

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra
con orientación en Geofísica Aplicada**

**Caracterización gravimétrica y magnética del ex-basurero
municipal de Ensenada, Baja California, México.**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Carmen Julia Canizales Cinco

Ensenada, Baja California, México

2016

Tesis defendida por

Carmen Julia Canizales Cinco

y aprobada por el siguiente Comité

M. C. Juan Manuel Espinosa Cardeña
Director del Comité

Dr. Carlos Flores Luna

M. C. Vicente Ferreira Bartrina



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Carmen Julia Canizales Cinco como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada.

Caracterización gravimétrica y magnética del ex-basurero municipal de Ensenada, Baja California, México.

Resumen aprobado por:

M. C. Juan Manuel Espinosa Cardeña
Director de Tesis

En el ex-basurero municipal de la ciudad de Ensenada, B. C., se han realizado diversos estudios geoelectrónicos para detectar lixiviados y plumas de contaminación, en los cuales se han observado anomalías de baja resistividad (2-8 Ohm-m) y de potencial espontáneo positivas (+220 mV) y negativas (-189 mV), asociadas a la presencia y flujo de lixiviados. Los mecanismos propuestos como causantes de las anomalías de potencial natural positiva y negativa son la metanogénesis y la electrofiltración, respectivamente. En este estudio se reportan los resultados del levantamiento, compilación y análisis de datos magnéticos y gravimétricos. Al oriente de los terrenos del basurero se detecta una zona de máximos de gradiente horizontal magnético que se correlaciona con fracturas, por donde los lixiviados provenientes del basurero podrían infiltrarse en las aguas subterráneas, provocando su eventual contaminación. A partir del modelado de perfiles gravimétricos y magnéticos, se estima que la profundidad máxima de la interfaz basura-roca es de 40 m y que, debido a la heterogeneidad de los materiales que constituyen los residuos, se observan intensos contrastes de densidad (-1.07 a 0.16 gr/cm^3) y valores de susceptibilidad magnética en un rango de 0 a 0.02 cgs. Mediante la correlación de anomalías magnéticas y de potencial espontáneo, observada en el ex-basurero, se deduce que los potenciales positivos están relacionados con la presencia de materiales metálicos y los negativos son posiblemente debidos a procesos de difusión.

Palabras Clave: **Magnetometría, gravimetría, ex-basurero municipal de Ensenada.**

Abstract of the thesis presented by Carmen Julia Canizales Cinco as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Master in Sciences in Earth Sciences with orientation in Applied Geophysics..

Magnetic and gravimetric characterization former landfill of Ensenada city , Baja California, Mexico.

Abstract approved by:

M. C. Juan Manuel Espinosa Cardeña
Thesis Director

In the former landfill located in Ensenada city, Baja California, several geoelectric studies have been carried out to detect leachates and pollution feathers, from which anomalies of low resistivity (2-8 Ohm-m) and, both positive (+220 mV) and negative (-189 mV) spontaneous potential have been observed and associated with flow of leachate. Methanogenesis and electrofiltration have been mechanism proposed as cause of natural potential anomalies, positive and negative, respectively. In this study, we report the results from survey, compiling, and analysis of magnetic and gravimetric data. A zone of maximum horizontal magnetic gradient is detected in the eastern side of the landfill, it is correlated with fractures, where leachate from the landfill could infiltrate the groundwater causing its eventual contamination. Through modeling of gravimetric and magnetic profiles, the maximum depth of the garbage-rock interface is estimated to be 40 m and, because the heterogeneity of the materials that constitute the residues, intense contrasts of density (-1.07 to 0.16 gr/cm^3) and magnetic susceptibility values within a range from 0 to 0.02 cgs are observed. From the correlation of magnetic anomalies and spontaneous potential observed in the former landfill, it is deduced that the positive potentials are related to the presence of metallic materials and the negative potentials are due to possibly diffusion processes.

Keywords: **Magnetometry, gravimetry, former landfill of Ensenada City.**

Dedicatoria

A mis padres

María Teresa Cinco

Armando Canizales

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICE-SE). Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. A mi director de tesis el M. C. Juan Manuel Espinosa Cardeña, por compartir sus conocimientos conmigo durante todo este tiempo. A mis sinodales el Dr. Carlos Flores y el M. C. Vicente Ferreira, por su apoyo y ayuda para mejorar este trabajo, por tener siempre las palabras adecuadas para darme consejos.

A la Dra. Rufina Hernández, por apoyarme con una beca terminal para poder concluir mis estudios. Al técnico Jaime Calderón, por su valiosa ayuda en campo. A mis amigos Anaid Fragoso, Ángel Ojeda, Hebert Martínez y Claudia Quinteros, por su disposición para ayudarme en todo momento y contribuir a la mejora de este trabajo. A la Oceanóloga Margarita Almeida por su apoyo durante esta etapa.

A mis padres Armando Canizales y Maria Teresa Cinco, a mi segunda mamá Carmen Lourdes Cinco, por estar conmigo e impulsarme a ser mejor cada día, por no dejarme caer nunca, por ser esas personas tan especiales en mi vida.

A las mejores amigas que el universo pudo poner en mi camino, Manet Peña, Lorena Gómez y Nayeli Cuero, por las sesiones interminables de trabajo, porque con su ayuda pude salir adelante. A mis amigos Ramiro Aragón y Miguel Castellanos que aún a la distancia siempre estuvieron conmigo. A mis compañeros y amigos, Omar, Saúl y Sergio, por todos los momentos compartidos. A la Lic. Celica Cuevas, por ser mi guía cuando más lo necesitaba, por su amistad y sus consejos.

A kelvin, ripichip, lili, mini, miao, oyuki, aluche* y betta*, mis pequeños grandes amores, porque solo con existir hacen mi vida feliz.

Tabla de contenido

Página

Resumen en español	iii
Resumen en inglés	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Localización del Ex-basurero Municipal de Ensenada	4
1.3. Bosquejo geológico regional y local del área de estudio	5
1.3.1. Regional	5
1.3.2. Local	7
1.4. Hipótesis	8
1.5. Objetivos	9
1.5.1. General	9
1.5.2. Particulares	9
2. Metodología y materiales	10
2.1. Técnica de posicionamiento satelital RTK	10
2.2. Magnetometría	11
2.2.1. Compilación y levantamiento de datos	12
2.2.1.1. Aeromagnéticos	12
2.2.1.2. Terrestres	13
2.2.2. Susceptibilidad magnética	14
2.2.3. Análisis de contactos magnéticos (gradiente horizontal)	15
2.2.4. Modelado de datos	17
2.2.4.1. Deconvolución de Euler	17
2.2.4.2. Modelado Directo	19
2.3. Gravimetría	22
2.3.1. Densidad	28
2.3.2. Levantamiento de datos	29
2.3.3. Separación Regional-Residual	31
3. Resultados	33
3.1. Análisis de datos Aeromagnéticos	33
3.2. Análisis de datos magnéticos terrestres	40
3.2.1. Susceptibilidad magnética	44
3.2.2. Deconvolución de Euler	44
3.3. Análisis Gravimétrico	53
3.4. Modelado de Datos	57
4. Discusión	64

5. Conclusiones	66
Lista de referencias bibliográficas	67

Lista de figuras

Figura	Página
1. Mapa de anomalía de potencial espontáneo. Ex– <i>basurero</i> de Ensenada (polígono negro) y anomalías de potencial natural a caracterizar (cuadro blanco). Anomalías de Potencial Espontáneo: positiva (APE+), negativa (APE-), (adaptado de Alarcón, 2010).	2
2. Cuerpos fuente de PE (tomada de Alarcón, 2010) sobre secciones de resistividad; (a): Línea 1 correspondiente a la línea A de nuestro estudio; (b): Línea 3, en este estudio corresponde con la línea 12.	4
3. Mapa de ubicación de la zona de estudio. Polígono color naranja: límites del ex-basurero.	5
4. Mapa geológico regional que incluye el ex-basurero municipal de Ensenada y sus alrededores. Modificado de INEGI: hoja H11B12.	6
5. Rasgos geológicos en el área de estudio y lugares adyacentes.	8
6. Esquema del levantamiento de datos, comúnmente conocido como “salto de rana”, se establece una estación base, a la cual se regresa después de haber medido cierto núm. de estaciones para monitorear la variación diurna.	13
7. Mapa de ubicación de los perfiles magnéticos, 1ra. etapa: líneas color negro; 2da. etapa: líneas color café. Respiraderos: rombos en color amarillo.	14
8. Adaptada de Blakely, 1995. Anomalía magnética, pseudogravimétrica de gradiente horizontal que produce una barra.	16
9. Polígono irregular que usa el método de Talwani para realizar el modelado directo. Adaptada de Estrada, 2012.	20
10. Esquema de las correcciones por topografía que utiliza el software Oasis Montaj: módulo Gravity and Terrain Correction. Se divide el campo en tres zonas (0: cercana, 1: intermedia, 2: lejana) para realizar el cálculo de la corrección por topografía.	24
11. Prisma triangular que se utiliza para el cálculo de la corrección cercana.	25
12. Prisma cuadrado para calcular la corrección topográfica intermedia.	26
13. Sector de un anillo para calcular la corrección topográfica lejana.	27
14. Perfiles gravimétricos (líneas color magenta) y magnéticos (líneas color negro y café) levantados. Línea color naranja: contorno del terreno del ex-basurero; rombos color amarillo: respiraderos.	30
15. Adaptada de Hinze, 1990. Muestra la separación regional y residual de una anomalía gravimétrica, proceso mediante el cual, se quitan las componentes gravimétricas de gran escala, obteniendo sólo las componentes locales de interés.	32

Figura	Página
16. Mapa aeromagnético del ex-basurero municipal de Ensenada y sus alrededores. Datos levantados en 1962. Se incluyen los perfiles magnéticos terrestres levantados (líneas de puntos color magenta).	34
17. Perfil aeromagnético sobre terrenos del ex-basurero. Datos medidos: asteriscos color naranja.	35
18. Mapa pseudogravimétrico del área.	36
19. Mapa de máximos de gradiente horizontal (cruces color negro) extraídos del mapa de anomalías pseudogravimétricas.	37
20. Diagramas de rosas de diques (a), fallas (b) y fracturas (c).	38
21. Correlación de máximos de gradiente horizontal (círculos rellenos color amarillo) de anomalías pseudogravimétricas con estructuras (fracturas, diques y fallas), el recuadro negro indica la región que se analizó con magnetometría aérea (para la simbología ver la Figura 4).	39
22. Magnetograma del 22 de octubre del 2015, en el ex-basurero de Ensenada.	40
23. Mapa de anomalías magnéticas terrestres. APE(-) zona de anomalía de potencial natural negativa; APE(+) zona de anomalía de potencial natural positiva; líneas con puntos color negro: sitios de medición; polígono color naranja: delimitación del área del ex-basurero; R1, R2: respiraderos artificiales. Contornos cada 200 nT.	42
24. Ubicación en campo de la línea 3 y donde se cruza aproximadamente con la línea A. La imagen está tomada viendo hacia el W. Se aprecia basura expuesta, principalmente llantas.	43
25. Se realizaron mediciones de susceptibilidad magnética en campo, la foto muestra la roca alterada donde fueron tomadas las mediciones.	44
26. Línea 3, Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la Deconvolución de Euler, para índices estructurales (IE) correspondientes a estructuras uni, bi y tridimensionales. APE(+): fuente de anomalía de potencial natural positiva.	46
27. Línea A, Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la Deconvolución de Euler, para índices estructurales (IE) correspondientes a estructuras uni, bi y tridimensionales. APE(+): fuente de anomalía de potencial natural positiva.	47
28. Línea B. Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la Deconvolución de Euler, para índices estructurales (IE) correspondientes a estructuras uni y bi-dimensionales.	48

29. Línea 10. Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la deconvolución de Euler, para IE de 1, 2 y 3. APE(-): fuente de anomalía de potencial natural negativa. 50
30. Línea 11. Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la deconvolución de Euler, para IE de 1, 2 y 3. APE(-): fuente de anomalía de potencial natural negativa. 51
31. Línea 12, Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la Deconvolución de Euler, para índices estructurales (IE) correspondientes a estructuras uni, bi y tridimensionales. APE(-): fuente de anomalía de potencial natural negativa. 52
32. Línea 17. Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la Deconvolución de Euler para índices estructurales (IE) correspondientes a estructuras uni, bi y tridimensionales. 53
33. Imagen tomada del punto inicial del perfil A viendo hacia el SE, la línea amarilla muestra la ubicación del perfil A, al fondo el escarpe que se observa, corresponde al ex-basurero de Ensenada. 54
34. Perfiles de anomalías magnética, gravimétrica y de topografía de la línea LA. 55
35. Perfiles de anomalías magnética, gravimétrica y de topografía de la línea LB. 56
36. Perfiles de anomalías magnética, gravimétrica y de topografía de la línea 12. 57
37. Modelo magnético-gravimétrico de la línea LA. Anomalía magnética (observada y calculada) (a), Anomalía gravimétrica residual (observada y calculada) (b), Modelo gravimétrico y magnético (c). Gr: roca sana; Los números en el modelo indican el contraste de densidad en gr/cm^3 respecto a $2.67 gr/cm^3$. Cuadro con línea discontinua: área de la fuente (cilindro horizontal) de anomalía de potencial natural positiva (APE+), según Alarcón (2010). . 59
38. Modelo magnético-gravimétrico del perfil LB. Anomalía magnética (observada y calculada) (a), Anomalía gravimétrica residual (observada y calculada) (b), Modelo gravimétrico y magnético (c). Gr: roca sana. Los números en el modelo indican el contraste de densidad en gr/cm^3 respecto a $2.67 gr/cm^3$ 61
39. Modelo magnético-gravimétrico del perfil L12. Anomalía magnética (observada y calculada) (a), Anomalía gravimétrica (observada y calculada) (b), Modelo gravimétrico y magnético (c). Gr: roca sana. Los números en el modelo indican el contraste de densidad en gr/cm^3 respecto a $2.67 gr/cm^3$. Cuadro con línea discontinua: área de la fuente (cilindro vertical) de la anomalía de potencial natural negativa (APE-), según Alarcón (2010). 63

Lista de tablas

Tabla	Lista de tablas	Página
1.	Índice estructural (IE) para fuentes magnéticas de diferentes geometrías (Durrheim y Cooper, 1997).	18
2.	Valores típicos de densidad para residuos sólidos domésticos y comerciales (Tchobanoglous y Theisen, 1994).	29
3.	Simbología utilizada para índices estructurales de fuentes magnéticas de diferentes geometrías.	45

Capítulo 1. Introducción

En las últimas décadas el volumen de residuos generados ha aumentado considerablemente provocando un riesgo toxicológico para el hombre a través de su interacción con el medio ambiente. El vertido incontrolado de todo tipo de residuos, ha sido una práctica creciente en muchas localidades. Importantes volúmenes de residuos industriales y de otros tipos (urbanos, agrícolas, etc.) han sido depositados y enterrados en vertederos, muchos de los cuales carecen de las barreras impermeables geológicas naturales o artificiales, y los fluidos tóxicos que se producen por lixiviación pueden migrar hacia el subsuelo y contaminar las aguas subterráneas. El problema se agrava cuando una vez colmatado el vertedero se cubre de tierra y se pierde la información relativa a las prácticas de vertido realizadas en el pasado (Busquet et al., 1996).

Estos vertederos normalmente se emplazaban en zonas deprimidas del terreno, como canteras abandonadas, hondonadas e incluso sencillamente en el fondo de un barranco. La acumulación de residuos en vertederos incontrolados y mal acondicionados puede producir un impacto negativo muy importante y a veces incluso irreversible, en la calidad de los suelos y aguas subterráneas (Busquet et al., 1996).

Uno de los principales objetivos en cualquier misión de control y saneamiento de vertederos es delimitar la extensión lateral del vertedero y su relación con el medio geológico en que está ubicado.

El sitio de estudio funcionó como vertedero municipal alrededor de 40 años y fue clausurado de manera oficial en el 2004. En el 2009, el XIX Ayuntamiento de Ensenada propuso la construcción de un cementerio, pero a falta de estudios de factibilidad éste se derogó (Alarcón, 2010).

Durante el funcionamiento del basurero no se tenía una normativa sobre el control de los residuos que se depositaban, por lo cual el Departamento de Geofísica Aplicada de la División de Ciencias de la Tierra del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) ha iniciado un programa de evaluación del sitio mediante métodos geofísicos (eléctricos, electromagnéticos, sísmicos y potenciales). Se espera

que el empleo de métodos geofísicos contribuya a delimitar las dimensiones del basurero, detectar la presencia de lixiviados y su interacción con el medio ambiente.

En este trabajo se presentan resultados de la evaluación de dos sitios del ex-basurero, con presencia de anomalías de potencial natural eléctrico (APE) aparentemente producidas por el flujo de lixiviados y presencia de gas metano (Alarcón, 2010), mediante mediciones de la aceleración de la gravedad e intensidad total del campo magnético terrestre.

1.1. Antecedentes

En el 2010, Alarcón Barradas realizó un estudio geofísico en la zona, empleándose los métodos eléctricos de potencial espontáneo (PE) y tomografía eléctrica resistiva (TER), con el objetivo de localizar infiltraciones de lixiviados. Encuentra dos anomalías de PE, una con polaridad positiva (APE+) con potencial máximo de 220 mV y otra con polaridad negativa (APE-) con potencial máximo de -189 mV (Figura 1). Ambas asociadas con anomalías resistivas conductoras (2-10 Ohm-m).

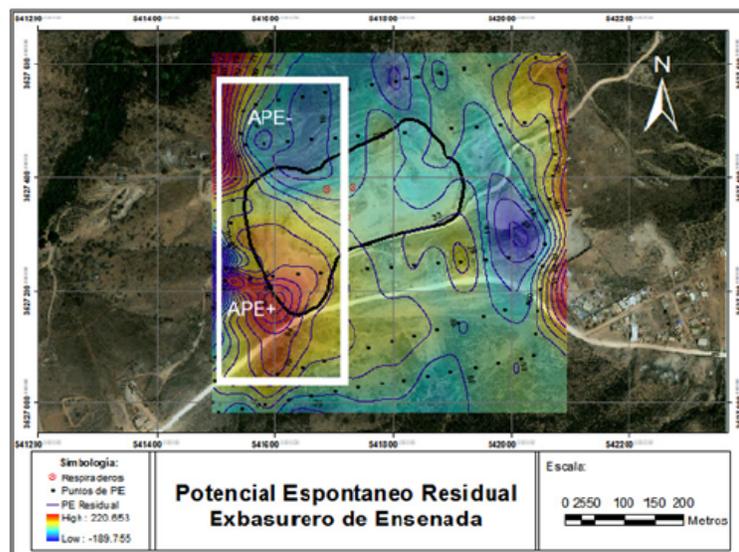


Figura 1: Mapa de anomalía de potencial espontáneo. Ex-basurero de Ensenada (polígono negro) y anomalías de potencial natural a caracterizar (cuadro blanco). Anomalías de Potencial Espontáneo: positiva (APE+), negativa (APE-), (adaptado de Alarcón, 2010).

El origen de la anomalía de polaridad negativa la atribuye a reacciones de oxidoreducción por la presencia y flujo de lixiviados, mientras que la anomalía con polaridad positiva la atribuye a reacciones anaeróbicas asociadas a metanogénesis¹. Secciones de los modelos geométricos de las fuentes que generan las anomalías de potencial espontáneo positiva (cilindro horizontal) y negativa (cilindro vertical), se muestran sobre secciones geoelectricas en la Figura 2.

En 2015, Legorreta, realizó un levantamiento de polarización inducida y electromagnético, para detectar contaminantes provenientes del sector norte del basurero hacia el arroyo de Ensenada. Detecta anomalías de polarización inducida y conductividad eléctrica, producidas por la presencia de contaminantes de origen inorgánico, depositados en terrenos acuíferos del margen sur del Arroyo de Ensenada.

¹Fase final de la descomposición orgánica donde el ácido acético, hidrógeno, agua, ácido fórmico y metanol son convertidos por acción microbiana a metano y dióxido de carbono (Alarcón, 2010).

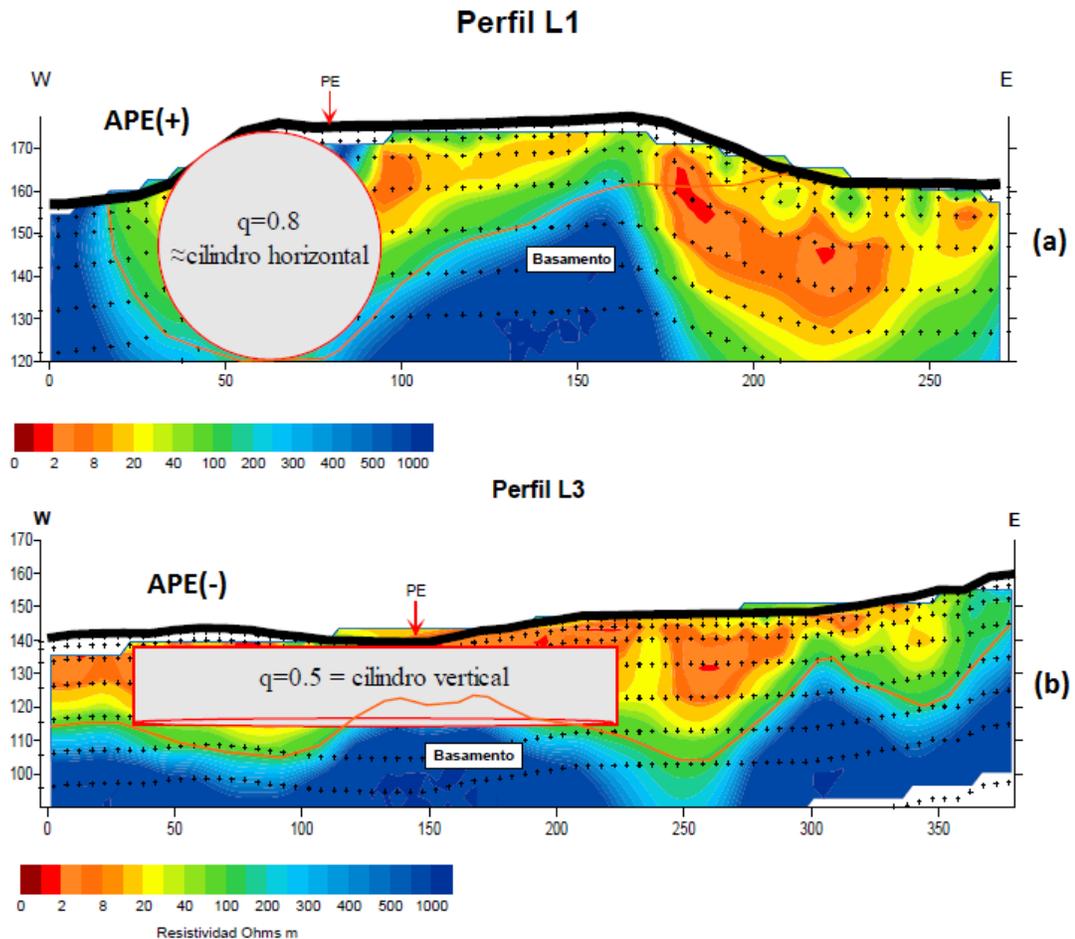


Figura 2: Cuerpos fuente de PE (tomada de Alarcón, 2010) sobre secciones de resistividad; (a): Línea 1 correspondiente a la línea A de nuestro estudio; (b): Línea 3, en este estudio corresponde con la línea 12.

1.2. Localización del Ex-basurero Municipal de Ensenada

El ex-basurero municipal se localiza al sur del centro de la ciudad de Ensenada, B.C., entre los paralelos $31^{\circ} 52'$ a $31^{\circ} 53'$ de latitud norte y los meridianos $116^{\circ} 33'$ a $116^{\circ} 34'$ de longitud oeste, abarcando un área aproximada de 6.6 hectáreas. A sus alrededores se localizan 4 colonias, que fueron desarrollándose en los últimos 20 años, Fraccionamiento Mar, Ampliación Gómez Morín, Popular 89 y 17 de Abril. Además, hacia el norte a 300 m, colinda con el arroyo, de aguas intermitentes, Ensenada (Figura 3). Actualmente la parte superior del basurero está cubierta por una capa de arena gruesa compactada de 2 m de

espesor para prevenir la percolación vertical de aguas de lluvia, mientras que sus flancos están descubiertos y expuestos a la intemperie. Tiene dos respiraderos artificiales por donde se fuga gas metano (biogás) hacia la atmósfera, cuya ubicación se muestra en la Figura 3.

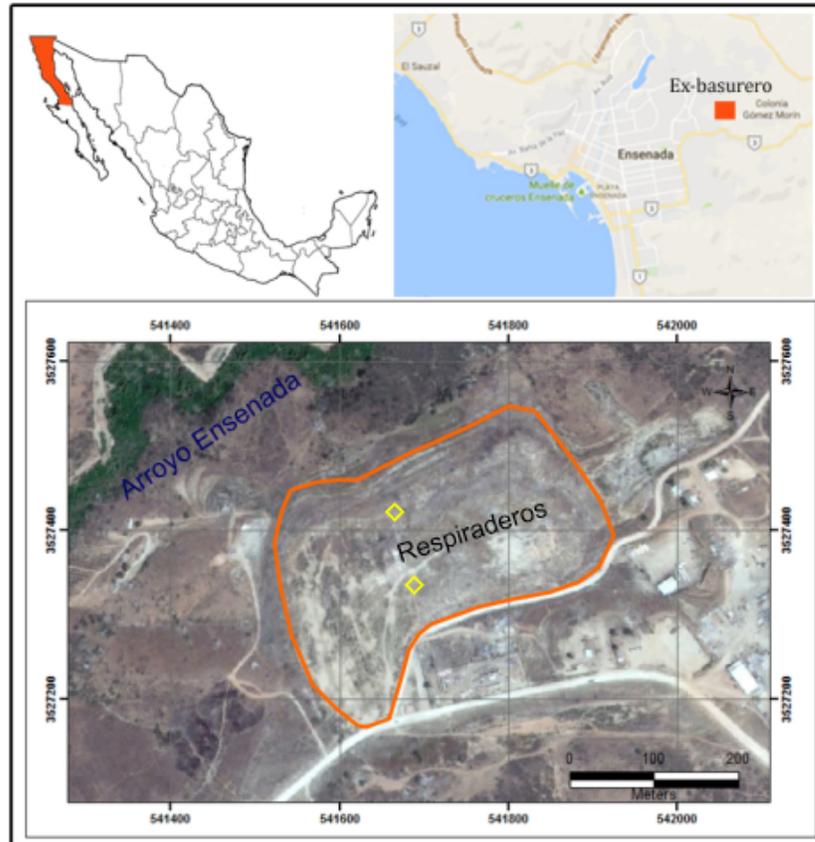


Figura 3: Mapa de ubicación de la zona de estudio. Polígono color naranja: límites del ex-basurero.

1.3. Bosquejo geológico regional y local del área de estudio

1.3.1. Regional

La zona de estudio se encuentra en la Provincia de Baja California (Figura 4), con subprovincia en la Sierra de Baja California, la cual está caracterizada por un basamento

formado por rocas batolíticas graníticas, metamórficas mesozoicas cubiertas por depósitos sedimentarios recientes (CNA, 2002).

El subsuelo de Ensenada consiste en un basamento conformado por rocas meta-volcánicas de la Formación Alisitos (Almazán, 1988). Este cuerpo basal aflora al oriente de la zona costera, profundizándose conforme se adentra hacia la playa y se encuentran subyaciendo a la cuenca sedimentaria de la Formación Rosario, en los extremos norte y sur (Gastil et al., 1975).

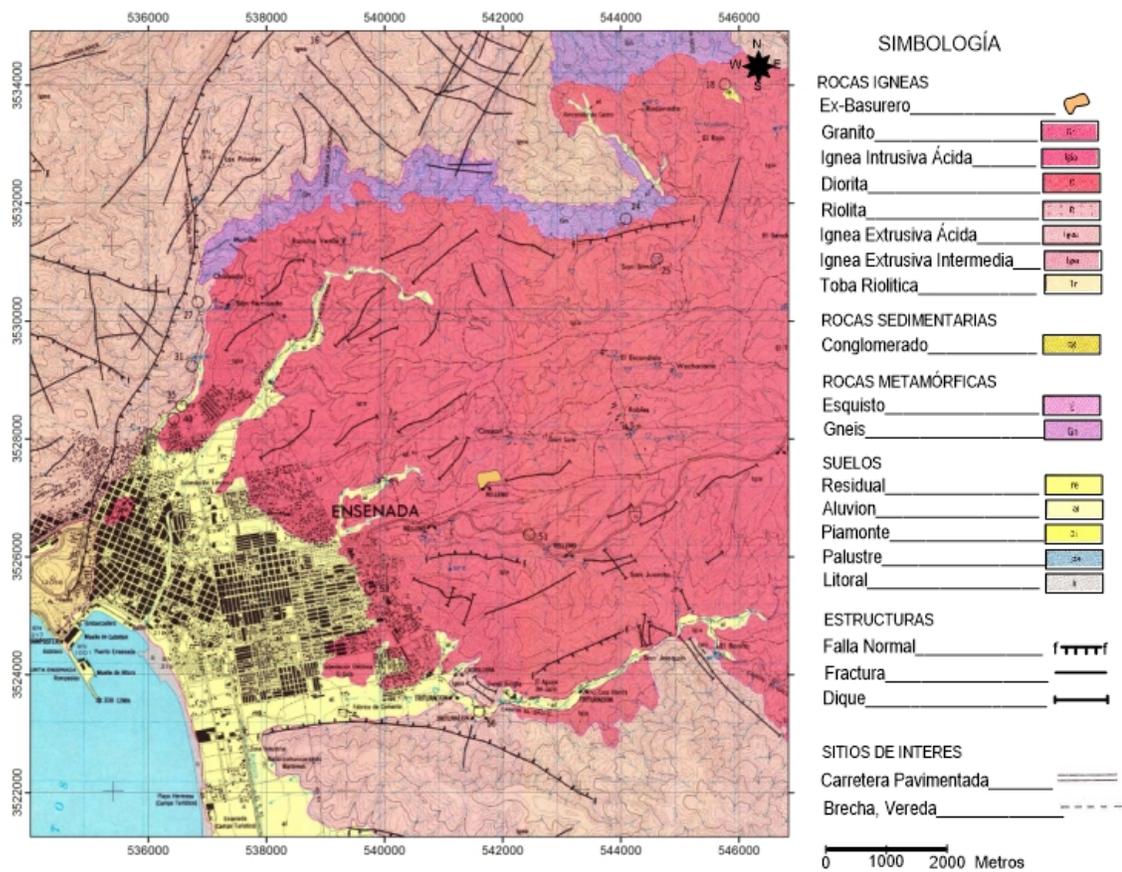


Figura 4: Mapa geológico regional que incluye el ex-basurero municipal de Ensenada y sus alrededores. Modificado de INEGI: hoja H11B12.

La Formación Rosario es principalmente arenosa, con una brecha preferentemente conglomerática en los sectores central y meridional. Cubriendo discontinuamente a ésta, se encuentra una secuencia de materiales granulares, con índices de permeabilidad de

elevados a moderados, representados por arenas de grano medio a fino, arcillas y cuerpos de conglomerados, estos fueron depositados en los causes de los arroyos provenientes de las zonas montañosas, los espesores varían de 30 a 80 m (CNA, 2002). En cuanto a la geología estructural, diversas estructuras, tales como fracturas, fallas y diques, cortan a las rocas ígneas (intrusivas y extrusivas), metamórficas y sedimentarias. Probablemente las fracturas y fallas fueron desarrolladas por efectos de esfuerzos, debido al proceso de consolidación de las rocas intrusivas. Los diques son fracturas que podrían estar rellenas de aplita, pegmatita y filones de cuarzo. Las fallas que cortan a las rocas extrusivas, metamórficas y sedimentaria indican diferentes períodos de afallamiento, debido a esfuerzo regionales. Las direcciones estructurales principales son NW-SE.

1.3.2. Local

Específicamente, el sitio se encuentra en una capa arenosa somera, derivada del intemperismo del granito Cretácico, con un zócalo cristalino constituido por rocas ígneas intrusivas masivas, de variedad granito a granodiorita, de grano medio y fracturamiento moderado y cubierto por una capa de alteración, seguida por una alternancia de arenas gruesas a finas, de espesor variable (Gómez-Treviño y Espinosa, 1990).

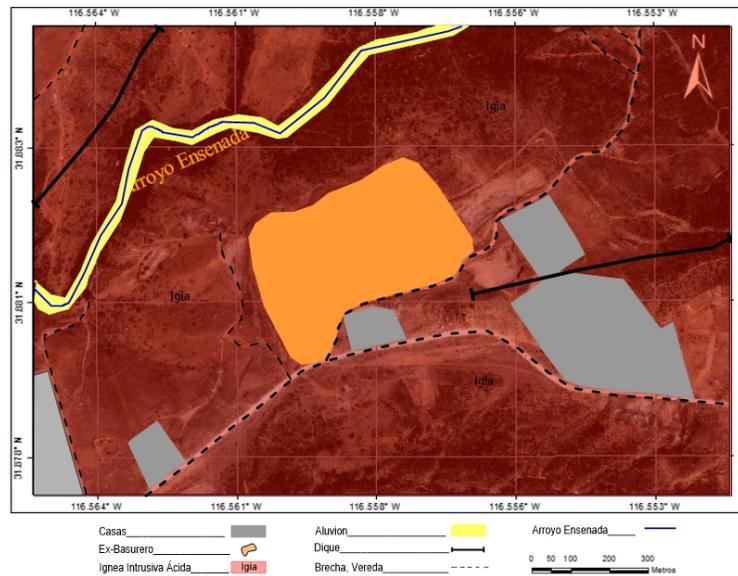


Figura 5: Rasgos geológicos en el área de estudio y lugares adyacentes.

La zona urbana que rodea al ex-basurero, está establecida casi por completo sobre conglomerados con clastos y arena de origen granítico del Cretácico Tardío y Terciario Temprano. A los alrededores del área de estudio, se localiza un sistema de diques de diversa composición (aplitita, pegmatita y cuarzo) y casi paralelos al cauce del Arroyo Ensenada (Figura 5), el cuál podría ser producto de una fractura regional, mientras que los arroyos secundarios que convergen al arroyo principal, podrían ser fracturas preexistentes.

1.4. Hipótesis

Las anomalías de potencial natural presentes en un relleno sanitario, son producidas principalmente por: migración de líquidos (escurrimiento), degradación de la materia orgánica (procesos bioquímicos), oxidación de elementos metálicos, cambios de presión provocados por gases o líquidos, reacciones químicas entre lixiviados y metales (oxido-reducción), entre otros (Alatorre-Zamora et al., 2008).

Los materiales geológicos que constituyen el subsuelo de los rellenos sanitarios, se caracterizan por presentar valores de resistividad eléctrica, que son función de la composición litológica de las partículas minerales, de la porosidad, del contenido de agua y de la concentración en sales disueltas del agua (Busquet et al., 1996). En la presencia de lixiviados, o simplemente por los residuos sólidos depositados en el subsuelo, las propiedades geofísicas del terreno (densidad y susceptibilidad magnética) sufren cambios que se pueden detectar como anomalías en las mediciones geofísicas.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

Evaluación de las siguientes técnicas geofísicas, en problemas de contaminación por rellenos sanitarios

- Gravimetría (ubicación interfaz roca-basura).
- Magnetometría (presencia de material ferroso), localización de estructuras geológicas.

1.5.2. Particulares

- Contribuir al esclarecimiento del origen de anomalías de potencial espontáneo presentes en el ex-basurero Municipal de Ensenada, B. C.

Capítulo 2. Metodología y materiales

En este capítulo se describen los fundamentos de los métodos de posicionamiento satelital, magnetometría y gravimetría. Los métodos de procesamiento, análisis, modelado y levantamiento de datos. Así como la descripción del equipo utilizado.

2.1. Técnica de posicionamiento satelital RTK

Para realizar un estudio geofísico, es indispensable conocer la ubicación de cada estación. En especial, si se trabaja con gravimetría se requiere tener la elevación y la posición horizontal de cada punto de medición, ya que se utilizan para hacer las correcciones de gravedad observada. Tarea que en la actualidad se realiza mediante técnicas de posicionamiento satelital (GPS: Global Positioning System) en la modalidad de cinemático en tiempo real (RTK: Real Time Kinematic).

El GPS es una técnica basada en el uso de medidas de señales portadoras de navegadores con señales GPS, GLONASS y/o de Galileo, donde una sola estación de referencia proporciona correcciones en tiempo real, obteniendo una exactitud submétrica. La dificultad para implementar un sistema RTK, radica en alinear correctamente las señales. En la práctica, los sistemas de RTK utilizan un sólo receptor como estación base, con una posición conocida de manera precisa y un número determinado de unidades móviles. La estación base retransmite, a través de algún canal de comunicación (VHF o UHF, red celular), la fase del portador que hace mediciones, y las unidades móviles comparan sus propias medidas de fase, con las que está recibiendo desde la estación base (Tolosa, 2012).

La técnica RTK, es una de las tecnologías de navegación y posicionamiento satelital más precisas, con la cual los usuarios pueden obtener en tiempo real, una precisión de centímetros en posiciones relativas.

El equipo necesario, para usar este sistema, consiste en un emisor y un receptor de la señal de la estación de referencia; un software que calcule en tiempo real la posición

del móvil respecto de la base (conocida). El problema que tiene este sistema es, que con la distancia no se cancelan los errores, es necesario que haya conexión entre emisor y receptor y ésta no se pierda, de lo contrario habrá que inicializar nuevamente (Tolozá, 2012).

Para tener un control topográfico de las mediciones gravimétricas y magnéticas se llevaron a cabo mediciones GPS con la técnica RTK. El equipo utilizado fue un par de receptores GPS marca TOPCON modelo GR-5 con libreta electrónica para ir guardando automáticamente la información. Posteriormente se descargaron los datos de la libreta electrónica en una computadora, los cuales no requieren ningún post-proceso.

2.2. Magnetometría

La prospección magnética, es una técnica basada en la medida y estudio de las variaciones del campo magnético terrestre, obteniéndose medidas del valor total del campo magnético o bien, del gradiente de dicho campo magnético. Estas variaciones, son debidas a la presencia de cuerpos susceptibles de ser magnetizados y que, por tal motivo, contribuyen a modificar el campo magnético terrestre en su entorno.

El propósito en este trabajo de las mediciones de la intensidad del campo magnético terrestre es encontrar anomalías que se puedan asociar con depósitos de alto contenido de magnetita (por ejemplo, materiales ferrosos dentro del relleno sanitario como posibles fuentes de las anomalías de potencial natural) y estructuras en el subsuelo (fallas y/o fracturas) que funcionen como conductos para el flujo de los lixiviados.

Para interpretar los datos, las mediciones magnéticas se comparan con un modelo de la Tierra. El valor de la anomalía es el resultado de restar el valor observado, menos el valor teórico, es decir

$$\Delta T = \{[T_{obs} \pm T_{VD}] - T_{IGRF}\} \quad (1)$$

Donde ΔT es la anomalía magnética, T_{obs} es el valor de campo magnético medido en campo, T_{VD} es la corrección por variación diurna, y T_{IGRF} : Campo Geomagnético Internacional de Referencia (modelo matemático que describe la variación del campo geomagnético en función de la latitud, longitud y tiempo).

De la ecuación 1 se ve que si en la zona de estudio no existe ningún material diferente a la roca de los alrededores, dicha ecuación será cero (ó muy cercano a cero). Por lo que si se obtiene un valor de $\Delta T \neq 0$ se asocia a la presencia de un material distinto.

2.2.1. Compilación y levantamiento de datos

Previo al levantamiento de datos terrestres se realizó una compilación de datos aeromagnéticos disponibles para extraer lineamientos aeromagnéticos que podrían estar relacionados con estructuras geológicas en y los alrededores del ex-basurero. Por estas estructuras podrían percolar hacia el subsuelo los lixiviados generados.

2.2.1.1. Aeromagnéticos

Los datos aeromagnéticos utilizados para este estudio, fueron levantados por el Consejo de Recursos Minerales (CRM), hoy Servicio Geológico Mexicano (SGM), los cuales fueron adquiridos mediante compra por la División de Ciencias de la Tierra.

Estos datos fueron medidos en 1962 a lo largo de líneas de vuelo con separación entre sí de 1 km y a una altura de 300 m sobre el nivel del terreno, utilizando un magnetómetro Fluxgate y navegación visual. Esta información fue recuperada a partir de la digitalización de los cruces entre los contornos magnéticos y líneas de vuelo de un mapa magnético escala 1:100 000 compilado a mano (Fragoso, 2014).

Las coordenadas geográficas se reportan en proyección Universal Transversal de Mercator con datum horizontal NAD 27, fue necesario re proyectarlas a UTM con datum WGC

84, ya que es la proyección y el datum utilizados a lo largo de este trabajo. A estos datos se les sustrajo el valor del modelo del campo geomagnético (IGRF) correspondiente al año de 1962, para convertirlos en valores de anomalía magnética (Ecuación 1).

2.2.1.2. Terrestres

Estos datos fueron levantados en dos períodos de tiempo. En el primero (del 22 al 27 de octubre del 2015), los datos se registraron con un magnetómetro de precesión nuclear marca GEM System modelo 19. La variación diurna (VD) del campo magnético fue monitoreada con el mismo magnetómetro, utilizando la técnica “salto de rana” como ilustra la Figura 6, por cada cinco estaciones que se registraban, se regresaba a la estación base, aproximadamente en un intervalo de 30 min.

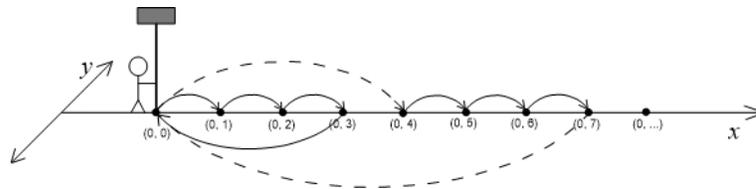


Figura 6: Esquema del levantamiento de datos, comúnmente conocido como “salto de rana”, se establece una estación base, a la cual se regresa después de haber medido cierto núm. de estaciones para monitorear la variación diurna.

Se levantaron un total de 21 perfiles, 4 abarcando la anomalía de potencial natural negativa y 10 la anomalía de potencial natural positiva, los 7 perfiles restantes fueron medidos sobre el ex-basurero alrededor de los respiraderos. El perfil de mayor longitud es de 356 m (L10), mientras que el de menor longitud es de 65 m (L9). Se registraba una medición cada 5 m a lo largo del perfil. La ubicación de los perfiles levantados se muestra en la Figura 7.

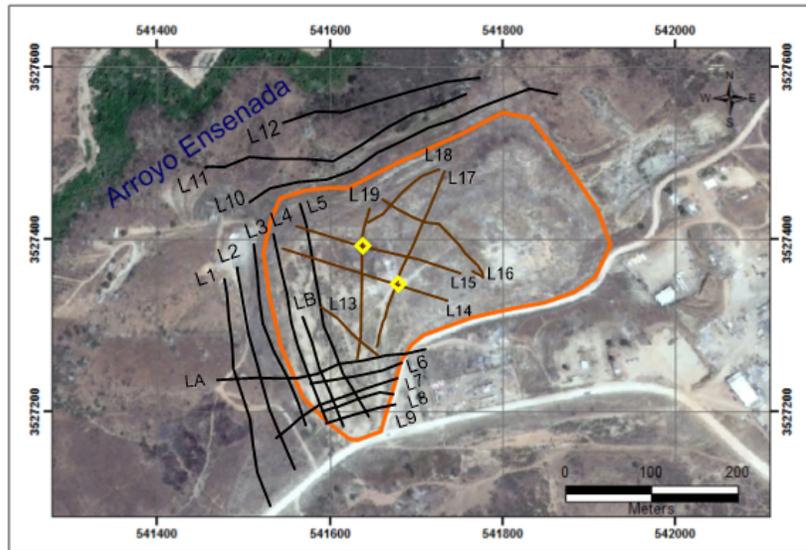


Figura 7: Mapa de ubicación de los perfiles magnéticos, 1ra. etapa: líneas color negro; 2da. etapa: líneas color café. Respiraderos: rombos en color amarillo.

Para la 2da. etapa (del 14 al 15 de octubre del 2016) se contó con un magnetómetro marca Geometrics modelo G-856 para monitorear la variación diurna. Los perfiles levantados se muestran en la Figura 7 con líneas color café. La separación entre estaciones se mantuvo igual al levantamiento de la 1ra. etapa.

2.2.2. Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad κ indica el grado de sensibilidad a la magnetización de un material, al ser influenciado por un campo magnético. Para el vacío y sustancias no magnéticas κ es cero.

La magnetización es una magnitud vectorial y viene dada como el momento magnético por unidad de volumen de materia. La unidad de magnetización en el sistema SI se expresa en amperios por metro (A/m). La susceptibilidad es adimensional, la relación entre el sistema SI y el CGS es la siguiente (Hinze, 1990):

$$\kappa (SI) = 4\pi\kappa (cgs)$$

El magnetismo de casi todas las rocas, es función de su contenido en minerales ferromagnéticos. Son estas sustancias las que poseen susceptibilidad relativamente alta y capacidad de adquirir imanación permanente. Entre los diversos constituyentes ferromagnéticos de las rocas, la magnetita (Fe_3O_4) es la más importante. Se han propuesto varias ecuaciones empíricas, para determinar la susceptibilidad de las rocas en función de su contenido de magnetita, sin embargo, no existe ninguna relación de validez universal entre la susceptibilidad y el contenido de las rocas en magnetita. Es recomendable determinar directamente la susceptibilidad de las rocas y minerales de la zona de interés.

Así mismo, es importante conocer la susceptibilidad de las rocas donde se depositan residuos urbanos, ya que la posibilidad de detectar materiales férricos en la basura vertida, depende esencialmente de poder diferenciar la susceptibilidad de dichos materiales de la roca que los aloja.

Para tener datos de susceptibilidad magnética de las rocas adyacentes al ex-basurero, se realizaron mediciones en rocas graníticas sanas y alteradas (Figura 25) con un susceptibilímetro de mano marca EDA modelo K-2. Para que las mediciones fueran representativas se cubrieron áreas de 2x2 m de roca.

2.2.3. Análisis de contactos magnéticos (gradiente horizontal)

El método de gradiente horizontal se utiliza para localizar contrastes de densidades, a partir de datos de gravedad o de datos magnéticos de campo total transformados a datos pseudogravimétricos. Este método se basa en el principio de que una frontera, como la de una falla, produce una anomalía de la gravedad cuyo gradiente horizontal es mayor directamente sobre el borde de la frontera. Los datos magnéticos pueden ser transformados a datos pseudogravimétricos, usando técnicas de Fourier, para que se comporten como datos de gravedad; Por lo tanto, el gradiente horizontal de pseudogravedad también tiene

su valor máximo, directamente sobre el borde de la fuente anómala (Grauch y Cordell, 1987).

La magnitud del gradiente horizontal de las anomalías de gravedad o pseudogravimétricas esta dada por

$$h(x, y) = \left[\left(\frac{\partial g_z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g_z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

y se calcula fácilmente utilizando relaciones simples de diferencias finitas.

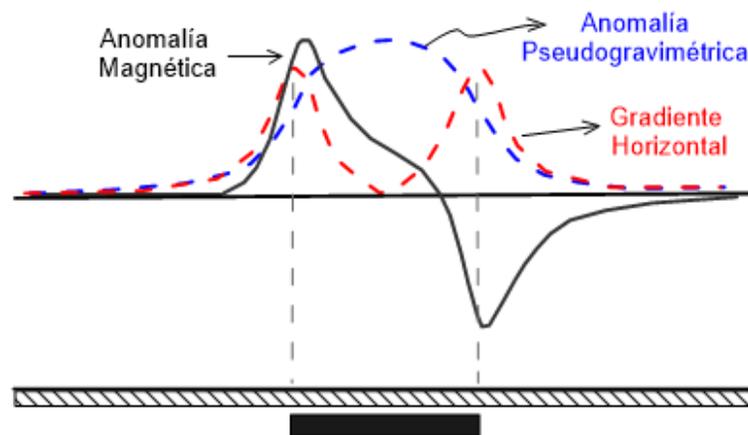


Figura 8: Adaptada de Blakely, 1995. Anomalía magnética, pseudogravimétrica de gradiente horizontal que produce una barra.

En la Figura 8 se muestra gráficamente los resultados del proceso descrito, aplicados a una anomalía magnética, debida a una barra horizontal. Se observa que los máximos del gradiente horizontal de la anomalía pseudogravimétrica coinciden con los bordes de la barra.

Se utilizó la técnica de análisis de contactos magnéticos “magnetic boundary analysis” (Blakely, 1995), para detectar posibles estructuras geológicas (fracturas, diques, fallas, contactos) en y a los alrededores de ex-basurero municipal de Ensenada.

El procedimiento consta de 3 pasos que se describen brevemente a continuación:

(1) Se transforman las anomalías magnéticas de campo total, a anomalías pseudo-gravimétricas. Para ello, las anomalías de campo total se transforman al dominio de las frecuencias, se multiplica por la función de transferencia del filtro pseudogravimétrico y se aplica la transformada inversa al producto.

(2) Habiendo hecho la transformación pseudogravimétrica se determina la magnitud del gradiente horizontal (ecuación 2).

(3) Localización y graficado de cada máximo del gradiente horizontal.

El proceso de la transformación de anomalías aeromagnéticas a anomalías pseudo-gravimétricas, de gradiente horizontal y extracción de máximos de gradiente horizontal, se realizó utilizando programas del paquete para procesado de datos gravimétricos y magnéticos desarrollado por el Servicio Geológico Norteamericano (Phillips, 1997).

2.2.4. Modelado de datos

2.2.4.1. Deconvolución de Euler

El método de deconvolución de Euler (MDE) fue desarrollado originalmente en la exploración geofísica para estimar rápidamente la ubicación y profundidad de fuentes magnéticas o de gravedad. Se basa en el hecho de que el campo potencial producido por muchas fuentes simples obedece la ecuación homogénea de Euler (Kristofer y Yaoguo, 2009).

Sea $f(x, y, z)$ una función tridimensional, se dice que es homogénea de grado n si la función cumple la expresión:

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z) \quad (3)$$

Esta ecuación satisface la ecuación de Euler

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf \quad (4)$$

Y aplicando la ecuación a los campos potenciales se tiene:

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \quad (5)$$

Donde (x_0, y_0, z_0) es la posición de la fuente gravimétrica o magnética, cuyo campo total T se ha medido en (x, y, z) . T está afectado por un valor regional B .

La ec. 4 es la ecuación Homogénea de Euler, mientras que de la ec. 5 podemos ver la relación de intensidad de un campo potencial y las componentes de su gradiente con la profundidad a la que se encuentra la fuente a través del grado de homogeneidad N que se denomina Índice Estructural (IE).

El IE es la potencia del inverso de la distancia a la fuente, la cual atenúa la intensidad del campo potencial y brinda un medio para discriminar entre las distintas geometrías que se asumen para las fuentes. La relación entre geometría de las fuentes anómalas e índice estructural se pueden ver en la tabla siguiente:

Tabla 1: Índice estructural (IE) para fuentes magnéticas de diferentes geometrías (Durrheim y Cooper, 1997).

Modelo	Fuente	IE
Línea de polos	Lámina horizontal	1.0
Polo puntual	Cilindro vertical	2.0
Línea de dipolos	Tubería horizontal	2.0
Dipolo puntual	Tanque	3.0

En la versión automática de interpretación de perfiles magnéticos por el MDE implementada por Durrheim y Cooper (1997) y utilizada en este trabajo, el proceso se inicia con la lectura del número de estaciones (n), la longitud de la ventana de análisis a utilizar, los valores de los índices estructurales (IE), la intensidad del campo geomagnético (T), la inclinación magnética (I), el rumbo del perfil (R), medido en sentido horario a partir del norte magnético y los valores de la anomalía de intensidad total. Posteriormente se calcula, tanto la derivada vertical de los datos magnéticos reducidos al polo (se ha eliminado la asimetría de las anomalías por efecto de la inclinación magnética) y el gradiente horizontal de los datos magnéticos, se seleccionan 4 valores de los datos magnéticos de la ventana de análisis establecida. Se determina la solución del sistema de ecuaciones y se calculan los parámetros desconocidos, distancia horizontal (x_0) y profundidad (z_0). Enseguida se continúa el proceso, desplazándose la ventana un intervalo entre estaciones y se vuelven a leer otros 4 valores ya sea del gradiente horizontal o vertical de los datos, calculándose nuevamente los parámetros mencionados. En esta forma se obtienen un número de soluciones igual a las veces que la ventana avanzó por el perfil magnético (deconvolución). La sensibilidad del algoritmo, para la detección de una fuente magnética real, está fuertemente relacionada con las dimensiones horizontales de la ventana de análisis y de la posición de ésta, con respecto a la anomalía que genera la fuente, por lo tanto, habrá soluciones ficticias que deberán descartarse, utilizando algún criterio adecuado de selección, por ejemplo, separación máxima permitida entre soluciones en el plano xz ; mínima desviación estándar de la solución mínimos cuadrados del sistema de ecuaciones lineales, etc.

2.2.4.2. Modelado Directo

El modelado directo, implica proponer un modelo geológico hipotético, tal que la geometría, densidad y susceptibilidad, reproduzcan lo mejor posible la anomalía gravimétrica y magnética observada. En este estudio se utilizó el módulo GM-SYS del software Oasis Montaj versión 6.4.2. Este programa realiza un modelado en 2D basado en el método de Talwani, en el cual los cuerpos varían con la profundidad (eje z) y a lo largo del perfil

(eje x) y si se quiere hacer un modelado $2\frac{1}{2}D$ se considera la longitud del eje y . Luego se integra conjuntamente sin separar x e y como integral doble a lo largo del polígono P (Estrada, 2012).

$$g_z = 2G\rho \int \int_P \frac{z}{x^2 + z^2} dx dz \quad (6)$$

Mediante el teorema de Green se transforma esta integral doble a una integral de línea:

$$g_z = 2G\rho \int_C \arctan\left(\frac{x}{z}\right) dz \quad (7)$$

que se resuelve integrando por separado y sumando el efecto de cada lado (Figura 9).

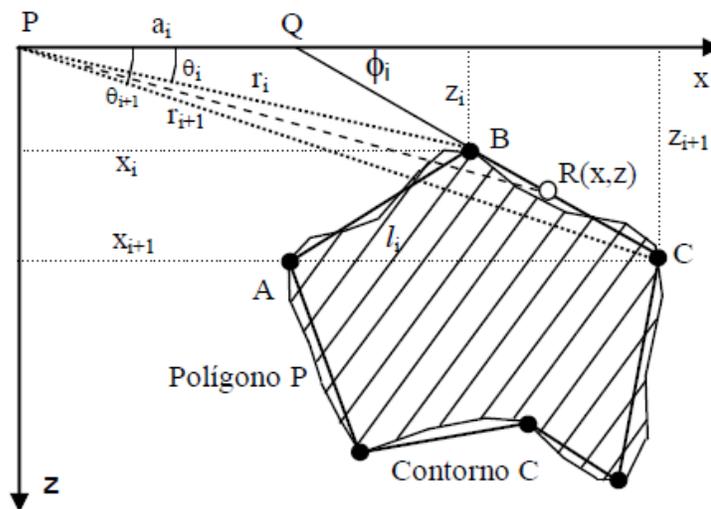


Figura 9: Polígono irregular que usa el método de Talwani para realizar el modelado directo. Adaptada de Estrada, 2012.

El método de Talwani establece que cualquier cuerpo irregular se puede representar por medio de cuerpos de sección poligonal. Entonces, la integral de contorno ec. 7 se puede descomponer en la suma de las integrales correspondientes a los efectos de cada

una de las rectas de la sección

$$g = 2G\rho \sum_{i=1}^n z_i \quad (8)$$

con

$$z_i = a_i \operatorname{Sen}\phi_i \operatorname{Cos}\phi_i \left\{ (\theta_i - \theta_{i+1}) + \tan\phi_i \ln \left[\frac{\operatorname{Cos}\theta_i (\tan\theta_i - \tan\phi_i)}{\operatorname{Cos}\theta_{i+1} (\tan\theta_{i+1} - \tan\phi_i)} \right] \right\}$$

donde

G : es la constante de gravitación universal ($G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$).

ρ : es la densidad o contraste de densidad del medio (kg/m^3).

a_i : es la distancia entre el punto de muestra y la intersección del lado del polígono en la superficie.

θ_i : es el ángulo entre la superficie y la línea que une el punto de muestra y un vértice.

ϕ_i : es el ángulo entre la superficie y la propagación de un lado del polígono hasta la superficie.

Por lo tanto, para el modelado 2D se propone un modelo teórico y se compara con los datos de campo. Luego, por prueba y error se va ajustando la curva teórica hasta lograr que coincidan lo mejor posible. En el modelado puede existir más de una solución que reproduzca los datos magnéticos y gravimétricos. Es tarea del intérprete evaluar razonablemente la geología del modelo. (Del Bosque-Espinosa e Hidalgo, 2013).

Para determinar la interfaz roca-basura, densidades y susceptibilidades magnéticas de los materiales que conforman el basurero, se realizó el modelado $2\frac{1}{2}D$ de tres perfiles gravimétricos y magnéticos que cruzan por las anomalías de potencial natural (Figura 14).

2.3. Gravimetría

La gravimetría se basa en el estudio de las propiedades del subsuelo mediante la medida y el análisis del campo gravitatorio en la superficie terrestre. Dicho campo se ve afectado por todas las distribuciones de masa y discontinuidades del subsuelo, caracterizadas por su densidad, contrastes laterales en la densidad de las rocas del subsuelo producen anomalías gravimétricas, que pueden ser detectadas por mediciones precisas de la aceleración de la gravedad (Hinze et al., 1990; Monier-Williams et al., 1990).

El propósito de las mediciones de la aceleración de la gravedad es encontrar anomalías que podamos asociar con depósitos y estructuras en el subsuelo y la interfaz basura-lixiviados-rocas.

La magnitud de la gravedad en la superficie de la Tierra depende de cinco factores: latitud, elevación, topografía, marea terrestre y variaciones en la densidad del subsuelo. Este último factor, es el único de importancia en la exploración gravimétrica y es generalmente un efecto mucho muy pequeño.

Para analizar los datos gravimétricos es necesario convertirlos en anomalía, es decir, comparar las mediciones realizadas (ya corregidas por deriva instrumental y marea gravimétrica) con un modelo teórico. En este trabajo se utiliza la Anomalía de Bouguer Completa (ABC) la cual toma en cuenta la latitud, elevación, masa y topografía.

La ABC es definida por

$$g_{ABC} = g_{obs} - g_{teorica} \quad (9)$$

donde g_{obs} es el dato corregido, por variaciones temporales (deriva de aparato, marea gravimétrica y altura de aparato), referido a la estación base y $g_{teorica}$ es la gravedad teórica del sitio de estudio, es decir

$$g_{teorica} = g_{\phi} - g_{AL} + g_B - g_t \quad (10)$$

donde g_ϕ es la corrección por latitud, la cual, para un área local (no mayor a 1 km) se obtiene: $g_\phi = 0.008139 \text{ Sen } 2\phi$ [mGal/m], este valor representaría el cambio en latitud a 10 m de la estación de referencia; g_{AL} es la corrección por altura, $g_{AL} = 0.3086 \Delta h$ [mGal/m]; $g_B = 0.04191 \rho \Delta h$ [mGal/m], es la corrección por efecto de Bouguer debido a un espesor Δh de un material de densidad ρ en gr/cm^3 , esta corrección siempre es de signo contrario a la corrección por altura; g_t es la corrección por topografía (descrita más adelante). Así

$$g_{ABC} = g_{obs} - g_\phi + g_{AL} - g_B + g_t \quad (11)$$

Mientras que la Anomalía de Bouguer Simple (ABS) omite la corrección por topografía

$$g_{ABS} = g_{obs} - g_\phi + g_{AL} - g_B \quad (12)$$

Y la anomalía de Aire Libre, omite tanto los efectos de masa como de topografía y está dada por

$$g_{AAL} = g_{obs} - g_\phi + g_{AL} \quad (13)$$

Convencionalmente los mapas de anomalía de Bouguer de áreas regionales, se basan en una densidad de 2.67 g/cm^3 (2670 kg/m^3) en la corrección de masa. Esta densidad se ha supuesto que es la densidad promedio de las rocas continentales superiores (Hinze, 1990).

Corrección por Topografía. En esta corrección se considera el efecto de atracción de masa, dado por la topografía alrededor de la estación, tanto las depresiones (valles), como las elevaciones (montañas) en los alrededores de la estación disminuyen la gravedad medida, por eso la corrección topográfica siempre es positiva.

Estrictamente, la masa entre la base y la estación de medición no es una placa infi-

nita, como lo considera el efecto de Bouguer, sino que existe un relieve topográfico que presenta excesos y defectos de masa, respecto de la placa. Para corregir esos excesos y defectos de masa, se calcula la corrección topográfica, CT.

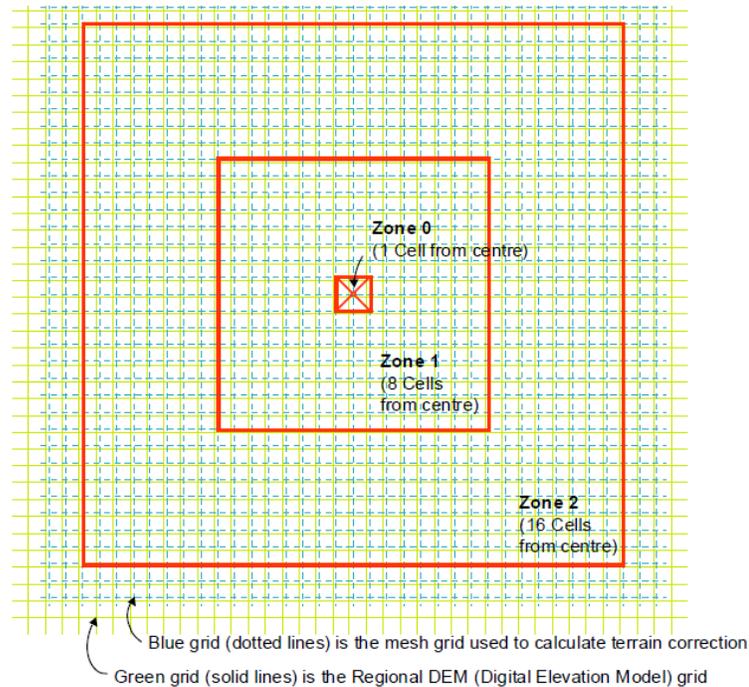


Figura 10: Esquema de las correcciones por topografía que utiliza el software Oasis Montaj: módulo Gravity and Terrain Correction. Se divide el campo en tres zonas (0: cercana, 1: intermedia, 2: lejana) para realizar el cálculo de la corrección por topografía.

La corrección por topografía, se realizó utilizando el módulo Gravity and Terrain Correction del software Oasis Montaj de Geosoft, el cual calcula dicha corrección, usando una combinación de los métodos descritos por Nagy (1966) y Kane (1962); el programa realiza el cálculo dividiendo las zonas, como se muestra en la Figura 10, la zona 0: corresponde a la corrección más próxima, la zona 1: es la corrección intermedia y la zona 2: es la corrección lejana.

Para utilizar este programa se debe contar con un Modelo Digital de Elevación (MDE) y conocer la densidad característica de las rocas de la zona. El MDE utilizado, fue tomado de INEGI, quienes reportan datos interpolados cada 5 m y la densidad se propuso de 2.67

gr/cm^3 .

La forma en la que el software hace el cálculo de cada zona es la siguiente:

Zona 0: El algoritmo suma los efectos de las cuatro secciones de un triángulo inclinado, Figura 11, que describe una superficie entre la estación de gravedad y la elevación en cada esquina de la diagonal.

$$g = GD\theta \left(R - \sqrt{R^2 + H^2} + \frac{H^2}{\sqrt{R^2 + H^2}} \right)$$

donde,

g: Atracción gravitacional del prisma triangular [mGal]

G: Constante de gravitación universal [$G = 6.667 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2$]

D: Densidad [g/cm^3]

θ : Ángulo [radianes]

R: Longitud horizontal del sector del prisma [m]

H: Altura del prisma [m]

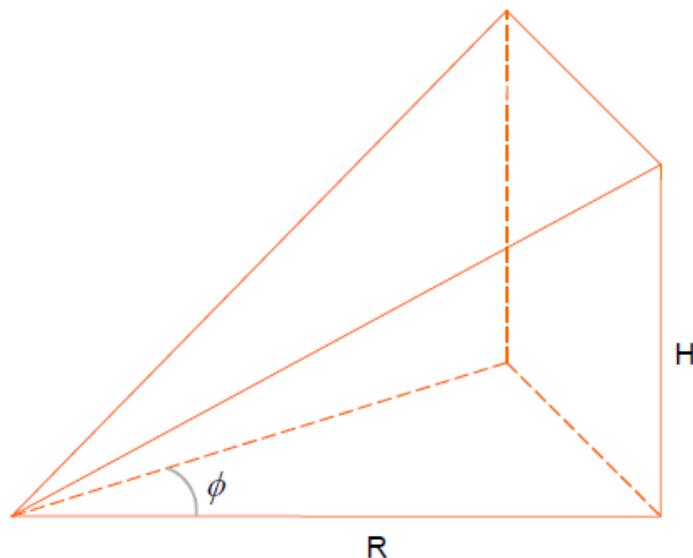


Figura 11: Prisma triangular que se utiliza para el cálculo de la corrección cercana.

Zona 1: El efecto de topografía es calculado, para cada punto usando el prisma plano cuadrado, como lo ilustra la Figura 12. Matemáticamente este efecto es

$$g = GD \left| \begin{array}{l} z_2 | y_2 | x_2 \\ z_1 | y_1 | x_1 \end{array} \right| x \bullet \ln(y + R) + y \bullet \ln(x + R) + Z \arctan \frac{Z \bullet R}{x \bullet y} \left| \right| \left| \right|$$

donde,

g: Atracción gravitacional del prisma cuadrado [mGal]

G: Constante de gravitación universal [$G = 6.667 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$]

D: Densidad [g/cm^3]

x: Coordenada horizontal [m]

y: Coordenada vertical [m]

z: Altura del prisma [m]

R: Distancia a los vértices de cada prisma [m]

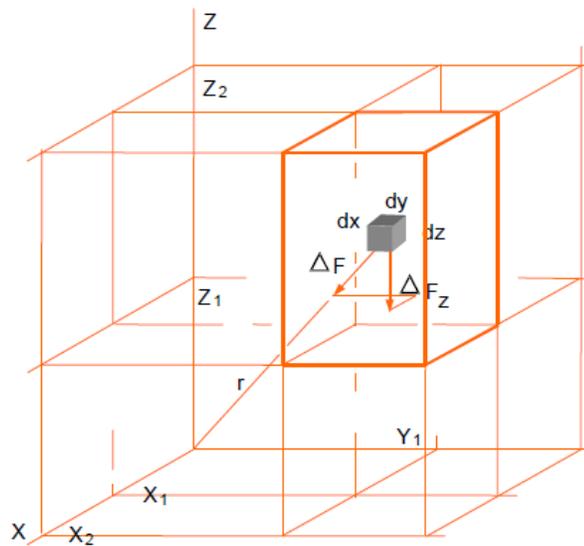


Figura 12: Prisma cuadrado para calcular la corrección topográfica intermedia.

Zona 2: Es denominada la zona lejana, el efecto topográfico se calcula usando el sector de un anillo, como se muestra en la Figura 13 y la ecuación que se utiliza es

$$g = 2GDA^2 \left(\frac{R_2 - R_1 \sqrt{R_1^2 + H^2} - \sqrt{R_2^2 + H^2}}{R_2^2 - R_1^2} \right)$$

donde,

g: Atracción gravitacional de un sector de anillo [mGal]

G: Constante de gravitación universal [$G = 6.667 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$]

D: Densidad [g/cm^3]

A: Longitud de la sección horizontal del prisma [m]

R_1 : Radio interno del anillo [m]

R_2 : Radio externo del anillo [m]

H: Altura del anillo de prisma [m]

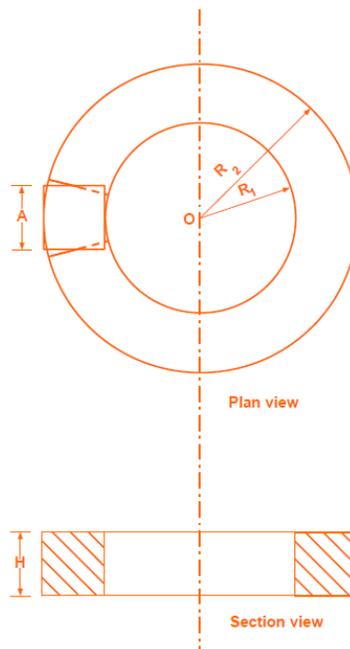


Figura 13: Sector de un anillo para calcular la corrección topográfica lejana.

La suma de todos los efectos estimados (cercano, intermedio y lejano) nos da el valor de la corrección por topografía. Para estimar esta corrección se utilizó un radio de 0 a 400 m para la corrección cercana y de 400 a 800 m para la corrección lejana. En ambas correcciones se usó un MDE con una resolución de 5 m en la horizontal y una resolución

vertical de 1 m, publicados por INEGI.

2.3.1. Densidad

La densidad se relaciona a las variaciones del volumen de masa y por lo tanto variaciones en densidad causa diferencias en la aceleración de la gravedad.

En exploración gravimétrica se busca detectar variaciones en la densidad o contrastes de densidad. El concepto de contraste de densidad, es importante, ya que este cambio permitirá estimar la profundidad del basamento del basurero.

La Tabla 2 muestra las densidades típicas de los residuos encontrados en un basurero, mientras que la roca de origen es del tipo granito/granodiorita, cuya densidad es 2.66 g/cm^3 (2660 kg/m^3).

Tabla 2: Valores típicos de densidad para residuos sólidos domésticos y comerciales (Tchobanoglous y Theisen, 1994).

TIPO DE RESIDUO Doméstico (No compactados)	DESIDAD (kg/m^3) PROMEDIO
Residuos de comida (mezclados)	291
Papel	89
Cartón	50
Plásticos	65
Textiles	65
Goma	131
Cuero	160
Residuos de jardín	101
Madera	237
Vidrio	196
Latas de hojalata	89
Aluminio	160
Otros metales	320
Suciedad, cenizas, etc.	481
Cenizas	745
Basuras	131
Comerciales	
Residuos de comida (húmedos)	540
Aparatos	180
Cajas de madera	110
Basura (combustible)	119
Basura (no combustible)	300
Basura (mezclada)	160

2.3.2. Levantamiento de datos

Se levantaron tres perfiles gravimétricos (Figura 14), con separación entre estaciones de 5 m, a excepción de los primeros 50 m en el perfil LA, que se tomaron mediciones cada 10 m. Para las mediciones de la aceleración de la gravedad se utilizó un gravímetro marca Scintrex modelo CG5, el cual corrige automáticamente las mediciones por deriva de aparato, marea gravimétrica y permite realizar mediciones a intervalos de un segundo. Se seleccionó un intervalo de registro de datos de 120 segundos. Para cada estación se tomaron al menos 2 paquetes de lecturas, cada uno con duración de 2 minutos. Después

de medir 5 estaciones se regresaba a la estación base, para monitorear la deriva instrumental. Para la corrección por altura de aparato se hicieron tres mediciones con una cinta métrica graduada en centímetros, por cada puesta de aparato.

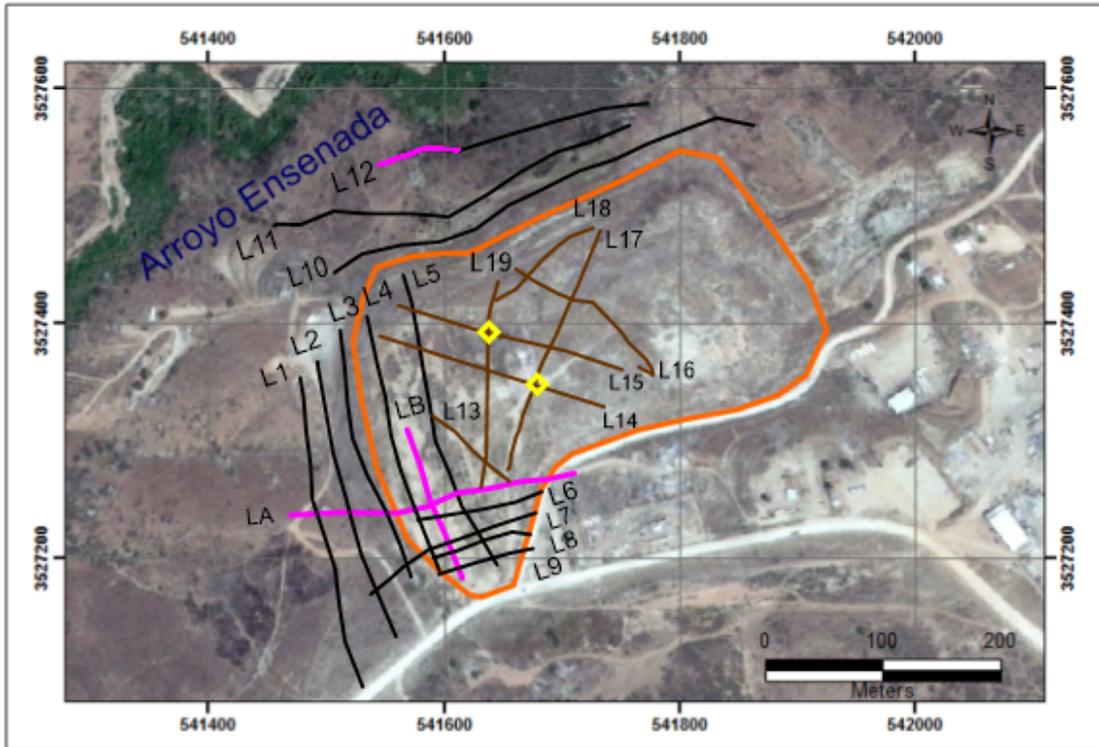


Figura 14: Perfiles gravimétricos (líneas color magenta) y magnéticos (líneas color negro y café) levantados. Línea color naranja: contorno del terreno del ex-basurero; rombos color amarillo: respiraderos.

El perfil LA, tiene una longitud de 290 m, con una orientación W-E y cruza por el alto de la anomalía de potencial natural positiva (APE(+)). El perfil LB se seleccionó perpendicular al perfil LA y sobre el ex-basurero, tiene una longitud de 105 m. Por último, el perfil L12, tiene una longitud de 64 m, abarca un sector de la línea 3 tomada por Alarcón (2010) y el inicio de la línea de PI (Polarización Inducida) estudiada por Legorreta (2016). Se ubica a un costado de la anomalía de potencial natural negativa (APE(-)).

2.3.3. Separación Regional-Residual

Las anomalías de pequeña extensión, localizadas a poca profundidad, son usualmente de longitud de onda corta y perceptibles, solo sobre pequeñas distancias. En contraste, los efectos de estructuras geológicas a gran escala, son perceptibles a grandes distancias, como anomalías de longitud de onda relativamente grande. Estas últimas se denominan anomalías *regionales*, mientras que las primeras, se les refiere como anomalías locales.

La definición de anomalía *residual* no es muy precisa, pero puede ser definida como la anomalía de interés geológico en un estudio particular. La separación de la anomalía residual de una distribución de campo potencial es un problema crítico que controla la exactitud del proceso de interpretación.

La separación de la anomalía consiste en la eliminación del efecto regional. Se puede realizar por un ajuste polinómico donde los datos observados se utilizan para calcular, por lo general por mínimos cuadrados, la superficie matemática que da el ajuste más cercano. En la práctica, la superficie se expresa como un polinomio de orden bajo. Por ejemplo, en un estudio gravimétrico, un polinomio de segundo orden puede ser utilizado, para expresar la superficie del campo regional como

$$\Delta g(x, y) = Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F$$

Los coeficientes A, B, ..., F, son determinados por un ajuste de mínimos cuadrados. El residual se obtiene, restando los valores del polinomio a los valores de anomalía gravedad observada. La Figura 15 muestra gráficamente, en que consiste la separación regional residual al ajustarle un polinomio.

La premisa fundamental del proceso de aislamiento es que la anomalía residual conserva el carácter significativo de la fuente de anomalía de interés y se puede utilizar directamente para el análisis cuantitativo y el modelado (Sharma, 1997).

Para remover la componente regional mediante el ajuste de funciones polinomiales a los tres perfiles gravimétricos levantados se utilizó el software SIGNALPRO desarrollado por G. R. J. Cooper de la Escuela de Geociencias de la Universidad de Witwatersrand.

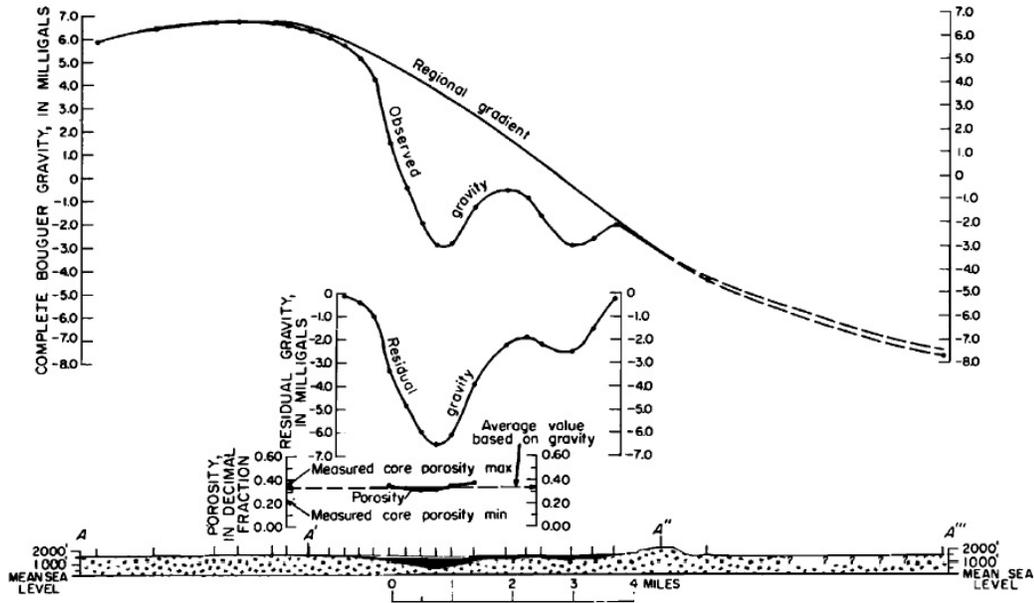


Figura 15: Adaptada de Hinze, 1990. Muestra la separación regional y residual de una anomalía gravimétrica, proceso mediante el cual, se quitan las componentes gravimétricas de gran escala, obteniendo sólo las componentes locales de interés.

Capítulo 3. Resultados

3.1. Análisis de datos Aeromagnéticos

La Figura 16 muestra el mapa de anomalías aeromagnéticas del área de estudio y sus alrededores (sobrepuesto al mapa topográfico), elaborado con datos levantados por un vuelo realizado por el SGM tomados en 1962. Los círculos negros señalan los puntos de intersección de las líneas de vuelo con los contornos magnéticos del mapa original de donde se extrajeron los datos. Para realizar este mapa se utilizó el software Surfer 11 y se interpolaron los datos aplicando el método de mínima curvatura.

Se observa que pasan cuatro líneas de vuelo sobre el área de interés, sin embargo, solo una cruza el ex-basurero. El mayor cambio magnético es de 480 nT, en la parte SE del mapa se aprecia el máximo de -8680 nT de anomalía magnética y también el máximo en topografía de 280 m, mientras que al SW de la Figura 16, se ubica el mínimo de anomalía magnética y la topografía más baja, 60 m. Relación que sugiere que las anomalías observadas sean, principalmente de origen topográfico.

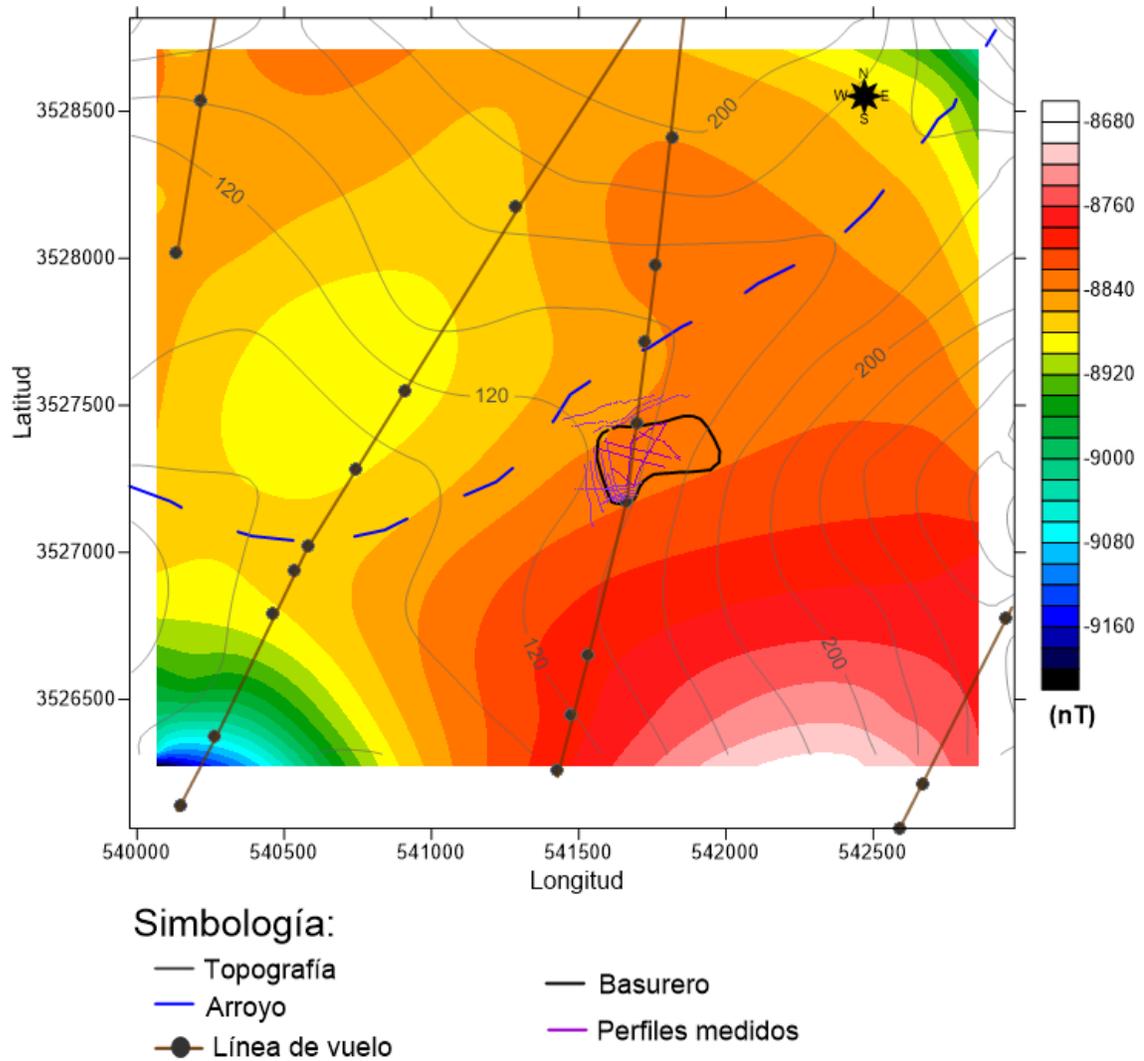


Figura 16: Mapa aeromagnético del ex-basurero municipal de Ensenada y sus alrededores. Datos levantados en 1962. Se incluyen los perfiles magnéticos terrestres levantados (líneas de puntos color magenta).

En la Figura 17 se muestra el perfil aeromagnético, de la línea de vuelo que cruza sobre el ex-basurero, junto con el perfil topográfico. Se observa que el ex-basurero cae en la zona de gradiente (0.11 nT/m) de una anomalía dipolar con amplitud relativa de 110 nT . Al parecer, a la fecha del vuelo aeromagnético (1962) no existía el ex-basurero.

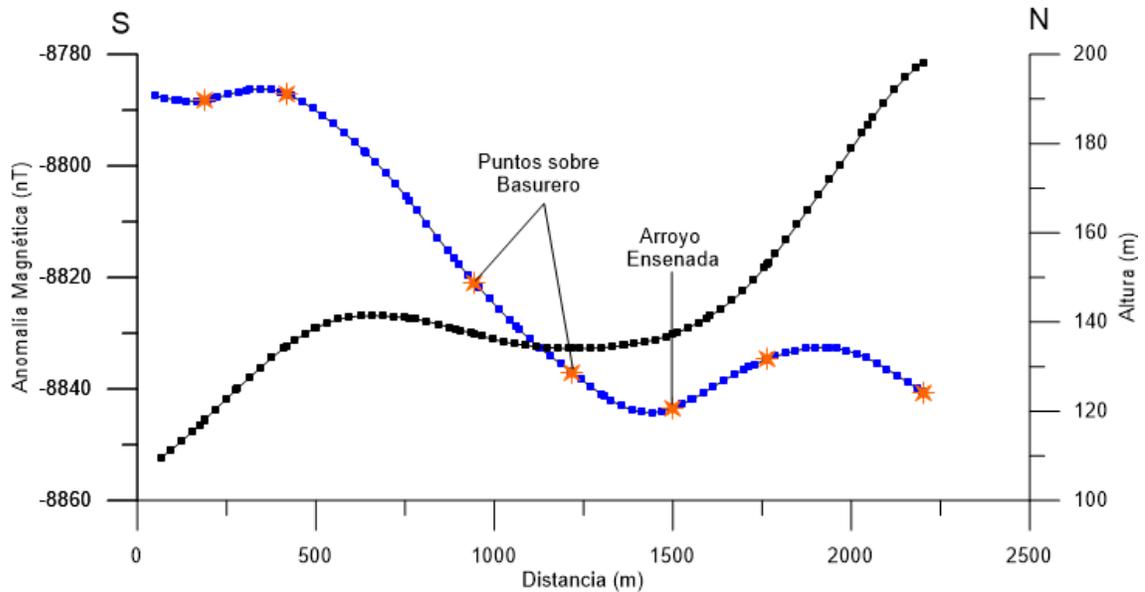


Figura 17: Perfil aeromagnético sobre terrenos del ex-basurero. Datos medidos: asteriscos color naranja.

En la Figura 18 se muestra el mapa de anomalías pseudogravimétricas. Se observa una anomalía dipolar, con su alto al este y su bajo al oeste. La zona de gradiente entre los polos, sugiere yuxtaposición de dos bloques de rocas graníticas (por ejemplo, granodiorita-granito) con diferente susceptibilidad magnética ($k_{granito} < k_{granodiorita}$). Así mismo, sobrepuestos al mapa de gradiente horizontal pseudogravimétrico (Figura 19) se presentan los máximos de gradiente horizontal (cruces color negro). Al correlacionarlos con las estructuras (Figura 21), se observa que tienen rumbos en el rango de 0° a 40° NE, se infiere que posiblemente están relacionados a fallas y/o fracturas, de acuerdo a los diagramas de rosas presentados en la Figura 20 (b) y (c) que muestra la orientación de la población de fallas y fracturas. Resalta que el cuadrante NE de las rosetas de fracturas y fallas muestran una población importante de ambas estructuras en el rango 15° a 25° .

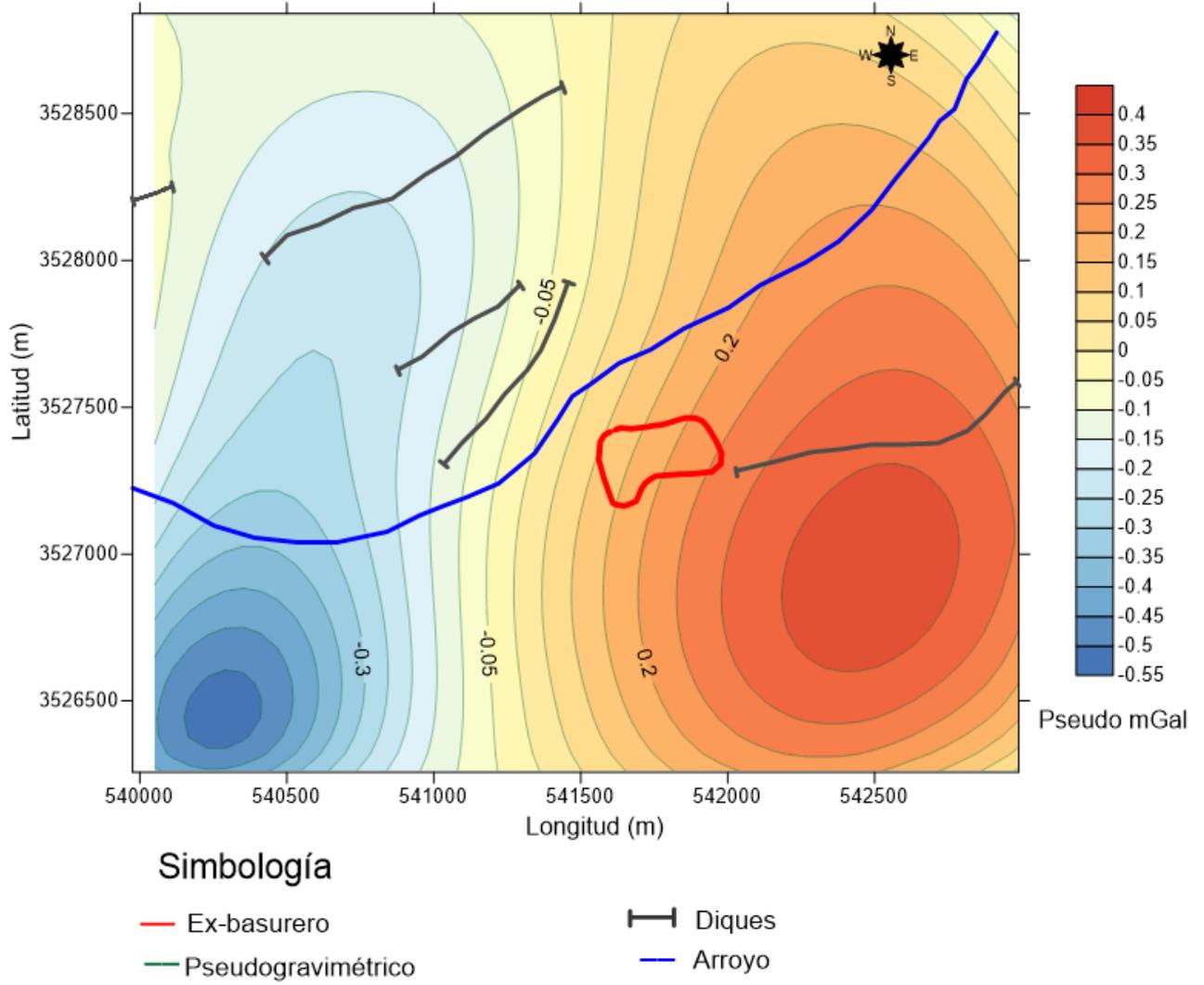
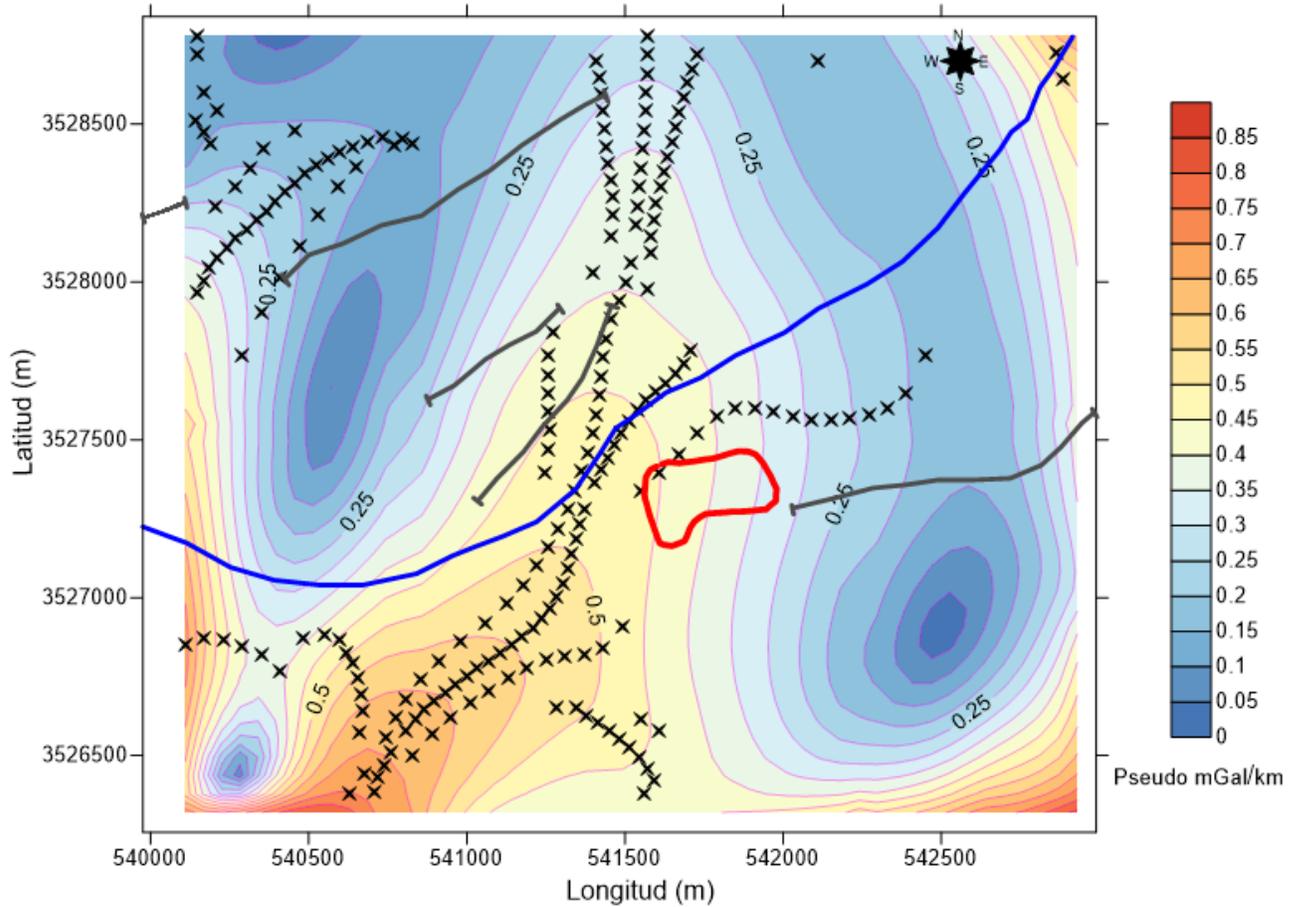


Figura 18: Mapa pseudogravimétrico del área.



Simbología

- Ex-basurero
- Gradiente horizontal
- xxx** Maximos de gradiente horizontal
- Diques
- Arroyo

Figura 19: Mapa de máximos de gradiente horizontal (cruces color negro) extraídos del mapa de anomalías pseudogravimétricas.

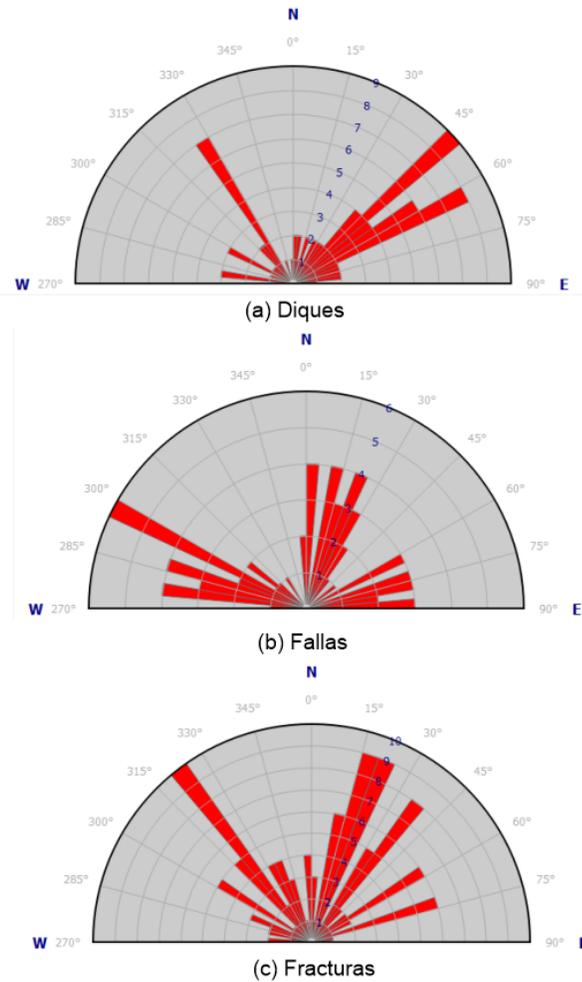


Figura 20: Diagramas de rosas de diques (a), fallas (b) y fracturas (c).

Por lo anterior, el conjunto de máximos de gradiente horizontal, sugiere una zona de fracturas. A través de esta zona de fracturamiento secundario, podrían fluir hacia el subsuelo los lixiviados provenientes del basurero y contaminar los acuíferos presentes.

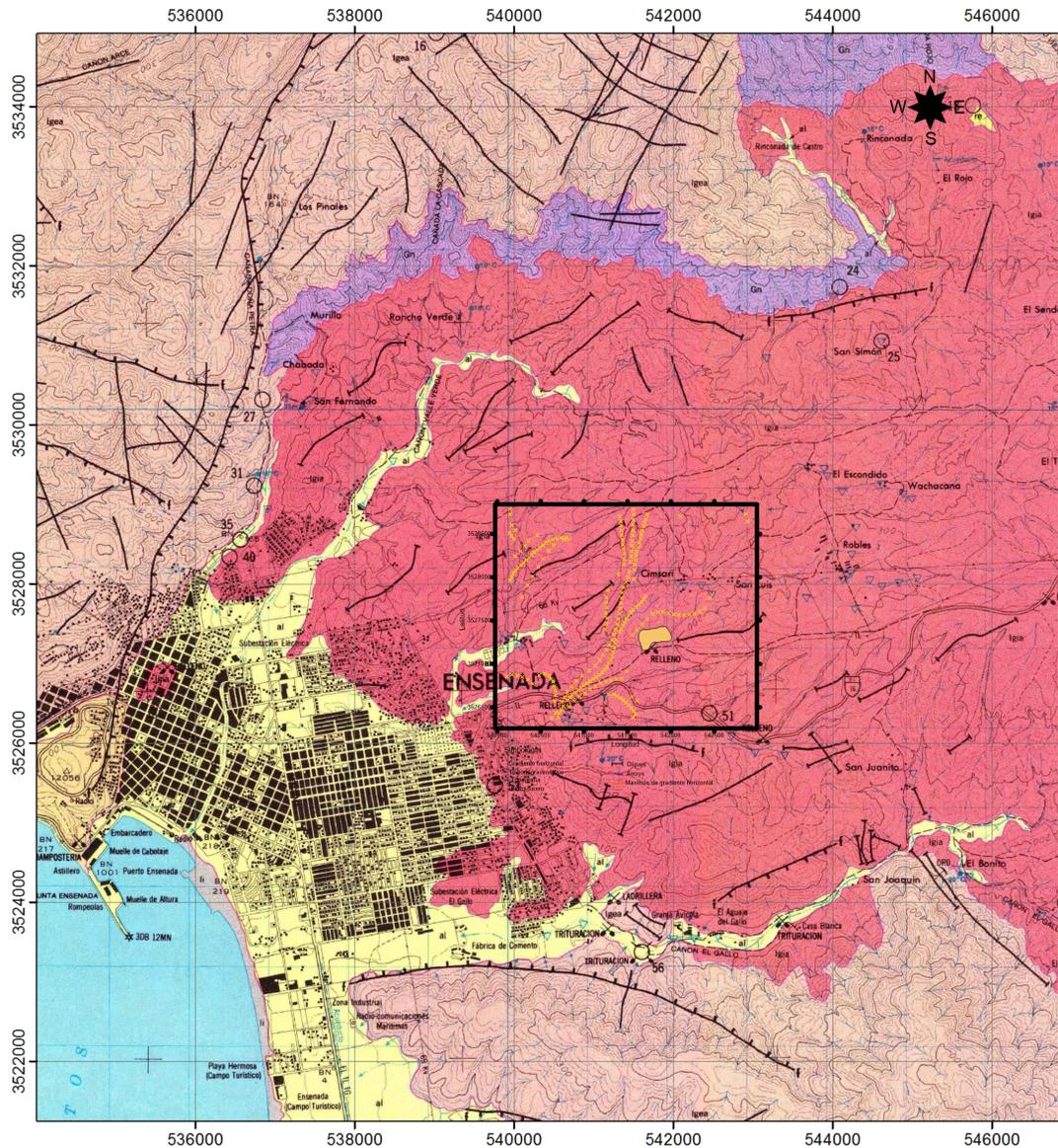


Figura 21: Correlación de máximos de gradiente horizontal (círculos rellenos color amarillo) de anomalías pseudogravimétricas con estructuras (fracturas, diques y fallas), el recuadro negro indica la región que se analizó con magnetometría aérea (para la simbología ver la Figura 4).

También, se observa que en la zona NW de la Figura 21 los rumbos de los máximos de gradiente horizontal se correlacionan con diques, los cuales son fracturas que podrían estar rellenas de aplita, pegmatita y filones de cuarzo, de acuerdo al contexto geológico de la zona.

3.2. Análisis de datos magnéticos terrestres

De los datos magnéticos recolectados en campo (período del 22 al 27 de octubre del 2015) se armaron dos archivos, uno con las mediciones de magnetometría registradas del terreno y el otro con el monitoreo de VD (Variación Diurna). Esto con la finalidad de utilizar el software GEMLink 5.3 que permite realizar la corrección por VD de forma automática, la cual consiste en graficar los registros de la estación base vs el tiempo; como se regresa al mismo sitio, se asume que los cambios que se puedan registrar se deben a factores externos, no a la respuesta del subsuelo, que es lo que se está buscando. Como se muestra en la Figura 22, se toma como referencia la primera medición realizada y a partir de ésta se hacen las correcciones por VD. Si se observa la Figura 22 se puede apreciar que el primer registro ($E100_1$) es mayor que la segunda medición ($E100_2$) de monitoreo de VD, esto implica que la diferencia entre la primera medición y la segunda, se debe sumar al segundo valor medido $E100_2$. Así se estaría eliminando el efecto de VD. En caso contrario, si el valor monitoreado es mayor que el valor de referencia, como en $E100_3$, se debe restar, es decir $E100_1 - E100_3 = a$, la corrección para $E100_3$ sería $E100_3 - a$.

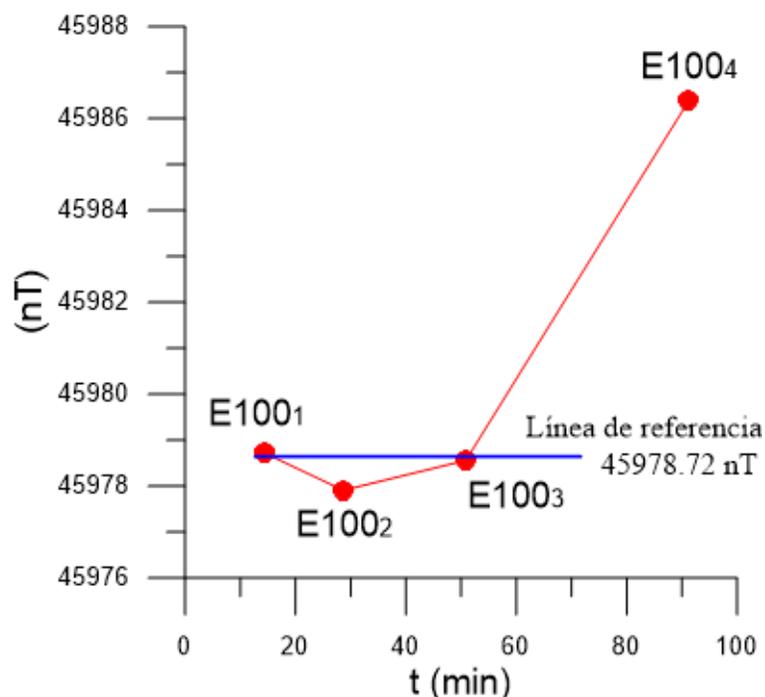


Figura 22: Magnetograma del 22 de octubre del 2015, en el ex-basurero de Ensenada.

Ya que se tenían los datos observados corregidos, se procedió a calcular con el IGRF el valor teórico de campo magnético. Como la zona de estudio abarca un área muy pequeña, aproximadamente 200 por 300 metros, el valor del IGRF (46044 nT) sólo se extrajo para el punto inicial de la línea A, ya que los cambios máximos que se presentaban de variación teórica, 21 nT/km, eran semejantes al rango en el que varía el error de las mediciones, de 0.11 a 17.13 nT.

Una vez que se tuvieron los datos corregidos por VD y el valor del IGRF se realizó el cálculo de anomalía magnética, que es la resta del valor medido (ya corregido) menos el valor teórico (IGRF). Este proceso se hizo de forma independiente, para cada uno de los 21 perfiles registrados. El mapa resultante de anomalía magnética, se muestra en la Figura 23. Fue realizado con el software Surfer 11 mediante un proceso de interpolación de vecino cercano.

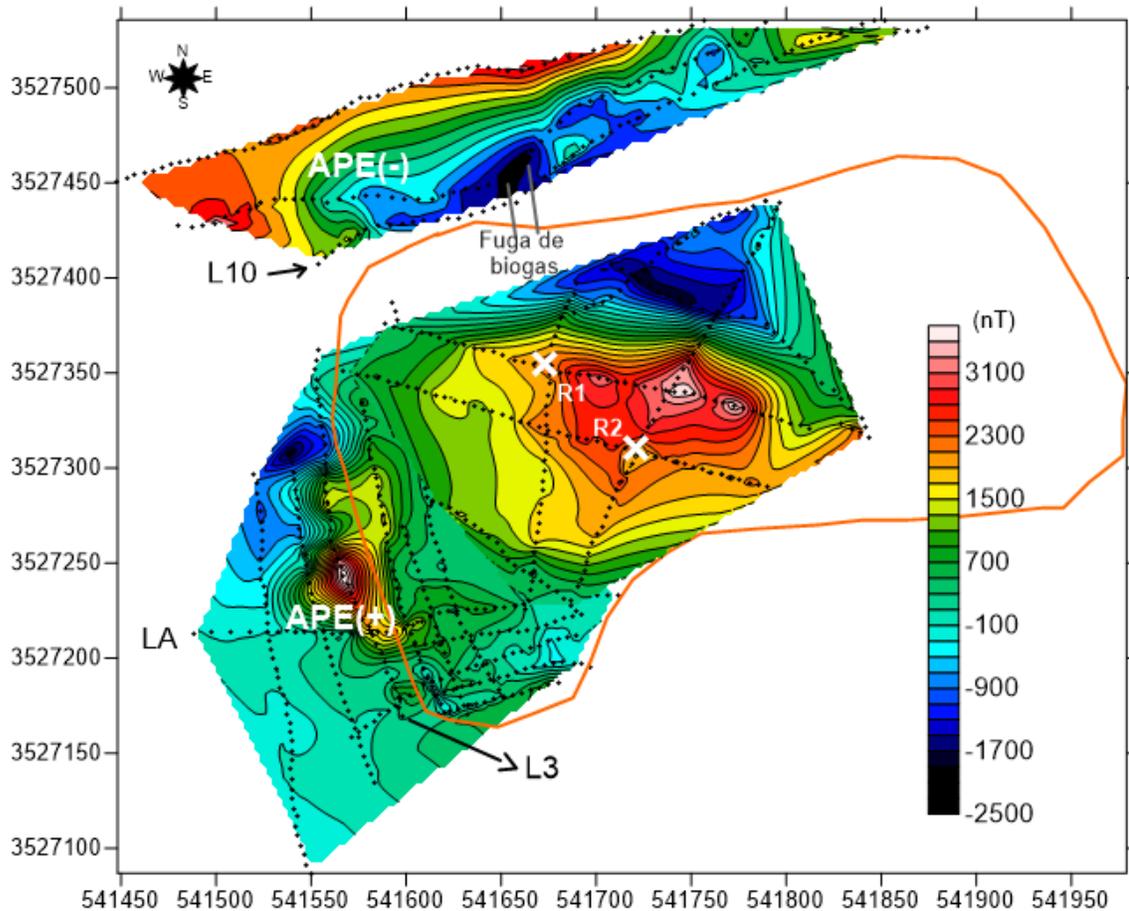


Figura 23: Mapa de anomalías magnéticas terrestres. APE(-) zona de anomalía de potencial natural negativa; APE(+) zona de anomalía de potencial natural positiva; líneas con puntos color negro: sitios de medición; polígono color naranja: delimitación del área del ex-basurero; R1, R2: respiraderos artificiales. Contornos cada 200 nT.

En la Figura 23, en la zona de la anomalía de potencial natural positiva (APE+), se puede apreciar una anomalía magnética positiva predominante y bien definida, que tiene una variación de 3600 a -2000 nT. El máximo de dicha anomalía es cruzado por el perfil L3, el cual se ubica sobre el escarpe del basurero (Figura 24). El origen de esta intensa anomalía dipolar, se atribuye a la presencia de materiales metálicos enterrados. En superficie se observan llantas en proceso de degradación.



Figura 24: Ubicación en campo de la línea 3 y donde se cruza aproximadamente con la línea A. La imagen está tomada viendo hacia el W. Se aprecia basura expuesta, principalmente llantas.

En la zona de anomalía de potencial natural negativa (APE-) se observa una anomalía magnética negativa, en otro de los escarpes, con una amplitud menor de 2800 nT. A la fecha del levantamiento, octubre de 2015, se registró fuga de biogás en un espacio de 10 m, en la línea 10 (L10) que coincide con el mínimo magnético de la Figura 23. Este mínimo se puede atribuir a basura orgánica, la cual después de descomponerse generó biogás que en todo este tiempo se ha mantenido encapsulado por paredes impermeables formadas por los mismos desechos. Este sector está cubierto con arena de grano grueso pero en ciertos lugares se observa que esta arena fue removida por interperismo o por personas que trabajan en ese lugar. Aunque se tiene el registro de la existencia de tres respiraderos, sólo dos mantienen su funcionamiento y uno de ellos (R1) se ubica cerca de la zona donde se detecta la fuga de biogás, Figura 23.

Del 14 al 15 de octubre del 2016, se llevó a cabo la 2da. etapa de campo. Los perfiles levantados se muestran en color café en la Figura 7. La Figura 23 muestra el mapa de anomalía magnética resultante al corregir los datos medidos por variación diurna y substraerle el valor del campo geomagnético correspondiente al mes de octubre del 2016

(IGRF= 45955 nT). Se observa una intensa y amplia anomalía dipolar con una amplitud relativa de 5600 nT. Por la magnitud de la anomalía, su origen se asocia a la presencia de escombros diversos de material de construcción, con contenido de materiales ferrosos (varillas, alambre, cercos, etc.) y/o acumulación de llantas.

3.2.1. Susceptibilidad magnética

Resultados de 6 mediciones en un afloramiento de rocas graníticas sanas, de variedad granito-granodiorita, dieron un rango de 0.40×10^{-6} a 0.93×10^{-6} cgs, obteniéndose un promedio de 0.685×10^{-6} cgs. Mientras que de 15 mediciones en la roca granítica alterada se obtuvo un rango de variación de 0.14×10^{-6} a 0.65×10^{-6} cgs y su promedio fue de 0.388×10^{-6} cgs. Resultando un contraste de susceptibilidad magnética negativo entre roca granítica sana y alterada de 0.3×10^{-6} cgs.



Figura 25: Se realizaron mediciones de susceptibilidad magnética en campo, la foto muestra la roca alterada donde fueron tomadas las mediciones.

3.2.2. Deconvolución de Euler

Los resultados de la aplicación de la DE a perfiles magnéticos terrestres que cruzan por las zonas de anomalía de potencial espontáneo, se muestran en las Figuras 26, 27,

28, 29, 30 y 31. En todas ellas se ha graficado en la parte superior el perfil de topografía, anomalía magnética y reducida al polo (RP). En la parte inferior se grafica el área (cuadro con línea punteada) que abarca la fuente cilíndrica que produce la anomalía de potencial espontáneo, según Alarcón (2010), las soluciones de Euler obtenidas de la anomalía RP y correspondientes a los índices estructurales mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3: Simbología utilizada para índices estructurales de fuentes magnéticas de diferentes geometrías.

Índices Estructurales	Símbolo
1.0	+
2.0	◇
3.0	□

Para obtener soluciones congruentes, después de diversas pruebas, se seleccionó una ventana de análisis móvil de 11 puntos. A continuación se describen los resultados obtenidos.

Zona de anomalía de potencial espontáneo positiva (APE+) producida por una fuente con geometría de cilindro horizontal (Alarcón, 2010), perfiles L3 (Figura 26), LA (Figura 27) y LB (Figura 28).

Perfil L3. De 200 m de longitud cruza a lo largo y costado occidental de la fuente de la anomalía de PE(+) y corre a lo largo de basura expuesta. La anomalía magnética reducida al polo, presenta dos altos. El primero, de izquierda a derecha y de mayor amplitud, se ubica casi al final del costado oriental de la fuente de potencial espontáneo. Mientras que la segunda se ubica fuera de ésta y sobre la capa de arena compactada que cubre a la basura. En cuanto a las soluciones de Euler, se observan cuatro grupos a las distancias horizontales de 25, 50, 100 y 125-175 m. El primero, con profundidades de 5-15 m. El segundo y tercero, con profundidades de 5-20 m y 10-50 m, casi coinciden con los bordes de la fuente de potencial espontáneo. El cuarto es un grupo disperso con profundidades de 5-40 m, sugiere presencia de una zona de materiales magnéticos dispersos.

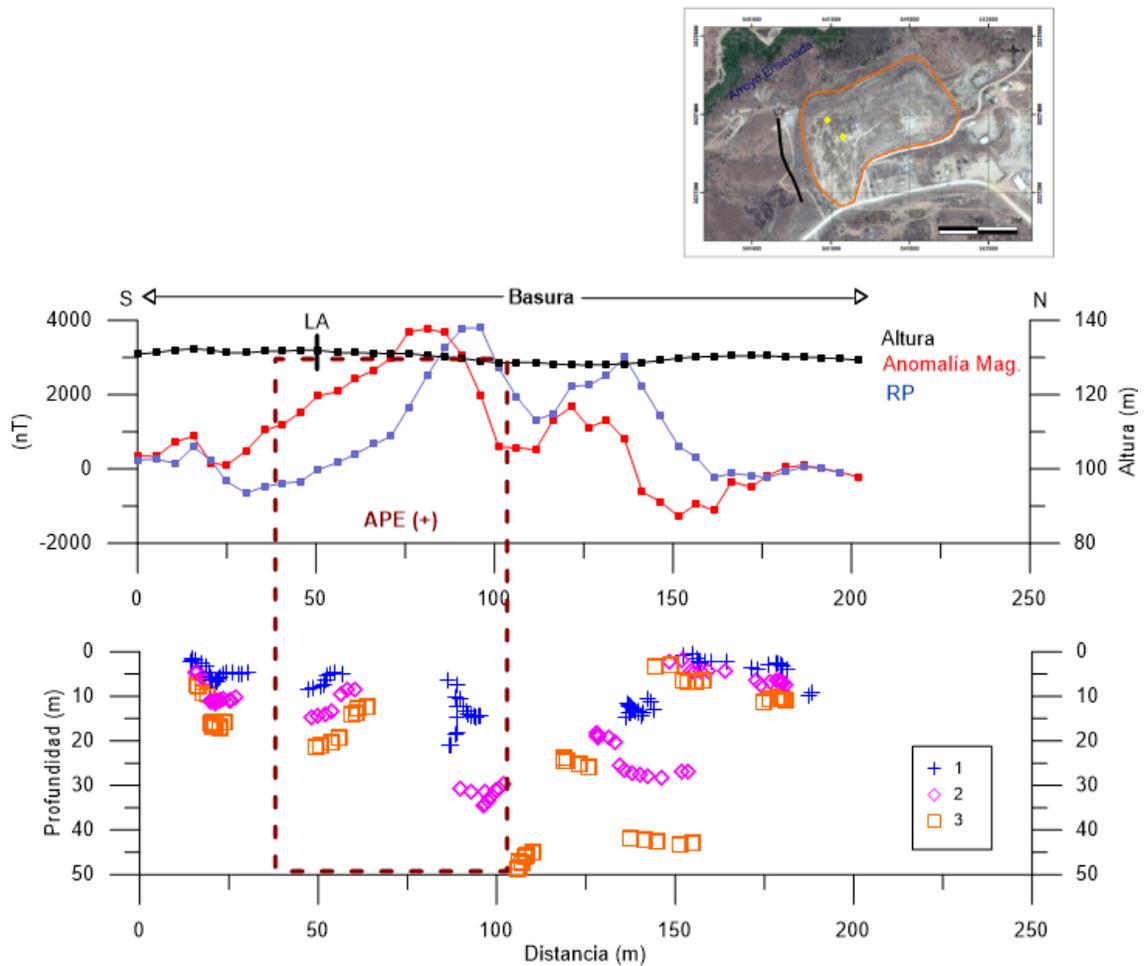


Figura 26: Línea 3, Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la Deconvolución de Euler, para índices estructurales (IE) correspondientes a estructuras uni, bi y tridimensionales. APE(+): fuente de anomalía de potencial natural positiva.

Perfil LA. De 250 m de longitud, inicia en roca granítica intemperizada, cruza por lo ancho de la fuente de potencial espontáneo, basura cubierta y termina sobre roca granítica intemperizada. La anomalía magnética reducida al polo, muestra un máximo sobre la fuente de la anomalía de potencial espontáneo. En las soluciones de Euler se observan (de izquierda a derecha) 3 grupos de interés a las distancias horizontales de 90, 125 y 200 m. El primero con profundidades de 5 a 20 m cae a lo largo del borde occidental de la fuente de PE(+). El segundo, con profundidades de 5 a 40 m cae dentro de la fuente de PE(+). El tercero con profundidades de 5-40 m, sobre basura cubierta.

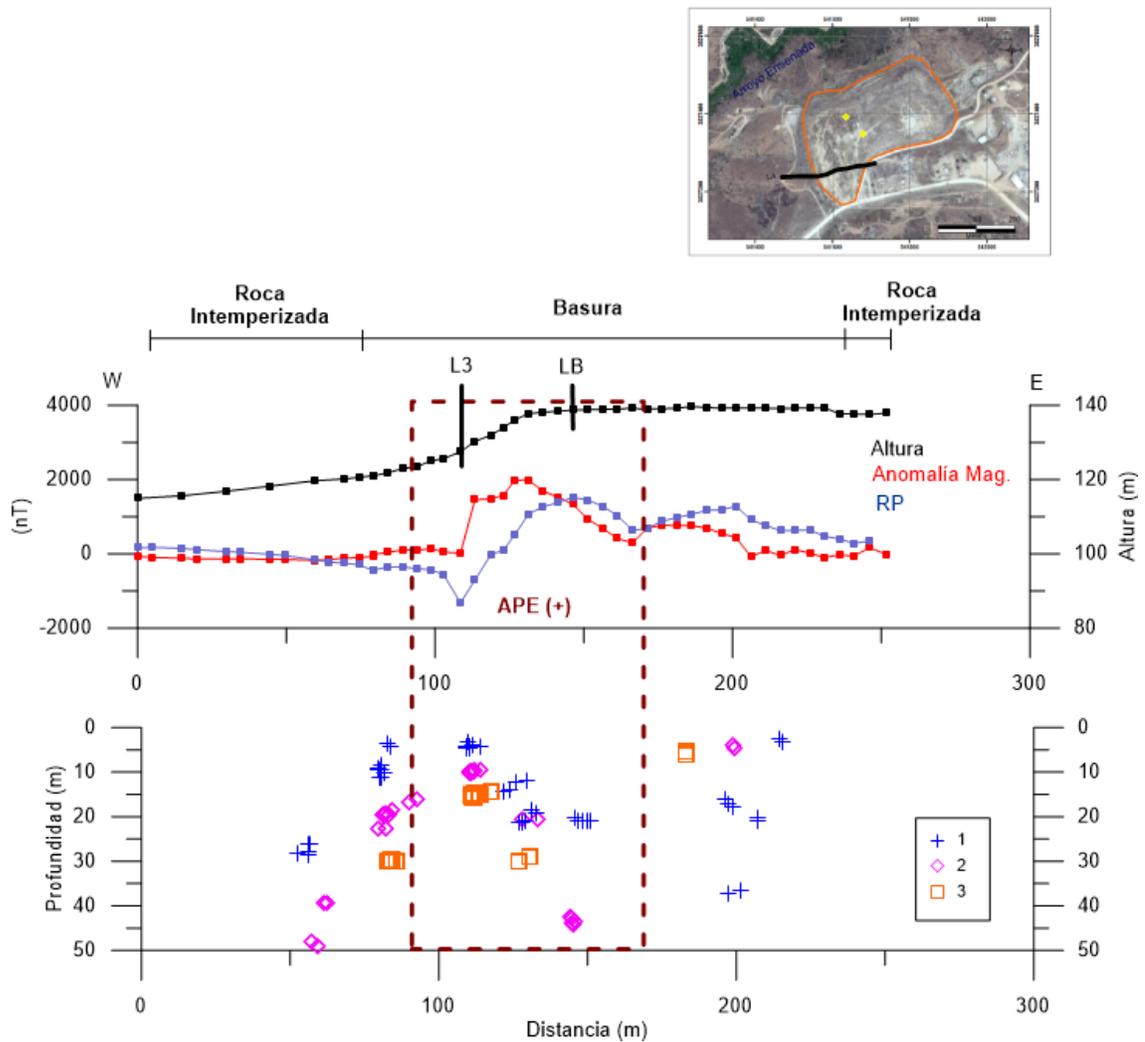


Figura 27: Línea A, Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la Deconvolución de Euler, para índices estructurales (IE) correspondientes a estructuras uni, bi y tridimensionales. APE(+): fuente de anomalía de potencial natural positiva.

Perfil LB. De 120 m de longitud corre a lo largo de basura cubierta por una capa de arena compacta. La anomalía magnética reducida al polo muestra un bajo relativo de 500 nT y un alto de 100 nT a la distancia horizontal de 30 y 80 m, respectivamente. En relación con las soluciones de la DE sobresale un grupo entre 80 y 100 m de distancia horizontal. Y con profundidades entre 10 y 22 m. Estas no presentan estructura tridimensional.

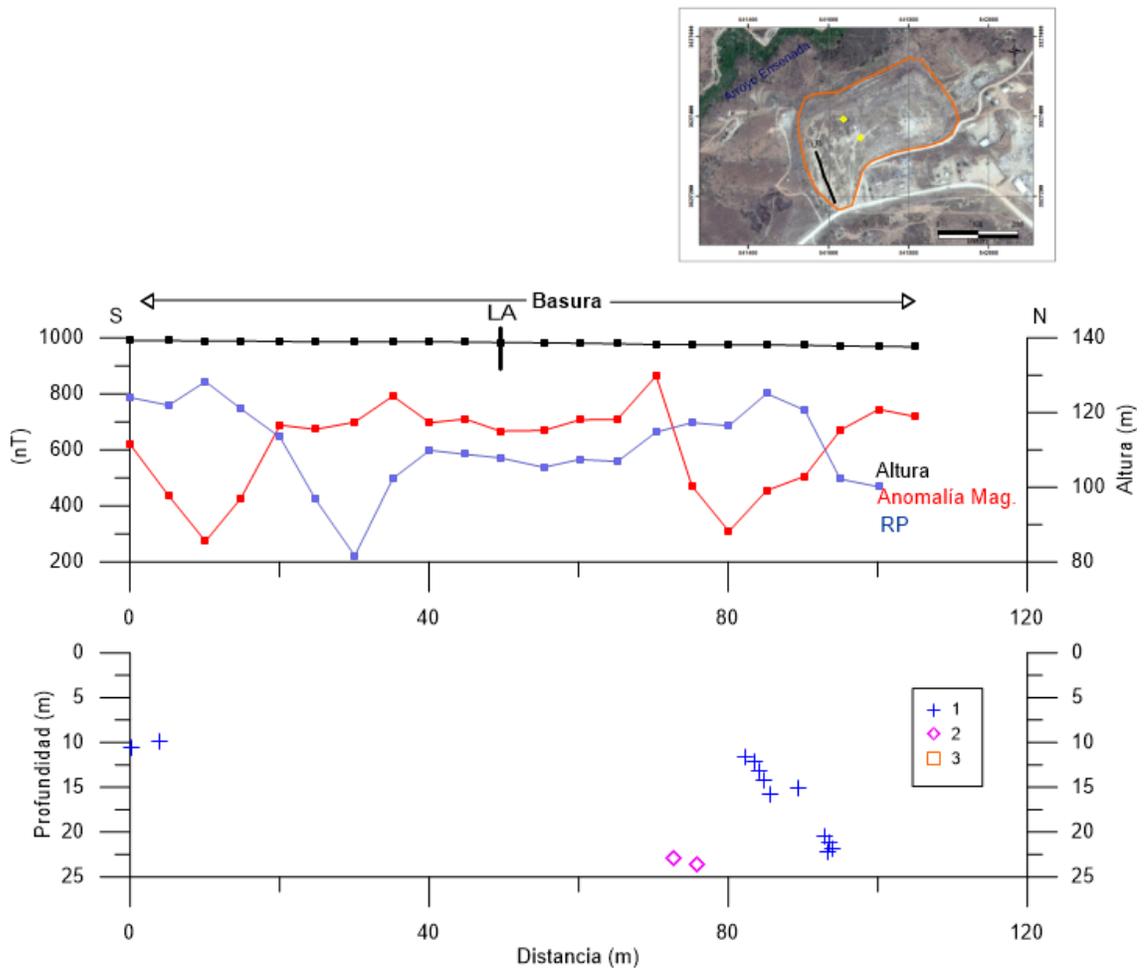


Figura 28: Línea B. Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la Deconvolución de Euler, para índices estructurales (IE) correspondientes a estructuras uni y bidimensionales.

Zona de anomalía de potencial espontáneo negativa (APE-) asociada a una fuente con geometría de cilindro vertical alargado (Alarcón, 2010), perfiles L10 (Figura 29) , L11 (Figura 30) y L12 (Figura 31).

Perfil L10. De 350 m de longitud, cruza el borde sur de la fuente de anomalía de PE(-) y corre sobre basura descubierta. La anomalía magnética reducida al polo es un bajo relativo con amplitud de -2000 nT con levantamientos significativos a las distancias horizontales de 25, 150 y 300 m. Se observan dos grupos de soluciones de Euler a las distancias de 25 y 225 m, con profundidades de 5 y 25 m, respectivamente. El primero coincide con el borde occidental de la fuente y el segundo con su borde oriental.

Perfil L11. De 325 m de longitud, cruza por el centro de la fuente de anomalía de PE(-) y corre sobre basura descubierta. La anomalía magnética reducida al polo, es un bajo relativo con amplitud de -2500 nT, con levantamientos significativos a las distancias horizontales de 25, 200 y 300 m. Se observan dos grupos de soluciones de Euler a las distancias de 25-50 y 200-225 m, con profundidades de 0-5 y 15-40 m, respectivamente. El primero (con IE=1, 2, 3) coincide con el borde occidental de la fuente y el segundo (con IE= 1, 2) con el borde oriental.

Perfil L12. De 325 m de longitud, cruza el borde norte de la fuente de anomalía de PE(-), inicia en roca granítica alterada, cruza un sector (50 m) de basura descubierta, continúa por roca granítica alterada y termina en roca granítica sana. La anomalía magnética reducida al polo es un bajo relativo con amplitud de -1000 nT y con levantamientos significativos a las distancias horizontales de 25 y 300 m. Se observan cuatro grupos de soluciones de Euler (con IE=1, 2, 3) a las distancias de 25, 75, 200-250 y 300 m, con profundidades de 5-15, 15-40, 5-45 y 515 m, respectivamente. El primero coincide con el borde occidental de la fuente de PE(-), el segundo con el sector de basura, el tercero con el borde oriental de la fuente de PE(-) y el cuarto con posibles diques en la roca granítica sana.

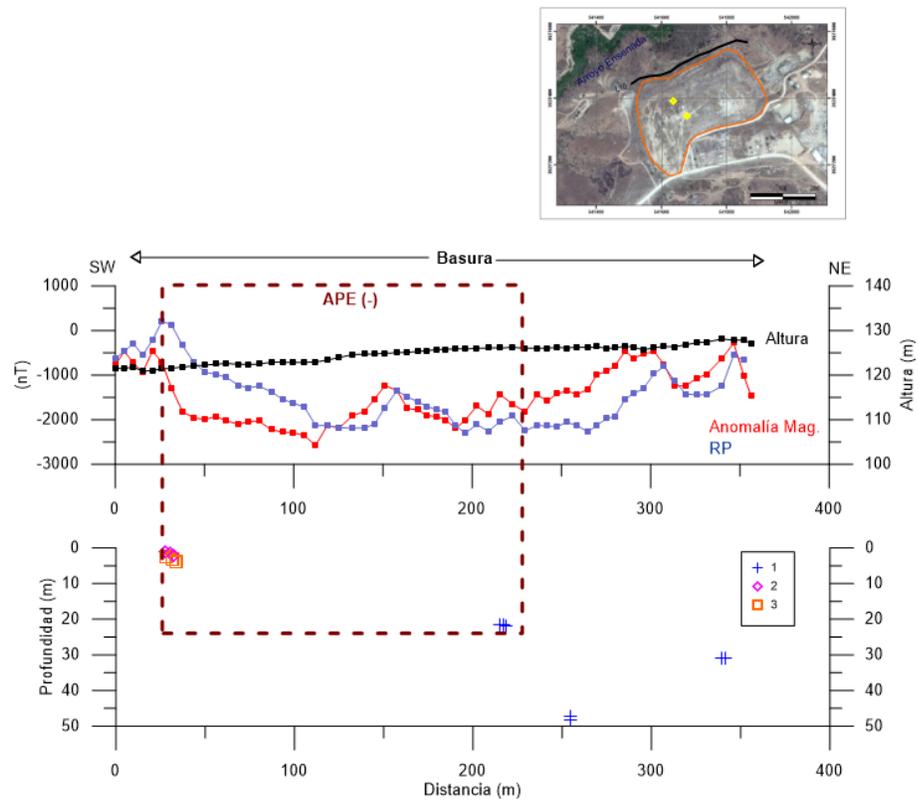


Figura 29: Línea 10. Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la deconvolución de Euler, para IE de 1, 2 y 3. APE(-): fuente de anomalía de potencial natural negativa.

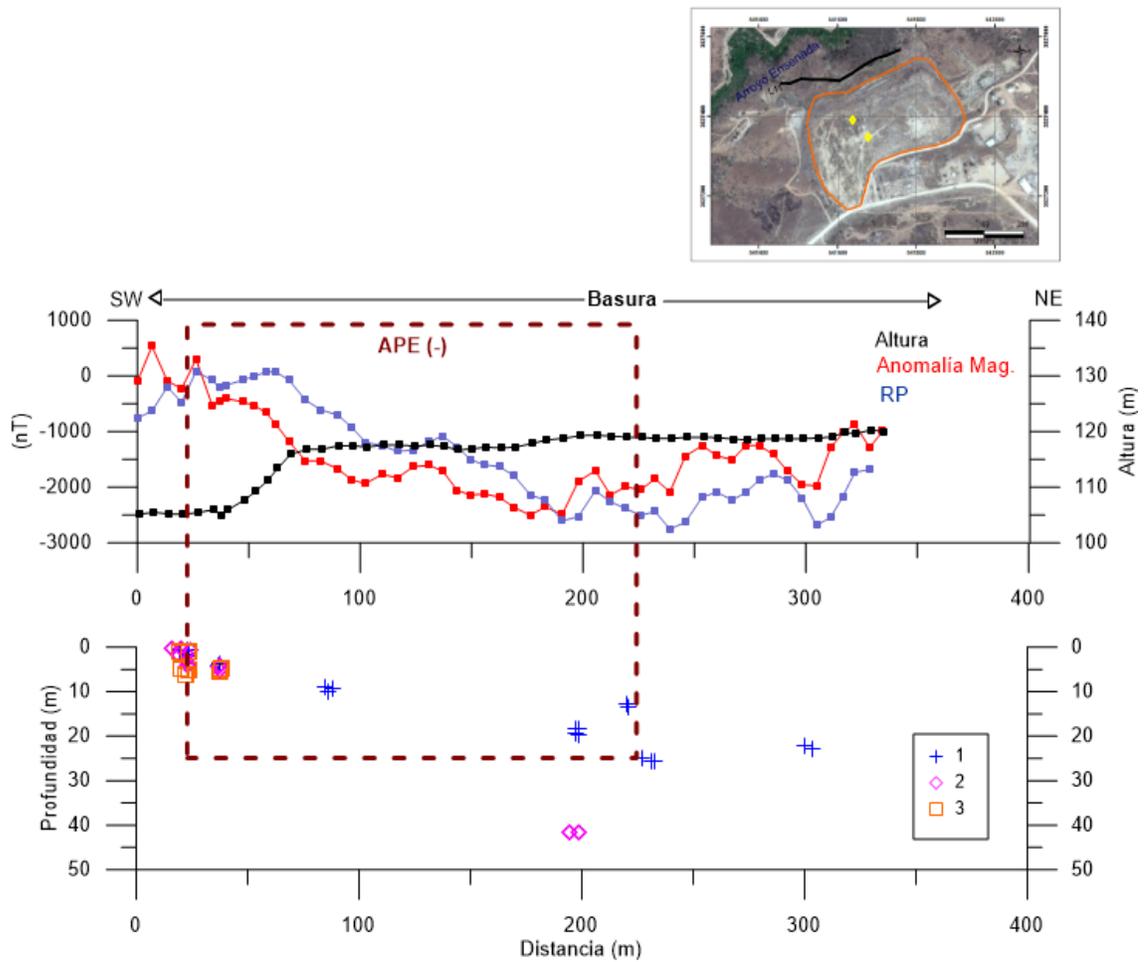


Figura 30: Línea 11. Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la deconvolución de Euler, para IE de 1, 2 y 3. APE(-): fuente de anomalía de potencial natural negativa.

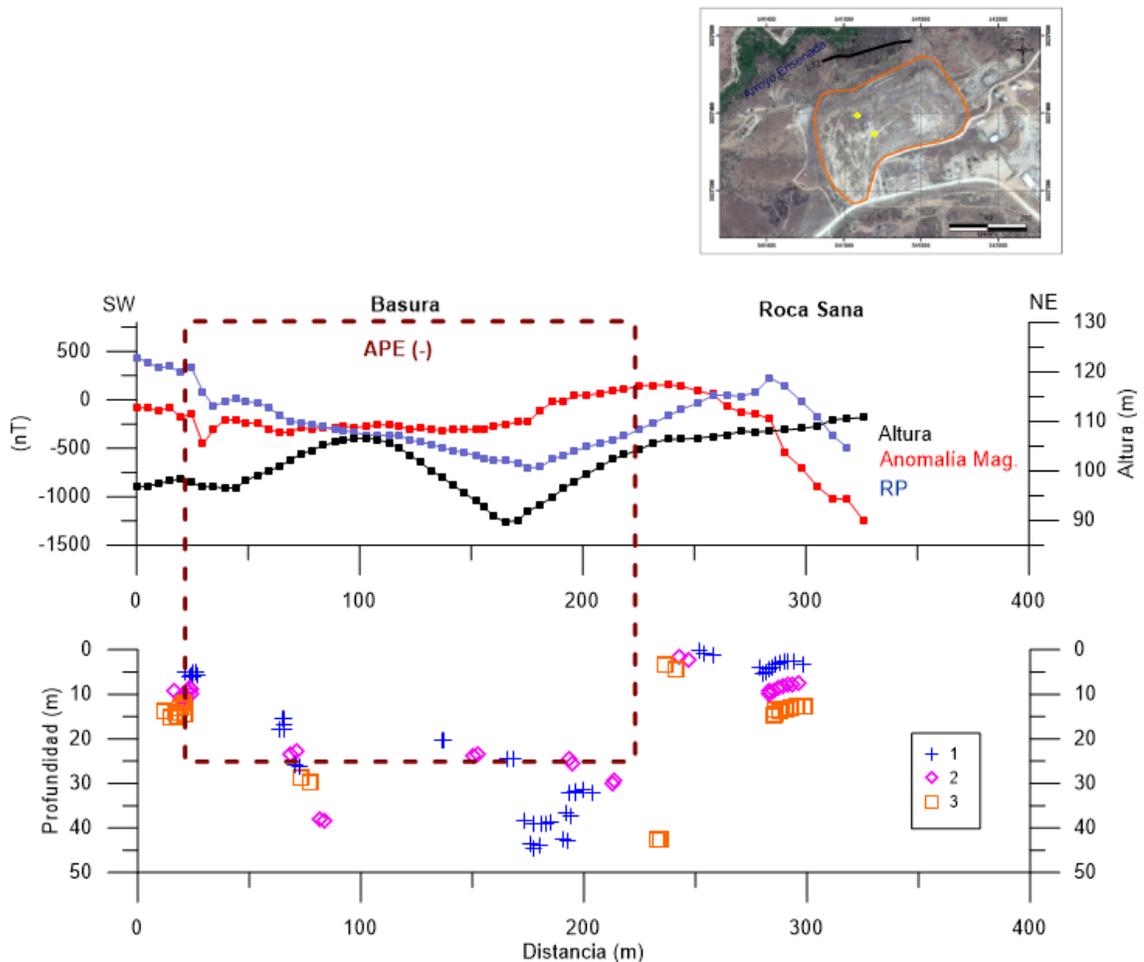


Figura 31: Línea 12, Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la Deconvolución de Euler, para índices estructurales (IE) correspondientes a estructuras uni, bi y tridimensionales. APE(-): fuente de anomalía de potencial natural negativa.

En complemento, se analiza el perfil L17 (Figura 32) de la segunda etapa. Éste tiene una longitud de 250 m, corre a lo largo de basura cubierta por una capa de arena compacta y pasa por el respiradero R2.

La anomalía magnética reducida al polo muestra un alto relativo de 4000 nT a la distancia horizontal de 150 m. En relación con las soluciones de la DE se observa un grupo (con IE= 1, 2, 3) a 75 m de distancia horizontal con profundidades entre 0 y 15 m. El segundo grupo de soluciones se observa una distancia horizontal de 150 m, presentando soluciones para los IE= 1 y 2, a profundidades de 20 a 50 m. Cuyas fuentes magnéticas podrían estar constituidas de fragmentos de materiales de construcción y/o llantas. El

tercer grupo de soluciones se encuentra a una profundidad de 0 a 20 m y a una distancia horizontal de 200 m.

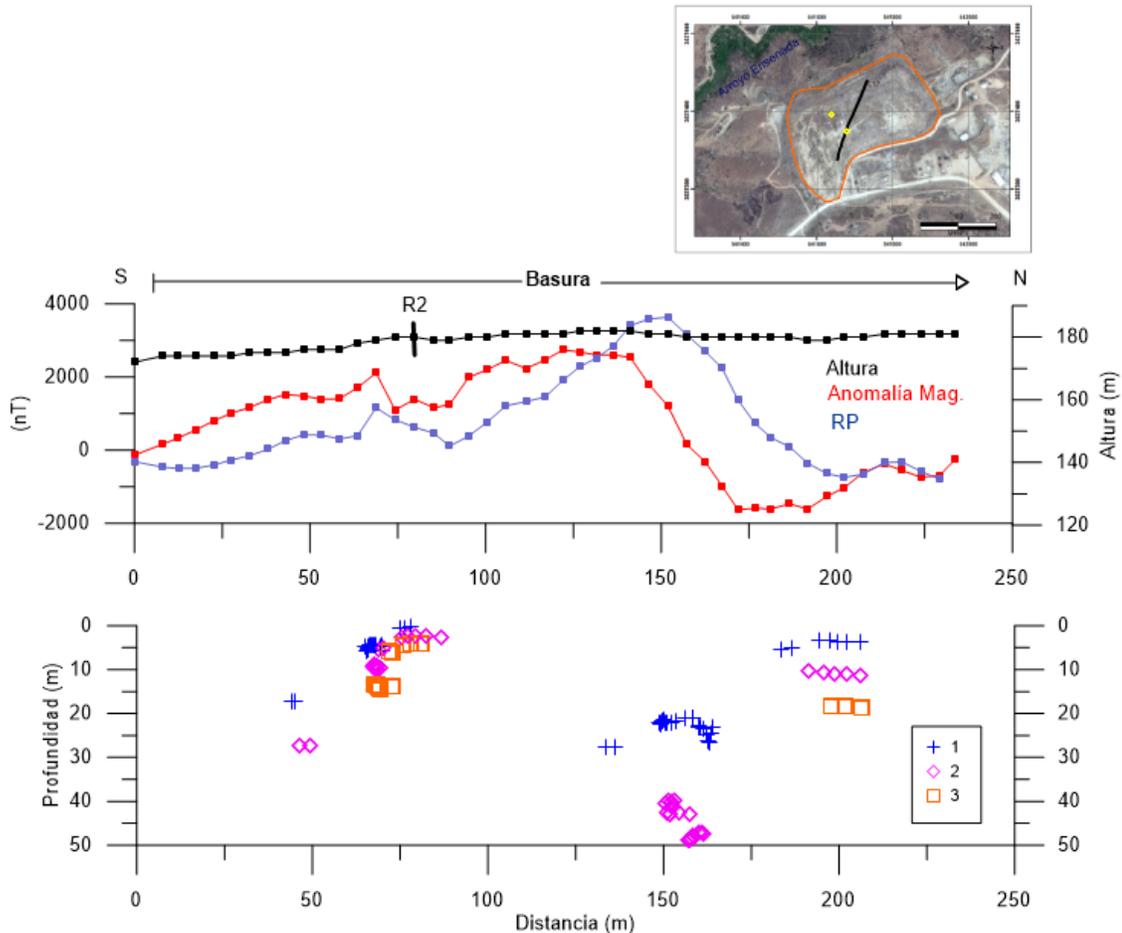


Figura 32: Línea 17. Arriba: perfiles de topografía, anomalía magnética y anomalía magnética reducida al polo. Abajo: resultados de la Deconvolución de Euler para índices estructurales (IE) correspondientes a estructuras uni, bi y tridimensionales.

3.3. Análisis Gravimétrico

Los datos de aceleración de la gravedad relativa de los tres perfiles gravimétricos levantados (LA, LB y L12) se convirtieron a valores de anomalía de Bouguer completa (anomalía de gravedad simple + corrección topográfica) y residual, para su posterior modelamiento. A continuación se describen los resultados obtenidos de cada perfil.

Perfil LA (Figura 33). Inicia sobre roca sana al W del ex-basurero, en los primeros 50 m solo se ve suelo y rocas granito/granodiorita. Entre los 70 a 110 m del punto de inicio (LAE100) se presenta una zona de derrumbe, donde se empieza a observar basura en superficie, principalmente llantas, aunque también se ven bolsas de plástico, madera, telas, animales muertos, etc., después hay una zona de escarpe del mismo material con el que se cubrió el basurero, arenas de grano grueso, es una pendiente muy inclinada, casi 45° , por lo que no fue posible tomar registros de gravimetría, al no ser factible colocar el equipo, pero sí de magnetometría.



Figura 33: Imagen tomada del punto inicial del perfil A viendo hacia el SE, la línea amarilla muestra la ubicación del perfil A, al fondo el escarpe que se observa, corresponde al ex-basurero de Ensenada.

La Figura 34 muestra la anomalía completa de Bouguer, la anomalía magnética y el perfil topográfico. Aproximadamente a los 100 m, se observa el máximo magnético de 2000 nT de amplitud. Este máximo corresponde con el inicio del mínimo de anomalía gra-

vimétrica, ubicados en el escarpe del basurero. La magnetometría sugiere la existencia de materiales ferrosos en esta zona, mientras que la gravimetría indica, a su vez, que son de baja densidad.

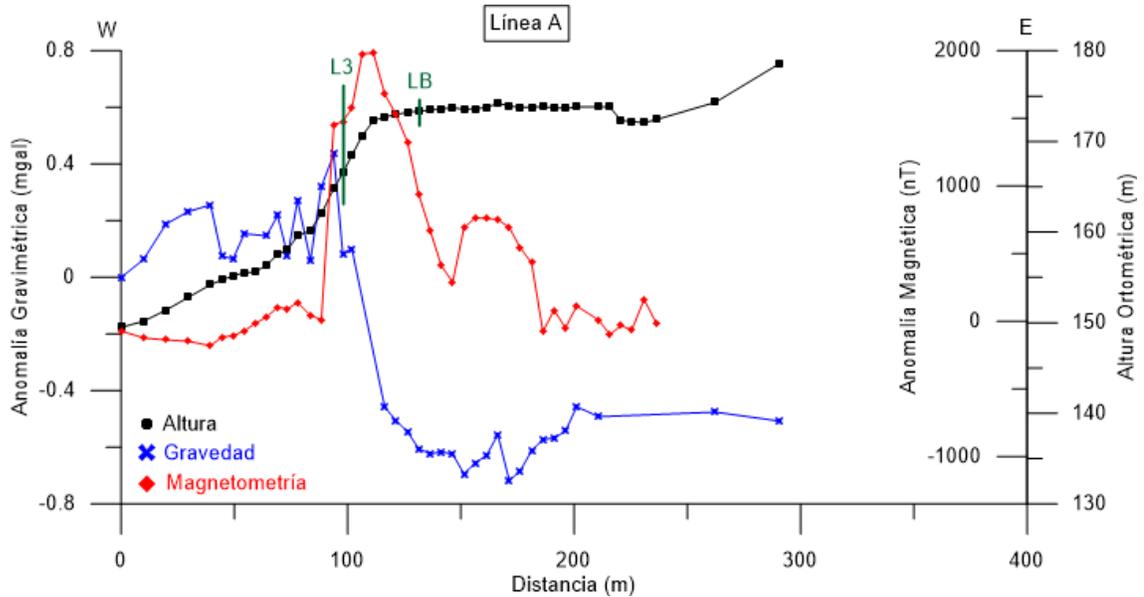


Figura 34: Perfiles de anomalías magnética, gravimétrica y de topografía de la línea LA.

Línea B, que se ubica sobre el ex-basurero, esta línea se tomó perpendicular a LA. De la Figura 35, se puede ver que la gravimetría varía 1.5 mgal, mientras que la respuesta magnética muestra dos mínimos a las orillas. La parte del terreno de LB es plana, en 105 m varía 2 m en altura.

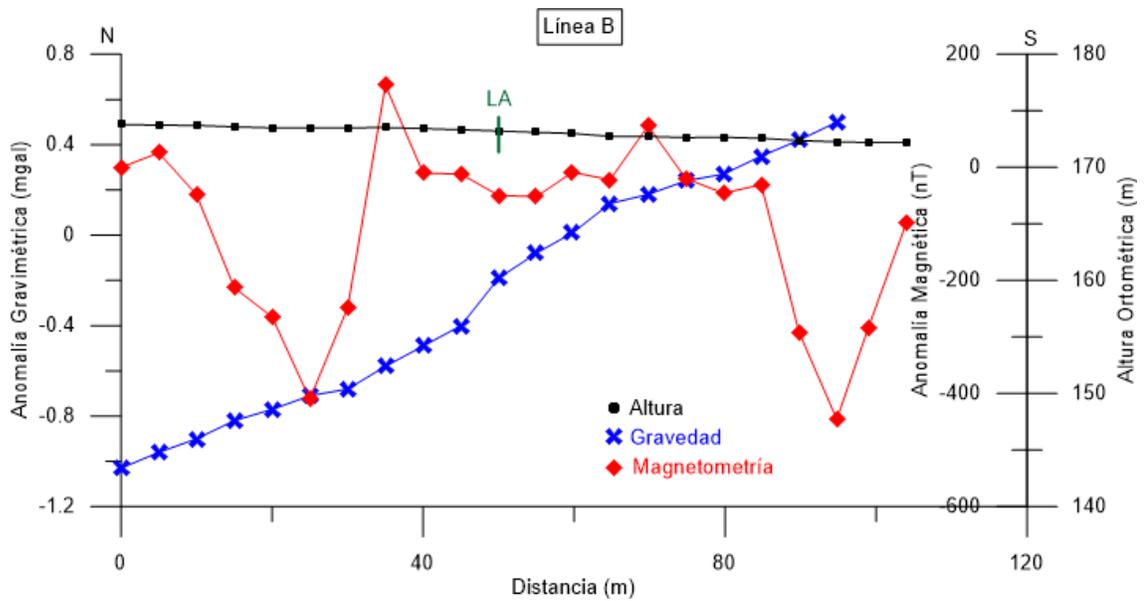


Figura 35: Perfiles de anomalías magnética, gravimétrica y de topografía de la línea LB.

Para la línea 12, se realizaron mediciones los primeros 65 metros del perfil magnético L12, se seleccionó de esta forma, para observar la respuesta gravimétrica, ya que en esa distancia pasaba de suelo sano a basura expuesta y nuevamente suelo sano, con el ex-basurero a 100 m al sur de este perfil.

En la Figura 36, se aprecia un mínimo de anomalía gravimétrica y también de anomalía magnética, exactamente donde se observó en campo la basura expuesta.

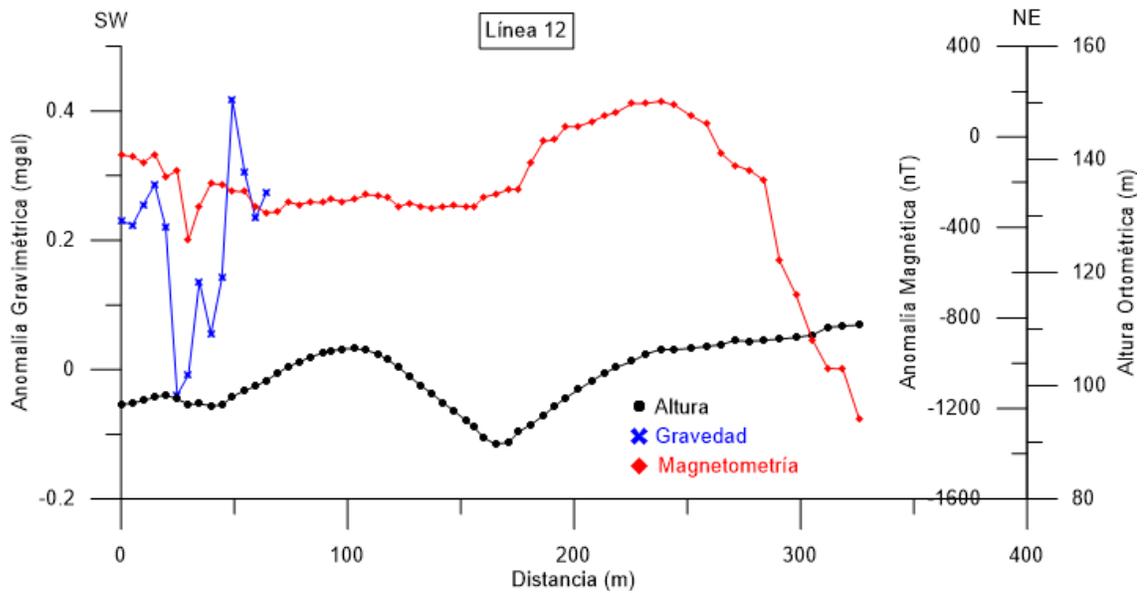


Figura 36: Perfiles de anomalías magnética, gravimétrica y de topografía de la línea 12.

3.4. Modelado de Datos

Previo al modelado cuasi-tridimensional ($2\frac{1}{2}D$) del conjunto de datos gravimétricos y magnéticos, se realizó la separación regional-residual a los datos de anomalía de Bouguer completa mediante el ajuste de polinomios de diferentes grados. Considerando que los valores de anomalía de Bouguer sobre rocas graníticas sanas, representan el efecto regional. Y que las anomalías residuales, indican contraste de densidad entre la interfaz basura-roca granítica. Asignando, para esta última el valor de la densidad de Bouguer (2.67 gr/cm^3) utilizada en el cálculo de la anomalía de Bouguer.

Los perfiles y modelos magnético-gravimétricos elaborados se describen a continuación:

Perfil LA (Figura 37). La interfaz roca-basura se estima a 40 m, hacia el lado W del basurero. En esta región se puede apreciar un mínimo de anomalía gravimétrica residual (Figura 37 b) y un máximo en anomalía magnética (Figura 37 a), asociada a desechos como: vidrio, madera, cuero, materiales de construcción, papel, cartón, plásticos, latas de

hojalata, llantas, entre otras cosas. Sin embargo, los desechos que se adaptan mejor a las observaciones geofísicas, son aquellos que cumplen con ser poco densos y magnéticos, que en este caso serían: latas de hojalata, materiales de construcción, llantas en proceso de descomposición, aparatos, por lo que la fuente de esta anomalía magnética, la podemos asociar a objetos metálicos enterrados en esta zona. Los valores de susceptibilidad que reproducían mejor las observaciones varían desde 0 hasta 0.021 unidades CGS.

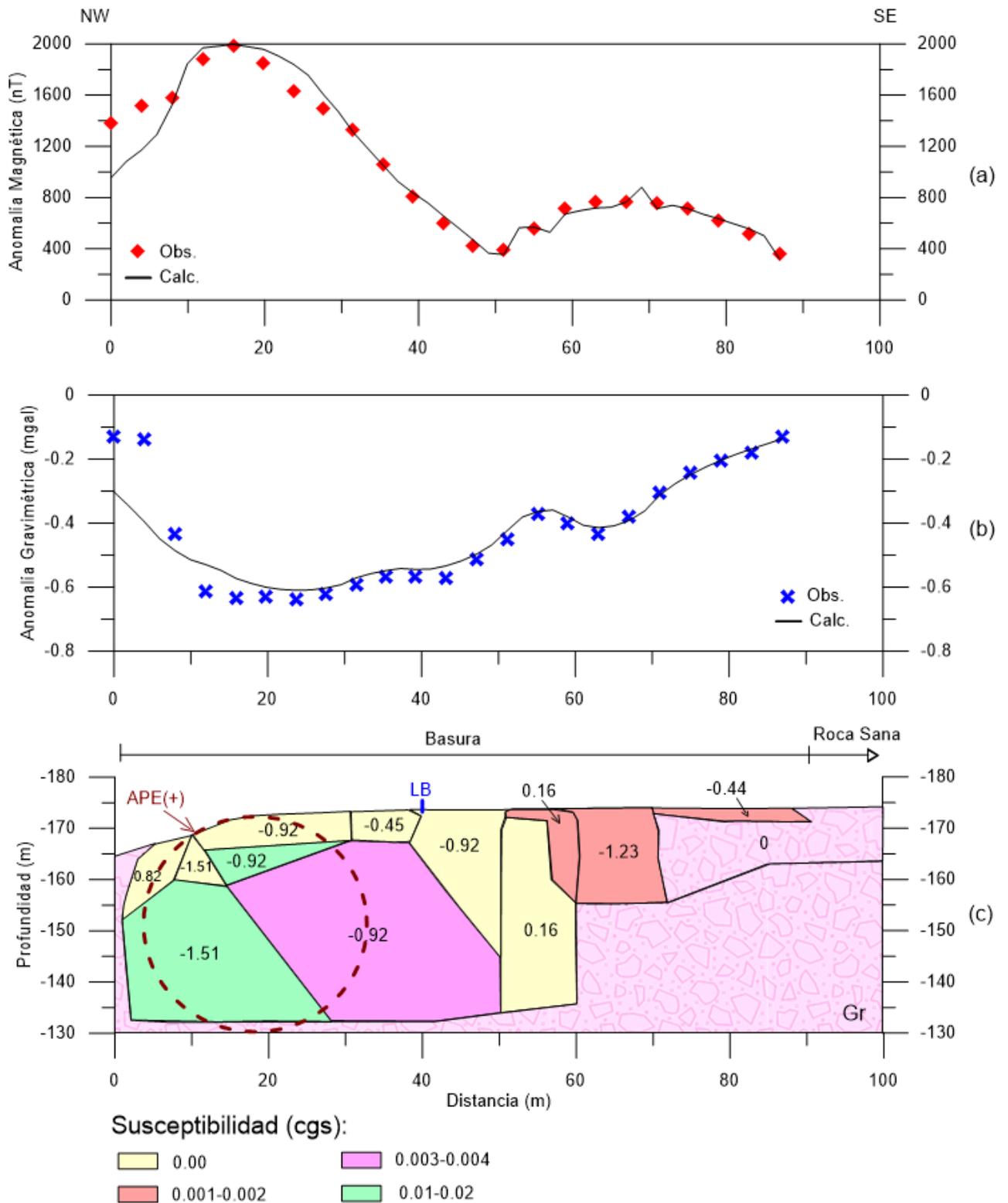


Figura 37: Modelo magnético-gravimétrico de la línea LA. Anomalia magnética (observada y calculada) (a), Anomalia gravimétrica residual (observada y calculada) (b), Modelo gravimétrico y magnético (c). Gr: roca sana; Los números en el modelo indican el contraste de densidad en gr/cm^3 respecto a $2.67 gr/cm^3$. Cuadro con línea discontinua: área de la fuente (cilindro horizontal) de anomalía de potencial natural positiva (APE+), según Alarcón (2010).

El modelo obtenido, Figura 37 (c), muestra un rango de variación de densidades de 1.6 a 2.83 gr/cm^3 y susceptibilidad magnética de 0.0 a 0.02 unidades CGS. Indicando la heterogeneidad de los materiales que constituyen el ex-basurero.

En la zona que abarca la fuente de anomalía de potencial natural positiva (circulo con líneas discontinuas) sobresale una fuente magnética con susceptibilidad de 0.01 ($10,000 \times 10^{-6}$) a 0.02 ($20,000 \times 10^{-6}$) unidades cgs y densidad de 1.16 gr/cm^3 . Según la densidad (ver Tabla 1) podría ser basura comercial (papel, cartón, plásticos, maderas, telas, etc.), los cuales no son magnéticos. Sin embargo, podrían estar impregnados de material disgregado del almacén (alambre de fierro) de llantas acumuladas en el área de estudio (ver Figura 33), por lo que tendrían comportamiento magnético.

Al final de la línea, la pila de basura (1.44 gr/cm^3) se acuña y el basamento rocoso (Gr; 2.67 gr/cm^3) aflora.

La línea LB (Figura 38), es perpendicular a LA y se ubica sobre el ex-basurero, la profundidad máxima estimada de la interfaz basura-roca fue de 45 m, disminuyendo hacia el lado sur. En la Figura 38(c) se pueden ver 3 cuerpos de contraste de densidad cero, atribuido a basura (material de construcción) de la misma densidad que la roca (2.67 gm/cm^3) y en susceptibilidad se encontró una variación de 0 a 0.006 unidades CGS. Además, se infiere que el resto de los desechos depositados en esta sección son: papel, cartón, plásticos, textiles, madera, aluminio, latas de hojalata, aparatos electrónicos, similares a los de la línea LA.

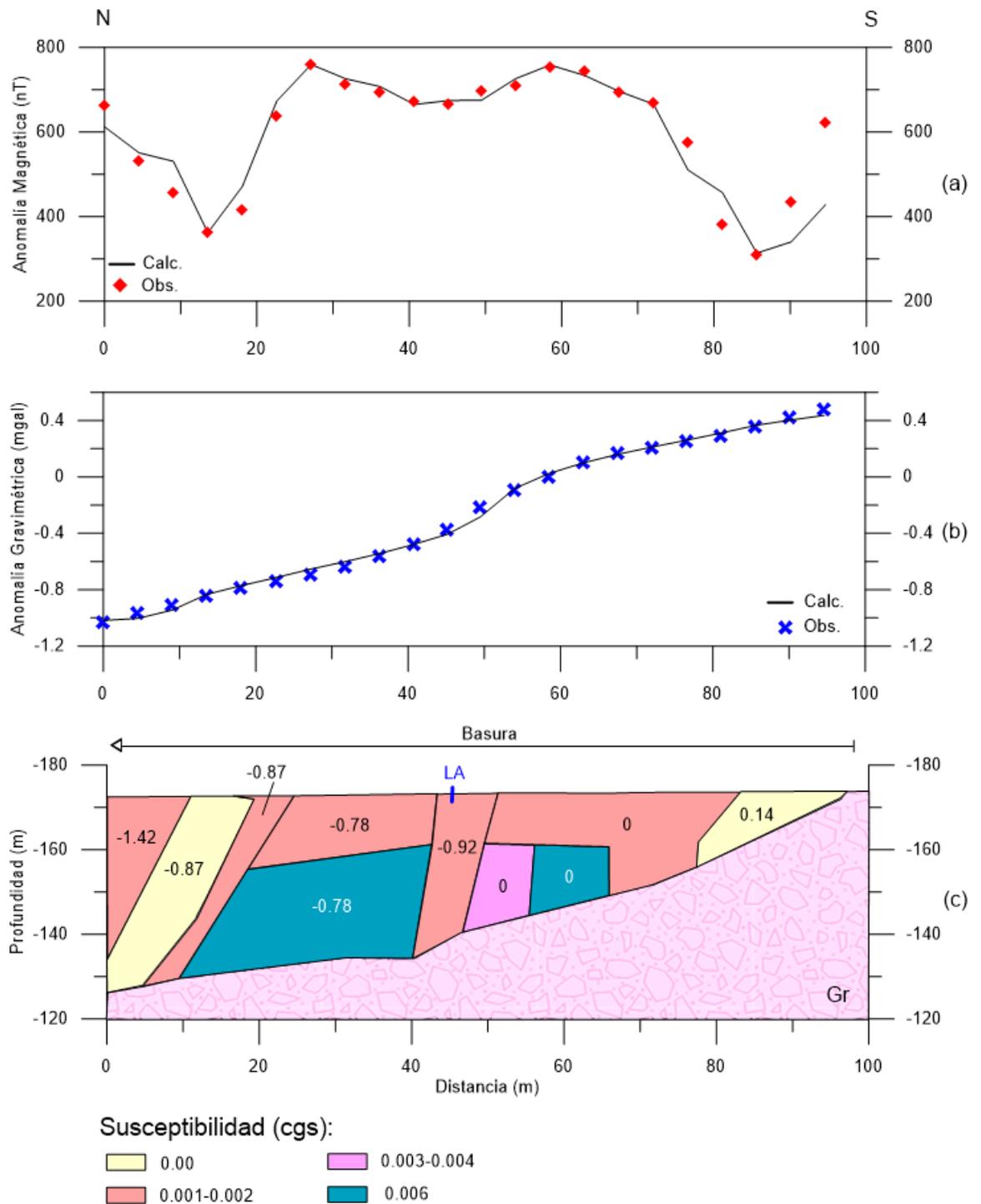


Figura 38: Modelo magnético-gravimétrico del perfil LB. Anomalía magnética (observada y calculada) (a), Anomalía gravimétrica residual (observada y calculada) (b), Modelo gravimétrico y magnético (c). Gr: roca sana. Los números en el modelo indican el contraste de densidad en gr/cm^3 respecto a $2.67 gr/cm^3$.

Línea L12 (Figura 39) pasa por un sector (60 m) del eje central (200 m) de la fuen-

te (cuadro con línea discontinua) de potencial natural negativa (APE-), según Alarcón (2010). Para elaborar el modelo gravimétrico (Figura 39c) se utilizaron densidades desde 1.57 hasta 2.85 gm/cm^3 . La mayor profundidad estimada de la interfaz basura-roca fue de 21 m.

Para reproducir los datos magnéticos observados en campo (Figura 39a), se colocó un cuerpo de susceptibilidad 0.01 unidades CGS, dicho cuerpo debía tener a su vez baja densidad, porque está en el mínimo gravimétrico (color verde), por lo que podría ser atribuido a aparatos eléctricos (pedacería de computadoras, televisores, ventiladores, etc.) y basura (mezclada). Así mismo, a una distancia de 30 a 35 m, se colocó un cuerpo de contraste de densidad cero, que puede deberse a basura de la misma densidad de la loza de Bouguer como materiales de construcción o también se pudiera interpretar como una región donde no se depositó basura y es la roca sana.

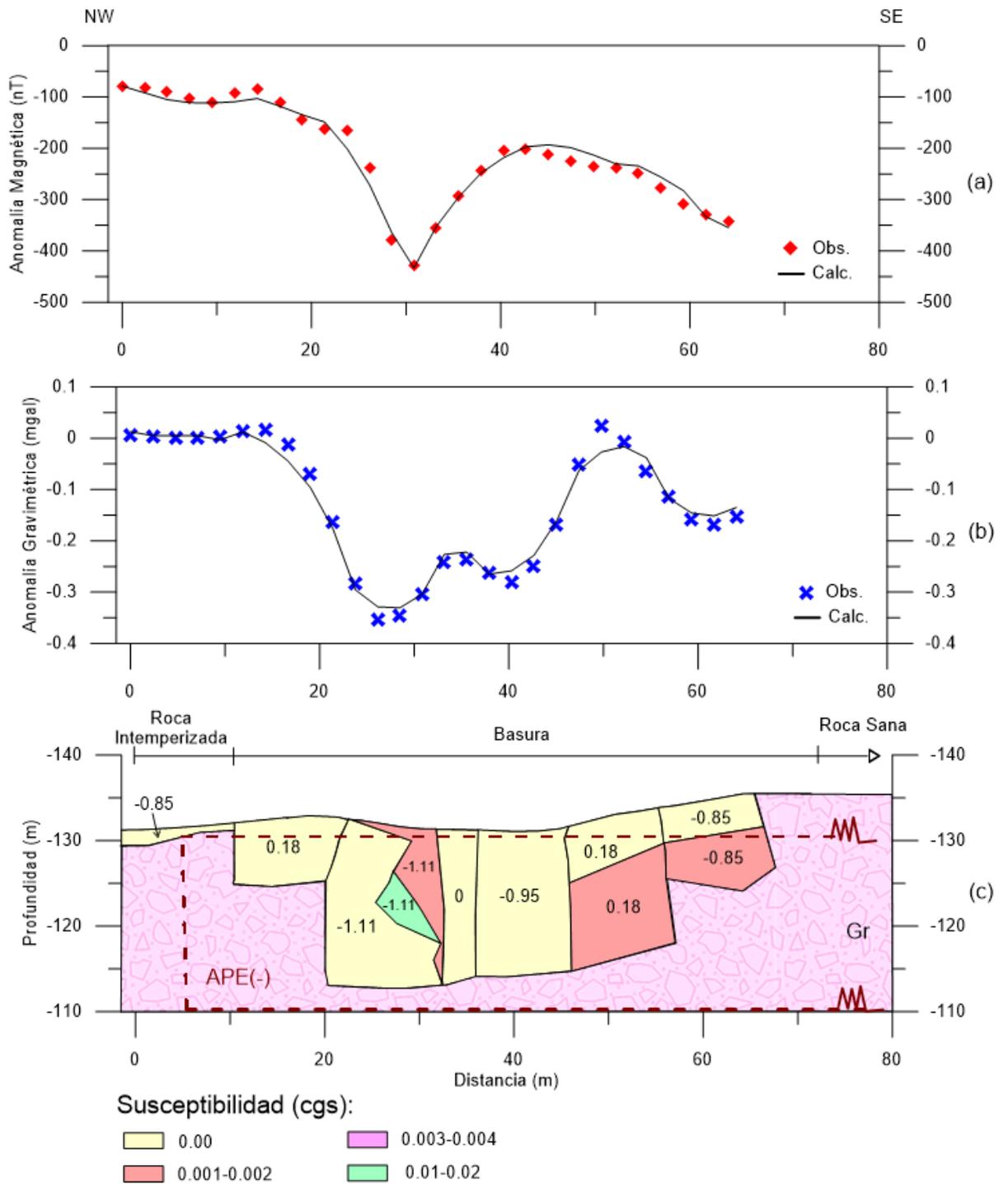


Figura 39: Modelo magnético-gravimétrico del perfil L12. Anomalia magnética (observada y calculada) (a), Anomalia gravimétrica (observada y calculada) (b), Modelo gravimétrico y magnético (c). Gr: roca sana. Los números en el modelo indican el contraste de densidad en gr/cm^3 respecto a $2.67 gr/cm^3$. Cuadro con línea discontinua: área de la fuente (cilindro vertical) de la anomalía de potencial natural negativa (APE-), según Alarcón (2010).

Capítulo 4. Discusión

En cuanto a los objetivos generales:

A partir del análisis de datos aeromagnéticos que cubren parcialmente el terreno que ocupa el ex-basurero y sus alrededores se infiere la presencia de una aparente zona de fractura (Figura 19), producida por el contacto entre dos unidades graníticas con diferente susceptibilidad magnética. Aunque podría debatirse el significado geológico de los lineamientos aeromagnéticos, la correlación del rumbo del lineamiento de máximos de gradiente horizontal con el rumbo de fracturas mapeadas (Figuras 4 y 21), validan su significado geológico supuesto. Y debido a que corta unidades graníticas, su origen podría relacionarse con estructuras causadas por el emplazamiento del intrusivo, ocurrido en el límite Cretácico-Terciario (120 m.a, Gastil, 1975). Por lo tanto, podría clasificarse como inactiva, en otras palabras sin riesgo geológico. No podría decirse lo mismo en cuanto a su riesgo ambiental, las zonas de cizalla, no obstante su antigüedad, son rutas preferenciales, para la migración de fluidos. En el caso que nos compete agua subterránea y lixiviados provenientes del ex-basurero, que al mezclarse producirían una pluma contaminante, la cual pondría en riesgo la salud de la población que habita alrededor del ex-basurero.

Por otra parte, la interfaz roca-basura, detectada por gravimetría, a una profundidad máxima de 40 m, corresponde con las estimaciones obtenidas por Alarcón (2010) utilizando tomografía eléctrica resistiva. El rango de contrastes de densidades (-1.51 a 0.18 g/cm^3) y susceptibilidades (0 a 0.02 unidades CGS) de los modelos magneto-gravimétricos elaborados corresponden a materiales encontrados en rellenos sanitarios domésticos y comerciales.

En cuanto a los objetivos particulares:

De las anomalías de potencial espontáneo reportadas por Alarcón (2010), se deduce, a partir de datos magnéticos, que la anomalía positiva (APE+) su fuente (Figura 2 a) contiene materiales ferrosos provenientes principalmente de la disgregación del almacén metálico de llantas. Esto sugiere que la causa de la anomalía podría ser la presencia de material ferroso diseminado en la basura. Por lo tanto, el proceso estaría asociado

a metalogénesis, contrario a metanogénesis según Alarcón (2010), apoyados en que la presencia de gas causaría una anomalía muy resistiva ($> 1000 \text{ Ohm}$), lo que no se ve en el modelo geoelectrico de la Línea 1 (Figura 2 a). La fuente propuesta cae sobre una anomalía conductora de 2 a 8 Ohm.

En cuanto a la anomalía de potencial espontáneo negativa (APE-; Figura 2b), esta se caracteriza por valores bajos de intensidad magnética, sugiriendo que la mayoría de los materiales que conforma la basura no son magnéticos o que se distribuyen en cantidades muy pequeñas (Figuras 29, 30 y 31). Alarcón sugiere que la anomalía es debida al flujo de lixiviados hacia el exterior del basurero. Fenómeno conocido como potencial de filtración (Orellana, 1972). Sin embargo, no se encontraron evidencias claras de escurrimientos de lixiviados hacia el exterior durante la campaña de levantamiento de datos magnéticos y gravimétricos. Sólo se observaron exhalaciones esporádicas de biogás en esta zona. Un mecanismo alternativo del fenómeno observado podría ser un potencial de difusión. Estos potenciales aparecen cuando en los poros de las rocas se ponen en contacto electrolitos diferentes, o existen diferencias de concentración en un mismo electrolito (Orellana, 1972). En nuestro caso, la roca sería la basura y el electrolito el lixiviado.

Capítulo 5. Conclusiones

A partir de la compilación, levantamiento y análisis de datos magnéticos y gravimétricos del ex-basurero municipal de la ciudad de Ensenada, B. C., se concluye lo siguiente:

- Al oriente de los terrenos del basurero se localiza una aparente zona de fracturas por donde los lixiviados provenientes del basurero podrían infiltrarse a las aguas subterráneas, provocando su eventual contaminación.
- La profundidad máxima de la interfaz basura-roca es de 40 m, cifra que podría ayudar a determinar el volumen total de basura, caracterizada por fuertes contrastes de densidad y susceptibilidad magnética. Producidos por la heterogeneidad de los materiales de los residuos domésticos y comerciales depositados durante sus 40 años de funcionamiento incontrolado.
- A partir de la correlación de anomalías magnéticas y de potencial espontáneo observadas en el ex-basurero, se deduce que los potenciales positivos están relacionados con la presencia de materiales metálicos y los negativos podrían ser debidos a potenciales de difusión.
- Finalmente, se recomienda un estudio geológico a detalle del terreno del ex-basurero y sus alrededores para evaluar su riesgo. Aumentar la cobertura del levantamiento magnético terrestre y gravimétrico para estimar indirectamente el volumen de basura acumulada.

Literatura citada

- Alarcón Barradas, A. (2010). *Exploración geofísica en terrenos del Exbasurero de Ensenada, B. C.* Tesis de maestría, CICESE.
- Alatorre-Zamora, M. A., Cortina, L., Campos-Enríquez, J. O., and Birch, F. S. (2008). Interpretación de anomalías de potencial espontáneo aplicada a un vertedero de desechos urbanos en el occidente de México. *e-Gnosis*, **6**(Art. 3): 1–24.
- Alatorre-Zamora, M. A., Rosas-Elguera, J., Pérez-Rodríguez, G., Campos-Enríquez, J. O., and Maciel-Flores, R. (2012). Contribución de la deconvolución de euler y la señal analítica en 3D al análisis de riesgos por fallas en el Graben de Valle de Banderas. *e-Gnosis*, **10**: 1–31.
- Almazán Vázquez, E. (1988). Marco paleosedimentario y geodinámico de la formación alisitos en la península de la Baja California. *Universidad Nacional Autónoma de México, Inst. De Geología*, **7**(1): 41–51.
- Blakely, R. J. (1995). *Potential theory in gravity & magnetic applications.* Cambridge University Press.
- Busquet, E., Casas, A., Pinto, V., Rivero, L., and Sabadía, J. B. (1996). Geofísica ambiental: técnicas no destructivas para el reconocimiento de zonas contaminadas por vertidos. *Acta Geológica Hispánica*, **30**(1-3): 73–82.
- CNA. (2002). Determinación de la disponibilidad del agua en el acuífero Ensenada, estado de Baja California, México. *Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica*, **6**(Art. 3): 1–13.
- Del Bosque-Espinosa, L. and Hidalgo-Moral, E. L. (2013). Estructura cortical del sector centro-este de la faja volcánica trans-mexicana mediante modelado de perfiles magnetométricos y gravimétricos. *Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.*
- Durrheim, R. J. and Cooper, G. R. J. (1998). Euldep: A program for the euler deconvolution of magnetic and gravity data. *Computers & Geosciences*, **24**(6): 545–550.
- Estrada, L. A. (2012). Prospección gravimétrica. *Universidad Nacional de Tucuman*, pp. 1–31.
- Fragoso Irineo, A. (2014). *Análisis de datos aeromagnéticos y gravimétricos del sector septentrional del Arco Alisitos: implicaciones tectónicas.* Tesis de maestría, CICESE.
- Gastil, R., Phillips, R. P., and Allison, E. C. (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. *The Geological Society of America*, **7**(Inc. Mem. 140): 1–8.
- Gómez-Treviño, E. and Espinosa-Cardena, J. (1990). Estudio geofísico en los terrenos del basurero municipal de Ensenada, B. C. *Departamento de Geofísica Aplicada, CICESE, Informe Técnico*, pp. 1–7.
- Grauch, V. J. S. and Cordell, L. (1987). Short note limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. *Geophysics*, **52**(1): 118–121.

- Hinze, W. J. (1990). The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies. *Geotechnical and environmental geophysics*. Edited by Stanley H. Ward, **1**: 75–126.
- Hinze, W. J., Roberts, R. L., and Leap, D. I. (1990). Combined analysis of gravity and magnetic anomaly data in landfill investigations. *Geotechnical and environmental geophysics*. Edited by Stanley H. Ward, **2**: 267–271.
- Kane, R. P. (1962). Relationship between primary cosmic rays and their secondary components. *Journal of Geophysical Research*.
- Kristofer, D. and Yaoguo, L. (2009). Enhancement of depth estimation techniques with amplitude analysis. *SEG Houston 2009 International Exposition and Annual Meeting*.
- Legorreta, K. P. (2016). *Detección de plumas de contaminación aplicando el método de Polarización Inducida alrededor del ex-relleno sanitario de la ciudad de Ensenada, Baja California, México*. Tesis de maestría, CICESE.
- Monier-Williams, M. E., Greenhouse, J. P., Mendes, J. M., and Ellert, N. (1990). Terrain conductivity mapping with topographic corrections at three waste disposal sites in Brazil. *Geotechnical and environmental geophysics*. Edited by Stanley H. Ward, **2**: 41–55.
- Nagy, D. (1966). The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*.
- Orellana, E. (1972). Prospección geo-eléctrica en corriente continua. *Parainfo, Madrid, ES*.
- Phillips, J. D. (1997). Potential-field geophysical software for the PC, version 2.2. *U.S. Geological Survey*, (Open-File Report 97-725): 34.
- Sharma, P. V. (1997). Environmental and engineering geophysics. *Cambridge University Press*.
- Tchobanoglous, G. and Theisen, H. y Vigil, S. (1994). Gestión integral de residuos sólidos. *Ed. McGraw-Hill, España, 1*.
- Tolosa, J. M. (2012). *Algoritmos y técnicas de tiempo real para el incremento de la precisión posicional relativa usando receptores GPS estándar*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata.