

Interpretación estructural de un sector continental de la cuenca Perth, Australia, mediante la integración de datos Aeromagnéticos y Gravimétricos reprocesados y Sísmica 3D

Ana María Rodríguez Rangel y Andrés Felipe Cruz Forero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Dilan Arturo Martínez Sánchez

M.Sc. en Geología

Codirector

Sait Khurama Velásquez

PhD (c) Ciencias de la Tierra y del Universo

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Geología

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A mi hermano, por siempre haber creído en mí.

A mis papás, por su apoyo incondicional.

A Dilan, por su amor y paciencia.

Ana María Rodríguez Rangel

Dedicatoria

A mis padres Cecilia y Manuel, que con su apoyo y esfuerzo que me han impulsado para llegar hoy a cumplir un sueño.

A mi perro Tomate que ha sido, sin duda, el mayor apoyo emocional que he tenido en los últimos 4 años.

A mis hermanas Angelica y Diana por ser esa voz de la experiencia que siempre guía mis pasos, por hacerme ver cuando estoy equivocado y enseñarme mediante sus experiencias como ser cada día una mejor persona.

A mis amigos Juan David, Juan Diego, Andrés, Felipe y Nicolas quienes me han acompañado en mis mejores y peores momentos y que además hicieron de esta etapa de mi vida una de las más especiales.

KPOC

Agradecimientos

Al Msc. Dilan Arturo Martínez Sánchez, director de nuestro proyecto de grado, por transmitirnos sus conocimientos y guiarnos en este camino.

Al PhD (c) Sait khurama, nuestro codirector, por su acompañamiento y valiosos aportes.

Al gobierno del Oeste de Australia, por poner a disposición la base de datos WAPIMS, por medio de la cual se obtuvo la información para desarrollar este proyecto.

A la PhD. Aline Tavares y al departamento de Geociencias de la UFMG, por permitirnos usar las licencias de los softwares para el procesamiento de la información de este proyecto.

Al PhD (c) Yesid Paul Goyes Peñafiel, evaluador de la tesis, por sus oportunas observaciones y recomendaciones, las cuales fueron cruciales para el desarrollo y escritura de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología, por contribuir en nuestra formación académica y profesional.

A nuestros amigos, por todas las experiencias inolvidables compartidas durante la carrera.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Justificación y planteamiento del problema.....	15
2. Objetivos	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Metodología.....	18
3.1 Etapa 1: Revisión bibliográfica y colección de datos	18
3.2 Etapa II: Procesamiento de los datos potenciales e identificación de anomalías geofísicas ..	18
3.3 Etapa III: Interpretación de la geometría del basamento	19
3.4 Etapa IV: Modelo integrado del subsuelo.....	20
3.5 Etapa V: Aplicación de la metodología en Colombia.....	20
3.6 Base de datos.....	20
3.6.1 Información gravimétrica.....	20
3.6.2 Información magnetométrica	21
3.6.3 Información sísmica.....	21
4. Contexto Geológico	22
4.1 Antecedentes	22
4.2 Localización	24
4.3 Evolución tectónica.....	24
4.4 Estratigrafía regional.....	27

4.4.1 Precámbrico	29
4.4.1.1 Basamento:.....	29
4.4.2 Pérmico	29
4.4.2.1 Formación Nangetty:	29
4.4.2.2 Shale Holmwood:.....	29
4.4.2.3 Areniscas de High Cliff:	30
4.4.2.4 Mantos de carbón del río Irwin.....	30
4.4.2.5 Formación Carynginia:	30
4.4.2.6 Areniscas de Dongara:	31
4.4.2.7 Formación Beekeeper:	31
4.4.3 Triásico a Cretácico Inferior	31
4.4.3.1 Shale de Kockatea:.....	31
4.4.3.2 Formación Woodada:.....	32
4.4.3.3 Arenisca Lesueur:	32
4.4.3.4 Formación Eneabba:	32
4.4.3.5 Mantos de Carbón de Catamarra:	32
4.4.3.6 Formación Cadda:.....	33
4.4.3.7 Formación Yarragadee:.....	33
4.4.3.8 Formación Parmelia:.....	33
4.4.4 Cretácico Inferior y Terciario	34
5. Marco teórico	34
5.1 Gravimetría	34
5.1.1 Correcciones Gravimétricas.....	35

5.1.1.1 Corrección por efecto de la Latitud.	36
5.1.1.2 Corrección de la elevación: Aire libre.	37
5.1.1.3 Corrección de elevación: Bouguer.....	38
5.1.1.4 Corrección de Terreno: Topografía.	39
5.1.2 Factores geológicos que afectan la densidad	40
5.1.2.1 Rocas sedimentarias.....	40
5.1.2.2 Rocas ígneas.....	40
5.1.2.3 Rocas metamórficas.....	40
5.2 Magnetometría	42
5.2.1 Susceptibilidad Magnética	43
5.2.2 Magnetismo en las rocas.....	47
5.2.3 Corrección Geomagnética.....	50
5.2.4 Corrección de variación Diurna	51
5.2.5 Anomalías Magnéticas.....	52
5.3 Sísmica.....	53
5.3.1 Atributos sísmicos.....	53
5.3.1.1 Structural smoothing.....	54
5.3.1.2 Varianza.....	54
5.3.1.3 Caos.....	55
5.3.1.4 RMS Amplitud.....	55
6. Resultados	56
6.1 Anomalías geofísicas de la zona de estudio.....	56
6.1.1 Magnetometría	56

6.1.2Gravimetría	65
6.2 Geometría, disposición y estructura del basamento	68
6.2.1Interpretación Sísmica	68
6.2.2Perfiles potenciales	72
6.3 Modelo integrado del subsuelo	76
6.4 Aplicación metodológica en Colombia.....	81
7. Discusión.....	88
8. Conclusiones	90
9. Recomendaciones.....	92
Referencias Bibliográficas	93

Listado de tablas**Pág.**

Tabla 1. Facies sísmicas asociadas a cada intervalo estratigráfico	72
Tabla 2. Densidades usadas en los intervalos sedimentarios, obtenidas del promedio del registro RHOB de los pozos Beharra Springs 3, Snotty Gobble, Hovea-3 y Evandra-1.....	73
Tabla 3. Densidades y Susceptibilidad magnética del basamento	74

Listado de figuras

	Pág.
Figura 1. Localización cuenca Perth y de la zona de estudio, representada por el área del cubo sísmico. Modificado de Hashimoto et al. (2018).....	25
Figura 2. Etapas principales del desarrollo tectónico de Australia. La cuenca Perth está resaltada en el recuadro blanco al oeste de Australia. Las flechas rojas indican esfuerzos compresivos y las flechas amarillas esfuerzos extensivos. Tomado de Olierook et al (2015).	26
Figura 3. Columna estratigráfica de la cuenca Perth. Modificado de Borssova (2017)	28
Figura 4. Prospección gravimétrica. Tomada de Tomado de Geofísica Argentina (2015).	35
Figura 5. Aceleración centrífuga y la variación de la gravedad con respecto a la latitud ϕ (no a escala). Tomado de Reynolds (2011).....	37
Figura 6. a) Corrección de aire libre para un punto de observación a una altura h del datum. b) Corrección de Bouguer. La región sombreada corresponde a la losa de roca de espesor h que se extiende hasta el infinito c) Corrección de Terreno. Tomado de Kearey et al. (2002).....	39
Figura 7. Variaciones en la densidad de rocas para diferentes tipos de rocas. Datos de Telford et al. (1990) en Reynolds (2011)	41
Figura 8. Variaciones locales o anomalías en la intensidad del campo magnético. Las anomalías se comparadas e interpretadas en relación con un modelo geológico, en cuanto a la profundidad, tamaño, forma y magnetización de las características geológicas que las causan. Tomado de Cramez (2007)	42
Figura 9. Diferentes tipos de comportamiento magnético. Las flechas rellenas indican el campo aplicado y las vacías la magnetización del material bajo el campo aplicado (lado izquierdo) o en ausencia del campo (lado derecho). Tomado de Caballero (2011)	45
Figura 10. a) Rangos y valores medios de susceptibilidad magnética de algunos tipos de rocas comunes, (b) susceptibilidades magnéticas de algunos minerales importantes. Tomado de Lowrie (2007).....	48
Figura 11. El campo debido a un dipolo geocéntrico inclinado. Tomado de McElhinny (1973) en Reynolds (2011).....	51
Figura 12. Ruta de un levantamiento magnético típico	52
Figura 13. a) cubo sísmico, b) Aplicación del atributo de Chaos. Tomado de Randen et al. (2015)	55
Figura 14. Anomalía de Campo Total.....	58
Figura 15. Errores de micronivelación. En este mapa se evidencia el efecto de líneas de vuelo, debido a la dirección de la adquisición. La señal del error es calculada utilizando los filtros Butterworth y Coseno Direccional.....	59
Figura 16. Campo Magnético Micronivelado (Decorrugado). Obtenido mediante la sustracción de los errores de micronivelacion al campo anómalo.	60
Figura 17. Derivadas verticales (DZ), la figura A corresponde a la primera derivada vertical, la B a la segunda derivada vertical.....	61
Figura 18. Señal Analítica (A) y Gradiente horizontal (B).....	63
Figura 19. Lineamientos interpretados sobre el grid de Gradiente Horizontal	64
Figura 20. Mapa Gravedad Absoluta	66
Figura 21. Anomalía de Bouguer (A) y Anomalía de Bouguer Residual (B)	67

Figura 22. Línea sísmica aleatoria (Random Line) en dirección N60E A. Sísmica original B. Sísmica con atributo de suavizado estructural.....	68
Figura 23. Línea sísmica aleatoria (Random Line) en dirección N60E con atributos sísmicos A. Suavizado estructural, B. RMS Amplitud, C. Caos, D. Varianza.....	69
Figura 24. Vista en planta del cubo sísmico con el atributo de Varianza y las superficies de las fallas trazadas	70
Figura 25. Línea sísmica interpretada en tiempo (TWT) con fallas principales y 6 intervalos tectonoestratigráficos	71
Figura 26. Dirección de los perfiles	74
Figura 27. Modelos 2D de gravimetría y magnetometría realizados haciendo uso de la herramienta GM-SYS (Oasis Montaj 9.6)	75
Figura 28. Comparación entre los resultados de gravimetría y la interpretación sísmica. A) Mapa de anomalía de Bouguer residual B) Mapa de la superficie del basamento	76
Figura 29. Relación entre la magnetometría y la interpretación sísmica. A) Mapa de gradiente horizontal B) Mapa de las fallas modeladas en el cubo sísmico.....	77
Figura 30. Mapa de las fallas en la zona de estudio. Se propone la zona transversal Allanooka entre las fallas de rumbo sinistral.	79
Figura 31. Secciones del modelo estructural en tiempo (TWT). Se delimita de manera esquemática la propuesta de la división del basamento.....	80
Figura 32. Metodología de exploración de yacimiento geotérmicos. Modificado de Alfaro-Valero et al (2013).	81
Figura 33. Recursos geotérmicos de Colombia. (a) Sistemas hidrotermales convectivos e inventario de aguas termales. Áreas geotérmicas: 1. Complejo Volcánico Cerro Bravo–Cerro Machín, 2. Complejo Volcánico Chiles–Cerro Negro, 3. Volcán Azufral, 4. área geotérmica Paipa–Iza, 5 Volcán Cumbal, 6. Volcán Galeras, 7. Volcán Puracé, 8. Volcán Sotará, 9. Volcán Doña Juana, 10. Volcán Huila, 11. Área geotérmica de San Diego, 12. Volcán Sibundoy. (b) Mapa de gradiente geotérmico. Tomado de Alfaro-Valero et al. (2020).	83
Figura 34. Datos aerotransportados de gravimetría y magnetometría del norte de Colombia (a) Anomalía total de Bouguer, escala de –80 a 80 mGal. (b) Intensidad magnética total reducida al polo (TMIRP) con escala de 33700 a 34200 nT. En el fondo está mapa estructural en profundidad del basamento. Tomado de Mora et al. (2020).	84
Figura 35. Modelado magnético y gravimétrico regional utilizado para inferir la estructura de la corteza debajo del macizo de la Sierra de Santa Marta (SSMM) y el área de estudio de la Cuenca César-Ranchería (CRB). Modificado de Sánchez & Mann (2015).....	85
Figura 36. Mapa de Colombia con las zonas definidas para aplicar la metodología del presente trabajo para la búsqueda de recursos geotermicos y/o hidrocarbúricos.	86
Figura 37. Perfil del modelo de susceptibilidad magnética del offshore de la cuenca Perth. Tomado de Johnston & Petkovic (2012).....	89

Listado de apéndices

Ver apéndices adjuntos. Pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

- Apéndice A. Mapa Campo Magnético Anómalo
- Apéndice B. Error de Micronivelación
- Apéndice C. Campo Magnético Micronivelado
- Apéndice D. Primera Derivada Vertical (Dz1)
- Apéndice E. Segunda Derivada Vertical (Dz2)
- Apéndice F. Gradiente Horizontal
- Apéndice G. Señal Analítica
- Apéndice H. Gravedad Absoluta
- Apéndice I. Anomalía de Bouguer
- Apéndice J. Anomalía de Bouguer Residual
- Apéndice K. Modelos de Gravimetría y Magnetometría
- Apéndice L. Mapa de Fallas Identificadas
- Apéndice M. Secciones Modelo Estructural

Resumen

Título: Interpretación estructural de un sector continental de la cuenca Perth, Australia, mediante la integración de datos Aeromagnéticos y Gravimétricos reprocesados y Sísmica 3D.*

Autor: Ana María Rodríguez Rangel, Andrés Felipe Cruz Forero**

Palabras Clave: Métodos potenciales, Sísmica, Cuenca Perth

Descripción: La cuenca de Perth, ubicada en el margen occidental de Australia, tiene actualmente una relevancia significativa debido a los nuevos descubrimientos de hidrocarburos y su potencial exploratorio en energía geotérmica, siendo el marco estructural importante en el desarrollo económico de estos dos campos de investigación.

Este estudio integra información geológica, datos aeromagnéticos y de gravedad heredados y sísmica 3D, obtenidos de la base de datos WAPIMS del Gobierno de Australia Occidental, con el fin de establecer un modelo estructural y comprender la geometría, arquitectura y configuración del noroeste continental de la cuenca Perth.

La anomalía de Bouguer se calculó para identificar las discontinuidades de la gravedad, asociadas con el basamento. A los datos aeromagnéticos se les aplicaron filtros de micro-nivelación como señal analítica, derivadas verticales (1° y 2°) y horizontales para identificar límites estructurales y lineamientos magnéticos. Las fallas y horizontes de los intervalos tectonoestratigráficos establecidos, se trazaron en el cubo sísmico aplicando atributos sísmicos como suavizado estructural, varianza, caos y amplitud RMS.

Al procesar los datos de gravimetría y magnetometría, se identificaron anomalías geofísicas asociadas con la morfología del basamento y lineamientos magnéticos. A partir de la elaboración de perfiles con los datos potenciales y tomando como base la interpretación sísmica, se propone un basamento diferenciado en dos, debido a la variación en la susceptibilidad magnética, y finalmente, con la integración de los resultados obtenidos con cada método geofísico (gravimetría, magnetometría y sísmica) se obtuvo modelo integrado del subsuelo, y se propuso la zona transversal Allanoooka, limitada por fallas de alto ángulo con desplazamiento sinistral, aspectos que no se habían evidenciado en los trabajos regionales de la cuenca.

Estos resultados evidencian que la integración de estos métodos geofísicos permite mejorar el modelo estructural de una zona, por lo que se sugieren 4 zonas en Colombia (cuencas Llanos, Catatumbo, Cesar y Valle Superior del Magdalena) donde esta metodología puede ser usada con base en el potencial geotérmico e hidrocarburífero de cada una de ellas, teniendo en cuenta los aspectos topográficos, ambientales y sociales del territorio colombiano.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: M.Sc. Dilan Arturo Martínez Sánchez. Codirector: PhD. (c) Sait Khurama Velásquez.

Abstract

Title: Structural interpretation of a block of the Perth Basin onshore, Australia, by the integration of aeromagnetic and gravimetric legacy data and 3D seismic.

Authors: Ana María Rodríguez Rangel, Andrés Felipe Cruz Forero **

Key Words: Potential methods, seismic, Perth basin

Description: The Perth basin, located on the western margin of Australia, currently has significant relevance due to the new discoveries of hydrocarbons and its exploratory potential in geothermal energy, being the important structural framework in the economic development of these two fields of research.

This study integrates geological information, legacy aeromagnetic and gravity data, and 3D seismic, obtained from the WAPIMS database of Western Australia Government, to establish a structural model and understand the geometry, architecture and configuration of the onshore northwest Perth Basin.

Bouguer's anomaly was calculated to identify gravity discontinuities associated with the basement. Micro-leveling filters were applied to the aeromagnetic data, such as analytical signal, vertical (1° and 2°) and horizontal derivatives to identify structural limits and magnetic lineaments. The faults and horizons of the established tectonostratigraphic intervals were interpreted on the seismic cube by applying seismic attributes such as structural smoothing, variance, chaos, and RMS amplitude.

By processing the gravimetry and magnetometry data, geophysical anomalies associated with basement morphology and magnetic lineaments were identified. From the elaboration of profiles with the potential data and based on the seismic interpretation, a differentiated basement in two is proposed, due to the variation in the magnetic susceptibility, and finally, with the integration of the results obtained with each geophysical method. (gravimetry, magnetometry and seismic) an integrated model of the subsurface was obtained, and the Allanooka transverse zone was proposed, limited by high-angle faults with sinistral (left-lateral) displacement, aspects that had not been evidenced in the regional works of the basin.

These results show that the integration of these geophysical methods allows to improve the structural model of an area, for which 4 areas are suggested in Colombia (Llanos, Catatumbo, Cesar and Valle Superior del Magdalena basins) where this methodology can be used based on the geothermal and hydrocarbon potential of each of them, considering the topographical, environmental and social aspects of the Colombian territory.

* Degree work

** Faculty of physicochemical engineering. Geology school. Director: M.Sc. Dilan Arturo Martínez Sánchez. Codirector: PhD. (c) Sait Khurama Velásquez.

Introducción

1. Justificación y planteamiento del problema

Actualmente, la zona de estudio tiene una gran relevancia para la industria de los hidrocarburos debido a los descubrimientos recientes en el norte de la parte continental de la cuenca Perth, que incluyen los campos Waitsia, Hovea y Jingemia, y su potencial exploratorio (Geoscience Australia, 2020). Es importante delimitar en esta zona aquellas estructuras que funcionan como trampas, tanto bloques inclinados y fallados como anticlinales tipo rollover (Ferndinando & Longley, 2015).

El planteamiento del problema surge a raíz de la pregunta de ¿Cómo se podría mejorar el modelo estructural del sector continental de la cuenca Perth para dar mayor precisión y detalle al área de estudio?, por lo tanto, este proyecto se propone integrar la información obtenida por diferentes métodos geofísicos (gravimetría, magnetometría y sísmica), que aporte al desarrollo científico y económico de la zona de estudio, ya que la información gravimétrica y magnetométrica se puede utilizar para identificar posibles estructuras en zonas de la sísmica con mala calidad; así como, distinguir áreas para enfocar la exploración en zonas de la sísmica con buena calidad (Ferndinando & Longley, 2015). Además, la relevancia de los métodos potenciales para la exploración en esta área se relaciona con la proximidad de las unidades prospectivas permico-triásicas con el basamento (Shevchenko & Iasky, 2019).

Como producto de esta integración se pretende generar un modelo con mayor precisión (escala 1:50.000) de la configuración estructural del subsuelo en el área de estudio, mediante la identificación de estructuras como lineamientos y geocuerpos, debido a su importancia en el entrampamiento y migración de hidrocarburos, y también en la energía geotérmica; ya que esto no

ha sido abarcado en estudios anteriores en los cuales se han explorado áreas más grandes y con menos detalle (Olierook et al. 2015).

Es importante tener en cuenta que no hay problema con disponer de “datos antiguos” ya que históricamente han sido sub-utilizados y se pueden aprovechar para aportar información valiosa y proponer metodologías de abordaje pertinentes, con la aplicación de nuevas técnicas de procesamiento y a la luz de nuevos paradigmas científicos. Adicionalmente, éstos tienen como ventaja que no hay que realizar inversiones económicas adicionales en adquisición y que su tratamiento moderno permitirá obtener una interpretación mejorada, más fina, que a la postre puede generar nuevos criterios de exploración y desarrollo (Andrea et al., 2019).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Establecer un modelo estructural de un sector continental del norte de la cuenca Perth (Australia) con base en la interpretación de métodos potenciales y sísmica 3D.

2.2 Objetivos Específicos

- 1) Identificar las anomalías geofísicas de la zona de estudio resultantes de la aplicación de técnicas de reprocesamiento de datos geofísicos de gravimetría y magnetometría.
- 2) Establecer la geometría, disposición y estructura del basamento a partir de la interpretación de métodos potenciales.
- 3) Proponer un modelo integrado del subsuelo mediante la combinación de métodos potenciales y la interpretación de un cubo sísmico 3D.
- 4) Definir posibles zonas en Colombia donde se pueda aplicar la metodología de este trabajo para la búsqueda de yacimientos geotérmicos y/o petrolíferos.

3. Metodología

La propuesta de integrar información geofísica de datos potenciales y sísmicos para establecer un modelo estructural se realizó siguiendo 5 etapas:

3.1 Etapa I: Revisión bibliográfica y colección de datos

El trabajo inicia con la recopilación y lectura de estudios preliminares de la zona de interés, respecto al marco geológico y tectónico a nivel de cuenca y continente. Las actividades desarrolladas en esta fase fueron: a) Lectura de artículos científicos relacionados con la cuenca Perth para estudiar su evolución y geología actual; b) Búsqueda de datos gravimétricos, magnetométricos y sísmicos de la cuenca Perth, a través la plataforma WAPIMS de la base de datos del gobierno australiano y c) Revisión de técnicas y metodologías de procesamiento de datos potenciales.

3.2 Etapa II: Procesamiento de los datos potenciales e identificación de anomalías geofísicas

Mediante el software **Oasis Montaj 9.6**, se realizó el cálculo y mapeo de correcciones y anomalías gravimétricas y magnetométricas, así como la aplicación de filtros, con el fin de resaltar e identificar las anomalías del campo potencial. La licencia de este software fue otorgada por el departamento de Geociencias de la Universidad Federal de Minas Gerais.

Las siguientes correcciones son aplicadas a los datos crudos de gravedad observada: a) Corrección de latitud, b) Corrección de aire libre, c) Corrección de Bouguer y d) Corrección de terreno. A partir de ello, se calcula la anomalía de Aire Libre y de Bouguer y se mapean, interpolando los datos calculados en cada estación. Por último, se calcula y mapea la anomalía de Bouguer residual. Este procesamiento se hace con 3 valores diferentes de densidad (2.2, 2.4 y 2.6 g/cm³), teniendo en cuenta el reporte de gravimetría del norte de Perth (Arc Energy, 2003).

De igual manera, se plotea la información de campo magnético de las líneas de vuelo y se interpolan con el método de curvatura mínima. Se aplican los siguientes filtros: a) Butterworth y Coseno direccional, estos se utilizan con el fin de eliminar el efecto de línea producto de la dirección en que los datos fueron adquiridos. b) Señal Analítica, para identificar límites entre las litologías y las estructuras geológicas. c) Derivada vertical (1ra y 2da), para delimitar lineaciones magnéticas, ya que esta realiza las altas frecuencias (Milligan & Gunn, 1997) y c) Gradiente Horizontal, el cual es útil para enfatizar las altas frecuencias y ubica picos de anomalía muy cerca de los bordes de los cuerpos

3.3 Etapa III: Interpretación de la geometría del basamento

En esta fase, se analizó la estructura del basamento con base en los métodos potenciales y, a su vez, se interpretó el cubo sísmico en el software **Petrel 2020.4**, cuya licencia fue otorgada por el departamento de Geociencias de la Universidad Federal de Minas Gerais, trazando las fallas y horizontes de la zona de estudio. Para ello, primero se calcularon los siguientes atributos en el volumen sísmico: a) Suavizado estructural, b) Varianza, c) Caos y d) Amplitud RMS, y, en segundo lugar, se trazaron los topes de los siguientes horizontes: Formación Yarragadee, Mantos de Carbón Cattamarra, Formación Eneabba, Shale Kockatea, Areniscas de Dongara y el Basamento.

Después de haber realizado la interpretación individual de cada método geofísico, se elaboraron los perfiles potenciales que delimitaron la profundidad, forma y arquitectura del basamento y estructuras asociadas en zonas donde es baja la calidad de los datos sísmicos.

Los valores de densidad de los perfiles se tomaron del promedio del registro de densidad para cada intervalo interpretado en la sísmica, de los pozos Beharra Springs 3, Snottygobble, Hovea-3 y Evandra-1, debido a que en estudios realizados en la cuenca no se mencionan estos

valores. De igual manera, la susceptibilidad magnética se asignó y se ajustó según la litología de cada intervalo, de acuerdo con los valores estándares establecidos en la literatura por la misma razón mencionada anteriormente.

3.4 Etapa IV: Modelo integrado del subsuelo

Los resultados de las etapas previas son la base para elaborar modelo final integrado, el cual se llevó a cabo en el software **Petrel 2020.4**. En este modelo se tuvo en cuenta la interpretación del cubo sísmico, las fallas definidas mediante las anomalías magnéticas y la estructura del basamento. De esta integración se obtiene un modelo tridimensional en tiempo.

3.5 Etapa V: Aplicación de la metodología en Colombia

De acuerdo con los resultados obtenidos en la zona de estudio de la cuenca Perth, Australia, se realizó una revisión bibliográfica de estudios geotérmicos e hidrocarburíferos realizados en Colombia y se establecieron zonas donde esta metodología podría llevarse a cabo para la exploración de estos recursos.

3.6 Base de datos

La base de datos utilizada en el presente trabajo fue descargada de la plataforma pública WAPIMS (Western Australian Petroleum and Geothermal Information Management System) del gobierno de Australia, la cual se presenta a continuación:

3.6.1 Información gravimétrica

Se tomaron los datos de la prospección gravimétrica Dongara-Mullewa pro B4 cuya adquisición fue colectada en el año 1962. Consta de 2409 estaciones de medida de la gravedad (ver figura 1). La información está escaneada en formato PDF, por lo que los datos de adquisición

de cada estación fueron transcritos en digital y posteriormente se cargaron al software Oasis Montaj 9.6.

3.6.2 Información magnetométrica

Corresponde a la información de la prospección aeromagnética de Dongara que tiene una extensión de 3427 km de línea de vuelo con una distancia entre líneas en promedio de 76m en sentido E-W y 32.2m en dirección N-S y altura de vuelo promedio de 90m. Consta de 525200 datos magnetométricos (ver figura 1). Estos datos están contenidos en un documento con formato .txt que contiene la información de línea, vuelo, dirección, fecha, coordenadas, IGRF, Corrección Diurna e Información Magnética final.

3.6.3 Información sísmica

Denison 3D es una adquisición sísmica colectada en el año 2006, en formato SEG Y, y cubre un área de 1928 Km² que se encuentra sobre la zona continental norte de la cuenta Perth. Consta de 1656 in-lines con dirección E-W, enumeradas una a una en un rango desde 2745 hasta 4400, espaciadas cada 20 metros; y 1516 cross-lines con sentido N-S, enumeradas una a una en un rango desde 9105 hasta 10620, con un intervalo de 20 metros (ver figura 1). La longitud en tiempo del *survey* sísmico es de 206 hasta - 3767 ms.

4. Contexto Geológico

4.1 Antecedentes

La cuenca de Perth ha sido objeto de diversos estudios, no solo de manera regional sino en zonas específicas, sin embargo, es la zona norte donde se enfocará nuestro estudio. De manera regional, Hall *et al.* (2013) realizaron un modelo del basamento de la cuenca Perth a escala 1:2'000.000, en el cual integraron los modelos de terrenos, los sets de datos gravimétricos y magnéticos regionales, los pozos que alcanzaron el basamento y las grandes líneas sísmicas 2D. La finalidad de este estudio fue producir un modelo a escala regional del basamento para mejorar los modelos de la cuenca, especialmente la zona *offshore*.

Sobre la zona onshore del norte de la cuenca Perth, Iasky (1994) elaboró un mapa regional del basamento a escala 1:1'000.000 basado en datos gravimétricos tomados por las estaciones al norte de Perth, abarcando la zona de este estudio. En este identificó cuatro tendencias en lineamientos estructurales a través de una primera derivada vertical.

Shevchenko & Iasky (2019) actualizaron el estudio de Iasky (1994), y aumentaron la escala a 1:200.000, a su vez, añadieron un análisis previo de anomalías magnéticas para identificar estructuras. Esto con el fin de mejorar posteriores interpretaciones sísmicas de la zona con interés petrolífero.

ARC Energy (2003) basado en datos gravimétricos del *onshore* del norte de la cuenca Perth con resolución variable entre escalas de 1:50.000 a 1:100.000 de acuerdo con la ubicación de las estaciones gravimétricas; realizaron un procesamiento aplicando la corrección de terreno y la corrección de Bouguer para generar la gravedad residual. El objetivo de este estudio fue definir a qué se asociaba la respuesta de las anomalías de gravedad en la zona, las cuales fueron se relacionaron principalmente con las tendencias estructurales.

Holzrichter *et al.* (2014) realizaron un modelo 3D basado en el procesamiento de datos gravimétricos de la zona *onshore* y el *offshore* del norte de Perth a escala 1:500.000. Este estudio se realizó con el fin de modelar la corteza y el basamento de la zona. En este se integró el resultado del procesamiento gravimétrico con interpretaciones sísmicas previas de diversos autores con el fin de generar perfiles que se ajustaran a la información integrada y a los mapas finales de la discordancia de Moho y al basamento.

En el *offshore* del norte de Perth, Jhontson & Petkovic (2012) realizaron una integración de datos magnéticos de Hackney and Morse (2011) y de datos sísmicos, donde resaltan cuerpos con cambios en la susceptibilidad magnética a nivel de basamento o en el límite de este con la secuencia sedimentaria, los cuales se observan de manera difusa debido a que la calidad sísmica disminuyó a dicha profundidad.

4.2 Localización

El área de estudio está localizada en un sector continental del norte de la cuenca Perth, tal como se indica en el recuadro rojo de la figura 1. La parte continental de la cuenca tiene una forma alargada de tendencia norte-sur que se extiende a lo largo del margen suroccidental de Australia; se encuentra al oeste de la Falla Darling, que representa el límite occidental del Cratón Yilgarn.

4.3 Evolución tectónica

La cuenca Perth cubre un área de 45.000 km² continental y 55.000 km² costa afuera. Se separa al este del Cratón Yilgarn por medio de la Falla Darling y se extiende al oeste hasta el límite continental con la corteza oceánica Indica. Las cuencas Carnarvon y Bremer corresponden a sus límites norte y sur, respectivamente (Song y Cawood, 2000).

La cuenca de Perth es una estructura que se inició como un rift intracontinental al este de Gondwana y evolucionó, a través de la ruptura de la Gran India y Australia, en un margen pasivo a lo largo del suroeste de Australia (Song y Cawood, 2000). En la figura 2, se ilustran las etapas principales del desarrollo tectónico de Australia desde el Pérmico hasta el Mioceno. Las flechas de colores indican la cinemática regional por la que se vio influenciada la cuenca.

Figura 1.

Localización cuenca Perth y de la zona de estudio, representada por el área del cubo sísmico.

Modificado de Hashimoto et al. (2018).

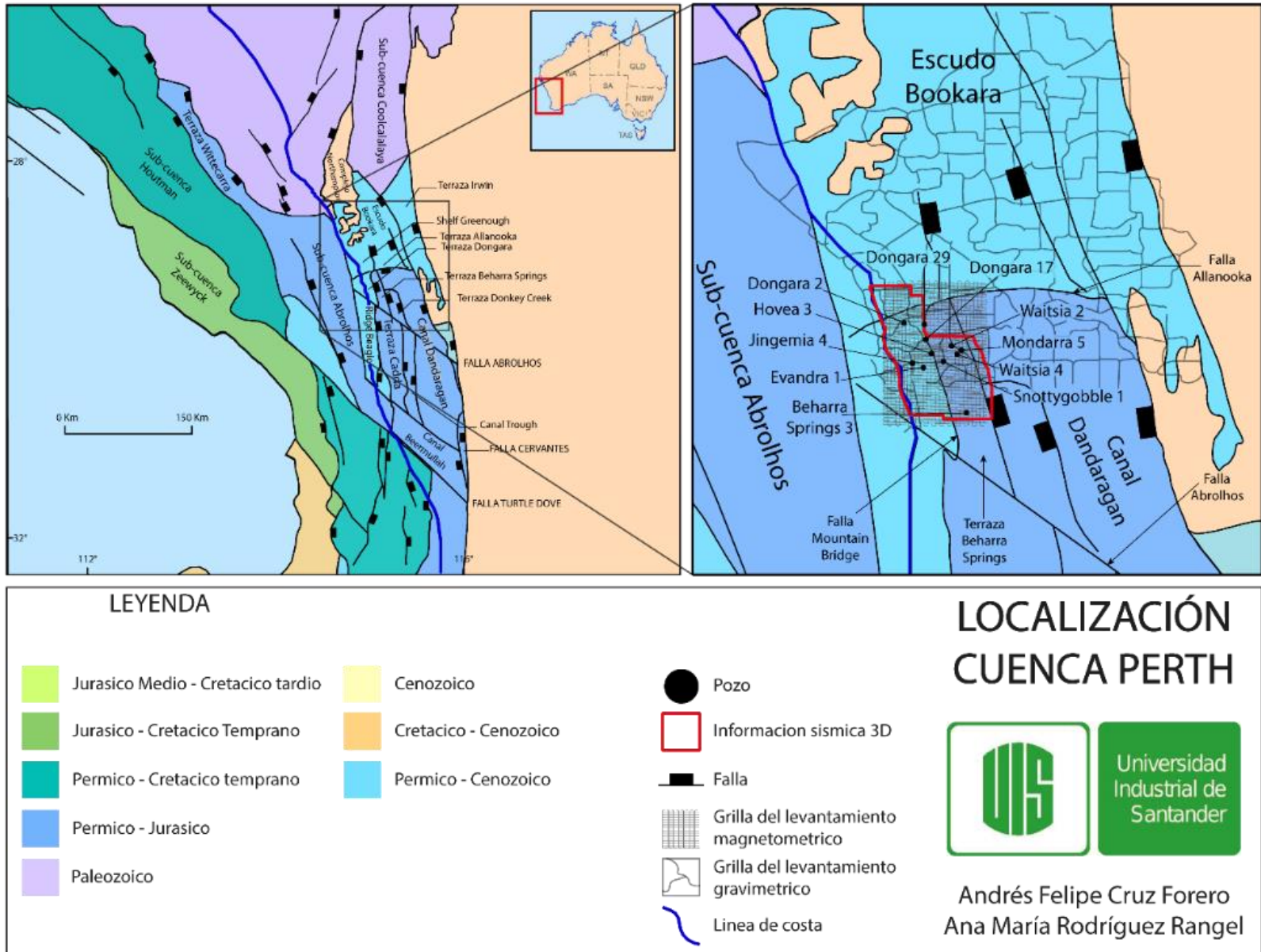
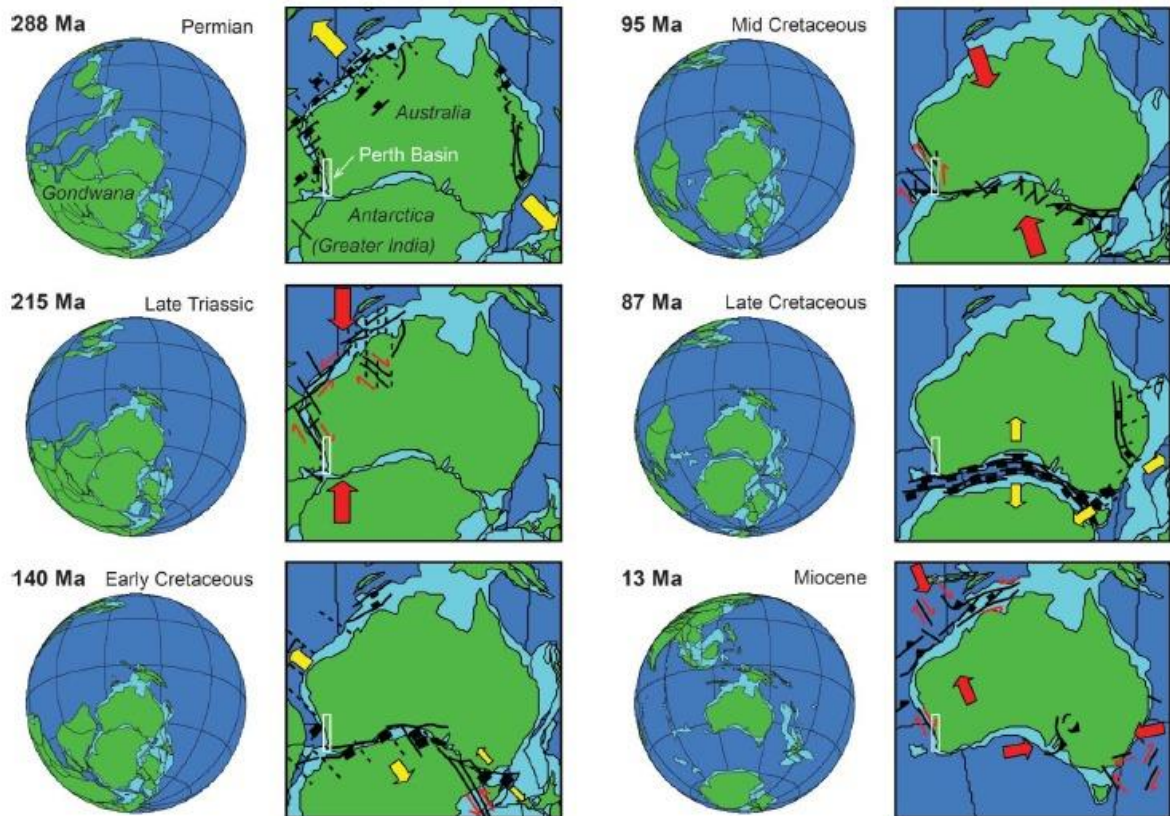


Figura 2.

Etapas principales del desarrollo tectónico de Australia. La cuenca Perth está resaltada en el recuadro blanco al oeste de Australia. Las flechas rojas indican esfuerzos compresivos y las flechas amarillas esfuerzos extensivos. Tomado de Olierook et al (2015).



Como aparece en la figura 1, la cuenca Perth está subdividida de acuerdo con sus elementos estructurales. En la zona de estudio se destacan la Terraza Dongara, la Terraza Beharra Springs, el Canal Dandaragan y el Escudo Bookara al norte (ver figura 1). El límite entre la Terraza Dongara y la Terraza Beharra se define por la falla Mountain Bridge (falla normal con dirección de rumbo 345° buzamiento hacia el oeste) y el límite entre la Terraza Dongara, la Terraza Beharra Springs y el Canal Dandaragan del escudo Bookara es la falla Allanooka (falla normal con componente de rumbo, cuya dirección de rumbo es 85° y buza hacia el sur) (Mory & Iasky, 1996).

La cuenca muestra evidencia de deformación en varias etapas o multi-estados, que se desarrollaron a través de la interacción de fases de extensión y transtensión, lo que resultó en una historia compleja de fallas y movimientos de bloque de fallas sinsedimentarios (Harris, 1994). Se han reconocido dos fases principales de rifting, la primera en el Pérmico, cuyo principal depocentro en el margen norte es el Canal Dandaragan (ver figura 1), y la segunda, desde el Jurásico hasta el Cretácico temprano.

La primera etapa como se mencionó anteriormente es el proceso de rift en el Pérmico, el cual generó la apertura de la cuenca (Figura 2). Posteriormente desde el Pérmico tardío hasta el Triásico tardío ocurrió un proceso compresivo que generó un levantamiento regional, aunque de manera localizada se dieron espacios de subsidencia térmica (Jones *et al.*, 2012; Mory & Iasky, 1996; Harris, 1994).

En el inicio del Jurásico, se dio a lugar la segunda etapa de extensión importante, la cual originó la separación de Australia con la India. El proceso de extensión tuvo lugar hasta el Valanginiano donde la transición en el sistema de esfuerzos se evidencia por extensión al norte de la cuenca y transpresión al sur. En el Valanginiano, se dio un levantamiento regional por la interacción de Australia con la Antártida (Jones *et al.*, 2012; Mory & Iasky, 1996; Harris, 1994).

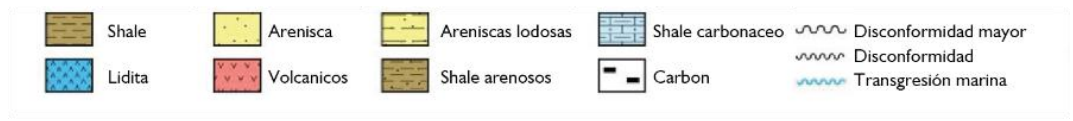
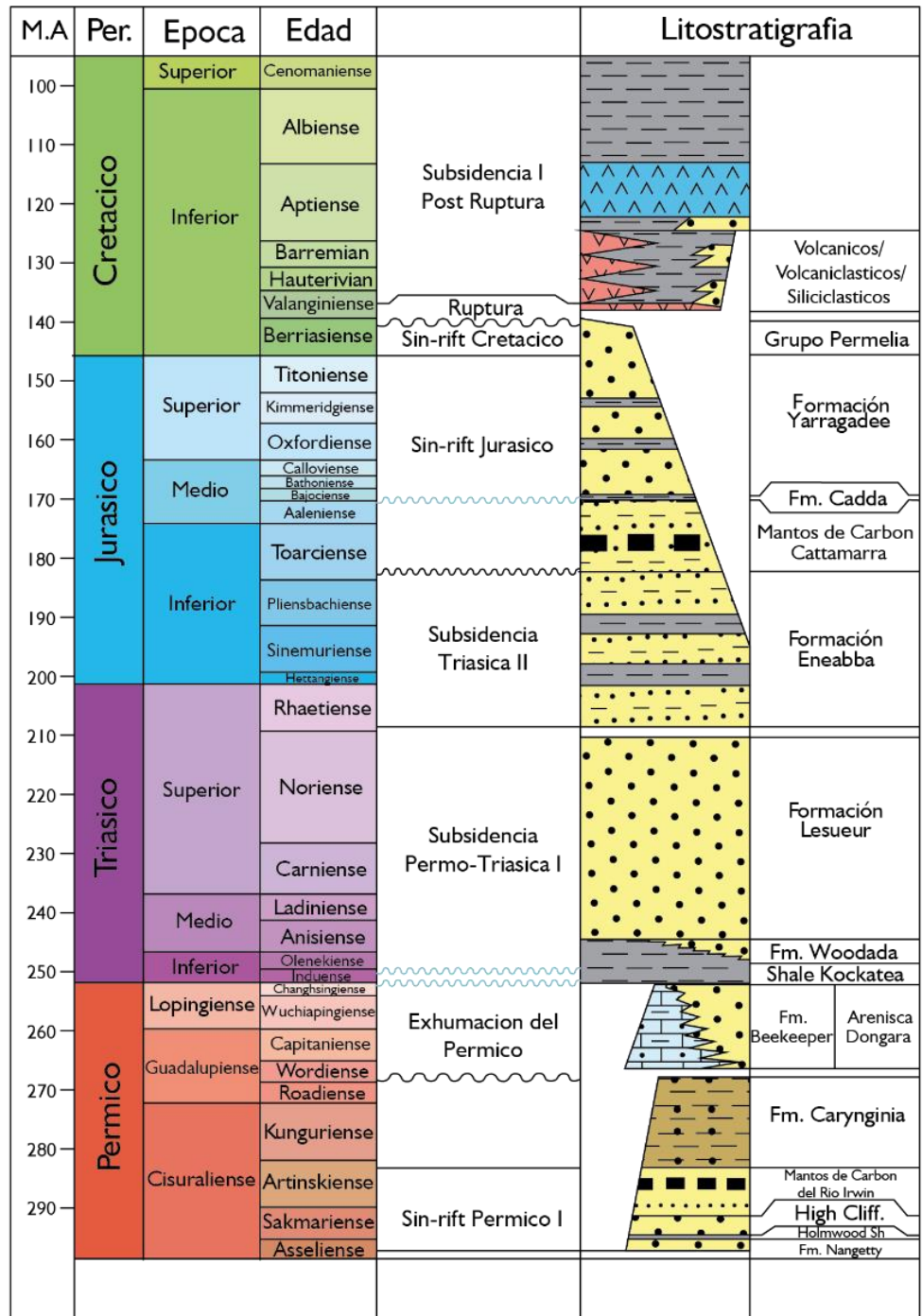
En el Cretácico tardío, ocurrió la separación de Australia con Antártida, y posterior a ello, la cuenca se mantuvo en un margen pasivo hasta el Mioceno cuando se presentan esfuerzos compresivos al Este y Noroeste de Australia, lo cual se evidencia en la cuenca de Perth con movimientos transcurrentes (Jones *et al.*, 2012; Mory & Iasky, 1996; Harris, 1994).

4.4 Estratigrafía regional

La estratigrafía de la cuenca Perth se puede resumir de la siguiente manera:

Figura 3.

Columna estratigráfica de la cuenca Perth. Modificado de Borssova (2017)



4.4.1 *Precámbrico*

4.4.1.1 Basamento: El basamento que infrayace la cuenca Perth está compuesto de rocas de edad proterozoica, correspondientes a granulitas, gneises, metasedimentos e intrusiones de granito del Orógeno Pinjarra. Los afloramientos del basamento se encuentran en el complejo Northampton al norte de la cuenca Perth y en el Complejo Leeuwin, en el margen oeste del “Bunbury Through”. (Department of Industry and Resources, Western Australia, 2008).

4.4.2 *Pérmico*

4.4.2.1 Formación Nangetty: Es la unidad de la edad pérmica más temprana, o posiblemente la última Carbonífera. La Formación Nangetty contiene predominantemente limo arenoso laminado, gris verdoso pálido, con concreciones de calizas de "bala de cañón" ocasionales, areniscas, y conglomerados. Presenta bloques erráticos de hasta 10 m de diámetro. Algunas de los bloques erráticos muestran superficies facetadas y estriadas indicativas de procesos glaciales e incluyen muchos tipos de rocas pre-Pérmicas, notablemente varias rocas arqueanas metamórficas y graníticas, así como varios tipos de sedimentos Proterozoicos (Mory & Iasky, 1996). Su espesor supera los 1500 m en el sector adyacente a la falla de Urella, pero la unidad se pincha contra el complejo de Northampton al noroeste y está ausente al oeste del complejo (Mory *et al.*, 2005).

4.4.2.2 Shale Holmwood: El shale Holmwood recubre la Formación Nangetty y subyace a las Areniscas de High Cliff (Clarke *et al.* 1951). Su espesor promedio es de 450 m de acuerdo con los reportes de la cuenca (Mory *et al.*, 2005), y de acuerdo con la información de pozos obtenida de la plataforma WAPIMS en la zona de estudio tiene un espesor promedio de 185m. Su parte inferior está compuesta de shale de color verde grisáceo con capas delgadas de caliza arcillosa. El miembro Beckett, que se encuentra dentro de esta parte inferior de la formación, consiste en capas alternas de pizarra y caliza marrón, incluye un horizonte delgado de concreciones

calcáreas fosfáticas amarillo-marrón. La parte superior está dominada por limolitas arcillosas grises a negras, micáceas, jarosíticas y gipsíferas, bien asentadas. La jarosita es probablemente un producto de la pirita a la intemperie. La parte superior de la unidad contiene capas y lentes delgadas de caliza fosilífera. (Mory *et al.*, 2005)

4.4.2.3 Areniscas de High Cliff: Las Areniscas de High Cliff comprenden areniscas intercaladas con conglomerados y limolitas, se encuentran entre el shale de Holmwood y los mantos de carbón del río Irwin (Clarke et al., 1951). Consiste en una sección grano creciente de arenisca limosa, altamente bioturbada y ondulada con delgadas capas de cantos rodados y conglomerado de guijarros. La sección tipo que se encuentra en High Cliff tiene 24 m de espesor (Playford et al., 1976) y el promedio de los espesores encontrados en la información de pozos de nuestra zona de interés es de 70 m.

4.4.2.4 Mantos de carbón del río Irwin: El nombre fue introducido por Clarke et al. (1951) para la unidad carbonífera que se encuentra sobre la Arenisca de High Cliff y debajo de las limolitas de la Formación Carynginia. La sección tipo se extiende hacia el norte a lo largo del río Irwin y tiene 55 m de espesor. Al oeste de Irwin Terrace, la unidad se espesa a través de la Allanooka High, alcanzando los 288 m, y el promedio de los espesores encontrados en la información de pozos de la zona de estudio es de 230m (Mory *et al.*, 2005). Esta unidad contiene intercalaciones de arenisca, limolita, shale carbonáceo y carbón. Las areniscas varían de guijarros y granos muy gruesos a granos muy finos. Lentes conglomeráticos ocurren en algunos lugares. (Mory & Iasky, 1996).

4.4.2.5 Formación Carynginia: La Formación Carynginia consiste predominantemente en limo oscuro, micáceo y carbonoso, y areniscas cuarzosas de grano fino a grueso, con lechos delgados de conglomerado fino. (Mory & Iasky, 1996). La unidad tipo de la formación se

encuentra en Carynginia Gully, donde Clarke et al. (1951) estimaron que la unidad tiene 240 m de espesor. En el subsuelo, la unidad se espesa hacia el sur, alcanzando los 328 m. (Mory *et al.*, 2005) y el promedio de los espesores encontrados en la información de pozos es de 120 m en la zona de estudio.

4.4.2.6 Areniscas de Dongara: La arenisca de Dongara es una arenisca limosa limpia y bioturbada debajo del shale de Kockatea (Playford et al., 1976). Se compone principalmente de arenisca bioturbada media a gruesa con pequeñas bandas de guijarros delgados, vetas y limolitas carbonosas. La parte superior de la unidad contiene una proporción significativa de monazita (Rasmussen et al., 1989) y es notablemente más limpia y gruesa con material menos carbonoso y poca evidencia de biotubación. De acuerdo con la información de pozos obtenida de la plataforma WAPIMS, en la zona de estudio tiene un espesor promedio de 35 m.

4.4.2.7 Formación Beekeeper: La Formación Beekeeper es una unidad mixta de clastos y carbonatos que se encuentra al sur y es coetánea con la arenisca de Dongara. La unidad consta de arenisca de grano medio a grueso, caliza y shale. En el norte, la unidad consiste principalmente de arenisca con shale y calizas menores, mientras que en el sur la caliza es dominante. La diagénesis posdeposicional ha destruido la porosidad primaria en estas calizas, pero el estrés tensional posterior y la dolomitización han creado una porosidad secundaria. (Mory & Iasky, 1996).

4.4.3 Triásico a Cretácico Inferior

4.4.3.1 Shale de Kockatea: El Shale de Kockatea del Triásico Inferior (Playford et al., 1976) se considera la principal fuente de petróleo y roca sello en la cuenca (Thomas, 1979). La parte de la unidad con mayor potencial generador es el shale basal, rico en sapropel, con un TOC promedio de 2.0%, en comparación con un promedio general para la unidad de 0.8% (Hall, P. B., 1989). La unidad consta de shales oscuros, limolitas micáceas y areniscas y calizas menores. El

promedio de los espesores encontrados en la información de pozos es de 340 m en la zona de estudio.

4.4.3.2 Formación Woodada: La Formación Woodada solo se ha identificado en el subsuelo. Consiste en arenisca de grano fino intercalada y limolita carbonosa. (Mory & Iasky, 1996). Se engrosa gradualmente hacia el sur y alcanza un espesor máximo conocido de aproximadamente 230 m en el campo Woodada. En nuestra zona de estudio, el espesor de esta unidad es de 76 m, de acuerdo con la información de pozo.

4.4.3.3 Arenisca Lesueur: La arenisca Leuseur consiste en areniscas feldespáticas y de guijarros gruesos a muy gruesos con limolitas y conglomerados menores. La unidad se espesa dramáticamente hacia el sureste llegando a casi 3000 m en Barberton, en comparación con unos 200 m en el campo Woodada y 100 m cerca de Dongara. (Mory & Iasky, 1996). El promedio de los espesores encontrados en la información de pozos es de 180 m en la zona de estudio.

4.4.3.4 Formación Eneabba: La Formación Eneabba consiste en areniscas de grano fino a grueso intercalado con limolita y arcillas multicolores. Las lutitas carbonosas grises menores y el carbón fino también están presentes. (Playford et al., 1976). Esta formación se espesa hacia el sur y alcanza un espesor máximo conocido de 854 m en Donkey Creek 1 (Mory *et al.*, 2005). El promedio de los espesores encontrados en la información de pozos de la zona de estudio es de 414 m.

4.4.3.5 Mantos de Carbón de Catamarra: La formación está constituida por areniscas de grano fino a grueso entremezclada con limolita y arcilla carbonosa oscura, y vetas de carbón de hasta 11 m de espesor. La unidad se distingue de la Formación Eneabba subyacente por la presencia de limolita y limo carbonoso y por la mayor respuesta de rayos gamma en las capas de arenisca, posiblemente debido a la presencia de glauconita, que es un mineral accesorio común.

(Mory & Iasky, 1996). El espesor promedio de esta unidad en la zona de estudio es de 427 m de acuerdo con la información de pozo.

4.4.3.6 Formación Cadda: La Formación Cadda está compuesta de shales, limolitas y areniscas medianas a muy gruesas, que se clasifican en algunos lugares en caliza con cáscara arenosa. En los afloramientos, las capas de caliza son generalmente ferruginizadas y lixiviadas de carbonato, con moldes de pequeños moluscos. (Mory & Iasky, 1996). La Formación alcanza un espesor máximo conocido de 290 m en Mullering y 288 m en Ocean Hill (Mory *et al.*, 2005). El espesor promedio de esta unidad en la zona de estudio es de 60 m de acuerdo con la información de pozo.

4.4.3.7 Formación Yarragadee: La Formación Yarragadee es una unidad predominantemente arenosa de la edad del Jurásico Tardío. Consiste en areniscas feldespáticas finas a gruesas intercaladas, limolita y arcillas con conglomerados y carbón menores. Las capas son típicamente discontinuas y la correlación de unidades dentro de la formación es difícil. (Mory & Iasky, 1996). Se estima que esta unidad tiene un espesor promedio de 856 m de acuerdo con la información de pozo de la zona de estudio.

4.4.3.8 Formación Parmelia: La Formación Parmelia consiste en arenisca feldespática, con pequeñas limolitas y arcillas, y es litológicamente muy similar a la formación subyacente de Yarragadee. El miembro basal de Otorowiri consiste predominantemente en limolita con pequeñas capas de arenisca de grano fino. (Backhouse, 1984). Se estima que la unidad tiene un grosor de hasta 500 m en el área de estudio (Mory *et al.*, 2005).

4.4.4 Cretácico Inferior y Terciario

Este es un periodo de tiempo predominantemente de clastos marinos y carbonatos. El mar parece haber venido tanto del oeste como del norte y el Cretácico probablemente representa el momento en que un gran cuerpo oceánico se estableció por primera vez al oeste de la cuenca Perth.

Las rocas cretáceas tardías y terciarias se producen solo en el canal central de Dandaragan, el canal Vlaming y la subcuenca Abrolhos. Se componen de arenas verdes, margas, areniscas, calizas y dolomitas. La secuencia es interrumpida por varias inconformidades menores. Todas las rocas son marinas y la máxima transgresión se produjo en el Santoniano, Cretácico Superior (Cockbain & Lehman, 1971).

5. Marco teórico

Los tres métodos geofísicos utilizados en este proyecto son: gravimetría, magnetometría y sísmica 3D. Se hará una explicación cada uno de ellos, a continuación:

5.1 Gravimetría

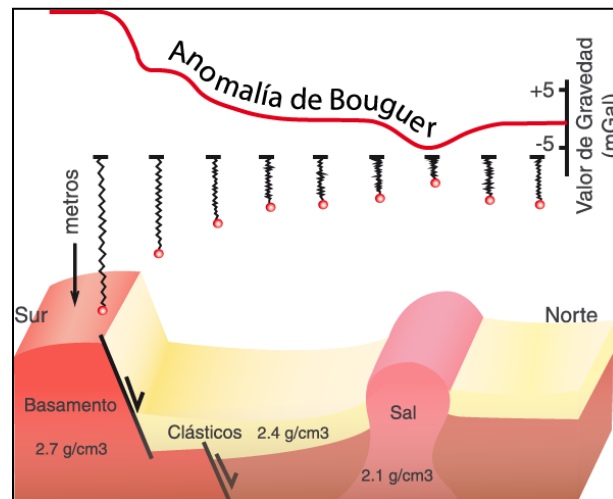
La prospección gravimétrica es un método geofísico que se basa en el estudio de las variaciones de aceleración de gravedad, producidas por la distribución desigual de masas en el interior de la tierra y la diferencia de densidad entre las rocas del subsuelo, mediante la medida y el análisis del campo gravitacional en la superficie de la corteza terrestre (Chelotti *et al.*, 2009; Reynolds, 2011), por lo tanto, un cuerpo causal genera perturbación localizada en el campo gravitacional conocido como anomalía gravitacional (Reynolds, 2011).

El método consiste en la medida de la aceleración de la gravedad en distintos puntos, la cual se realiza usando un resorte, cuya elongación es proporcional a la fuerza de gravedad ejercida

sobre él en el punto de medición (Figura 4), esto es debido a que esa fuerza es proporcional a las densidades del material del subsuelo (Burger *et al.*, 2006).

Figura 4.

Prospección gravimétrica. Tomada de Tomado de Geofísica Argentina (2015).



5.1.1 Correcciones Gravimétricas

Si la Tierra tuviera una simetría esférica perfecta y no rotara, entonces, la gravedad debería ser la misma en cualquier lugar de la superficie. Claramente, sabemos que esto no es así, por lo tanto, es esencial identificar las razones por las que la gravedad varía, para así poder hacer las correcciones.

El principal objetivo de una prospección gravimétrica es obtener valores de gravedad que varían únicamente por la distribución de densidades del subsuelo. Por lo tanto, es necesario primero aplicar las debidas correcciones gravimétricas a los datos obtenidos en campo, que eliminan el efecto de la gravedad debido a la forma de la tierra, rotación, topografía, entre otros, antes de realizar las interpretaciones (Burger *et al.*, 2006).

5.1.1.1 Corrección por efecto de la Latitud. La gravedad varía con respecto a la latitud de la Tierra, debido a su forma no esférica y a su movimiento de rotación, que produce una fuerza centrífuga dirigida al exterior de ella.

Como el radio polar (6357 km) es 21 km más corto que el radio ecuatorial (6378 km), los puntos en los polos están más cerca del centro de masa de la Tierra, por lo tanto, el valor de la gravedad en los polos es mayor (aproximadamente un 0.7%) que en el Ecuador. Además, a medida que la Tierra gira una vez por día alrededor de su eje norte-sur, se produce una fuerza centrífuga que actúa en dirección opuesta a la gravedad, y es mayor donde la velocidad de rotación es mayor; es decir, en el Ecuador (1674 km / h) y disminuye a cero en los polos y como consecuencia directa, la gravedad en los polos es mayor que en el ecuador (Figura 5). Esto explica la variación de la gravedad de 978 Gals en el Ecuador a 983.2 Gals en los polos. (Reynolds, 2011; Burger *et al.*, 2006; Kearey *et al.*, 2002).

La fórmula de Clairaut relaciona la gravedad con la latitud en el elipsoide de referencia de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$g_n = g_e(1 + A\sin^2\phi + B\sin^2 2\phi) \text{ cm/s}^2$$

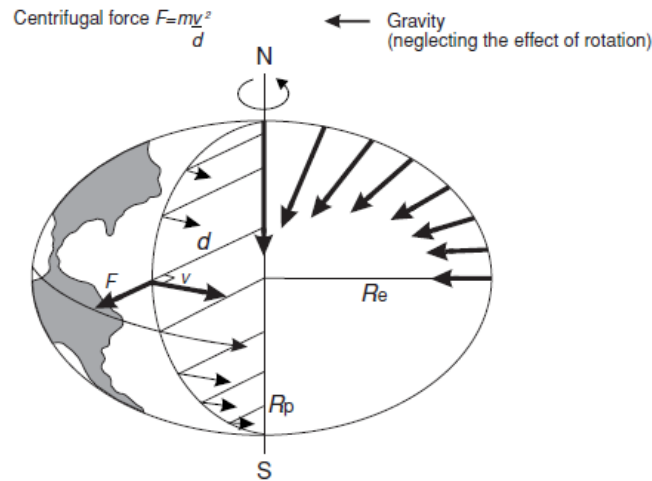
Donde g_n es el valor predicho de gravedad en una latitud ϕ , g_e es el valor de la gravedad en el ecuador, A y B representan constantes que tienen en cuenta la velocidad angular de la Tierra y su forma. El resultado es la fórmula siguiente, establecida con los parámetros definidos por el sistema de referencia geodésico de 1967 (GRS67):

$$g_n = 978.03185(1 + 0.005278895\sin^2\phi + 0.000023462\sin^4\phi) \text{ cm/s}^2$$

Figura 5.

Aceleración centrífuga y la variación de la gravedad con respecto a la latitud ϕ (no a escala).

Tomado de Reynolds (2011)



Generalmente, el valor de gravedad medido (g_{obs}), no coincide con el valor predicho por la fórmula del sistema geodésico de referencia (g_n). La diferencia $g_{obs} - g_n$ es llamada anomalía de gravedad.

5.1.1.2 Corrección de la elevación: Aire libre.

La corrección de aire libre se aplica a los datos para contrarrestar la disminución de la magnitud de la gravedad con la altura, en el aire libre; es decir, que no tiene en cuenta la masa entre el datum y el punto de observación (Lowrie, 2007; Kearey *et al.*, 2002; Burger *et al.*, 2006). Como en el caso de la corrección de latitud, se usa la más adecuada representación del carácter verdadero de la Tierra y se incluyen factores para la rotación y la forma del elipsoide. La relación final es:

$$FA_{corr} = 0.3086 - 0.00023\cos 2\phi + 0.00000002z \text{ mGal}$$

Donde ϕ es la latitud y z es la elevación. La corrección por el gradiente vertical debido al aumento de la distancia desde el elipsoide de referencia es significativa solo en regiones montañosas donde hay una extrema variación en la elevación (Burger *et al.*, 2006). El valor resultante después de añadir la corrección de aire libre (FA_{corr}) y sustraer la gravedad normal (g_n) a la gravedad observada (g_{obs}) es denominado como anomalía de aire libre.

La anomalía de aire libre (Δg_{FA}) se expresa como:

$$\Delta g_{FA} = g_{obs} - g_n + FA_{corr}$$

5.1.1.3 Corrección de elevación: Bouguer. Mientras la corrección de aire libre compensa la reducción de la gravedad debido al incremento de la distancia al centro de la tierra, la corrección de Bouguer es usada para tener en cuenta el efecto de la masa rocosa entre la estación de medición y el elipsoide de referencia (Reynolds, 2011). La corrección de Bouguer (BC) calcula la fuerza gravitacional adicional ejercida por una losa de roca de espesor h metros (corresponde a la diferencia de elevación entre la medición y los niveles de referencia) y densidad media ρ (Kearey *et al.*, 2002), así:

$$BC = 2\pi G\rho h = 0.04193\rho h \text{ [mGal]}$$

Siguiendo el mismo razonamiento que se hizo para la corrección de aire libre, la gravedad resultante después de realizar la corrección de Bouguer (BC_{corr}) es conocida como anomalía de Bouguer (Δg_{BC}) y es igual a (Burger *et al.*, 2006):

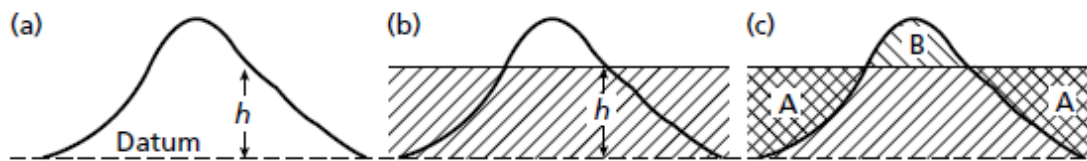
$$\Delta g_{BC} = g_{obs} - g_n + FA_{corr} - BC_{corr}$$

$$\Delta g_{BC} = \{g_{obs} - [978.03185(1 + 0.005278895\sin^2\phi + 0.000023462\sin^4\phi)] + [(0.3086 - 0.04193\rho)h]\} mGal$$

La corrección de Bouguer supone que la topografía alrededor de la estación de observación es plana. Esto raramente ocurre y por lo tanto debe hacerse la corrección del terreno (TC) para tener en cuenta el relieve topográfico en las proximidades de la estación de gravedad (Kearey *et al.*, 2002).

Figura 6.

a) Corrección de aire libre para un punto de observación a una altura h del datum. b) Corrección de Bouguer. La región sombreada corresponde a la losa de roca de espesor h que se extiende hasta el infinito c) Corrección de Terreno. Tomado de Kearey *et al.* (2002)



5.1.1.4 Corrección de Terreno: Topografía. La corrección de Bouguer supone una aproximación a una losa de roca horizontal semi-infinita entre la estación de medición y el nivel de referencia. No tiene en cuenta las colinas y los valles y es por eso por lo que la corrección del terreno es necesaria.

En la figura 6c, las regiones designadas como A forman parte de la losa de corrección de Bouguer donde no hay roca o sedimento presente. En consecuencia, la corrección de Bouguer ha sobre corregido estas áreas y su efecto debe ser restaurado por una corrección positiva del terreno. La

región B consiste en material de roca que ha sido excluido de la corrección de Bouguer. Ejerce una atracción ascendente en el punto de observación causando que la gravedad disminuya. Por lo tanto, su atracción debe corregirse mediante una corrección positiva del terreno (Kearey *et al.*, 2002)

Si TC representa la corrección de terreno, entonces la anomalía de Bouguer se convierte en la siguiente ecuación:

$$\Delta g_B = g_{obs} - g_n + FA_{corr} - B_{corr} - TC$$

5.1.2 Factores geológicos que afectan la densidad

La prospección gravimétrica es sensible a las variaciones en la densidad de las rocas, por lo que la apreciación de los factores que afectan la densidad ayudará a la interpretación de los datos de gravedad. Los rangos de densidades aparentes para una selección de diferentes tipos de materiales se muestran gráficamente en la figura 7 (Reynolds, 2011).

5.1.2.1 Rocas sedimentarias. Según Reynolds (2011), hay al menos siete factores que afectan la densidad de los materiales sedimentarios: composición, cementación, edad y profundidad de enterramiento, procesos tectónicos, porosidad y la relación fluido-poro.

5.1.2.2 Rocas ígneas. Tienden a ser más densas que las rocas sedimentarias, aunque hay superposición como se ve en la figura 7. La densidad aumenta con la disminución del contenido de sílice, por lo que las rocas ígneas básicas son más densas que las ácidas. Del mismo modo, las rocas plutónicas tienden a ser más densas que sus equivalentes volcánicos (Reynolds, 2011).

5.1.2.3 Rocas metamórficas. La densidad de las rocas metamórficas tiende a aumentar al disminuir la acidez y al aumentar el grado de metamorfismo. Por ejemplo, los esquistos pueden

tener densidades más bajas que sus equivalentes gnéissicos. Sin embargo, las variaciones en la densidad dentro de las rocas metamórficas tienden a ser mucho más erráticas que en rocas sedimentarias o ígneas y pueden variar considerablemente en distancias muy cortas.

Figura 7.

Variaciones en la densidad de rocas para diferentes tipos de rocas. Datos de Telford et al.

(1990) en Reynolds (2011)

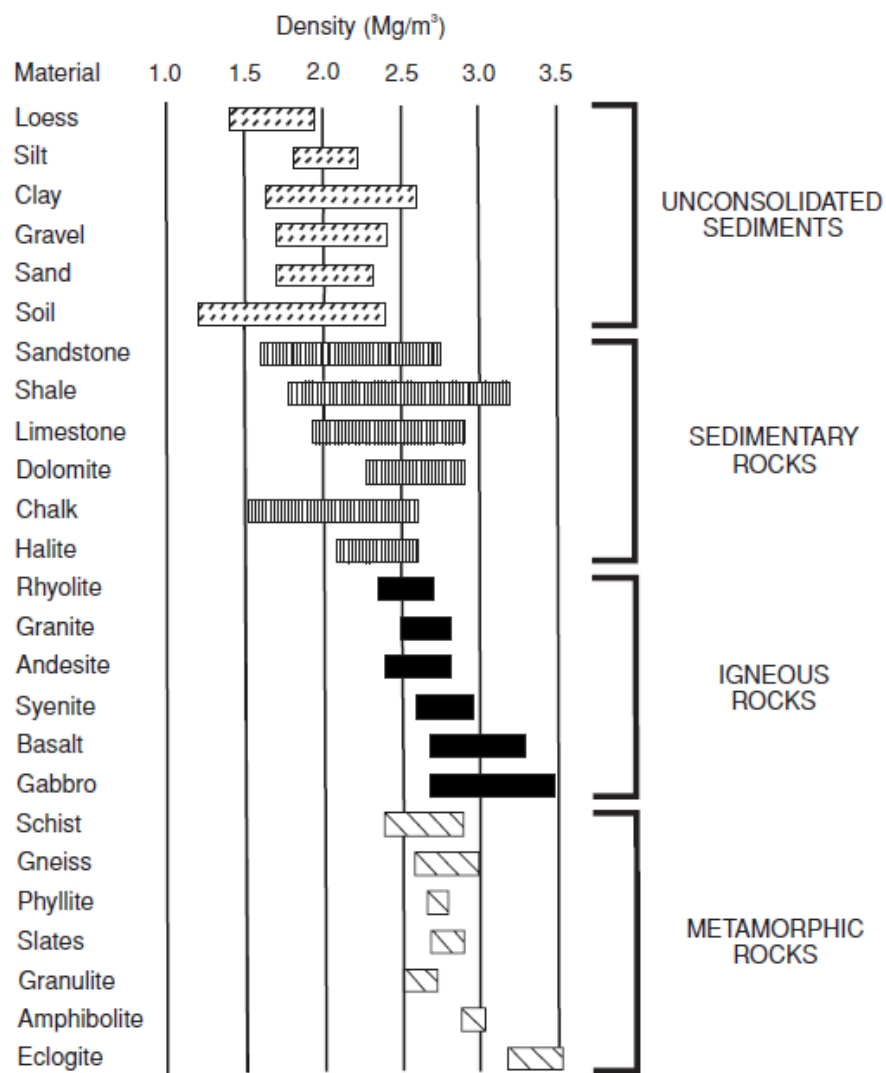
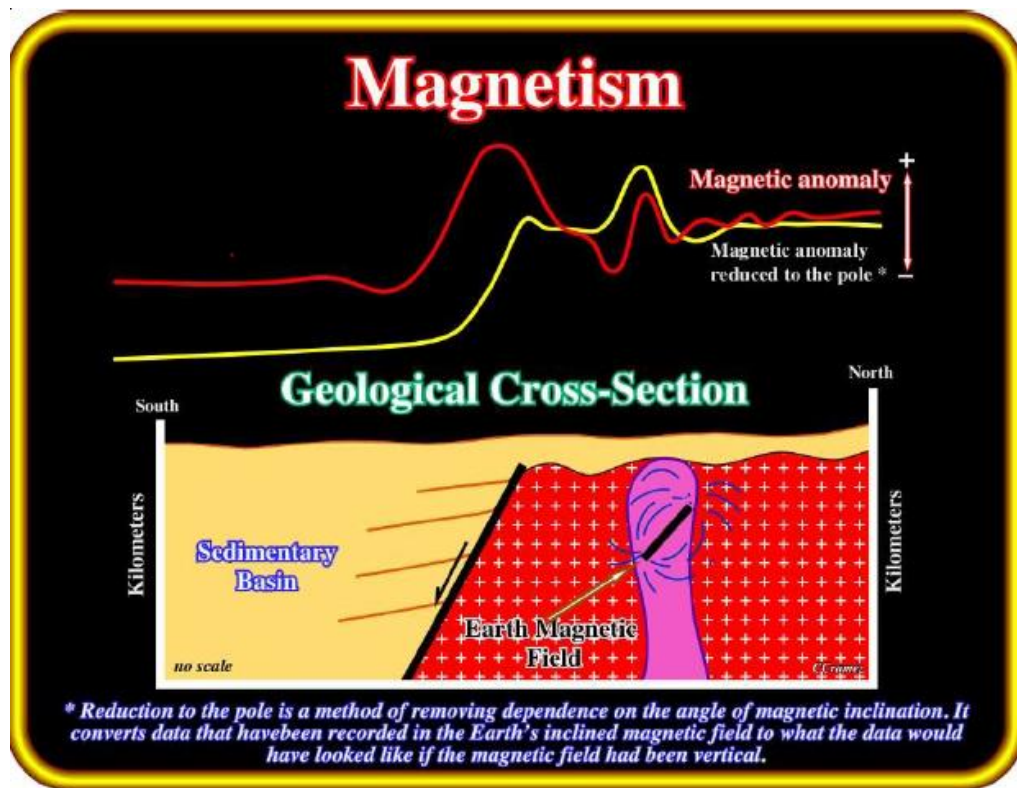


Figura 8.

Variaciones locales o anomalías en la intensidad del campo magnético. Las anomalías se comparadas e interpretadas en relación con un modelo geológico, en cuanto a la profundidad, tamaño, forma y magnetización de las características geológicas que las características geológicas que las causan. Tomado de Cramez (2007)

**5.2 Magnetometría**

Un estudio magnetométrico se realiza con el objetivo de investigar la geología del subsuelo, teniendo de base las anomalías en el campo magnético de la Tierra como resultado de las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes, como se evidencia en la figura 8. Aunque la

mayoría de los minerales formadores de rocas no son magnéticos, ciertos tipos de rocas contienen suficientes minerales magnéticos para producir anomalías significativas (Kearey *et al.*, 2002).

5.2.1 Susceptibilidad Magnética

La susceptibilidad es la medida de que tan apto es un material para magnetizarse. (Reynolds, 2011). Si se pone un material que puede ser magnetizado en un campo magnético externo H , la intensidad de magnetización I será proporcional a la fuerza del campo. (Burger *et al.*, 2006).

$$I = kH$$

K es la constante de proporcionalidad a la que se es referida como susceptibilidad magnética del material, y como I y H son medidas en A/m, esta constante es adimensional (Kearey *et al.*, 2002; Burger *et al.*, 2006; Lowrie, 2007).

Para materiales geológicos, la dirección de magnetización es paralela al campo magnético de la Tierra, el cual funciona como el campo inductor. (Burger *et al.*, 2006).

Los instrumentos usados en la adquisición de datos magnéticos en campo normalmente no determinan la orientación y magnitud de magnetizaciones remanentes en las rocas, ya que esto se establece normalmente en laboratorio; la información adquirida se interpreta como la anomalía debido a la magnetización inducida. (Burger *et al.*, 2006).

El comportamiento magnético de un objeto depende del momento magnético de los átomos que contiene. Basados en las susceptibilidades magnéticas, los minerales se clasifican en diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos (Burger *et al.*, 2006; Lowrie 2007). Los diferentes tipos de comportamiento magnéticos de los sólidos dependen no solo de la presencia de

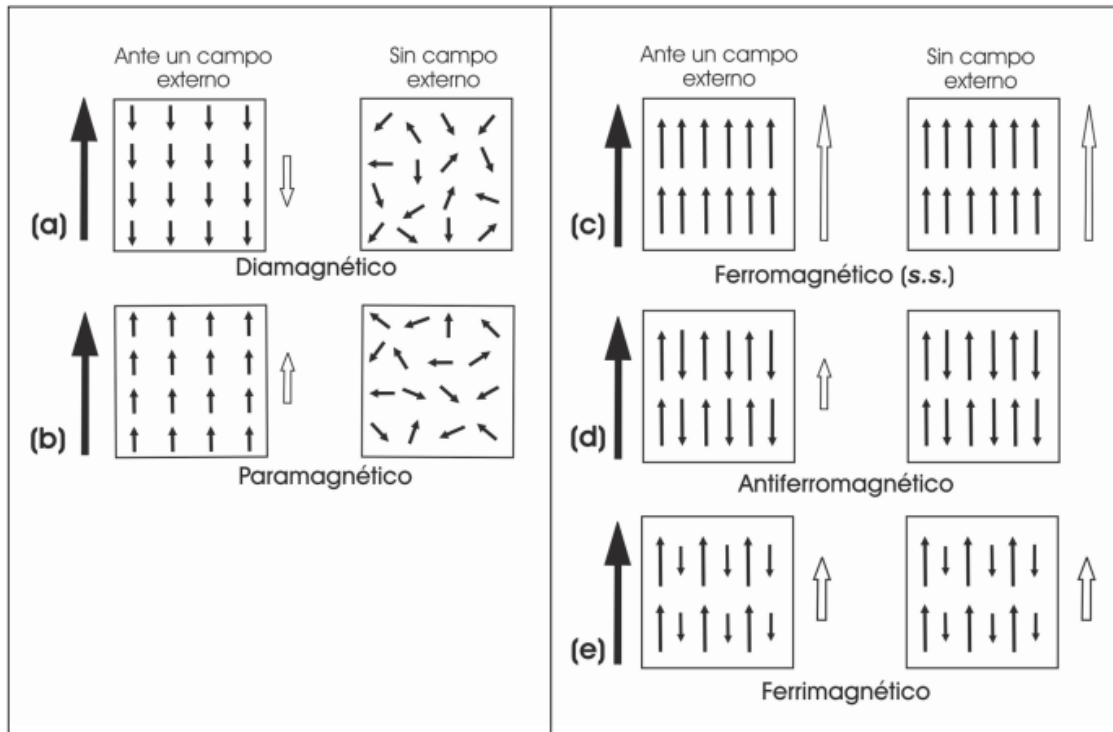
iones con espines no apareados, sino también de la simetría de su red cristalina y el tamaño de sus celdas. (Lowrie, 2007).

En los minerales *diamagnéticos*, la susceptibilidad magnética es reversible, negativa y débil; además, sucede cuando los electrones del material tienen los spines emparejados. El cuarzo, el feldespato y la halita son minerales diamagnéticos comunes y en ellos ocurre que todas las capas de electrones están completas, por lo que no hay electrones desapareados, así que cuando se aplica un campo magnético externo, se induce una magnetización y los electrones orbitan de tal manera que producen un campo magnético que se opone al campo aplicado, dando lugar a una susceptibilidad negativa débil. (Reynolds, 2011; Lowrie, 2007; Burger et al., 2006).

Los minerales *paramagnéticos* tienen susceptibilidades reversibles y positivas, pero los valores son muy bajos. Algunos minerales de este grupo son los silicatos ferromagnesianos como piroxenos, anfíboles, el granate y el olivino, así como carbonatos de hierro y manganeso, además de arcillas, como la montmorillonita (Burger et al., 2006). Los electrones no apareados en capas de electrones incompletas producen momentos magnéticos de espín desequilibrados. Cuando se aplica un campo externo, los momentos magnéticos de este material paramagnético se alinean en la misma dirección y el resultado es una susceptibilidad positiva débil, pero que disminuye inversamente con la temperatura absoluta según la ley de Curie-Weiss. (Reynolds, 2011)

Figura 9.

Diferentes tipos de comportamiento magnético. Las flechas rellenas indican el campo aplicado y las vacías la magnetización del material bajo el campo aplicado (lado izquierdo) o en ausencia del campo (lado derecho). Tomado de Caballero (2011)



Los materiales *ferromagnéticos* se pueden subdividir en tres categorías: ferromagnético s.s., antiferromagnético y ferrimagnético. La fuerza de magnetización de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos disminuye con la temperatura y desaparece al alcanzar la temperatura de Curie. Por encima de esta temperatura, las distancias interatómicas aumentan hasta separaciones que impiden el acoplamiento de electrones, y produce que el material se comporte como una sustancia paramagnética. (Kearey *et al.*, 2002).

El acoplamiento magnético puede ser tal que los momentos magnéticos estén alineados en paralelo (Figura 9c) o en antiparalelo como en un material antiferromagnético (Figura 9d). Un

material ferrimagnético, es uno en el que uno de los dos momentos magnéticos antiparalelos es más fuerte que el otro (Figura 9e), lo que produce una magnetización remanente neta incluso en ausencia de un campo magnético externo. (Reynolds, 2011).

El *ferromagnetismo s.s.* es un fenómeno que se observa en metales como el hierro, el níquel y el cobalto, así como en los materiales llamados ferritas, hechos de Hierro y Boro con Bario, Estroncio y Molibdeno; en los que la geometría de la red y el espaciado permiten el intercambio de electrones entre átomos vecinos de acuerdo con sus electrones de spin no apareado. Esto produce un campo molecular mediante el cual los momentos magnéticos de los átomos adyacentes refuerzan su alineación mutua paralela a una dirección común. El comportamiento ferromagnético se caracteriza por altas susceptibilidades positivas y fuertes propiedades magnéticas, que depende de la temperatura y la fuerza del campo aplicado. (Reynolds, 2011; Lowrie, 2007). Los minerales ferromagnéticos no ocurren naturalmente en la Tierra, aunque están presentes en meteoritos, por lo que no son de interés para la exploración geofísica (Burger *et al.*, 2006).

Los minerales *antiferromagnéticos* ocurren en los óxidos, donde los iones de oxígeno suelen mantener a los iones metálicos muy separados, de modo que no es posible el intercambio directo de electrones entre los iones metálicos. Sin embargo, en ciertos minerales, la interacción entre espines magnéticos se hace posible mediante el intercambio de electrones de un ion metálico a otro a través de la “nube” de electrones del ion oxígeno. Este proceso de intercambio indirecto da como resultado direcciones opuestas de momentos magnéticos atómicos adyacentes (figura 9d), y como resultado, la susceptibilidad de un material antiferromagnético es débil y positiva, y la magnetización remanente no es posible (Lowrie, 2007).

Cuando un material antiferromagnético contiene una imperfección en su estructura cristalina, un espacio o impureza, crea un *ferromagnetismo parásito*, debido a que algunos de los espines antiparalelos no están apareados o también sucede si los espines no son exactamente antiparalelos, sino que están inclinados en un ángulo pequeño. Un ejemplo de esto ocurre con la Hematita en el que tanto los momentos de inclinación como de defecto contribuyen a que tenga propiedades ferromagnéticas (Lowrie, 2007).

Un material es *ferrimagnético* cuando uno de los dos momentos magnéticos antiparalelos es más fuerte que el otro (figura 9e). Esto produce una magnetización remanente neta incluso en ausencia de un campo magnético externo. (Reynolds, 2011). El pequeño grupo de minerales ferrimagnéticos es geofísicamente importante, especialmente en relación con el análisis del campo paleomagnético de la Tierra, así como en la exploración geofísica. Los minerales que hacen parte de este grupo son la magnetita, titanomagnetita, ilmenita y pirrotita los cuales confieren propiedades magnéticas a las rocas (Burguer *et al.*, 2006, Lowrie, 2007).

5.2.2 *Magnetismo en las rocas*

En palabras de Reynolds (2011): “La susceptibilidad magnética es una propiedad extremadamente importante de las rocas, y es para los métodos de exploración magnética lo que la densidad es para los estudios de gravedad”.

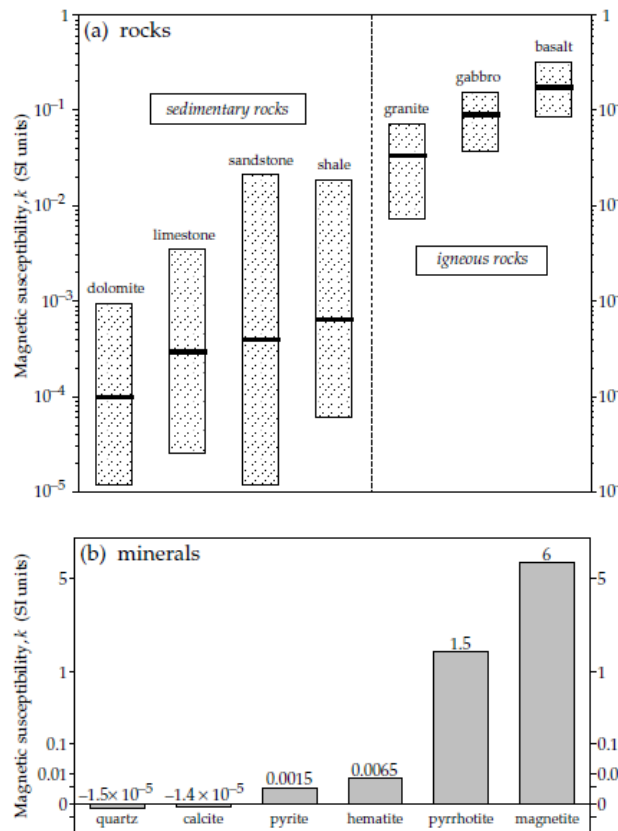
Los minerales formadores de rocas más comunes exhiben una susceptibilidad magnética muy baja y las rocas deben su carácter magnético a la proporción generalmente pequeña de minerales magnéticos que contienen, debido que las rocas están constituidas comúnmente por silicatos o carbonatos en su matriz, los cuales son carácter diamagnético, y tienen una menor cantidad de minerales secundarios, como arcillas, que tienen propiedades paramagnéticas. Las concentraciones variables de minerales ferrimagnéticos y de la matriz dan como resultado una

amplia gama de susceptibilidades en las rocas, como se observa en la figura 10. (Kearey *et al.*, 2002; Lowrie, 2007).

Los factores más importantes que influyen en el magnetismo de las rocas son: el tipo de mineral ferrimagnético que las compone, su tamaño de grano, alineación y forma de los granos magnéticos dispersos por la roca. La variación de las propiedades magnéticas en función de la orientación y la forma de los granos minerales se conoce como tejido magnético (Lowrie, 2007; Reynolds, 2011).

Figura 10.

a) Rangos y valores medios de susceptibilidad magnética de algunos tipos de rocas comunes, (b) susceptibilidades magnéticas de algunos minerales importantes. Tomado de Lowrie (2007)



Las rocas básicas y ultrabásicas tienden a tener las mayores susceptibilidades magnéticas, debido a su concentración significativa de minerales de hierro o ferrimagnéticos; las rocas ígneas y metamórficas ácidas tienen valores intermedios a bajos, y las rocas sedimentarias tienen susceptibilidades muy bajas. Las rocas metamórficas dependen de su material parental y es probable que las metapsammitas (protolito sedimentario cuarzoso) tengan diferentes susceptibilidades en comparación con las metabasitas (protolito ígneo básico) (Reynolds, 2011).

Hay dos grupos geoquímicos que proporcionan minerales ferrimagnéticos: (a) ***El grupo hierro-titanio-oxígeno***, que posee una serie de minerales magnéticos desde magnetita (Fe_3O_4) hasta ulvöspinel (Fe_2TiO_4). La hematita (Fe_2O_3) es otro óxido de hierro común, pero es antiferromagnético y, por lo tanto, no da lugar a anomalías magnéticas a menos que se desarrolle un antiferromagnetismo parasitario (Kearey *et al.*, 2002).

(b) ***El grupo hierro-azufre*** contiene el mineral magnético pirrotita (FeS_{1+x} , $0 < x < 0.15$). El mineral magnético más común es la magnetita, que tiene una temperatura de Curie de 578°C . (Kearey *et al.*, 2002).

Cuando se observan anomalías magnéticas sobre áreas cubiertas de sedimentos, las anomalías generalmente son causadas por un basamento ígneo o metamórfico subyacente, o por intrusiones en los sedimentos (Kearey *et al.*, 2002).

Las causas comunes de anomalías magnéticas incluyen diques, sills, flujos de lava, intrusiones básicas masivas, rocas metamórficas del basamento y cuerpos de magnetita. Las anomalías magnéticas varían en amplitud desde unas pocas decenas de nT sobre un basamento metamórfico profundo hasta varios cientos de nT sobre intrusiones básicas y pueden alcanzar una amplitud de varios miles de nT sobre menas de magnetita. (Kearey *et al.*, 2002).

La reducción de datos magnéticos es necesaria para eliminar todas las causas de variación magnética de las observaciones distintas de las que surgen de los efectos magnéticos del subsuelo (Kearey *et al.*, 2002), por lo que se deben tener en cuenta la corrección geomagnética y la corrección de variación diurna, que se van a revisar a continuación.

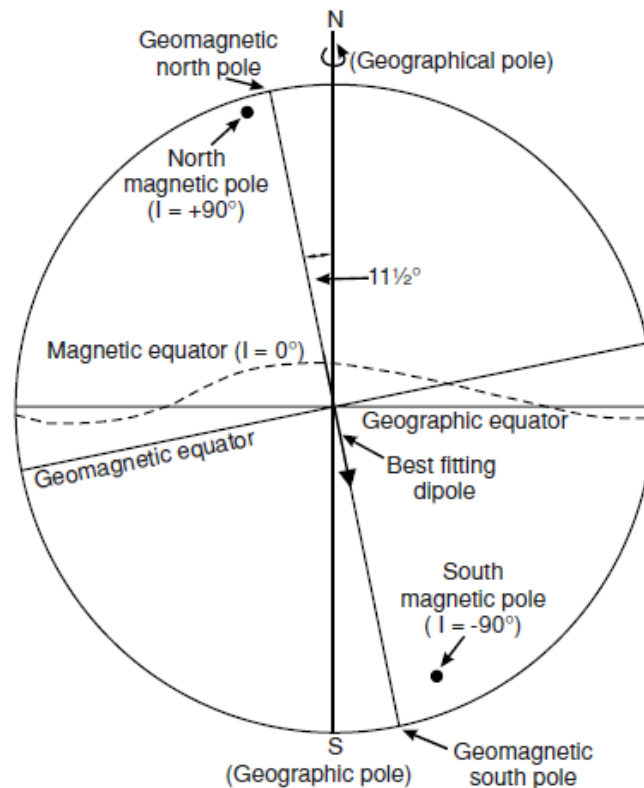
5.2.3 Corrección Geomagnética

El IGRF define el campo magnético teórico no perturbado en cualquier punto de la superficie de la Tierra. En la adquisición magnética, el IGRF se utiliza para eliminar aquellas variaciones magnéticas atribuibles a este campo teórico (Kearey *et al.*, 2002).

Con el IGRF se realiza la corrección geomagnética de los datos adquiridos, la cual es equivalente a la corrección de latitud en la gravimetría, ya que, para producir un mapa de anomalías magnéticas de una región, los datos deben corregirse para tener en cuenta los efectos de la latitud porque la fuerza del campo magnético de la Tierra varía de 25000 nT en el ecuador magnético a 69000 nT en los polos. Los datos del levantamiento magnético en cualquier ubicación determinada se pueden corregir restando el valor del campo teórico del IGRF del valor medido. (Reynolds, 2011).

Figura 11.

El campo debido a un dipolo geocéntrico inclinado. Tomado de McElhinny (1973) en Reynolds (2011)



5.2.4 Corrección de variación Diurna

El campo geomagnético varía diariamente debido a efectos magnéticos de origen externo, esto depende principalmente de la intensidad de la actividad solar debido a la llegada a la ionosfera de partículas solares cargadas. En condiciones normales la variación diurna es suave y regular y tiene una amplitud aproximada de 20-80nT, siendo máxima en las regiones polares. Los días perturbados se distinguen por variaciones diurnas mucho menos regulares e implican

et al., 2002). Aunque la interpretación de anomalías magnéticas y gravimétricas sea similar, debido a que ambas técnicas utilizan campos potenciales naturales basados en las leyes de atracción del cuadrado inverso, la primera resulta un poco más compleja. Una anomalía gravitacional es positiva o negativa, dependiendo de si el cuerpo causal es más o menos denso que su entorno, pero en las anomalías magnéticas, un cuerpo tiene elementos positivos y negativos debido a la naturaleza dipolar del magnetismo (Lowrie, 2007). Otra diferencia es que la densidad es un escalar, mientras que la magnetización es un vector y la dirección de magnetización controla la anomalía magnética y por ello la anomalía magnética suele estar menos relacionadas con la forma del cuerpo causante. A su vez, la intensidad de magnetización de una roca depende de la cantidad, tamaño, forma y distribución de sus minerales ferrimagnéticos (Lowrie, 2007).

La interpretación de anomalías magnéticas y gravimétricas tienen en común el problema de la ambigüedad en la interpretación debido al problema inverso, es por ello por lo que se deben realizar todos los controles externos sobre la naturaleza (correcciones) para reducirla (Lowrie, 2007).

5.3 Sísmica

5.3.1 Atributos sísmicos

Los atributos sísmicos son herramientas capaces de realzar características geológicas en información sísmica, los cuales revelan propiedades, relaciones y patrones en los datos sísmicos que de otra manera no serían visibles para los intérpretes (Barnes, 2016). Según The Schlumberger Oilfield Glossary (2015), un atributo sísmico es “cualquier propiedad medible del volumen sísmico, tales como la amplitud, el buzamiento, la fase, la frecuencia y la polaridad, que se miden

en una ventana de tiempo/profundidad, en una sola traza, en un grupo de trazas, o en una superficie interpretada a partir de los datos sísmicos”.

El uso de los atributos sísmicos se debe restringir a aquellos que se comprendan su significado geológico y geofísico, evitando los atributos netamente matemáticos, ya que el objetivo consiste en optimizar la interpretación, NO producir volúmenes inútiles (Barnes, 2007).

La detección de fallas es uno de los pasos más importantes en la interpretación sísmica, y existen una variedad de atributos sísmicos que mejoran su visualización y detección que son utilizados por los intérpretes (Othman et al., 2016). En el presente trabajo se aplicaron atributos geométricos y de acentuación de amplitud en el cubo sísmico, a saber:

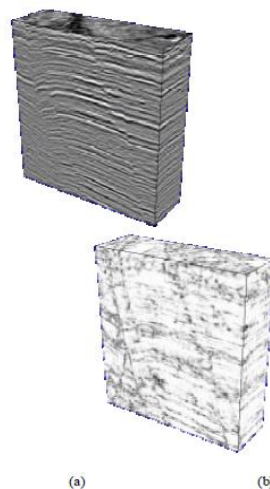
5.3.1.1 Structural smoothing. El atributo de *structural smoothing* o suavizado estructural se ocupa del suavizado de la señal de entrada guiada por la estructura local, para aumentar la continuidad de los reflectores sísmicos (Randen, 2002 en Othman, 2016). El suavizado de datos se realiza mediante promedios locales con un filtro de promedio ponderado gaussiano para obtener una mayor relación señal / ruido para interpretación estructural. Se utiliza como dato de entrada para la aplicación de otros atributos como varianza, caos y *dip deviation* (Schlumberger, 2015).

5.3.1.2 Varianza. Este atributo utiliza la varianza local como medida de discordancia de la señal. Para cada vóxel, la varianza local se calcula a partir de sub-sectores horizontales. Si este corte se encuentra dentro de una capa de reflexión ininterrumpida, la variación de amplitud será pequeña, mientras que los cambios de amplitud debidos a una falla darán como resultado una variación mayor (Randen et al., 2015). Además, revela discontinuidades en los datos sísmicos relacionadas con terminaciones estratigráficas o lineamientos estructurales. Una varianza alta puede sugerir fallas o enjambres de fracturas. (Schlumberger, 2015)

5.3.1.3 Caos. El patrón de señal caótico contenido en los datos sísmicos es una medida de la "falta de organización" en el método de estimación de buzamiento y azimut. (Othman, 2016). Este atributo se puede utilizar para iluminar fallas y discontinuidades y para la clasificación sísmica de textura caótica. El caos puede estar relacionado con características geológicas locales, tales como rutas de migración de gas, intrusiones de cuerpos de sal, texturas de arrecifes, relleno de canales, fallas y fracturas. (Othman et al., 2016; Randen et al. 2015).

Figura 13.

a) cubo sísmico, b) Aplicación del atributo de Chaos. Tomado de Randen et al. (2015)



5.3.1.4 RMS Amplitud. El atributo sísmico *Root-Mean-Square (RMS) amplitude*, se define como la raíz cuadrada de la media de las amplitudes en un conjunto de datos, dividida por el tamaño de la muestra de los datos dentro del tiempo deseado. (Meek, 2013). Este atributo se utiliza para mapear indicadores de hidrocarburos dentro de una zona al proporcionar una medida estadística de la magnitud de la variación en amplitud en un conjunto de datos. (Schlumberger, 2015).

6. Resultados

6.1 Anomalías geofísicas de la zona de estudio

Con el propósito de distinguir las fuentes de anomalías magnéticas y gravimétricas para diferenciarlas de los cuerpos o factores que puedan aportar ruido a la señal, se hace uso de las herramientas de procesamiento de datos geofísicos proporcionadas por el programa **Oasis Montaj 9.6** llevando a cabo la aplicación de los filtros que permitan trabajar con señales directamente relacionadas con las fuentes anómalas de interés.

A continuación, se presentan los pasos llevados a cabo, así como los mapas donde se evidencia el procesamiento de los datos magnéticos y gravimétricos mediante la aplicación de los diversos filtros descritos anteriormente en el apartado de metodología.

6.1.1 Magnetometría

En la Figura 14 se observa la anomalía de Campo Total, la cual se obtiene después aplicar tanto la corrección por variación diurna como la remoción del campo normal (IGRF).

La primera etapa en el tratamiento de los datos de magnetometría es la preparación del grid para la aplicación de los filtros, para esto se emplearon las herramientas **“Prepare Grid”** y **“Forward Fourier Transform”** del menú MAGMAP de Oasis Montaj. Esto con el fin de poder llevar a cabo la micronivelación del campo magnético anómalo aplicando los filtros Butterworth y Coseno direccional, los cuales se utilizan para eliminar el efecto de línea causado por la dirección en la que se dio la adquisición de los datos. Primero, se aplicó el filtro Butterworth, este filtro deja pasar solo las frecuencias más altas, las cuales se busca eliminar, ya que son las que contienen el efecto de bandeo. A continuación, se aplica el filtro coseno direccional en dirección norte-sur y este-oeste. Como resultado se obtiene un grid donde se evidencia el efecto de banda (Figura 15), posteriormente, usando la herramienta Grid Math se resta dicho grid a la Anomalía de campo total

(Figura 14) para obtener uno nuevo donde los errores de micronivelación ya no estén presentes (Figura 16).

Sobre los datos resultantes se utilizaron diversos filtros con el fin de reconocer, delimitar e interpretar las causas de dichas anomalías. En primera instancia se aplicaron las derivadas verticales (Figura 17), primera y segunda, con el fin de resaltar las fuentes geológicas poco profundas. En estas dos imágenes llama la atención principalmente un cuerpo de forma irregular ubicado al noroeste del área de estudio, así como numerosos cuerpos de menor tamaño que presentan una disposición lineal a lo largo del área.

No solo se tuvieron en cuenta las variaciones verticales, también las horizontales representadas en sus derivadas (D_x y D_y) las cuales, al combinarse, dan lugar al gradiente horizontal total, que brinda la posibilidad de verificar grandes variaciones laterales, enfatiza las altas frecuencias y ubica picos de anomalía muy cerca de los bordes de los cuerpos (Figura 18B).

En la Figura 18 (A) se muestra el mapa resultado de la aplicación del filtro de señal analítica. Este filtro ayuda a definir cuerpos magnetizados en el subsuelo y lineamientos presentes, pues produce una señal simétrica positiva sobre dichos cuerpos y estructuras ubicando el valor máximo en el centro, así mismo, permite tener una idea de que tan profundos pueden estar, ya que el ancho de la señal resultante es directamente proporcional a la profundidad (Salem, 2005).

Figura 14.

Anomalía de Campo Total

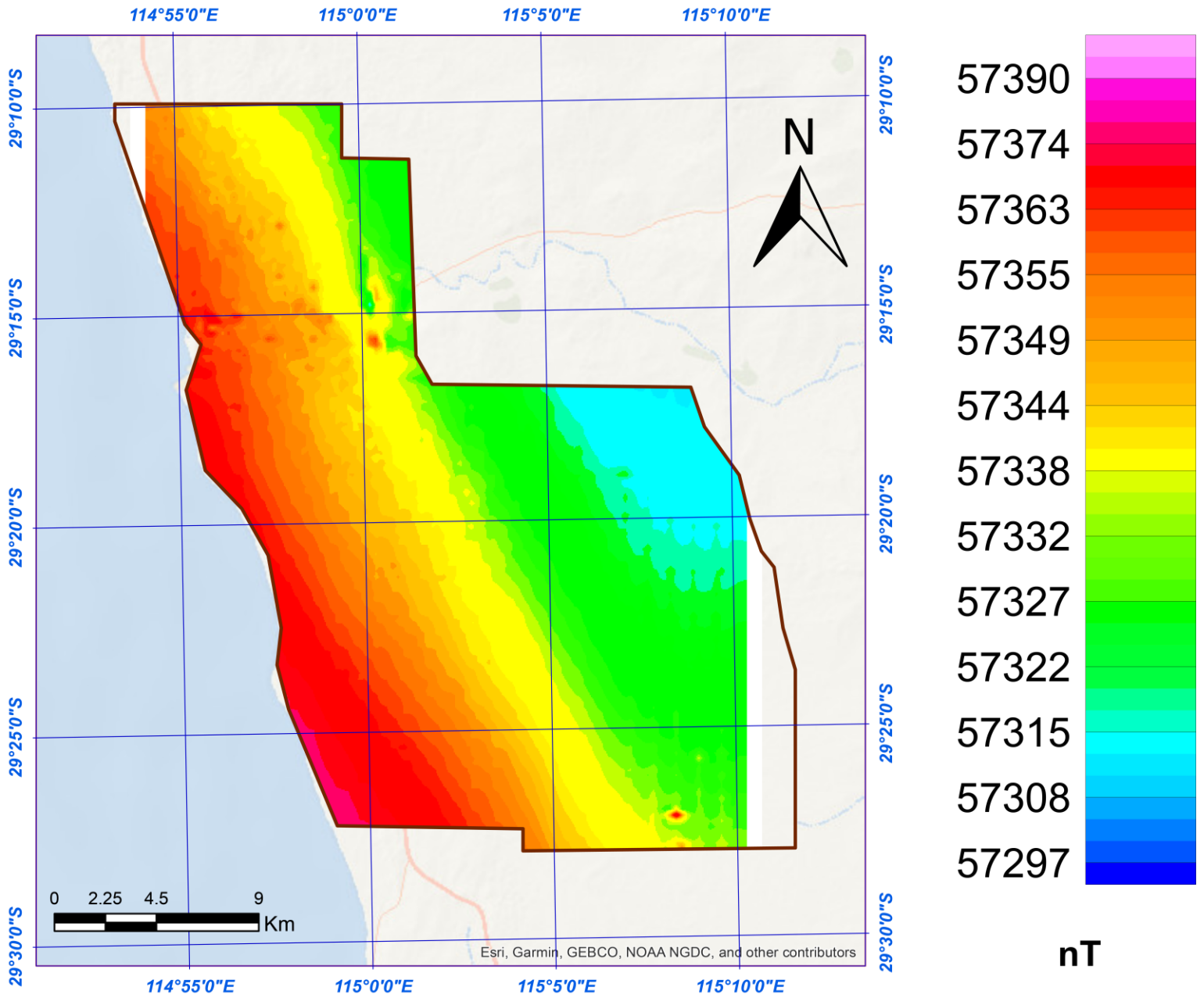


Figura 15.

Errores de micronivelación. En este mapa se evidencia el efecto de líneas de vuelo, debido a la dirección de la adquisición. La señal del error es calculada utilizando los filtros Butterworth y Coseno Direccional.

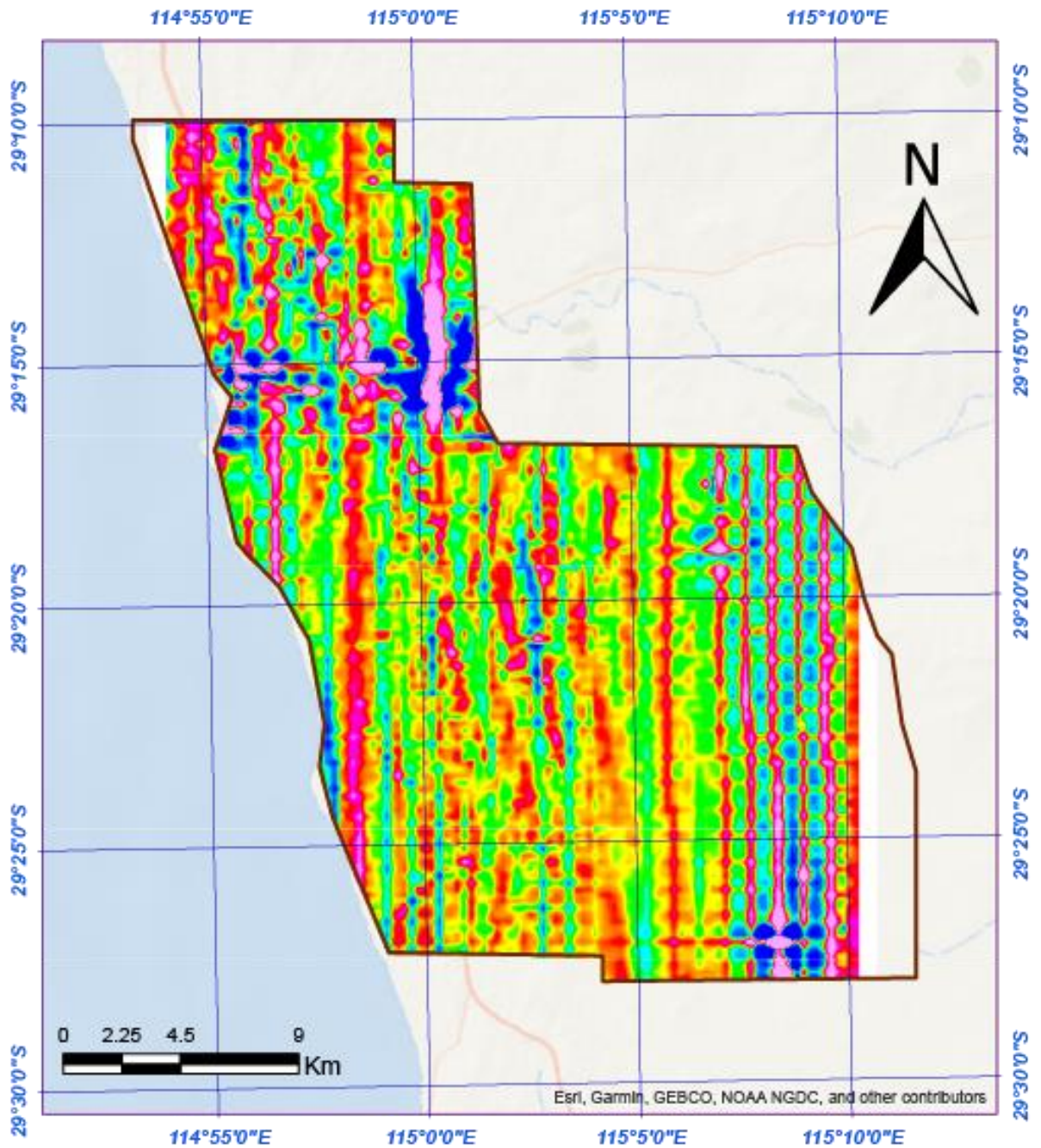


Figura 16.

Campo Magnético Micronivelado (Decorrugado). Obtenido mediante la sustracción de los errores de micronivelacion al campo anómalo.

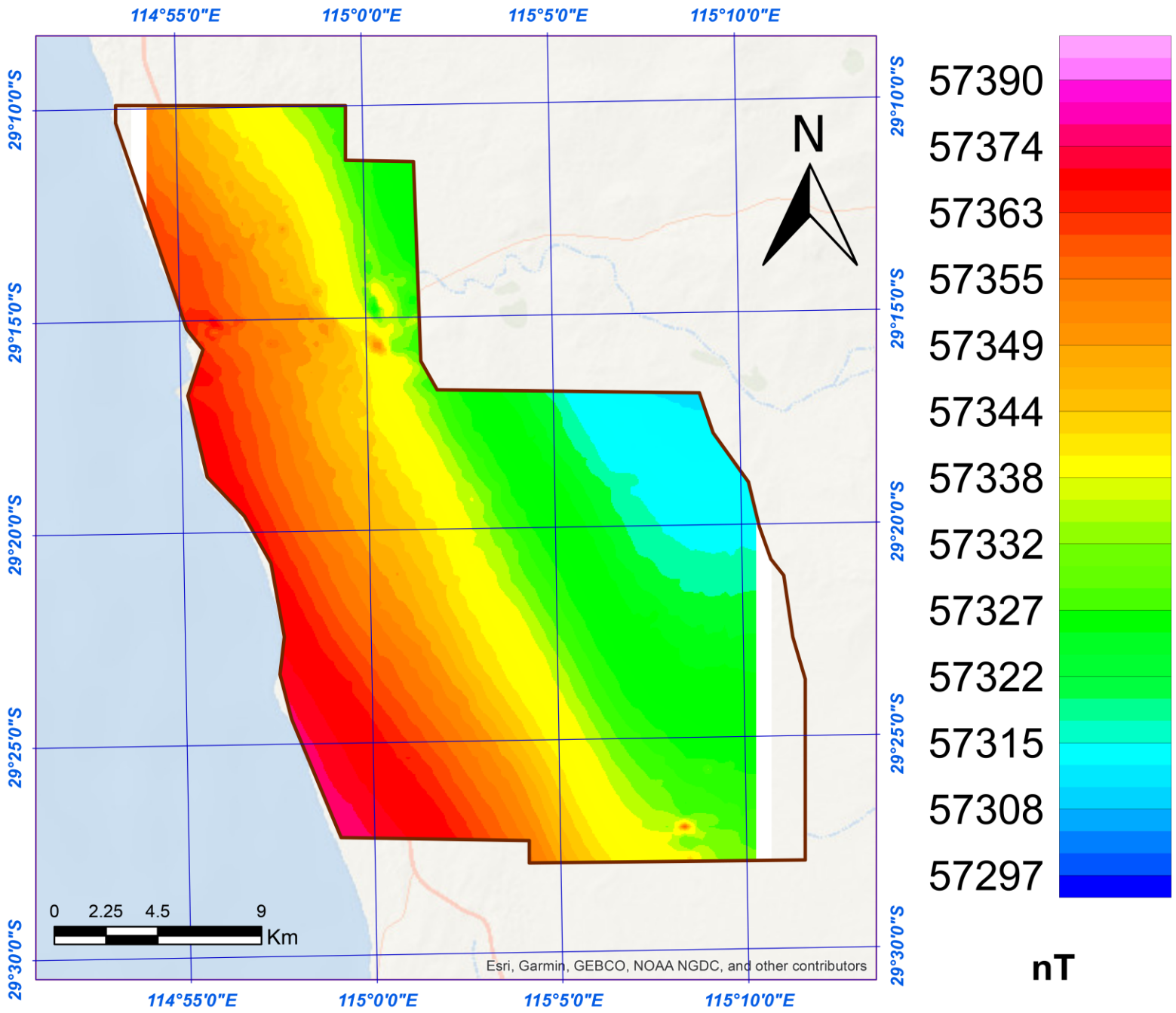
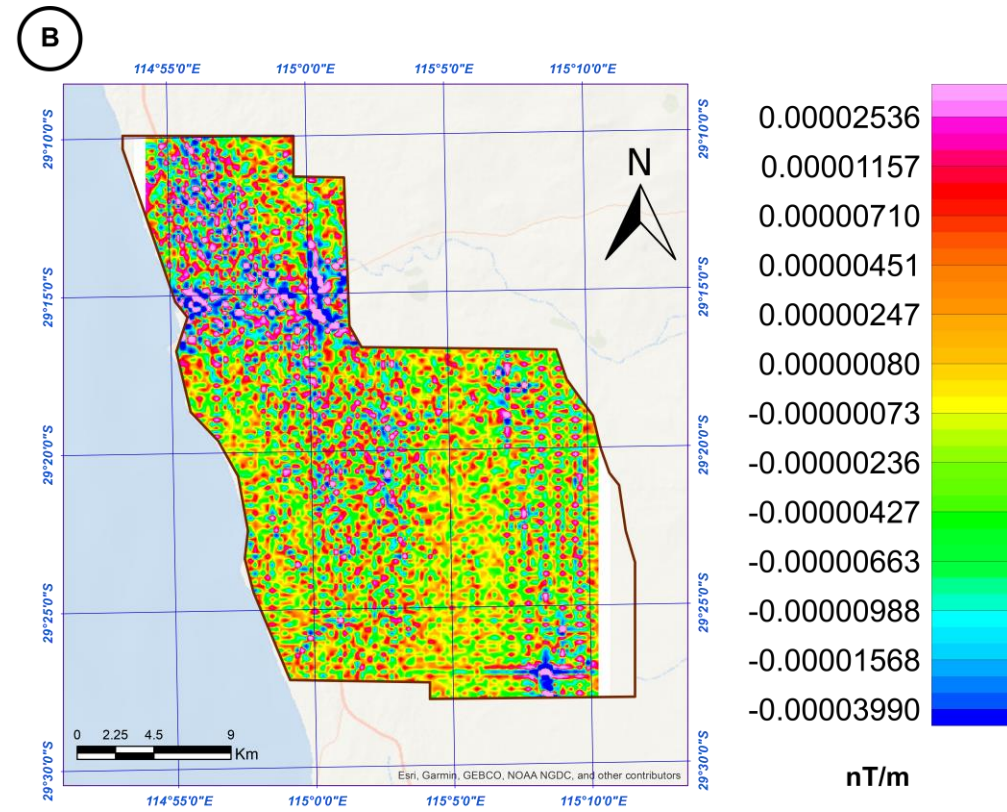
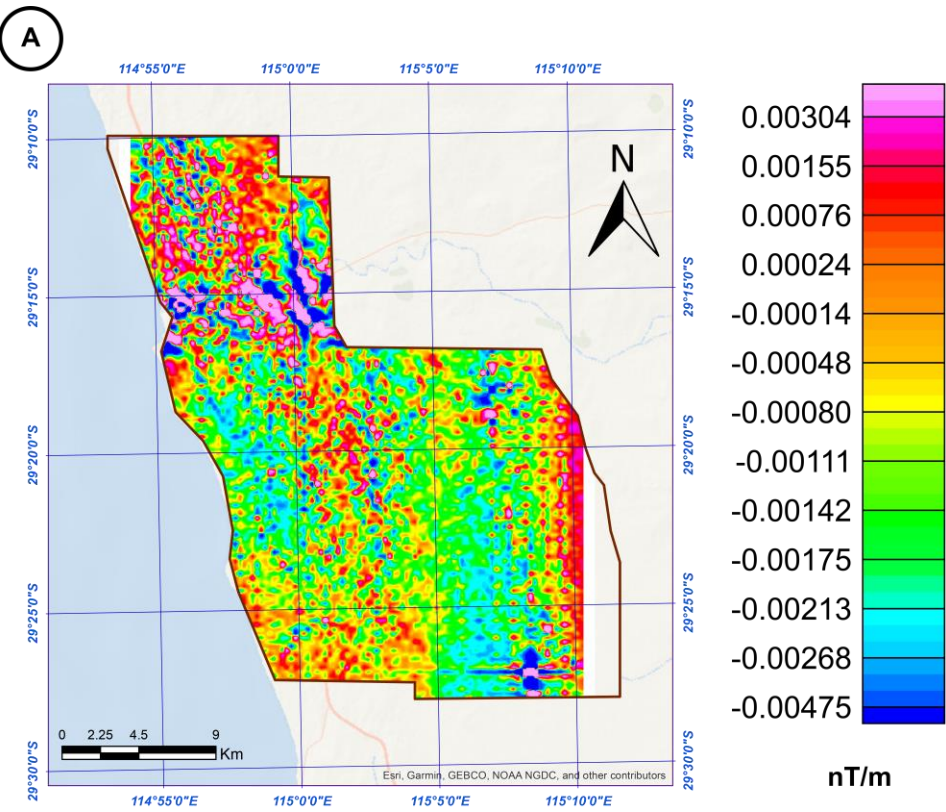


Figura 17.

Derivadas verticales (DZ), la figura A corresponde a la primera derivada vertical, la B a la segunda derivada vertical



De acuerdo con el análisis de los mapas obtenidos de los filtros de señal analítica y gradiente horizontal, se identificaron numerosos lineamientos (Figura 19) interpretados como un sistema de fallas con una dirección predominante NNW- SSE-. En la zona norte destacan lineamientos con una tendencia E-W y dos anomalías que llaman la atención por su forma irregular y su gran tamaño, las cuales pueden corresponder a cuerpos de mayor susceptibilidad, así como a una respuesta al régimen estructural marcado por los lineamientos encontrados alrededor de dichas anomalías, lo que reafirma las observaciones realizadas en las derivadas verticales.

Figura 18.

Señal Analítica (A) y Gradiente horizontal (B).

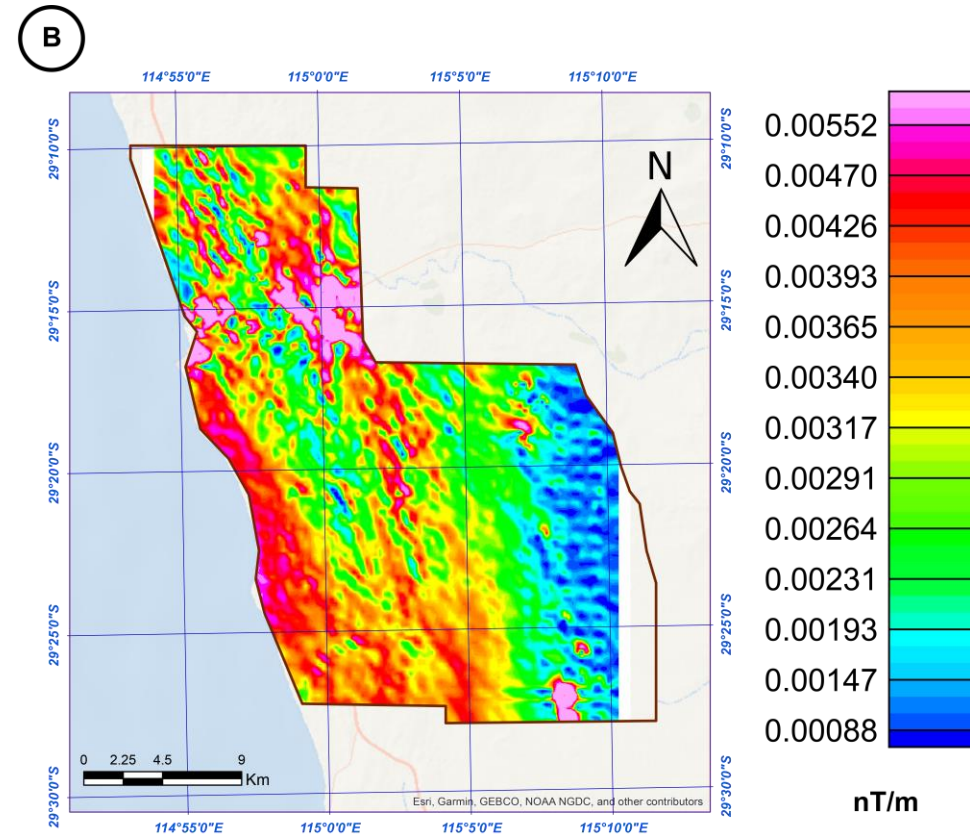
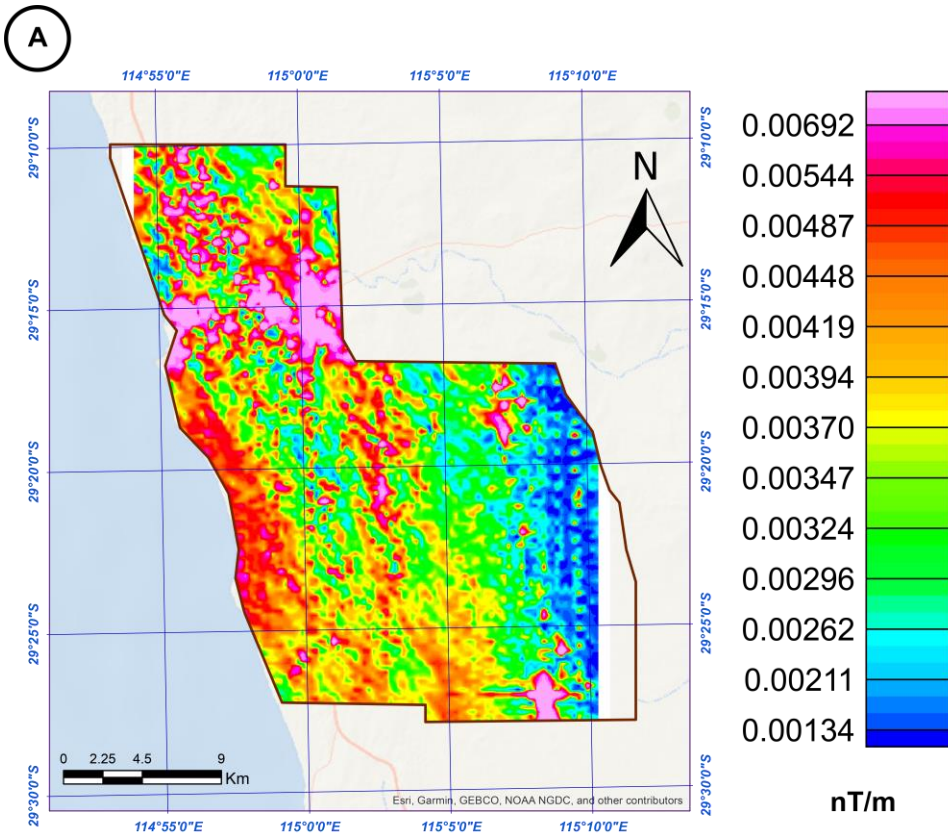
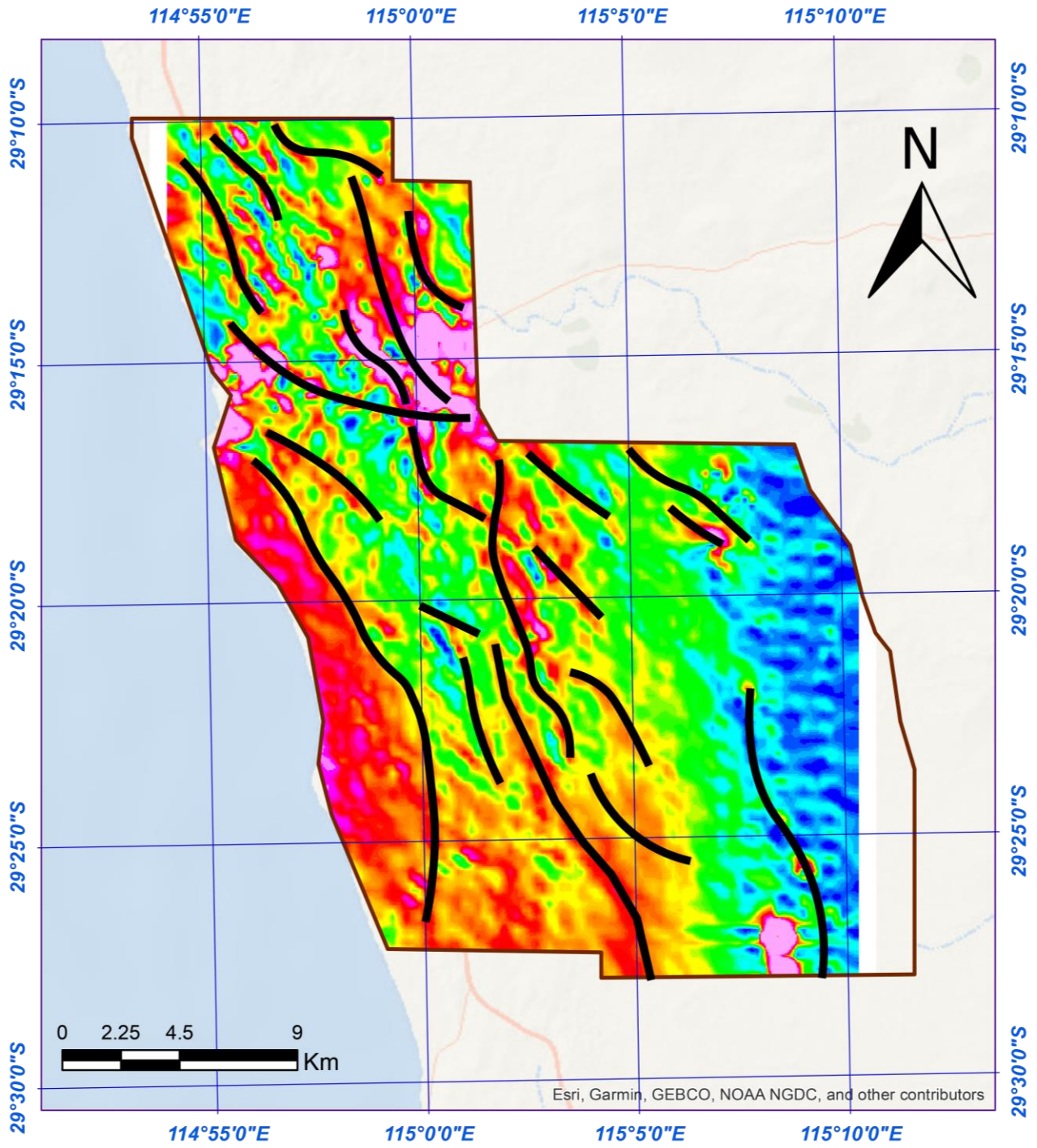


Figura 19.

Lineamientos interpretados sobre el grid de Gradiente Horizontal



6.1.2 Gravimetría

Los datos que fueron recolectados en el levantamiento gravimétrico son presentados en la Figura 20, en donde se presentan los datos crudos, ya que no han sido alterados por ningún filtro o corrección. En este mapa es posible evidenciar altos gravimétricos en toda la zona de interés, siendo el margen occidental de la misma el que muestra los valores más altos de densidad, concordando con el área ubicada al occidente de los lineamientos mencionados en el apartado anterior.

En los mapas de anomalía de Bouguer (Figura 21 A) y anomalía de Bouguer residual (Figura 21 B) se continúa marcando esta tendencia de altas densidades en la zona más occidental, correspondiendo a un cambio en la profundidad del basamento. Las zonas más profundas del basamento están marcadas por las anomalías de gravedad más negativa, representada en el mapa de anomalía de Bouguer residual con las tonalidades azules y verdes.

Figura 20.

Mapa Gravedad Absoluta

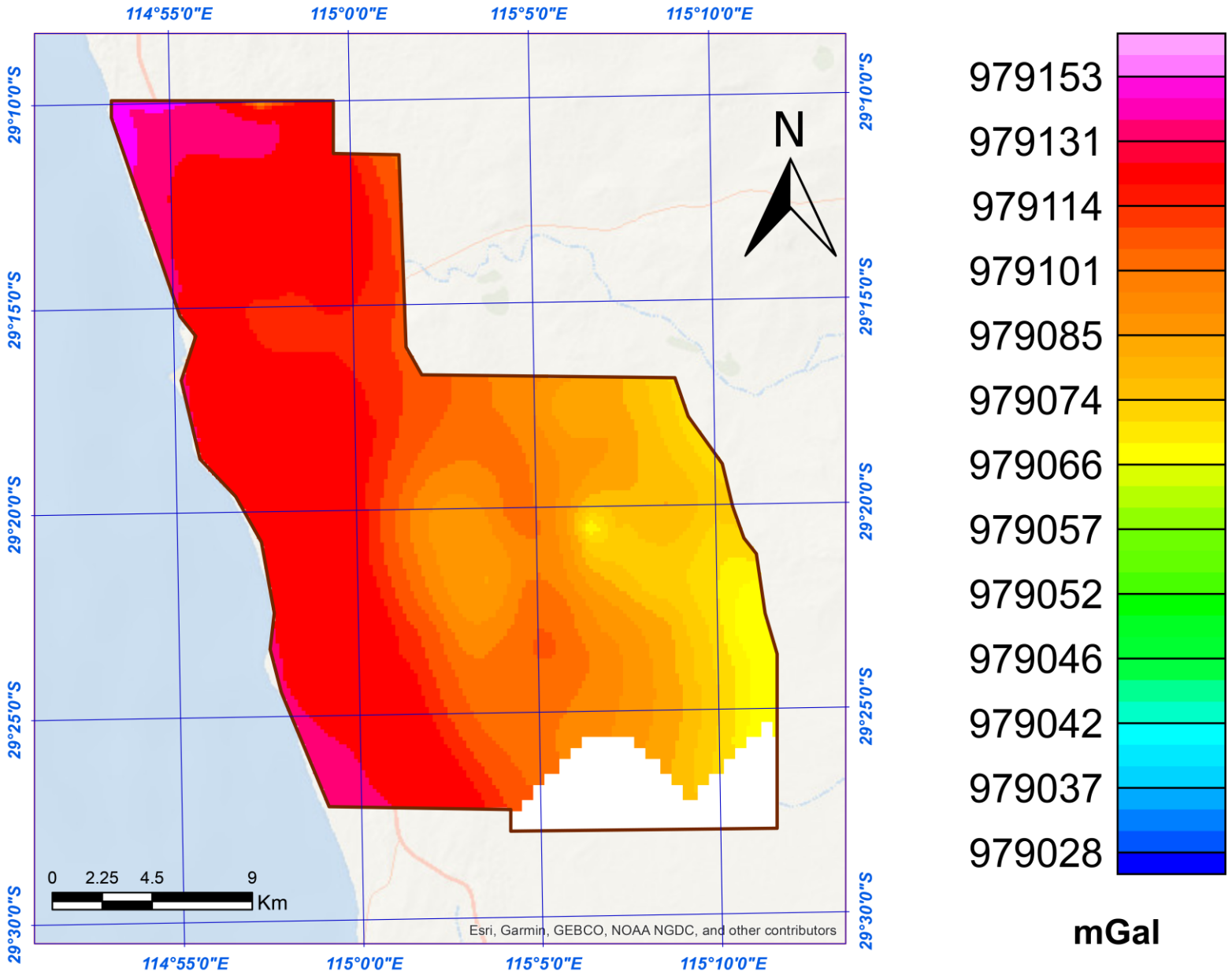
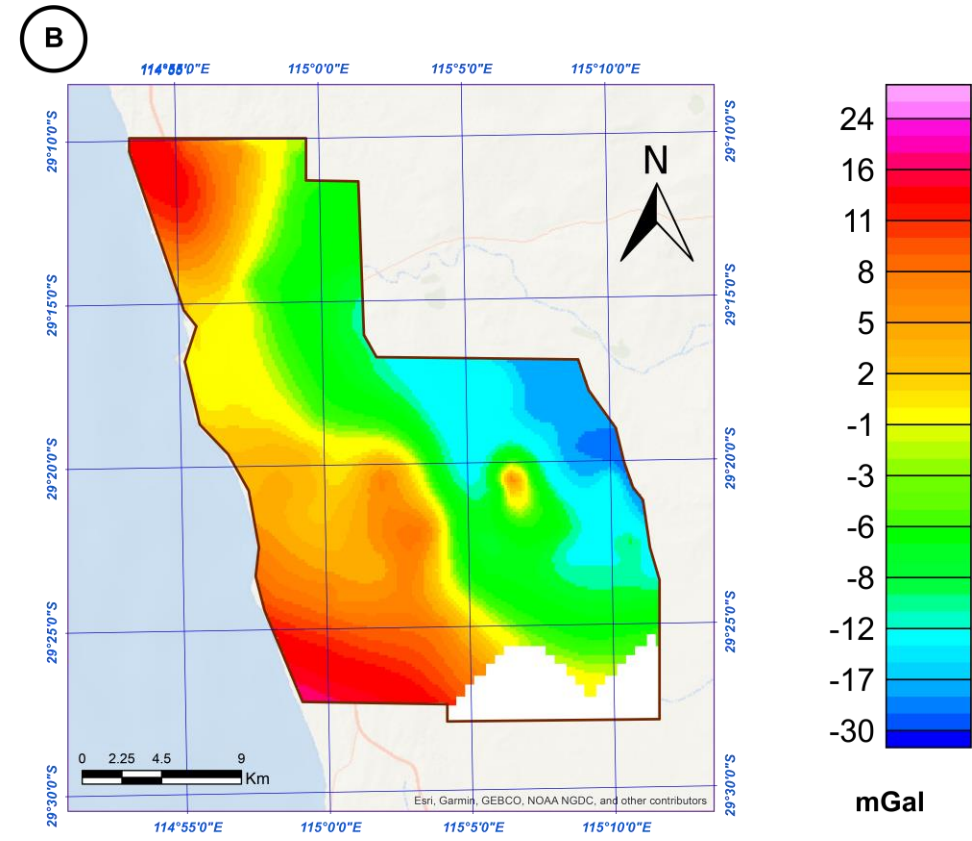
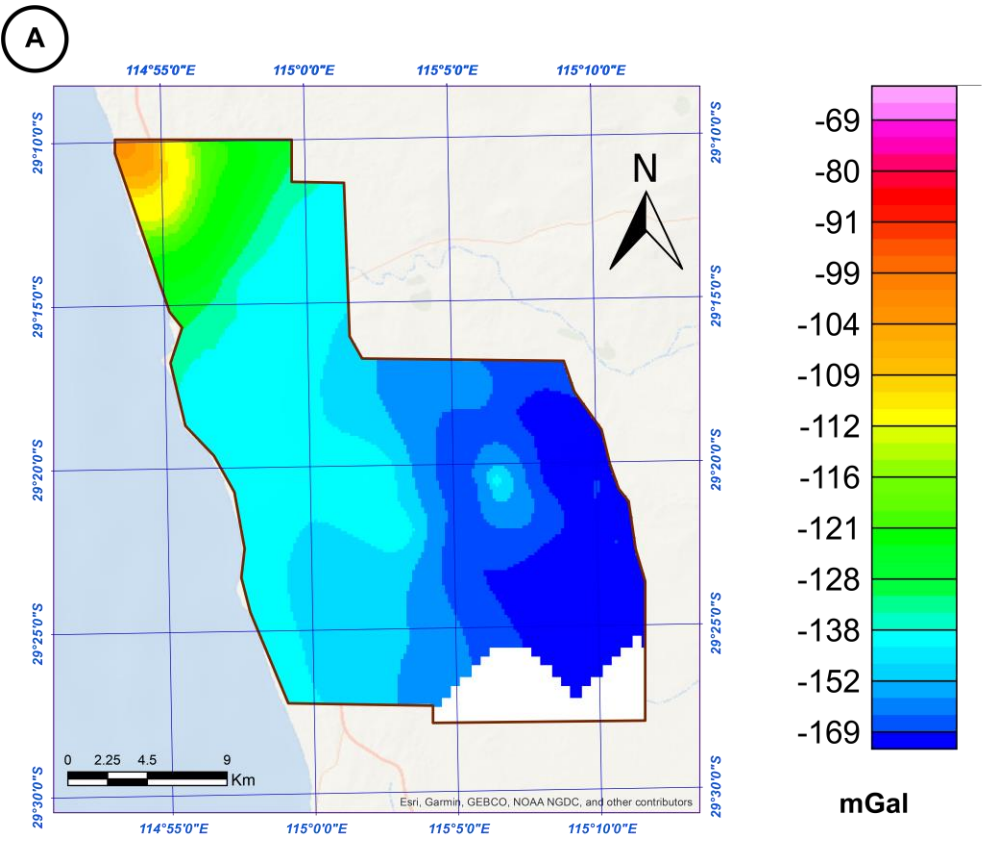


Figura 21.

Anomalía de Bouguer (A) y Anomalía de Bouguer Residual (B)



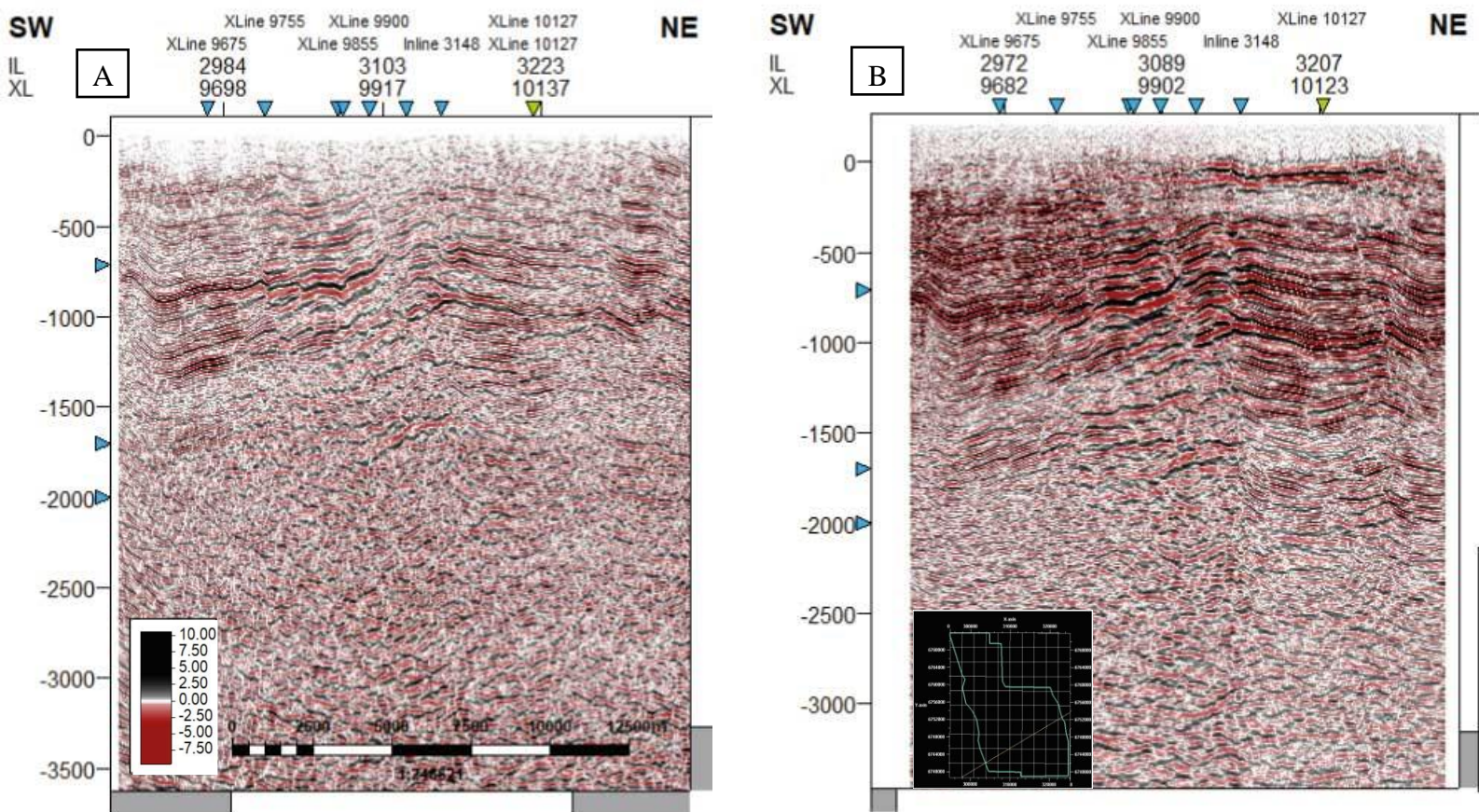
6.2 Geometría, disposición y estructura del basamento

6.2.1 Interpretación Sísmica

La interpretación de fallas y horizontes se realizó en el software de **Petrel 2020.4**. Inicialmente se aplicó al cubo sísmico el atributo de suavizado estructural (structural smoothing) con el fin de mejorar la continuidad de los reflectores (Figura 22).

Figura 22.

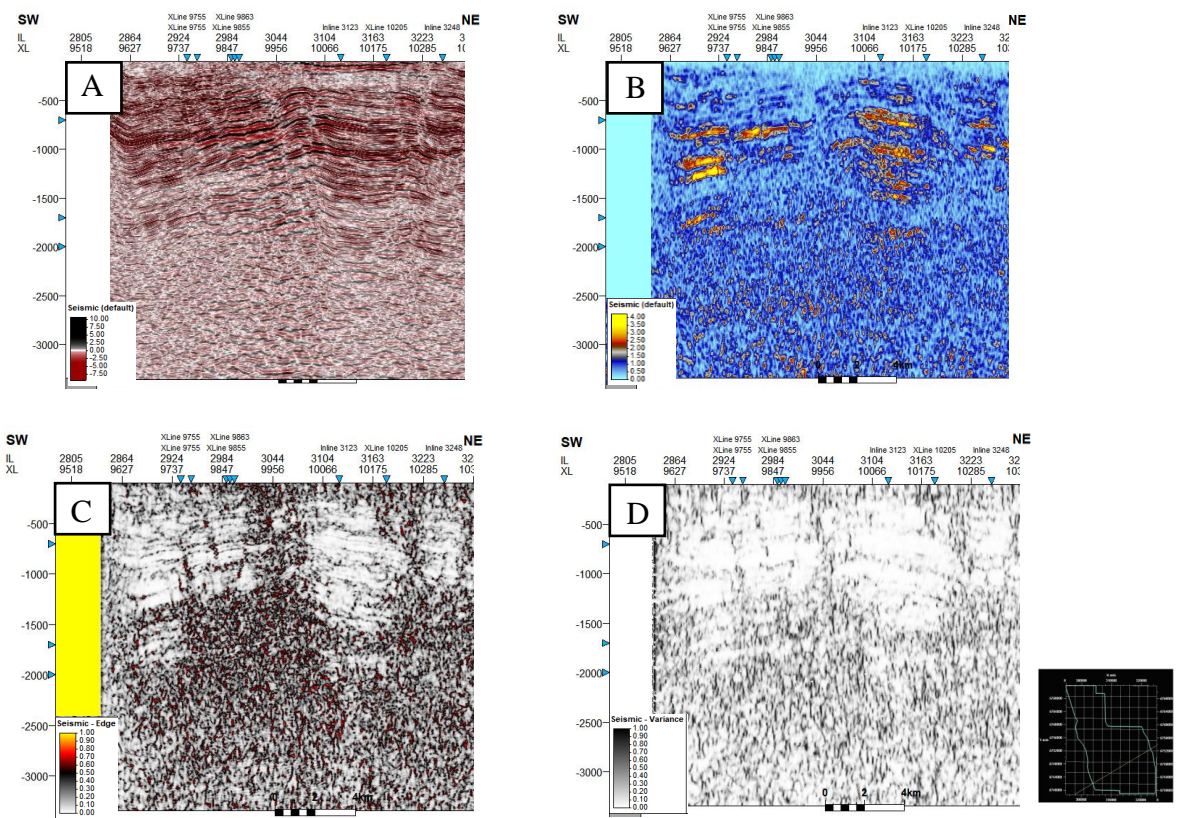
Línea sísmica aleatoria (Random Line) en dirección N60E A. Sísmica original B. Sísmica con atributo de suavizado estructural



Posteriormente, se corrieron los atributos sísmicos de RMS Amplitud, Caos y Varianza sobre la sísmica con suavizado estructural (Figura 23).

Figura 23.

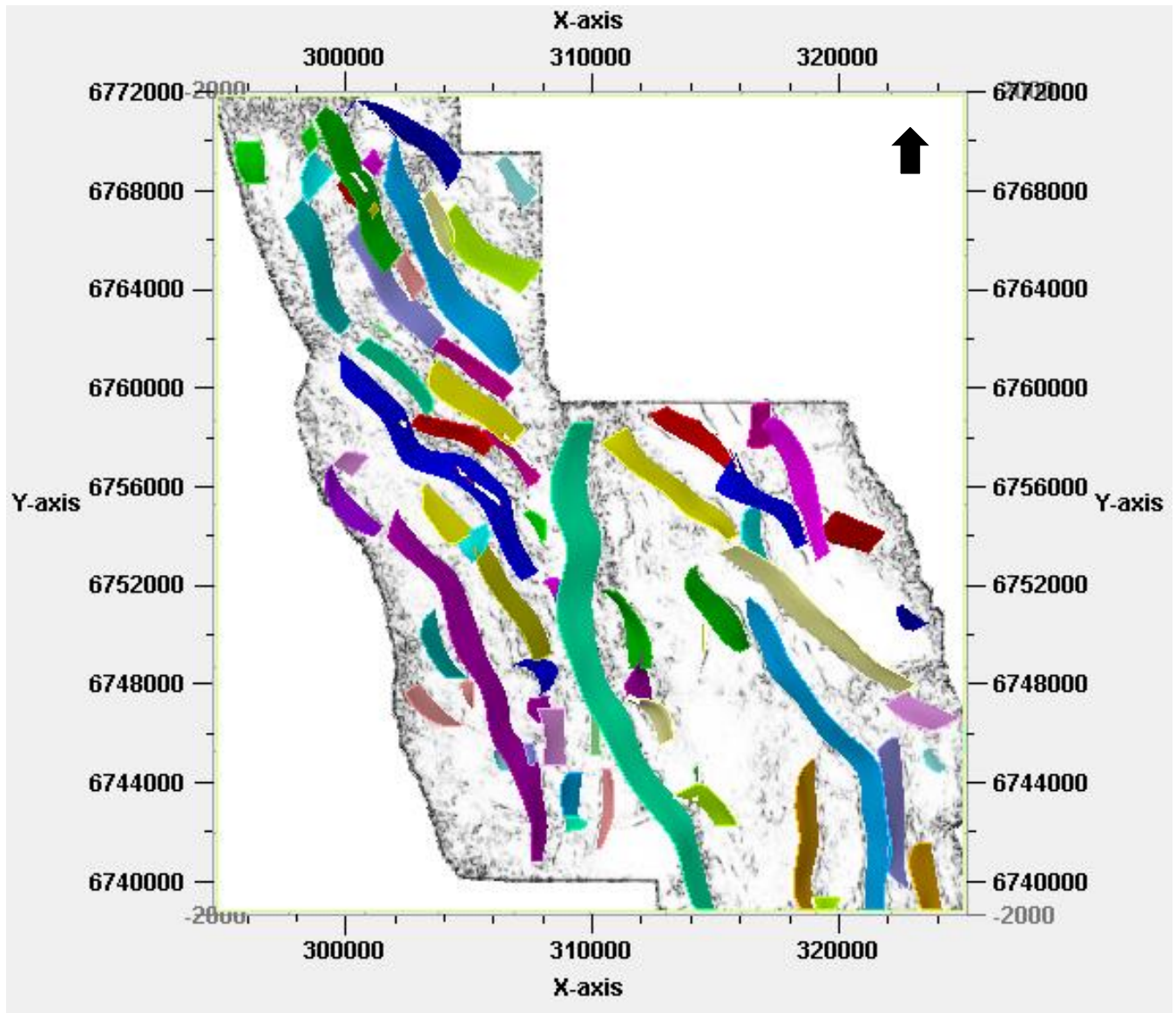
Línea sísmica aleatoria (Random Line) en dirección N60E con atributos sísmicos A. Suavizado estructural, B. RMS Amplitud, C. Caos, D. Varianza.



Se trazaron 69 fallas en el cubo sísmico, teniendo en cuenta las discontinuidades de los reflectores, resaltadas por los atributos mencionados anteriormente. Las fallas presentan dos direcciones preferenciales: a) N45°W y b) N20°W aproximadamente (Figura 24)

Figura 24.

Vista en planta del cubo sísmico con el atributo de Varianza y las superficies de las fallas trazadas



Se interpretaron 5 horizontes sísmicos, que corresponden al tope del basamento, el tope de las areniscas de Dongara (límite Pérmico-Jurásico), tope de la formación Kockatea (Triásico inferior), tope de la formación Eneabba (Jurásico inferior), y tope de los mantos de carbón de

Cattamarra (Jurásico medio) (Figura 25). Los marcadores para identificar y trazar cada horizonte fueron tomados del reporte de la interpretación sísmica de la zona realizada por AWE limited (2014).

Estos horizontes representan eventos tectonoestratigráficos regionales, como se observa en la columna estratigráfica (Figura 3), y se pueden seguir a través de los reflectores y facies sísmicas características de cada intervalo (Figura 25) (Ver Tabla 1).

Figura 25.

Línea sísmica interpretada en tiempo (TWT) con fallas principales y 6 intervalos tectonoestratigráficos

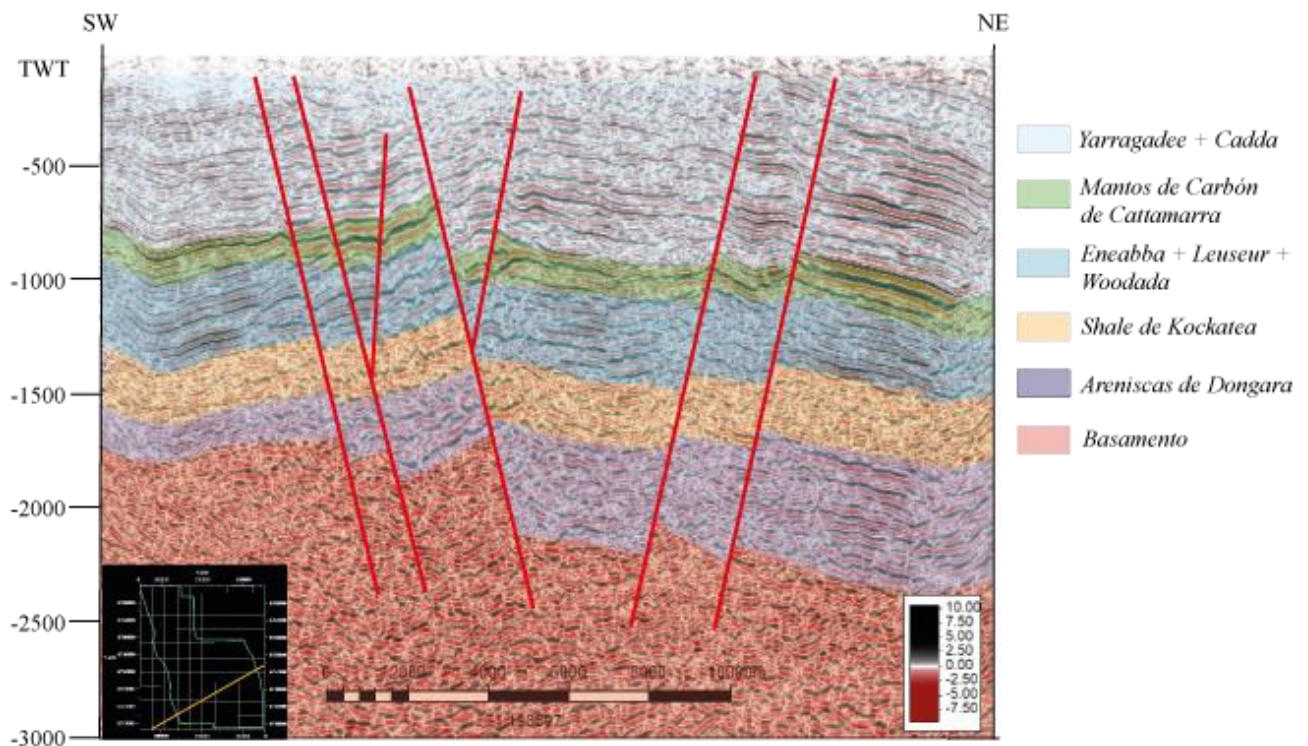
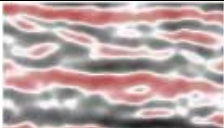
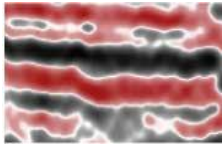
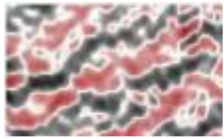
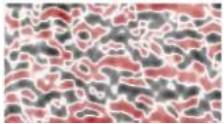
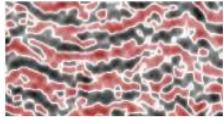
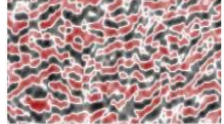


Tabla 1.*Facies sísmicas asociadas a cada intervalo estratigráfico*

Intervalos Tectonoestratigráficos	Facies Sísmica Asociada	Imagen Sísmica
Yarragadee-Cadda	Reflectores semicontinuos y semi paralelos, con amplitudes medias a altas.	
Mantos de carbón de Cattamarra	Reflectores continuos y gruesos, con altas amplitudes y geometría interna plano paralelo.	
Eneabba-Leuseur-Woodada	Reflectores semicontinuos y semi paralelos, con amplitudes medias.	
Shale de Kockatea	Reflectores discontinuos, de baja amplitud, caóticos.	
Areniscas de Dongara	Reflectores discontinuos a semicontinuos con amplitudes medias y configuración contorsionada.	
Basamento	Reflectores discontinuos, con baja amplitud y alto ruido.	

6.2.2 *Perfiles potenciales*

Una vez aplicados los diferentes filtros y realizados los cálculos correspondientes sobre los datos y grids de los métodos potenciales mencionados en el apartado 6.1, se llevó a cabo una integración de estos mediante el modelado 2D de 4 secciones haciendo uso de la herramienta GM-SYS (Oasis Montaj 9.6). Para los datos de entrada se integraron los grids de anomalía de Bouguer (Figura 27A) y campo magnético micronivelado (Figura 22).

La Figura 26 muestra la dirección de los 4 perfiles sobre los cuales se llevó este proceso de modelado bidimensional en el que se busca proponer geometrías que representen la disposición de los cuerpos del subsuelo, cuya respuesta se asemeje a la firma magnética y gravimétrica de los datos observados a lo largo del corte, buscando la mejor coincidencia entre ambas curvas (Bakely, 1996) tal como se muestra en la Figura 27. Este modelado tomo como referencia lo interpretado en el cubo sísmico, tomando en cuenta las fallas y los 5 intervalos sedimentarios trazados, cuyos valores de densidad promedio mostrados en la Tabla 2, fueron obtenidos del registro RHOB de los pozos Beharra Springs 3, Snotty Gobble, Hovea-3 y Evandra-1, localizados en la Figura.1. En cuanto a la susceptibilidad magnética se tomó en todos los intervalos sedimentarios un valor de 0.

Tabla 2.

Densidades usadas en los intervalos sedimentarios, obtenidas del promedio del registro RHOB de los pozos Beharra Springs 3, Snotty Gobble, Hovea-3 y Evandra-1

Formación	Densidad (g/cm³)
Yarragadee, Cadda	2.34
Mantos de Carbón de Cattamarra	2.33
Eneabba, Leuseur, Woodada	2.47
Shale de Kockatea	2.6
Areniscas de Dongara	2.59

Bodorkos et al. (2016) estudiaron el basamento de la cuenca Perth; tomaron muestras al norte y sur de la cuenca y definieron en el Beagle Ridge, estructura adyacente a la zona de estudio del presente trabajo, que su litología correspondía a un ortogneis de protolito granítico. Con base

a esto se definió para el basamento una densidad de 2.85 (g/cm³) y una susceptibilidad magnética de 0.00125 (SI). En el proceso de modelado con estos valores se obtuvo una respuesta gravimétrica que se asemeja bastante a la de los datos observados, sin embargo, no ocurría lo mismo en el caso de la curva de magnetometría, por lo que se propuso una diferenciación entre dos tipos de roca o variaciones minerales en el basamento. Los valores de densidad y susceptibilidad magnética de estos dos basamentos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Densidades y Susceptibilidad magnética del basamento

	Densidad (g/cm ³)	Susceptibilidad magnética (SI)
Basamento 1	2.85	5x10 ⁻⁵
Basamento 2	2.85	0.00125

Figura 26.

Dirección de los perfiles

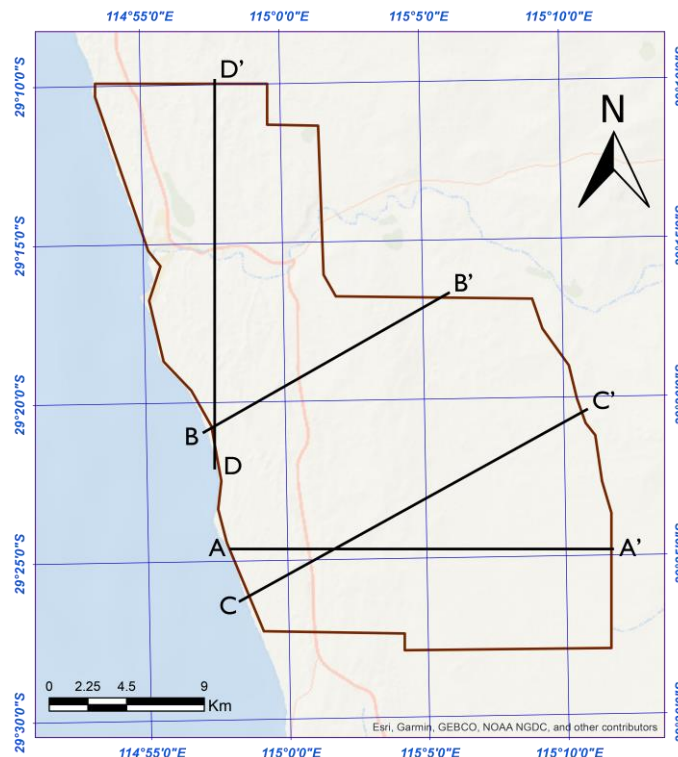
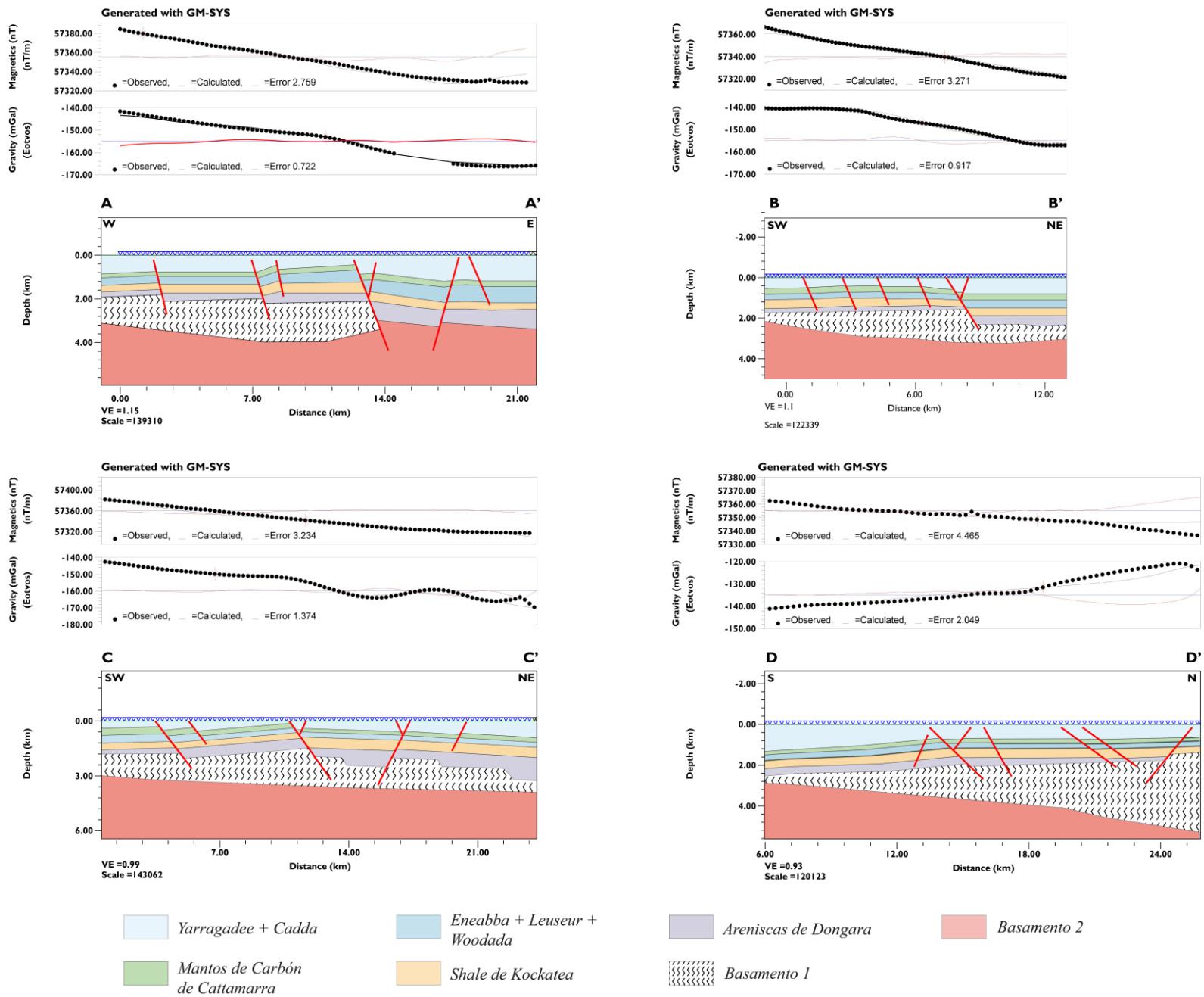


Figura 27.

Modelos 2D de gravimetría y magnetometría realizados haciendo uso de la herramienta GM-SYS (Oasis Montaj 9.6)

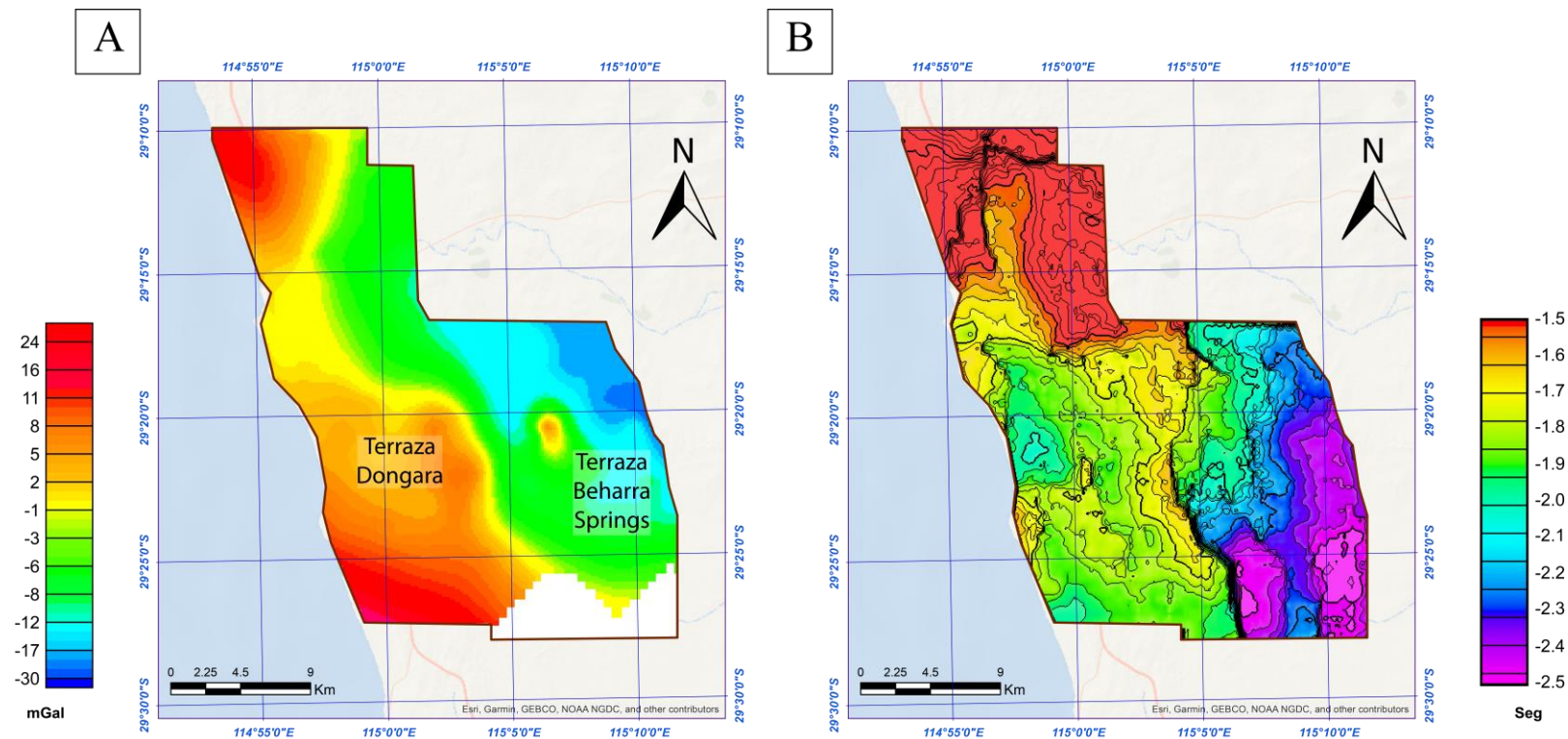


6.3 Modelo integrado del subsuelo

Los métodos potenciales complementaron la interpretación sísmica realizada en la zona de estudio. El mapa de anomalía residual de Bouguer resalta la diferencia entre las profundidades del basamento, la cual también se evidencia en la superficie sísmica trazada (Figura 28), y se logra asociar a las estructuras de la Terraza de Dongara al oeste y la Terraza de Beharra Springs al este, las cuales se han reconocido en los mapas regionales de la cuenca Perth (Mory & Iasky, 1996; Song, 2000; Hashimoto, 2018).

Figura 28.

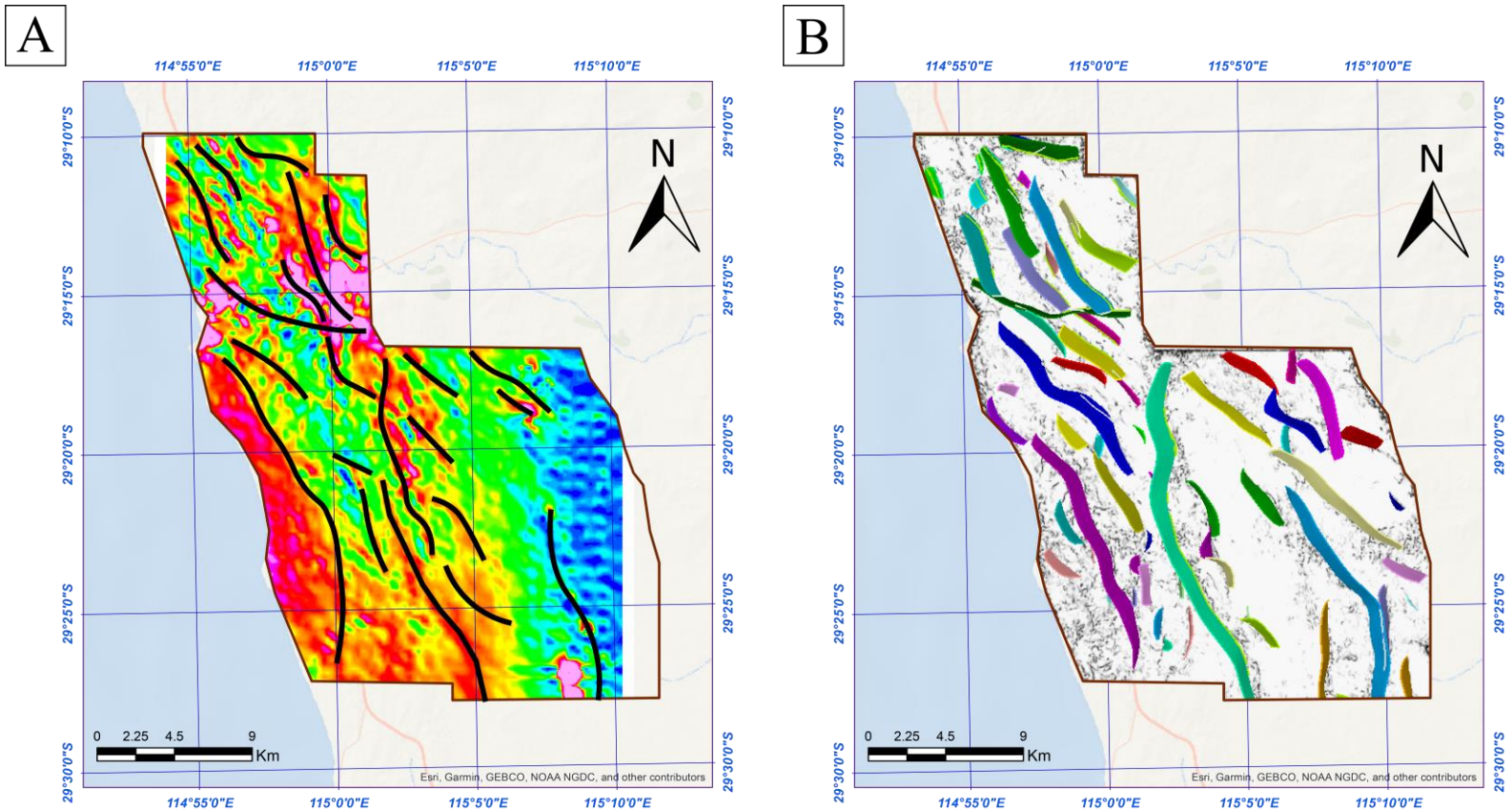
Comparación entre los resultados de gravimetría y la interpretación sísmica. A) Mapa de anomalía de Bouguer residual B) Mapa de la superficie del basamento



Los mapas magnéticos resultantes de los filtros de señal analítica, gradiente horizontal y las derivadas verticales (1ra y 2da), permitieron identificar la zona transversal al norte de la cuenca, en donde se delimitan dos fallas de rumbo con tendencia E-W (Figura 29), las cuales no se habían interpretado inicialmente en el cubo sísmico, debido a que no presentan un desplazamiento notorio en la secuencia. Estas fallas fueron incluidas en el modelo final, después de notar las anomalías magnetométricas y la ligera rotación de las fallas en sentido W en esta zona.

Figura 29.

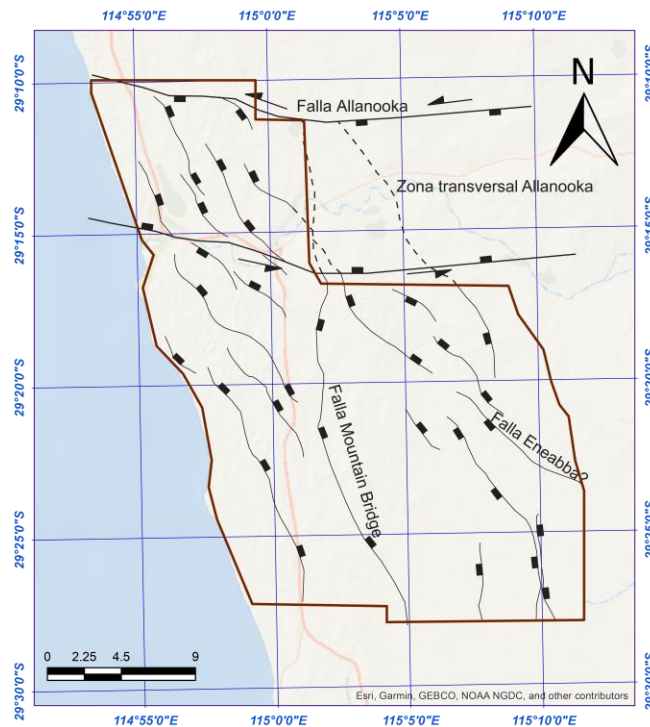
Relación entre la magnetometría y la interpretación sísmica. A) Mapa de gradiente horizontal B) Mapa de las fallas modeladas en el cubo sísmico.



Teniendo en cuenta este análisis estructural integrado, se realizó un mapa de las fallas con longitud significativa (Figura 30), en el que se destaca la zona transversal al norte del área de estudio, a la cual se le da el nombre de Allanooka, debido a que la Falla Allanooka se encuentra cartografiada en este sector en los mapas regionales (Mory & Iasky, 1996; Song, 2000; Hashimoto, 2018). También se observa la tendencia N20W predominante en la mayoría de las fallas, la cual en la zona transversal cambia ligeramente hacia el W, debido a la cizalla sinistral que genera un estilo dominó y un graben en el norte del área, como muestra la sección D-D' de la Figura 31.

Figura 30.

Mapa de las fallas en la zona de estudio. Se propone la zona transversal Allanooka entre las fallas de rumbo sinistral.



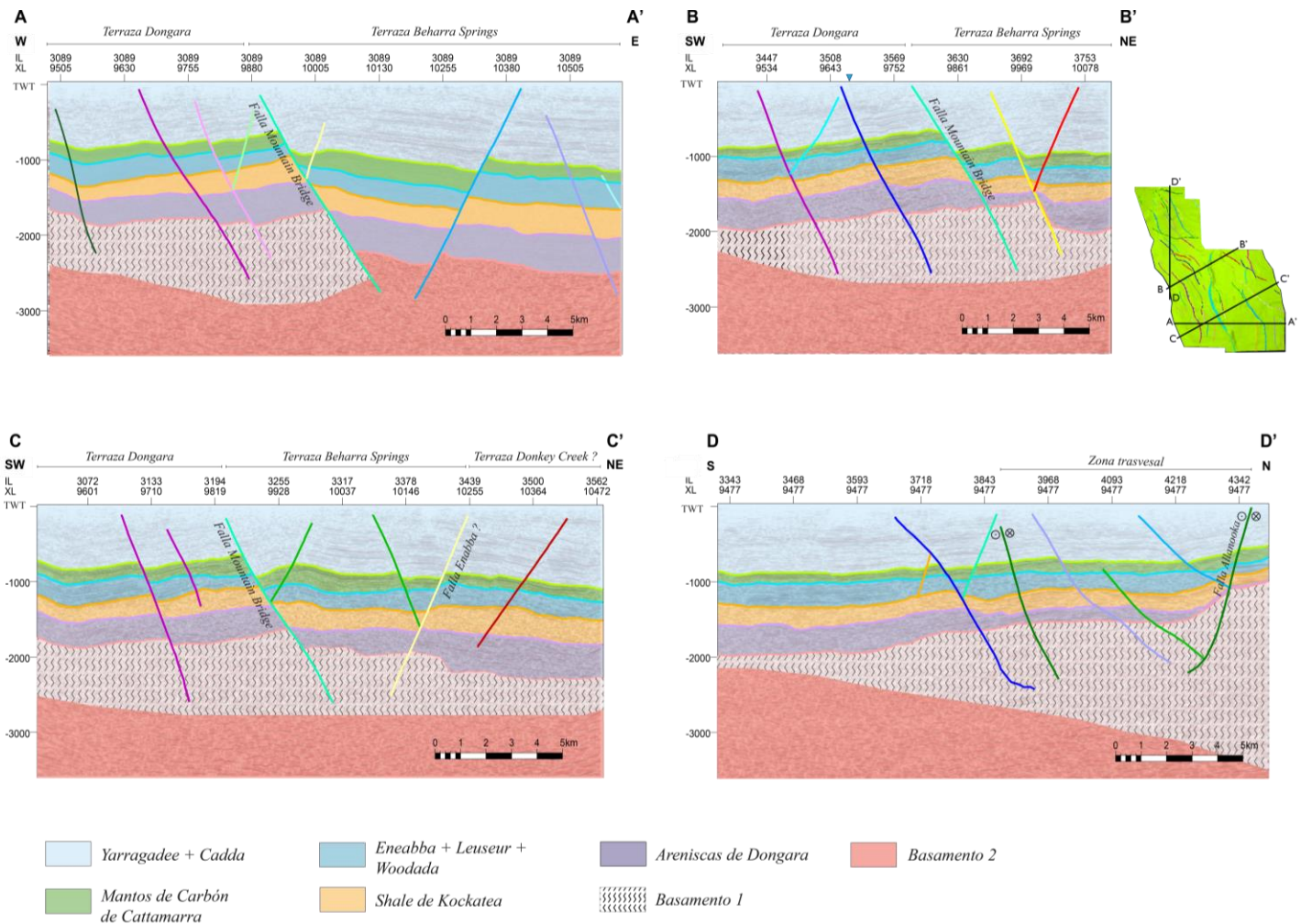
A partir de la integración de los resultados obtenidos con cada método potencial, se construyó un modelo estructural para obtener la geometría de la zona de estudio, la cual se caracteriza por la compartimentalización de fallas con tendencias NW-SE y NNW-SSE.

En el modelo construido se destaca la falla regional Mountain Bridge, la cual separa las estructuras de la Terraza de Beharra Springs al este y la Terraza Dongara al oeste, y tiene el mayor desplazamiento vertical de la secuencia (Figura 31); también destacan dos fallas de mayor ángulo en la sección D de la Figura 31, asociadas a los límites de la zona transversal. En general, se puede observar y definir la Terraza Dongara como un alto estructural en la zona oeste y la Terraza Beharra Spring como un bajo estructural o graben. Por su parte, al este de la sección C (Figura 31)

se muestra una zona que posiblemente pertenezca a la Terraza Donkey Creek, estructura ubicada al este de la Falla Eneabba, sin embargo, este aspecto queda en duda, ya que esta falla tiene una fuerte flexión en sentido oeste, tal como se observa en el mapa de localización (Figura 1) y no es clara su terminación en la zona de trabajo.

Figura 31.

Secciones del modelo estructural en tiempo (TWT). Se delimita de manera esquemática la propuesta de la división del basamento.



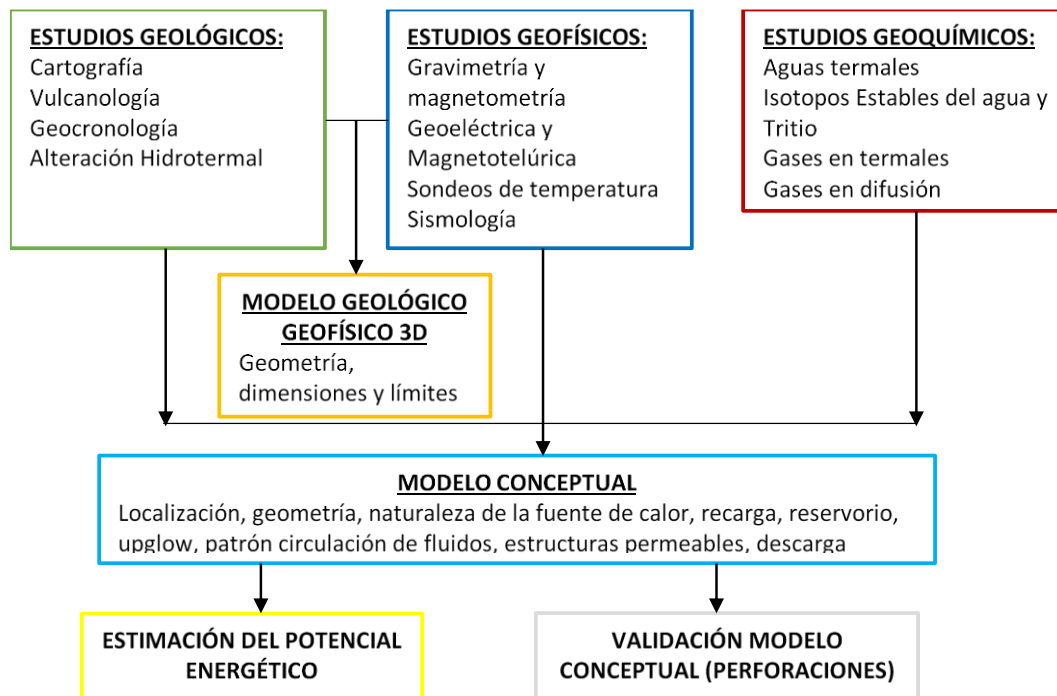
6.4 Aplicación metodológica en Colombia

En este apartado se definirán zonas de Colombia donde se pueda aplicar la metodología utilizada en este trabajo, de acuerdo con el potencial geotérmico e hidrocarburífero de diversas áreas del país; y la revisión de trabajos encontrados en la bibliografía, que han realizado la integración de esta información geofísica.

El Servicio Geológico Colombiano propone la siguiente metodología para la exploración de yacimientos geotérmicos (ver Figura 32), en la que se integran estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos para realizar modelos del subsuelo que permitan caracterizar las fuentes de calor, reservorios geotérmicos y estimar el potencial energético.

Figura 32.

Metodología de exploración de yacimiento geotérmicos. Modificado de Alfaro-Valero et al (2013).

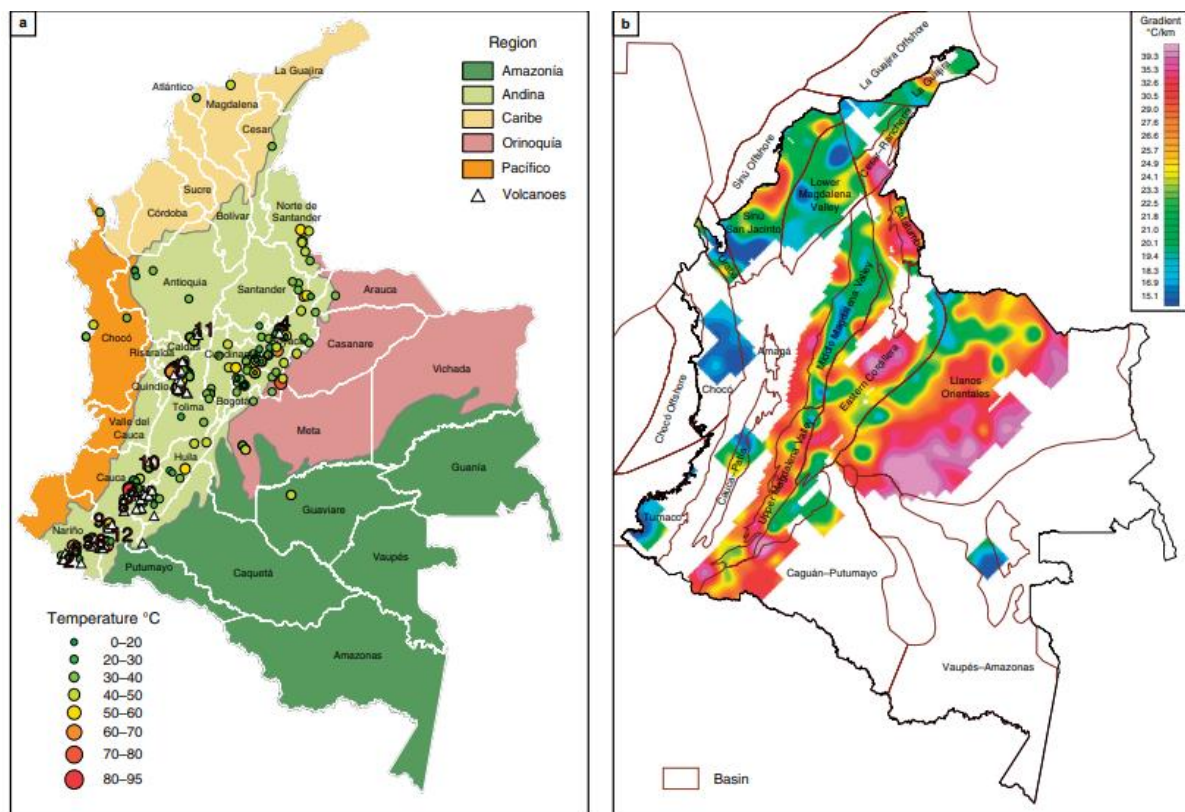


Los métodos de gravimetría, magnetometría y sísmica 3D están incluidos en el marco de los estudios geofísicos y son parte de la creación de un modelo geológico y geofísico del subsuelo, para establecer la estructura, geometría y dimensiones de los sistemas geotermales y así, caracterizar los reservorios geotérmicos y las fuentes de calor (Alfaro-Valero *et al.*, 2013).

Sin embargo, en Colombia aún no se han cuantificado los recursos geotérmicos, debido a que no se han desarrollado programas de exploración para definir las características físicas y químicas de los reservorios y fluidos geotérmicos del país, y para una proyección hacia diversificación de la matriz energética, esta información es indispensable (Alfaro-Valero *et al.*, 2020). Es por ello, que la metodología establecida en este trabajo se puede aplicar para el desarrollo de la exploración de estos recursos en el país en las zonas con potencial geotérmico resaltadas en la Figura 33, de acuerdo con los sistemas hidrotermales y el gradiente geotérmico, ya que la integración de los métodos potenciales y sísmica son una base importante para explorar la configuración tectonoestratigráfica del subsuelo.

Figura 33.

Recursos geotérmicos de Colombia. (a) Sistemas hidrotermales convectivos e inventario de aguas termales. Áreas geotérmicas: 1. Complejo Volcánico Cerro Bravo–Cerro Machín, 2. Complejo Volcánico Chiles–Cerro Negro, 3. Volcán Azufral, 4. área geotérmica Paipa–Iza, 5. Volcán Cumbal, 6. Volcán Galeras, 7. Volcán Puracé, 8. Volcán Sotaró, 9. Volcán Doña Juana, 10. Volcán Huila, 11. Área geotérmica de San Diego, 12. Volcán Sibundoy. (b) Mapa de gradiente geotérmico. Tomado de Alfaro-Valero et al. (2020).

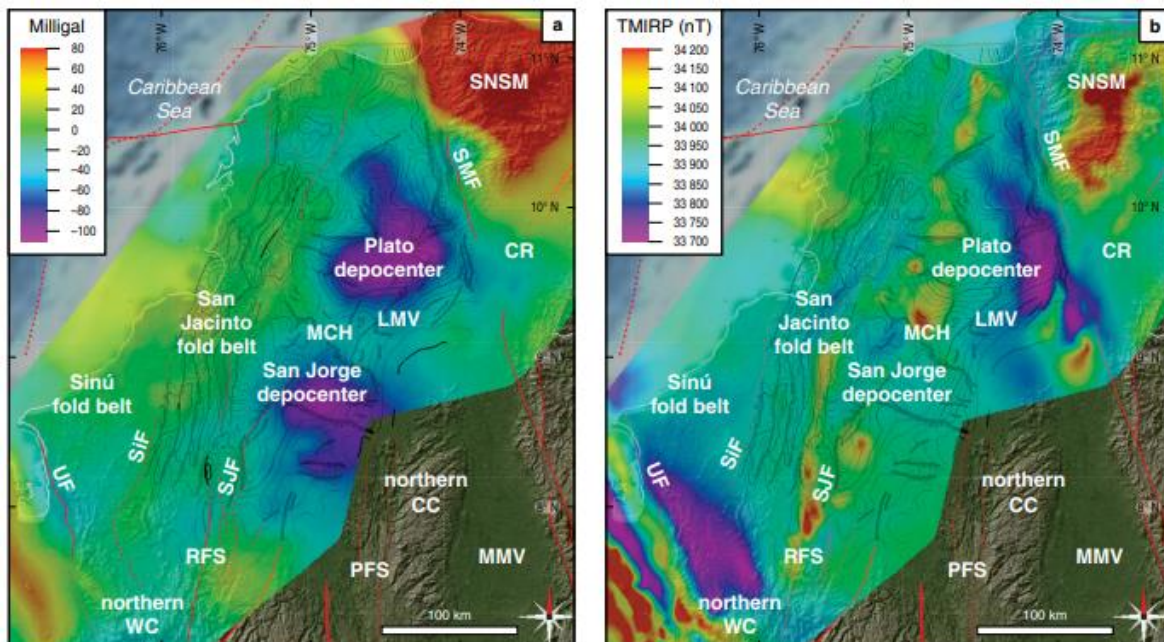


Por otro lado, En Colombia se han realizado estudios que integran métodos potenciales y sísmica en cuencas con potencial petrolífero. Tal es el caso del noroeste del país, donde Mora *et al* (2020) realizaron el estudio de formación y evolución de las cuencas del Valle Inferior del

Magdalena y el cinturón plegado de San Jacinto. Mediante el mapa de anomalía de Bouguer, la intensidad magnética reducida a polo y el mapa del basamento obtenido de los datos sísmicos, analizaron la configuración, estructura y morfología del basamento de estas cuencas e identificaron el depocentro de Plato, y el depocentro San Jorge, con profundidades de más de 7 y 5 km, respectivamente (Figura 34)

Figura 34.

Datos aerotransportados de gravimetría y magnetometría del norte de Colombia (a) Anomalía total de Bouguer, escala de -80 a 80 mGal. (b) Intensidad magnética total reducida al polo (TMIRP) con escala de 33700 a 34200 nT. En el fondo está mapa estructural en profundidad del basamento. Tomado de Mora et al. (2020).

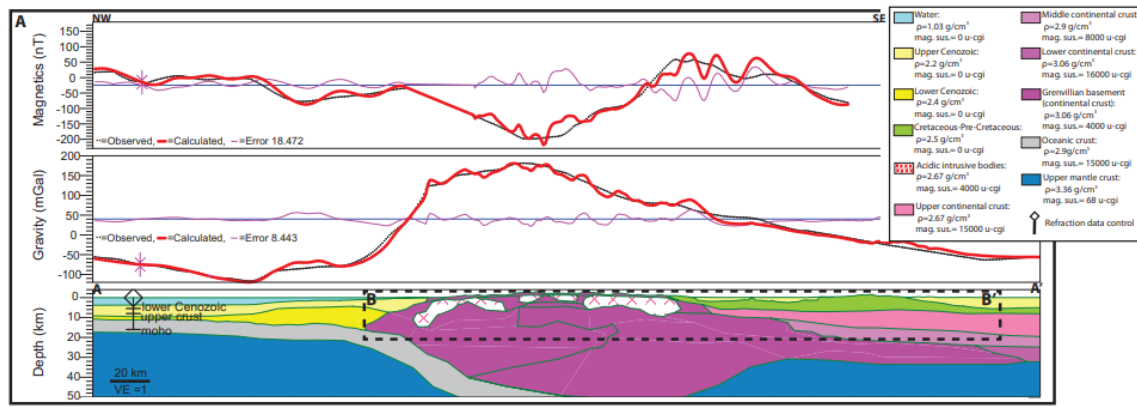


Sánchez & Mann (2015) llevaron a cabo el estudio de historia tectónica de la cuenca Cesar Ranchería, para lo cual realizaron interpretaciones de la estructura de la corteza, utilizando

modelos magnéticos y de gravedad (Figura 38), así como interpretación sísmica y mapeo de horizontes clave. Utilizaron la anomalía de Bouguer y el campo magnético total con el propósito de identificar características estructurales y tectónicas dentro del basamento cristalino y los mapas de campo potenciales ilustran características tectónicas y estructurales regionales.

Figura 35.

Modelado magnético y gravimétrico regional utilizado para inferir la estructura de la corteza debajo del macizo de la Sierra de Santa Marta (SSMM) y el área de estudio de la Cuenca César-Ranchería (CRB). Modificado de Sánchez & Mann (2015).



Estos estudios nos abren la posibilidad de integrar estos métodos para exploración de otras cuencas que han sido poco estudiadas o que han tenido poca prospección.

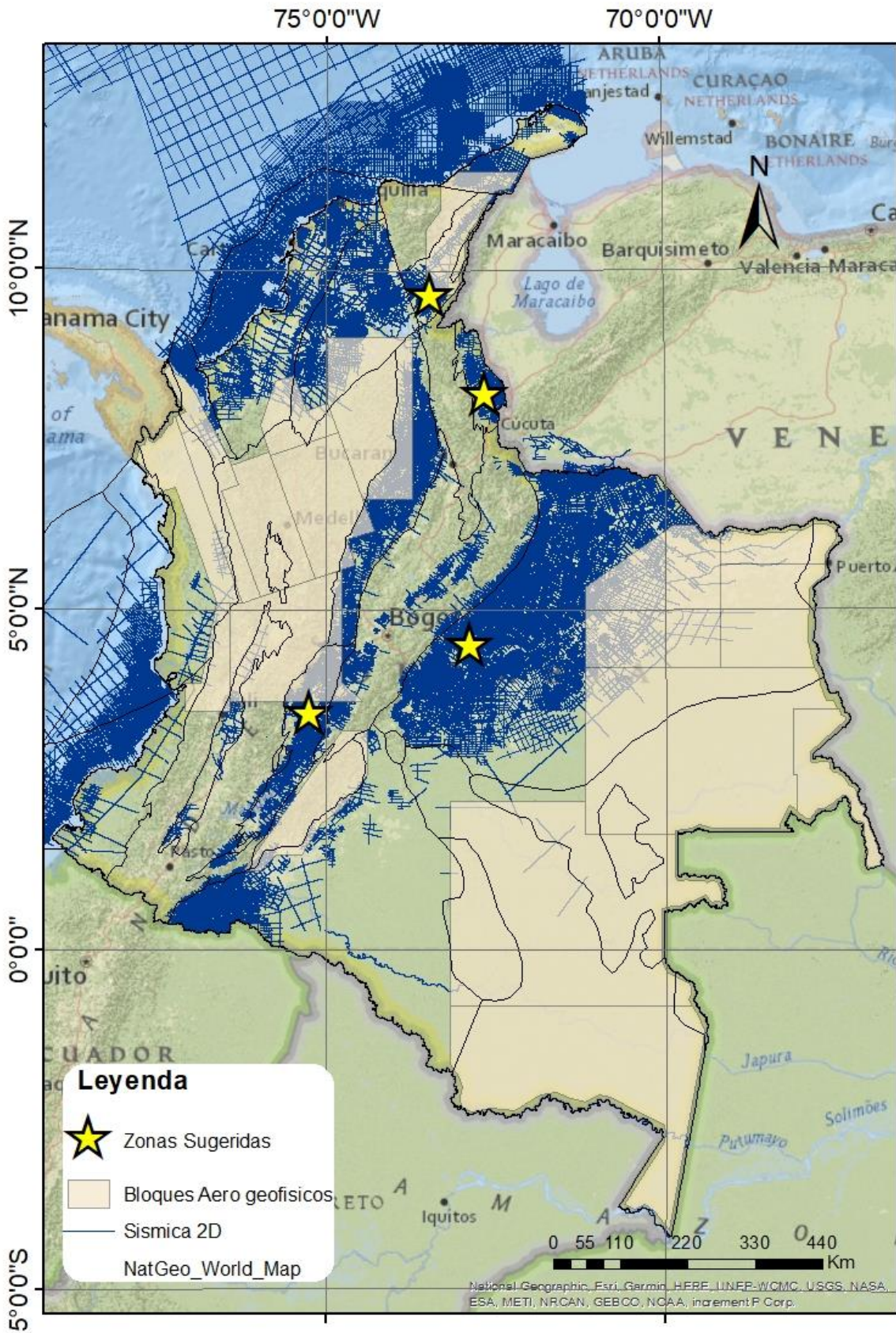
De acuerdo con el mapa geotérmico de Colombia y teniendo en cuenta los resultados de los estudios realizados previamente en el país que integran métodos potenciales y sísmica, se proponen las zonas de la Figura 36 para que se aplique allí la metodología del presente trabajo y sea utilizada en la búsqueda de yacimientos geotérmicos y/o hidrocarbúricos.

Las zonas propuestas son:

- a) El Valle Superior del Magdalena: Los mapas geotérmicos muestran evidencia de presencia de fuentes hidrotermales y alto gradiente geotérmico y, así mismo, es una cuenca de interés actual en el sector de los hidrocarburos que ha sido poco explorada.
- b) Llanos: En el límite entre los departamentos de Meta y Casanare y la Cordillera Oriental hay evidencia de fuentes hidrotermales con alta temperatura (80-90 °C) y se muestra alto gradiente geotérmico. Además, esta es una cuenca de gran importancia en la industria de los hidrocarburos y por ello, la integración de gravimetría, magnetometría y sísmica podría permitir un mejor entendimiento de la complejidad estructural del subsuelo.
- c) Cuenca Catatumbo: Con base en la presencia de fuentes hidrotermales y alto gradiente geotérmico, así como el potencial petrolífero de la cuenca, se propone esta zona para aplicar la metodología de integración de métodos potenciales y sísmica.
- d) Cesar-Ranchería: Esta cuenca muestra un alto gradiente geotérmico en la zona suroriental y ha sido objeto de estudios como el mencionado previamente de Sánchez & Mann (2015), a escala regional, razones por la que se propone dar detalle a este sector con la integración de datos realizada en este trabajo.

Figura 36.

Mapa de Colombia con las zonas definidas para aplicar la metodología del presente trabajo para la búsqueda de recursos geotérmicos y/o hidrocarburos. La información de la ubicación de las líneas sísmicas y bloques aerogeofísicos fue tomada del Geoportal del Servicio Geológico Colombiano.



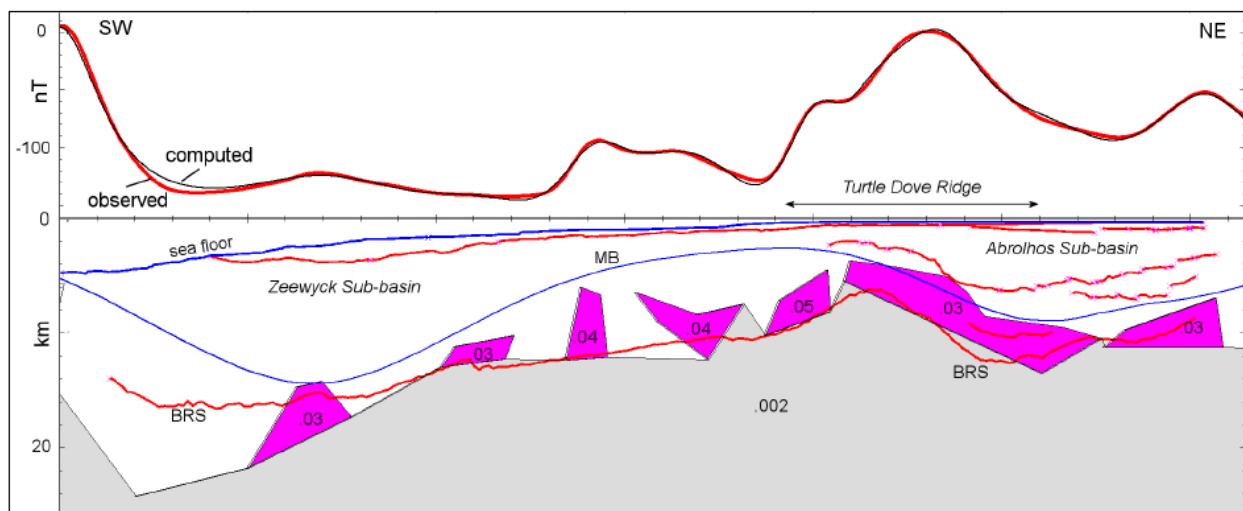
Zonas con potencial geotérmico, situadas en la cordillera oriental y central, no son propuestas, debido a que no se han tomado adquisiciones sísmicas (Figura 36) debido su topografía, y en algunos casos, por ser áreas protegidas como parques naturales y paramos, por lo mismo, la toma de datos sísmicos sería compleja. De igual forma, el sector de la Guajira con alto gradiente geotérmico no es considerado, ya que podría existir conflicto con las comunidades indígenas que habitan allí.

7. Discusión

Johnston & Petkovic (2012) realizaron un modelado del basamento de la parte offshore del norte de la cuenca Perth a partir de la interpretación de datos magnéticos, y propusieron la existencia de numerosos cuerpos con altas susceptibilidades magnéticas (Figura 37), asociados a plutones ígneos magnetizados o ensamblajes densos de diques y sills máficos que penetran en el basamento, cuyo emplazamiento aún no se ha determinado, pero pudo haber ocurrido durante la ruptura de Gondwana, o haber sido parte de terrenos del basamento más antiguos. Esta propuesta es relevante, ya que la respuesta del campo magnético evaluada en este estudio permite observar variaciones que de igual manera se podrían asociar a los plutones magnetizados mencionado por Johnston & Petkovic (2012). Sin embargo, en la zona trabajada en este estudio, se resaltan cuerpos continuos o áreas más grandes con esta variación mineral, sugiriendo una mineralización de cuerpos ígneos de mayor tamaño en la zona del onshore, o un cambio composicional en el basamento.

Figura 37.

Perfil del modelo de susceptibilidad magnética del offshore de la cuenca Perth. Tomado de Johnston & Petkovic (2012).



Los trabajos previos (Iasky, 1994; Hall *et al.* 2013; Shevchenko & Iasky, 2019) en la zona que vincularon la integración de datos sísmicos, aeromagnéticos y gravimétricos tuvieron una escala regional, resaltando a dicha escala la forma del basamento y grandes lineamientos en la cuenca. En este trabajo, se definieron estructuras locales de interés como un mayor número de fallas, la Zona Transversal Allanooka y la variación composicional del basamento, estructuras que no se habían establecido previamente, con el fin de dar mayor resolución al modelo de esta zona del norte de la Cuenca Perth. Además, se confirmó la tendencia en el aumento de espesor de la secuencia sedimentaria hacia el este, como sugiere Holzrichter *et al.* (2014) quien vincula este aumento a un half graben donde el punto de pivot es el Beagle Ridge.

8. Conclusiones

A partir del procesamiento de los datos potenciales, se identificaron las anomalías gravimétricas y magnéticas de la zona de estudio, en el sector continental del norte de la cuenca Perth. La anomalía residual de Bouguer permitió tener una idea preliminar de la disposición del basamento, así como sus zonas más profundas hacia el este, representadas con anomalías de gravedad negativas. Las anomalías resultantes de la aplicación de los filtros a los datos magnéticos permitieron interpretar las direcciones de las tendencias estructurales predominantes en la zona, siendo principalmente en sentido NNW-SSE, y en la zona norte lineamientos con una tendencia E-W.

Basados en la respuesta magnética y gravimétrica y en los resultados de la interpretación sísmica, se llevó a cabo una aproximación al modelo estructural mediante perfiles. Se realizaron 4 secciones, que fueron útiles en la caracterización del basamento, y se propuso una diferenciación de este, marcada por un cambio en la susceptibilidad magnética. Lo que se denominó Basamento 1, fue modelado con una susceptibilidad de 5×10^{-5} (SI) y el Basamento 2 con susceptibilidad de 0.00125 (SI). El basamento 1 se extiende por la mayor parte del área de estudio a excepción del sureste y su espesor varía entre 0.5 y 4 km, siendo mayor hacia el noroeste y disminuyendo hacia el sureste. El basamento 2 se extiende a lo largo de toda la zona de trabajo

La integración de métodos potenciales y sísmica 3D permitió la creación de un modelo estructural del área de estudio. La interpretación de los lineamientos de anomalías magnéticas se asoció con las fallas trazadas en el cubo sísmico, las cuales presentan direcciones preferenciales de N20W y N45W. Se identificó la zona transversal Allanooka, limitada por 2 fallas sinestrales

paralelas, con dirección E-W, que forman una estructura en dominó. La Falla Mountain Bridge es el límite de las Terrazas Beharra Springs y Dongara, y a su vez marca la profundización del basamento hacia el Este. Por medio de esta integración se logró dar mayor detalle al modelo de la zona de estudio con respecto a los trabajos que ya se habían realizado en la cuenca a nivel regional, ya que se identificaron nuevas características estructurales como la zona transversal y, así mismo, la diferenciación del basamento.

Se definieron 4 zonas en Colombia para aplicar la metodología de este estudio, las cuales están ubicadas en las cuencas del Valle Superior del Magdalena, Llanos Orientales, Catatumbo y Cesar-Ranchería, teniendo en cuenta el potencial geotermal que muestran los mapas geotérmicos y de fuentes hidrotermales de Colombia, así como el interés petrolífero, con el objetivo de explorar la configuración tectonoestratigráfica del subsuelo, especialmente de los reservorios geotérmicos, lo que significaría un paso fundamental y marcaría un precedente de cara a la transición energética, y también permitiría realizar un análisis tectónico para delimitar estructuras asociadas al entrapamiento de los hidrocarburos.

9. Recomendaciones

Para dar mayor detalle al modelo estructural, se recomienda realizar un amarre sísmica-pozo utilizando registros checkshot, para así poder realizar el mapeo de todas las formaciones estratigráficas presentes en el área de estudio.

Se recomienda realizar un modelo de velocidades que tenga en cuenta las profundidades obtenidas en los métodos potenciales y permita convertir el modelo estructural a profundidad.

Se propone elaborar más perfiles potenciales para poder interpolar y mapear la continuidad del segundo basamento.

En las zonas propuestas en Colombia se sugiere la toma de datos aeromagnéticos y gravimétricos.

Referencias Bibliográficas

Ahmad, A., Rezaee, R., & Rasouli, V. (2014). Significance of compressional tectonic on pore pressure distribution in Perth Basin. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 7, 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.juogr.2014.01.001>

Alfaro-Valero, C.M, Ponce. P., Ortíz, I., Monsalve, M., Franco, J., Torres, R., Gómez, D. (2013). *Modelo Geotérmico Conceptual Integrado del Volcán Azufral*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Alfaro-Valero, C.M., Rueda-Gutiérrez, J.B., Matiz-León, J.C., Beltrán-Luque, M.A., Rodríguez-Rodríguez, G.F., Rodríguez-Ospina, G.Z., González-Idárraga, C.E. & Malo-Lázaro, J.E. (2020). Paipa geothermal system, Boyacá: Review of exploration studies and conceptual model. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary*. Servicio Geológico Colombiano, *Publicaciones Geológicas Especiales* 38, p. 161–196. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.04>

Alfaro-Valero, C.M, Rueda-Gutierrez, J.B., Casallas, Y.P., Rodríguez, G.Z., Malo, J.E. (2020). *Estimación Preliminar Del Potencial Geotérmico De Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombia.

Andrea, V., Antonio, M., & Kaminski, V. (2019). On the use of legacy AEM data. *First Break*, 37(8), p83–87.

ARC Energy. (2003). *Denison Gravity Survey EP413 and L1/L2 Northern Perth Basin*.

AWE Limited. (2014). *Reprocessed Hibbertia, Denison and Beharra Springs 3D Preliminary Interpretation Report. Onshore Perth Basin*.

Backhouse, J., (1984), Revised Late Jurassic and Early Cretaceous stratigraphy in the Perth Basin: Western Australia Geological Survey, Report 12, Professional Papers for 1982, p. 1–6.

Bakely, R. J., 1996, Potential theory in gravity and magnetic applications: Cambridge, Cambridge University Press, 464 p.

Barnes, A. E. (2007). Redundant and useless seismic attributes. SEG Annual Meeting, 72(3), P33–P38.

Barnes, A. E. (2016). Handbook of Poststack Seismic Attributes. In Handbook of Poststack Seismic Attributes. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803324>

Bellefleur, G., & Adam, E. (2019). 3D seismic datasets applied to mineral exploration: Revisiting three Canadian case studies. *First Break*, 37(8), p75–81.

Bodorkos, S., Fitzsimons, I., Hall, L. S., Sircombe, K. N & Lewis, C. J. (2016). Beneath the Perth Basin. New U–Pb SHRIMP zircon ages from the Pinjarra Orogen, Western Australia. *Geoscience Australia. Record* 2016/31.

Burger, H. R., Sheehan, A. F., & Jones, C. H. (2006). Introduction to applied geophysics: Exploring the shallow subsurface. WW Norton.

Byrne, D. R., & Harris, L. B., (1992). Fault patterns during normal and oblique rifting and the influence of basement discontinuities: applications to models for the Perth Basin, Western Australia: *Basement Tectonics*, v. 9, p. 23–42

Chelotti, L., Acosta, N., & Foster, M. (2009). La biblia de la geofísica. Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina.

Clarke, E. de C., Prendergast, K. L., Teichert, C., & Fairbridge, R. W. (1951). Permian succession and structure in the northern part of the Irwin Basin, Western Australia: *Royal Society of Western Australia, Journal*, v. 12, p. 161–178.

Cramez, C., (2007). Seismic – Sequential Stratigraphy. Universidade Fernando Pessoa.
<http://homepage.ufp.pt/biblioteca/Seismic/Images/Plate008-Magnetism.jpg>

Cockbain, A. E., Lehman. P. R., (1971). Geology of the Perth Basin, Western Australia, Part 1. Regional stratigraphy and structure: Ashburton Oil N.L.

Ferdinando, D & Longley, I. (2015). Permian play mapping in the northern Perth Basin. Petroleum in Western Australia.

Geofisica Argentina (2015). Gravimetría. <https://geofisicaargentina.com/gravimetria.html>

Geoscience Australia (2020). Perth Basin. <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/energy/province-sedimentary-basin-geology/petroleum/offshore-southwest-australia/perth-basin>

Gorter, J. D. (2009). Enigmatic seafloor structures in the Perth Basin (Houtman sub-basin), offshore Western Australia: Deep-water carbonate mounds or volcanic cones? Australian Journal of Earth Sciences, 56(8), 1087–1094. <https://doi.org/10.1080/08120090903246196>

Hall, P. B., (1989). The future prospectivity of the Perth Basin: APEA Journal 29(1), p. 440–449

Hall, L. S., Gibbons, A., Bernardel, G., Whittaker, J., Nicholson, N., Rollet, N., Muller, R. (2013). Structural Architecture of Australia's Southwest Continental Margin and Implications for Early Cretaceous Basin Evolution. West Australian Basins Symposium.

Harris, L. B. (1994). Structural and Tectonic Synthesis for the Perth Basin, Western Australia. Journal of Petroleum Geology, 17(2), 129–156. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1994.tb00123.x>

Hashimoto, T., Bailey, A., Chirinos, A. & Carr L. K. (2018). Onshore Basin Inventory Volume 2 The Canning, Perth and Officer basins. Geoscience Australia. Record 2018/18.

Holzrichter, N., Hackney, R., Jhonston, S. (2014). Crustal structure of the northern Perth Basin, southwest margin of Australia: insights from three-dimensional density models. *Geophysical Journal International*. doi: 10.1093/gji/ggt347

Iasky, R. P. (1994). Onshore northern Perth Basin gravity project. Geological Survey of Western Australia, p. 92-98.

Johnston, S. and Petkovic, P. 2012. Offshore Northern Perth Basin 2D and 3D Models of Depth to Magnetic Basement. Record 2012/39. Geoscience Australia: Canberra.

Jones, A., Kennard, J., Nicholson, C., Rollet, N., Mantle, D., Grosjean, E., Boreham, C., Jorgensen, D., Robertson, D., Bernardel, G., Greinert, J., Kempton, R., Langhi, L., Zhang, Y., Hall, L., Hackney, R., S. Johnston, P., Petkovic., Bernecker, P. & Bradshaw, M., (2012). Reassessing the Petroleum Prospectivity of the Offshore Northern Perth Basin, Western Australia. *Search and Discovery Article #10461*.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd. Third Edition.

Lowrie, W., & Fichtner, A. (2007). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge University Press.

Marshall, J. F., Lee, C. S., Ramsay, D. C., And Moore, A. M. G., (1989). Tectonic controls on sedimentation and maturation in the offshore north Perth Basin: *APEA Journal*, v. 29(1), p. 450–465

Meek, T., (2015). *Applications of 3D Seismic Attribute Analysis Workflows: A Case Study from Ness County, Kansas, USA*. Department of Geology. Kansas State University.

Milligan, P.R. and Gunn, P.J. (1997) Enhancement and Presentation of Airborne Geophysical Data. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17, 63-75.

Mora–Bohórquez, J.A., Oncken, O., Le Breton, E., Ibañez–Mejía, M., Veloza, G., Mora, A., Vélez, V. & De Freitas, M. (2020). Formation and evolution of the Lower Magdalena Valley Basin and San Jacinto fold belt of northwestern Colombia: Insights from Upper Cretaceous to recent tectono–stratigraphy. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37, p. 21–66. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.02>

Mory, A. J., & Iasky, R. P., (1994). Structural evolution of the onshore northern Perth Basin, Western Australia, in *West Australian Basins* edited by P. PURCELL and R. PURCELL: Petroleum Exploration Society of Australia Symposium, Perth, 1994, Proceedings, p. 781–789

Mory, A. J., & Iasky, R. P., (1996). Stratigraphy and structure of the onshore northern Perth Basin, Western Australia: Western Australia Geological Survey, Report 46.

Mory, A. J., Haig, D. W., Mcloughlin, S., & Hocking, R. M., (2005). Geology of the northern Perth Basin, Western Australia — a field guide: Western Australia Geological Survey, Record 2005/9, 71p

Norvick, M.S. (2004) Tectonic and Stratigraphic History of the Perth Basin. Geoscience Australia, Record 2004/16. ISSN 1448-2177. ISBN 1 92087 11 X

Olierook, H. K. H., Timms, N. E., Wellmann, J. F., Corbel S., Wilkes J. F., (2015). 3D structural and stratigraphic model of the Perth Basin, Western Australia: Implications for sub-basin evolution, *Australian Journal of Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia*, DOI: 10.1080/08120099.2015.1054882

Othman, A., Mohamed, M., Mohamed, M. (2016). Improving fault tracing detection applying 3D ant tracking seismic attribute. *Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG)*. e-ISSN: 2321–0990, p-ISSN: 2321–0982. Volume 4, Issue 3.

Playford, P. E., Cockbain, a. E., & Low, G. H., (1976). The geology of the Perth Basin, Western Australia: Western Australia Geological Survey, Bulletin 124

Randen, T., Inge, S., Sonneland, L., (2015). Automatic Detection and Extraction of Faults from Three-Dimensional Seismic Data. Schlumberger Stavanger Research.

Rasmussen, B., Glover, J. E., & Alexander, R., (1989). Hydrocarbon rims on monazite in Permian–Triassic arenites, northern Perth Basin, Western Australia: pointers to the former presence of oil: *Geology*, v. 17, p. 115–118.

Reynolds, J. M. (2011). An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons.

Salem, A. (2005). Interpretation of magnetic data using analytic signal derivatives. *Geophysical Prospecting*, 53(1), 75–82. <https://doi:10.1111/j.1365-2478.2005.00434.x>

Sanchez, J., & Mann, P. (2015). Integrated Structural and Basinal Analysis of the Cesar–Rancheria Basin, Colombia: Implications for its Tectonic History and Petroleum Systems. *Memoir 108: Petroleum Geology and Potential of the Colombian Caribbean Margin*. doi:10.1306/13531945m1083648

Schlumberger Oilfield Glossary. (2015). <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>

Shevchenko, S. & Iasky, R. (2019). Is there any room for gravity in petroleum exploration? *ASEG Extended Abstracts*, 2003:2, 1-5, DOI: 10.1071/ASEG2003ab161

Song, T., & Cawood, P. A. (2000). Structural styles in the Perth Basin associated with the Mesozoic break-up of Greater India and Australia. *Tectonophysics*, 317(1–2), 55–72. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00273-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00273-5)

Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E.; Keys, D.A., 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge. Cambridge University Press. 860 p.

Thomas, B. M., (1979). Geochemical analysis of hydrocarbon occurrences in the northern Perth Basin, Australia: American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 63, p. 1092–1107.

Tupper, N., Matthews, E., Cooper, G., Furniss, A., Hicks, T., & Hunt, S. (2016). The Waitsia Field, onshore North Perth Basin, Western Australia. The APPEA Journal, 56(1), 29.
<https://doi.org/10.1071/aj15003>