	7856	09/07/16 - 10/07/16	21:27:31	01:49:21
20	7533	10/07/16 - 10/07/16	01:58:01	06:09:05
21	7953	10/07/16 - 10/07/16	06:33:03	10:58:07
22	8245	10/07/16 - 10/07/16	11:28:41	16:03:30
23	8395	10/07/16 - 10/07/16	16:38:26	21:18:14
24	7439	10/07/16 - 09/07/16	21:39:10	01:47:06
25	7599	11/07/16 - 11/07/16	02:04:00	06:11:00

La base de datos para esta tesis solo incluye 25 líneas de adquisición, invalidado seis líneas por su contenido ruidoso. Una vez aplicadas la organización de cada línea y efectuando la invalidación de registros magnéticos peculiares, el contenido de las correcciones y

reducciones en las 25 líneas son integradas en listados y en archivos Excel. La anomalía magnética final del Bloque Perdido-2A es resultado del procesamiento de 196,301 mediciones. Un ejemplo del listado de cada línea es mostrado en la siguiente figura:

Línea	DATE	Time (GMT)	LAT	LON	Prof(m)	Signal G-877	Mobs (nT)	IGRF (nT)	Mobs-MIGRF	VD. Teolo (nT)	Mvd (nT)	C. Rumbo (nT)	Mcr (nT)
1	6/7/2016	7:10:37	25.4830709	-95.5714512	18	240	44439.67	44464.6	-24.93	13.33	-38.26	5.0949	-43.3549
1	6/7/2016	7:10:39	25.4831386	-95.5714135	18.11	239	44439.19	44464.7	-25.51	13.33	-38.84	5.0949	-43.9349
1	6/7/2016	7:10:41	25.4832075	-95.5713754	18.27	241	44439.92	44464.7	-24.78	13.33	-38.11	5.0949	-43.2049
1	6/7/2016	7:10:43	25.4832777	-95.5713369	18.38	246	44439.97	44464.8	-24.83	13.33	-38.16	5.0949	-43.2549
1	6/7/2016	7:10:45	25.4833464	-95.5712995	18	242	44439.74	44464.8	-25.06	13.33	-38.39	5.0949	-43.4849
*													
*													
25	11/7/2016	6:10:50	25.9805636	-96.1079005	13.77	253	44747.76	44759	-11.24	-1.15	-10.09	5.0949	-15.1849
25	11/7/2016	6:10:52	25.9806384	-96.1078659	13.66	250	44747.57	44759.1	-11.53	-1.15	-10.38	5.0949	-15.4749
25	11/7/2016	6:10:54	25.9807115	-96.1078322	13.77	252	44747.53	44759.1	-11.57	-1.15	-10.42	5.0949	-15.5149
25	11/7/2016	6:10:56	25.9807791	-96.1078009	14.03	250	44747.84	44759.2	-11.36	-1.15	-10.21	5.0949	-15.3049
25	11/7/2016	6:10:58	25.9808525	-96.1077767	14.09	249	44748.02	44759.2	-11.18	-1.15	-10.03	5.0949	-15.1249
25	11/7/2016	6:11:00	25.980929	-96.1077317	14.03	249	44747.84	44759.3	-11.46	-1.15	-10.31	5.0949	-15.4049

Figura B-1: Base de datos Magnéticos, Perdido 2A.

Donde para cada columna incluye los valores de:

Línea: el número de línea de adquisición. Nota: la secuencia de adquisición es de Este a Oeste (Figura 12).

DATE: Fecha de adquisición de cada medición. En el Horario GMT.

Time (GMT): tiempo GMT al momento de adquisición de cada medición. Nota: para el bloque de estudio, el horario local es GMT-6 horas.

LAT: Latitud en coordenadas geográficas decimales.

LON: Longitud en coordenadas geográficas decimales.

Prof.: Profundidad en metros del magnetómetro G- 877 al momento de registrar cada medición.

Signal G-877: Intensidad de la señal registrada por el magnetómetro G-877 en cada medición.

Mobs: Valor del campo total magnético medido (observada) en nano Teslas por el magnetómetro G-877.

IGRF: Valor del campo teórico (IGRF) en nano Teslas para cada medición.

Mobs-MIGRF: Registro magnético de Perdido 2A reducido por campo teórico o IGRF. Expresado en nano Teslas

VD. Teolo: Curva de variación diurna en nano Teslas del observatorio magnético de Teoloyucan para cada medición.

MVD: Registro magnético de Perdido 1 reducido por variación diurna. Expresado en nano Teslas.

C.Rumbo: Valor de corrección por el efecto de rumbo en nano Teslas correspondiente a cada medición.

MCR: Registro magnético de Perdido 1 reducido por efecto de rumbo. Expresado en nano Teslas.