

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

GEOFÍSICA ARQUEOLÓGICA EN LA CASONA IBARRA, UCV, CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Quintana S., Richard A.
para optar al título de Ingeniero Geofísico

Caracas, noviembre de 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

GEOFÍSICA ARQUEOLÓGICA EN LA CASONA IBARRA, UCV, CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Mariano Arnaiz

COTUTOR: Prof. Carlos Martín

TUTORA INDUSTRIAL: MSc. Jéline Aray

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Quintana S., Richard A.
para optar al título de Ingeniero Geofísico

Caracas, noviembre de 2017

Caracas, 7 de noviembre de 2017

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

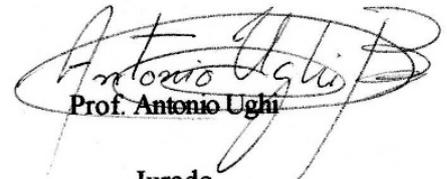
Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Quintana Richard, titulado:

“GEOFÍSICA ARQUEOLÓGICA EN LA CASONA IBARRA, UCV, CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.


Prof. Nuris Orihuela

Jurado


Prof. Antonio Ughi

Jurado


Prof. Mariano Arnaiz

Tutor Académico

DEDICATORIA

*A las tres personas más importantes de mi vida,
mis viejos y mi abuela Elisa.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios y a la vida por colocarme en este camino y por permitirme conseguir esta vocación que siempre merece la pena cultivar a pesar de cualquier obstáculo que se presente.

Quiero enaltecer a la Universidad Central, esta casa que vence la sombra y la casa que me escogió sin yo pensarlo para enamorarme, permitiéndome estudiar y aprender a lo largo del tiempo.

A mi tutor y mentor Mariano Arnaiz, un amigo, un compañero de campo y un ayudante incondicional que desde el inicio me tomó como a su hijo negro para enseñarle que a pesar de las caídas y los retos que vengan, es importante afrontarlos con cabeza fría y determinación.

A mi cotutor, el profesor Carlos Martín, quien a través de su experiencia y sabiduría en el campo arqueológico me impartió sus conocimientos y me ayudó también a interesarme aún más en esta fascinante disciplina.

A mi tutora industrial Jélime Aray y a todo el personal de FUNVISIS quienes tuvieron siempre la disposición para ayudarme a lo largo del trabajo con la prospección GPR. Muchas gracias a todos.

Le quiero agradecer especialmente a mi papá por haber sido mi compañero durante toda la adquisición de mis datos, por alegrarme, por apoyarme en los momentos difíciles y por ser ese amigo único y especial. De verdad muchas gracias viejo.

Darle las gracias también a la mujer que me trajo al mundo es importante para mí, así que realmente te agradezco mamá por ser un apoyo, una amiga y una confidente. Solo tú sabes cómo te quiero.

Quiero agradecerle de forma especial a mi novia, Nicole Oliveira, por ser una amiga incondicional, una compañera, un apoyo y un baluarte a lo largo de toda esta etapa. Te quiero mucho guapa y sé que como dijimos, esto realmente valdrá la pena.

A Nilbeny Cano y al equipo del Dpto. de Geodesia del IGVSB quienes desde el inicio estuvieron dispuestos a colaborar en varias partes de mi adquisición. Gracias de verdad a todos.

Agradezco también a los profesores Douglas Bravo y Yoreyma Castellanos del Dpto. de Geodesia de la UCV por apoyarme con el préstamo de los equipos para el levantamiento topográfico de la Casona.

De COPRED agradezco principalmente a Aglais y a todos los integrantes y cuidadores de la Casona Ibarra por abrirme las puertas y permitirme trabajar allí. Sumo acá también a Nelly Del Castillo, un pilar fundamental para encontrar buena parte de la información de esta edificación.

A la profesora Nuris Orihuela y el profesor Cavada por transmitirme su sabiduría en los momentos oportunos y de forma muy especial a la profesora Inírida Rodríguez por guiarme, por interesarse en estas aplicaciones particulares de la geofísica y darme la oportunidad de ser preparador de su materia para aprender un poco más sobre la gravimetría.

Ana Sánchez te agradezco por ser como mi segunda mamá a lo largo de este tiempo, ayudarme con Oasis, GMT, con las prepas, ayudarme a calmarme, a pensar, a razonar...en fin, a muchas cosas negrita. Se te quiere.

Para finalizar y no que esto sea menos importante, le doy las gracias a mis amigos y compañeros de siempre, Diego, Julio y a los que vinieron después como Jeiker y Luis Díaz. También mencionaré a Belyara y a Luis Rivera a quienes les agradezco por su apoyo con la adquisición GPR.

Quintana S., Richard A.

**GEOFÍSICA ARQUEOLÓGICA EN LA CASONA IBARRA,
UCV, CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS**

**Tutor Académico: Prof. Mariano Arnaiz. Cotutor: Prof. Carlos Martín.
Tutora Industrial: MSc. Jéline Aray. TEG. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de
Geofísica. Año 2017, 114 p.**

Palabras clave: microgravimetría, GPR, arqueología, Casona Ibarra, UCV.

RESUMEN

En la Casona Ibarra de la Ciudad Universitaria de Caracas se realizó una prospección geofísica con el fin de detectar cultura material en el subsuelo. Un total de 572 estaciones microgravimétricas en conjunto con 17 líneas GPR fueron adquiridas para determinar la posible existencia de fosos funerarios y antiguos canales hidráulicos denominados acequias. El procesamiento del dato microgravimétrico se llevó a cabo bajo los estándares requeridos, incluyendo correcciones especiales tales como la corrección por pared (*wall correction*); mientras que el procesamiento del georadar consistió en la aplicación de diversos filtros como la ganancia lineal o el filtro vertical pasabanda para la obtención de radargramas. Se concluyó que las principales anomalías están posiblemente asociadas a la existencia de un foso funerario dentro de la antigua capilla de la edificación y a sistemas hidráulicos re-utilizados durante la modernización de la estructura. Algunas cavidades posiblemente antropogénicas también fueron localizadas, así como la existencia de diferentes elementos estructurales tales como las fundaciones de antiguas paredes de tapia y columnas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2. OBJETIVOS.....	18
1.2.1. Objetivo general.....	18
1.2.2. Objetivos específicos.....	18
1.3. UBICACIÓN	19
1.4. ANTECEDENTES	20
CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO, HISTÓRICO Y ARQUEOLÓGICO	
2.1. GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL.....	24
2.2. CONSIDERACIONES HISTÓRICAS	25
2.3. CONSIDERACIONES ARQUEOLÓGICAS.....	32
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	
3.1. MICROGRAVIMETRÍA	35

3.1.1. Concepto.....	35
3.1.2. Fundamentos.....	36
3.1.3. Consideraciones en la prospección.....	37
3.2. GPR (<i>GROUND PENETRATING RADAR</i>).....	45
3.2.1. Concepto.....	45
3.2.2. Fundamentos.....	47
3.2.3. Consideraciones en la prospección.....	50
3.3. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA APLICADA A LA ARQUEOLOGÍA.....	55

CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO

4.1. MICROGRAVIMETRÍA.....	56
4.1.1. Diagrama general.....	56
4.1.2. Etapa de pre – adquisición.....	57
4.1.3. Etapa de adquisición.....	60
4.1.4. Etapa de procesamiento e interpretación.....	65
4.2. GPR (<i>GROUND PENETRATING RADAR</i>).....	72
4.2.1. Diagrama general.....	72
4.2.2. Etapa de pre – adquisición.....	73
4.2.3. Etapa de adquisición.....	73
4.2.4. Etapa de procesamiento e interpretación.....	77

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. MICROGRAVIMETRÍA	79
5.1.1. Mapa de anomalías de Bouguer	79
5.1.2. Espectro de potencia de la anomalía de Bouguer	80
5.1.3. Deconvolución de Euler	81
5.1.4. Mapa de la componente regional de la anomalía de Bouguer.....	83
5.1.5. Mapas residuales de la anomalía de Bouguer y sus derivadas	84
5.2. INTERPRETACIÓN CONJUNTA.....	89
5.2.1. Zona frente (FT)	90
5.2.2. Zona patio externo (PE).....	90
5.2.3. Zona patio interno (PI).....	94
5.2.4. Zona trapiche (TP).....	95
5.2.5. Zona interna (ZI).....	97

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES.....	101
6.2. RECOMENDACIONES	103

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
---	------------

APÉNDICES	111
------------------------	------------

ÍNDICE DE TABLAS

Nro. Tab.	pp.
3.1. Valores de diversas propiedades físicas para diferentes materiales...	53
3.2. Valores de frecuencia central en función de la profundidad de exploración.....	55
4.1. Procesamiento de datos en <i>Excel</i>	65
4.2. Amarre de los valores relativos de gravedad al valor de la base.....	65
4.3. Conversión de las medidas de gravedad relativa a observada reducida.	66
5.1 Profundidades calculadas en metros a partir del espectro de potencia de la anomalía de Bouguer.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Nro. Fig.	pp.
1.1. Plano de conjunto de la Ciudad Universitaria mostrando la ubicación de la Casona	19
1.2. Mapa de la componente residual de la anomalía de Bouguer mostrando el vacío principal (en azul) asociado a la cripta medieval.....	21
1.3. Mapa de anomalías de Bouguer residuales en conjunto con los cortes horizontales de GPR en la zona de estudio	22
2.1. Mapa geológico de la Cordillera de la Costa mostrando a los esquistos de las Las Brisas, Las Mercedes y Chuspita, ubicados en la Faja Caracas	24
2.2. Muestra de esquisto meteorizado del tipo cuarzo-micáceo tomada en las cercanías de la Casona Ibarra	25
2.3. Plano de la Casona para el Siglo XVIII	26
2.4. Plano de la Casona entre 1730 y 1830	27
2.5. Plano de la Casona entre 1830 y 1930	28
2.6. Plano de la Casona entre 1930 y 1943	29
2.7. Plano de la Casona entre 1943 y 1958	30
2.8. Plano de la Casona entre 1958 y 2004	31
2.9. Plano actual de la Casona.....	32

2.10. Plano con los ocho (8) posibles pozos de excavación asociados a zonas de interés arqueológico.....	33
3.1. Corrección por pared calculada para una densidad promedio de 2.2 g/cm ³	39
3.2. Gráfico demostrativo para la atracción que surge entre una esfera de masa anómala y un punto de observación.....	42
3.3. Anomalías de Bouguer de tres (3) esferas ubicadas a diferentes profundidades.....	43
3.4. Anomalías de Bouguer de tres (3) esferas con diferentes radios.....	44
3.5. Anomalías de Bouguer de tres (3) esferas con diferentes contrastes de densidad ρ	45
3.6. El diagrama de un sistema GPR y su funcionamiento.....	47
3.7. Elementos básicos de una onda electromagnética.....	48
3.8. Principio general del funcionamiento de la prospección electromagnética.....	49
3.9. Área de adquisición con sus respectivas líneas.....	51
3.10. Relación de las frecuencias con la máxima profundidad para obtener información de diversos materiales.....	53
3.11. Señal real de una antena GPR de 400 MHz en (a) y su espectro de frecuencias en (b).....	54
4.1. Flujograma representativo de la metodología de prospección microgravimétrica.....	56
4.2. Gravímetro CG-5 en funcionamiento.....	57
4.3. Descripción gráfica de un circuito de triple repetición.....	58

4.4. Base establecida previamente en Tierra de nadie (izq.) y base levantada en el monumento frente a la Casona (der.).....	58
4.5. Ubicación del sótano para el estudio de la deriva instrumental	59
4.6. Gráfico de la deriva instrumental para el CG-5 corrida en el IGVS B 59	
4.7. Estación representativa de la zona patio externo	61
4.8. Estaciones microgravimétricas distribuidas en la habitación llamada taller.....	61
4.9. Plano de la Casona mostrando los nombres para cada zona y habitación en conjunto con las estaciones levantadas.....	62
4.10. Proceso de nivelación del gravímetro CG-5 en campo	63
4.11. Distintas etapas de medición con la estación total	64
4.12. Histograma (izq.) y diagrama de caja y bigotes (der.) para los datos de gravedad observada reducida	66
4.13. En (a) el mapa topográfico de la Casona y en (b) el perfil con la estación de menor cota (círculo negro)	67
4.14. En (a) el mapa de corrección por pared y en (b) el mapa de correlación entre las dos (2) anomalías de Bouguer completas	69
4.15. Histograma (izq.) y diagrama de caja y bigotes (der.) para los datos de la anomalía de Bouguer completa	70
4.16. Histograma (izq.) y diagrama de caja y bigotes (der.) para los datos de la anomalía de Bouguer residual	72
4.17. Flujoograma representativo de la metodología de prospección GPR	72
4.18. Sistema de coordenadas para los perfiles GPR	74
4.19. Antena de 200 MHz conectada y ensamblada.....	74

4.20. Adquisición de datos con la antena de 200 MHz.	75
4.21. Plano de las líneas GPR dentro de la Casona.	76
4.22. Plano de las líneas GPR en su patio frontal.	77
5.1. Mapa de anomalías de Bouguer. En amarillo, estaciones cerca de alcantarillas; en negro estaciones con alguna dificultad de medición.	80
5.2. Espectro de potencia para la anomalía de Bouguer.	81
5.3. Mapa de las soluciones de la deconvolución de Euler.	82
5.4. Histograma (izq.) y diagrama de caja y bigotes (der.) para las soluciones de la deconvolución de Euler.	83
5.5. Mapa de la componente regional de la anomalía de Bouguer.	84
5.6. En (a) la anomalía de Bouguer residual y en (b) la misma anomalía sin la larga longitud de onda. En (c) la derivada en z y en (d) la derivada horizontal total para la componente residual.	86
5.7. Modelo de anomalías de Bouguer para la zona arqueológica de interés.	89
5.8. Radargrama FT_T2 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.	90
5.9. Radargrama PE_L1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.	91
5.10. Radargrama PE_L2 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.	92
5.11. Radargrama PE_T1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.	93

5.12. Radargrama PE_T2 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.	94
5.13. Radargrama PI_T1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.	95
5.14. Radargrama TP_T1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.	96
5.15. Radargrama TP_T2 paralelo a TP_T1.....	97
5.16. Radargrama ZI_L1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.	98
5.17. Radargrama ZI_T1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.	99
5.18. Radargramas ZI_T2 y ZI_T3 coincidentes con los perfiles de la anomalía de Bouguer residual.	100
A.1. Distintas tomas para una mampostería presente en la zona sur de la Casona (ICU, 1958).....	111
A.2. Planos con los acabados de pisos para la Casona (Del Castillo, 2008).	112
A.3. Plano con los tipos de paredes en la Casona (Del Castillo, 2008). .	113
A.4. Radargrama FT_T1 con su respectiva anomalía de Bouguer residual.	114
A.5. Radargramas ZI_L2, L3, L4 y L5 con sus respectivas anomalías de Bouguer residuales.	114

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La arqueología (del griego «ἀρχαίος» *archaios*, viejo o antiguo, y «λόγος» *logos*, ciencia o estudio) es la ciencia que estudia, a través de restos materiales conservados en el tiempo (o cultura material), los cambios que se producen en las diversas sociedades. Uno de los principales métodos para la obtención de materia cultural es la excavación en lugares históricos, proceso que se lleva a cabo a detalle en distintas zonas y que puede resultar fructífero o no. La geofísica, como un conjunto de métodos no invasivos, ha sido utilizada extensamente para la detección de material y estructuras culturales como cavidades, criptas, acequias o cuevas, sin perturbar o destruir el patrimonio cultural.

Padín *et al.* (2012) descubrieron a través de microgravimetría una cripta enterrada en la Iglesia Don de Valencia, España. Panisova *et al.* (2016) utilizaron prospección microgravimétrica en combinación con GPR (*Ground Penetrating Radar*), logrando detectar criptas medievales y las antiguas fundaciones asociadas a una importante iglesia en el sur de Eslovaquia. Entre los trabajos de prospección geofísica aplicados a la arqueología en Venezuela se encuentra el de Sesto (2008), quien caracterizó enterramientos humanos en el Cementerio de los Ingleses, Edo. Yaracuy a través de perfiles de resistividades eléctricas. Romero (2009) realizó una prospección con GPR en la Iglesia de Santa Ana, Edo. Nueva Esparta, logrando delimitar las zonas de interés arqueológico para futuros estudios interdisciplinarios. Fuenmayor (2013), a través de una prospección electromagnética, cartografió los antiguos sistemas de acequias en la Hacienda La Floresta de Caracas, logrando fortalecer su carácter patrimonial. Jiménez (2016), trabajó con las evidencias en el Parque San Felipe El Fuerte, ubicado en Yaracuy, Venezuela, con el objetivo de

detectar y caracterizar a través de georadar zonas de interés arqueológico tales como muros, cimientos de casas, losas, tumbas o sistemas de transporte de agua.

Para la Universidad Central de Venezuela el estatus de Patrimonio Mundial de la Humanidad dado por la UNESCO en el año 2000 es sinónimo de presencia de elementos arquitectónicos importantes tales como la Casona Ibarra, una estructura colonial del siglo XVIII. Dicha edificación representa un caso de estudio por ser el único remanente estructural de lo que antes fuera la antigua Hacienda Ibarra, cuyos terrenos fueron vendidos al gobierno de Isaías Medina Angarita en 1943 dando paso a la construcción de la Ciudad Universitaria. La importancia de esta construcción al albergar a personajes ilustres de la historia tales como Simón Bolívar o Alejandro de Humboldt hizo que Carlos Raúl Villanueva descartara su demolición, pasando a formar parte del futuro *campus* universitario, lográndose así su conservación y su declaración en 1970 como Monumento Histórico Nacional.

Molina y Amodio (2008), en el marco del trabajo realizado por Del Castillo (2008), reconocen el potencial arqueológico de la Casona – Ibarra por ser un sinónimo del ingenio azucarero de los siglos XIX y XX debido a sus tecnologías e infraestructura. Martín y Mosquera (2013) realizan una recolección de evidencias arqueológicas las cuales demuestran la necesidad de localizar posibles zonas de enterramiento en este lugar. Es por lo anterior que el propósito principal de esta investigación será la búsqueda a detalle de cultura material a través de métodos de exploración microgravimétricos y electromagnéticos (GPR), esperando que los resultados obtenidos refuercen el significado cultural y de preservación para este patrimonio.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

- Caracterizar a través de una prospección geofísica integrada (microgravimetría y GPR) posibles estructuras culturales existentes en el subsuelo de La Casona Ibarra.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar el estudio microgravimétrico de la Casona Ibarra.

- Complementar la información previamente obtenida con perfiles GPR en zonas de interés arqueológico.
- Determinar la existencia de alguna clase de foso funerario en la edificación y sus alrededores.
- Determinar la existencia de algún sistema hidráulico (acequia) en la edificación.

1.3. UBICACIÓN

La Casona Ibarra es una edificación ubicada en el *campus* de la Universidad Central de Venezuela, en la ciudad de Caracas (Figura 1.1).

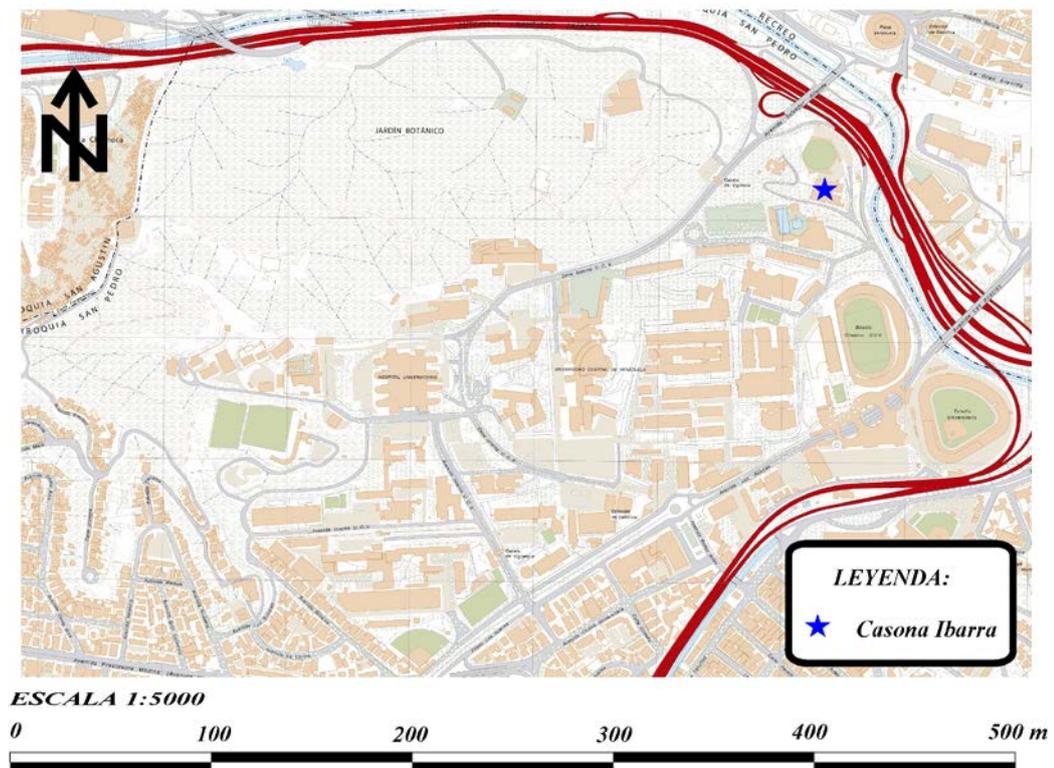


Figura 1.1. Plano de conjunto de la Ciudad Universitaria mostrando la ubicación de la Casona (Modificado de IGVS, 2007).

1.4. ANTECEDENTES

La aplicación de la prospección geofísica en el ámbito arqueológico data de mediados del siglo XX con una adquisición, procesamiento e interpretación distintivos que permiten la detección de cultura material. Su exitosa aplicación en ambientes y situaciones de interés cultural e histórico queda plasmada en los diversos trabajos nacionales e internacionales mostrados a continuación.

De manera de identificar la existencia de cámaras desconocidas en la la Gran Pirámide en Egipto, Lakshmanan y Montlucon (1987) adquirieron información microgravimétrica a lo largo de esta estructura por ser considerado como un método eficiente en la detección de cavidades. La primera de ellas consistió en un mallado de 2,1 x 2,1 m con un total de 15 estaciones en la cámara del Rey y en otras cinco (5) cámaras aledañas. Seguidamente, realizaron una nueva adquisición en los dos (2) niveles restantes de la cámara con el fin de cubrir sus 6 m de altura y colocaron tres (3) estaciones más cercanas a su entrada, en el llamado túnel de Caviglia. Finalmente, fueron medidos tres (3) perfiles con espaciado entre 0,5 y 2 m en la cámara de la Reina. La existencia de dos (2) anomalías negativas permitió a los autores llegar a las conclusiones de que estas se pueden asociar a la existencia de un antiguo túnel de investigación en la cámara del Rey y al túnel de acceso hacia la cámara de la Reina.

Chavez *et al.* (2005) estudiaron, de forma no invasiva, la Basílica de Nuestra Señora de La Salud (Patzcuaro, México) con prospección electromagnética (GPR) y gradiente magnético vertical. Un total de 20 perfiles GPR y 16 de gradiente magnético permitieron detectar patrones rectangulares y otras características importantes asociadas posiblemente a ruinas prehispánicas. Finalmente, los autores resaltaron la dificultad de que al trabajar en sitios arqueológicos rodeados de zonas urbanas modernas, las señales adquiridas por los instrumentos utilizados se debilitan y se pueden ver afectadas por el cableado eléctrico, por las puertas metálicas u otra fuente de ruido cultural.

Panisova *et al.* (2009) llevaron a cabo una investigación en la iglesia *St. Nicolas* de la ciudad de *Pukanec* en Eslovaquia. Como parte de la reconstrucción histórico –

estructural de esta iglesia, iniciada en el año 2003, la prospección microgravimétrica fue elegida como método principal con el objetivo de investigar el subsuelo debajo de la nave o cuerpo principal de la iglesia y detectar una posible cámara enterrada que formó parte de un antiguo sistema de túneles. La adquisición constó de un mallado de 111 estaciones, espaciadas inicialmente a 1 m de distancia, cubriendo un área total de 200 m², con control de elevación entre las mismas y con repetición de cierto porcentaje para el control de calidad. Además, un estudio del gradiente vertical fue realizado en tres (3) estaciones para el estudio somero de las diferencias de densidad. La principal conclusión de este trabajo fue la posible existencia de un vacío en la componente residual de la anomalía de Bouguer el cual se puede asociar a una cripta medieval (Figura 1.2).

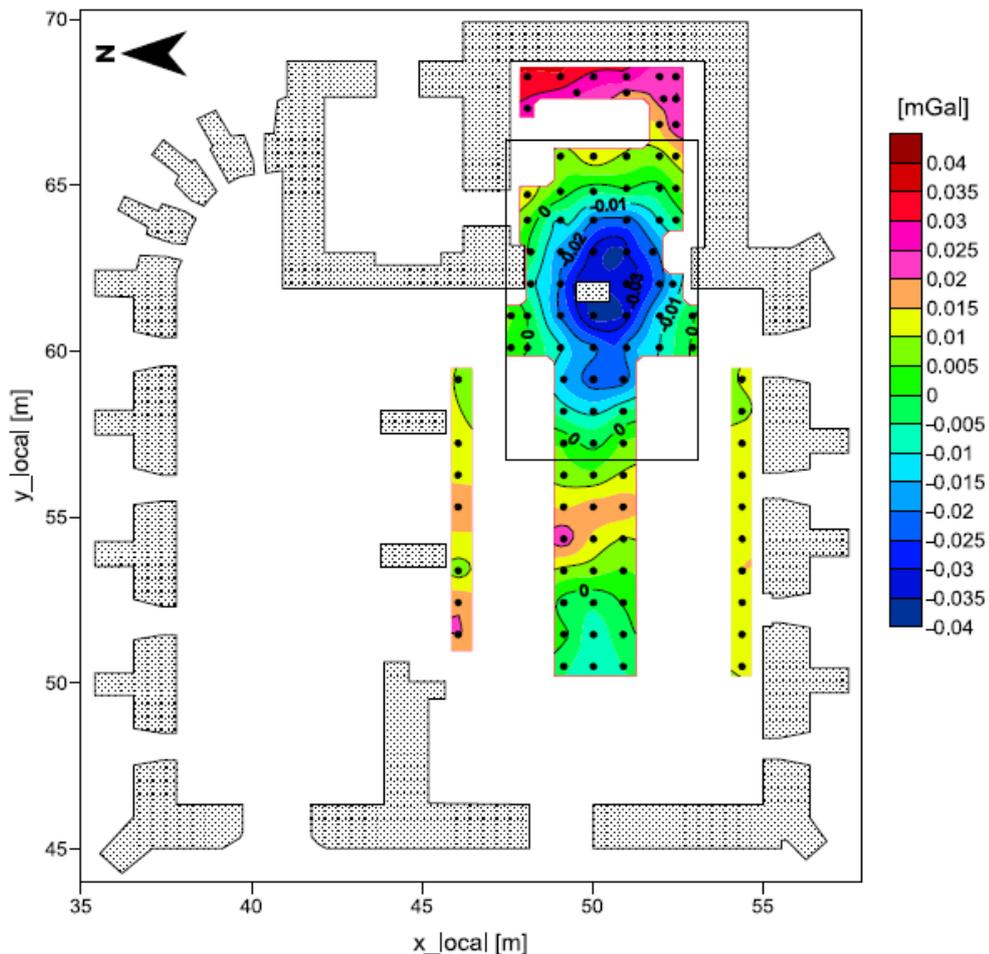


Figura 1.2. Mapa de la componente residual de la anomalía de Bouguer mostrando el vacío principal (en azul) asociado a la cripta medieval (Panisova *et al.*, 2009).

Para revelar la posición de tres (3) criptas ubicadas en el monasterio de *St. Catherine* en Eslovaquia, las cuales pertenecieron a importantes miembros de la alta sociedad de los siglos XVII y XVIII, Panisova *et al.* (2013) llevaron a cabo una investigación conjunta con la utilización de microgravimetría y GPR en el interior de este recinto religioso, generando un total de 258 estaciones separadas a 1 m en conjunto con 36 perfiles GPR espaciados a 15 cm. Debido a que estos dos (2) métodos estudian propiedades físicas distintas, los autores buscaron eliminar la ambigüedad a través del solapamiento entre los mapas de anomalías residuales y los cortes horizontales en tiempo del GPR, dando con la posición y dimensiones de una cripta previamente excavada en el año 2001, así como también con la presencia de otras dos (2) posibles criptas documentadas en archivos históricos. La conclusión principal de este trabajo es que la combinación de estas dos (2) técnicas provee a los investigadores de herramientas eficientes y no destructivas para la caracterización arqueológica del subsuelo.

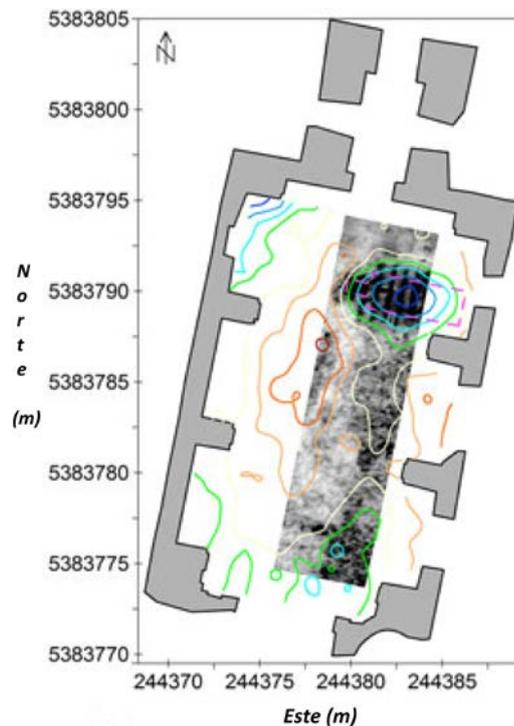


Figura 1.3. Mapa de anomalías de Bouguer residuales en conjunto con los cortes horizontales de GPR en la zona de estudio (Modificado de Panisova *et al.*, 2013).

Finalmente, la profesora Nuris Orihuela declaró la existencia de dos (2) trabajos de microgravimetría con fines arqueológicos en Venezuela. Entre ellos destacan el estudio en San Rafael de Orituco, Edo. Guárico y las prácticas realizadas en la antigua posada La Venta, ubicada en el Camino de los Españoles, en Caracas (N. Orihuela, comunicación personal, octubre 2017).

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO, HISTÓRICO Y ARQUEOLÓGICO

2.1. GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL

El área de estudio se ubica en la Asociación Metasedimentaria Caracas, específicamente en una de sus dos unidades constitutivas, el Esquistos de Las Mercedes. Dicha unidad consta de filitas, esquistos grafitosos, niveles menores de metareniscas y cuerpos carbonáticos mayormente calcíticos (Urbani, 2002). Debido a la escala de detalle requerida para esta investigación, se tomará en cuenta que, en la Ciudad Universitaria de Caracas, la Formación Las Mercedes actúa como el basamento geotécnico en donde se depositaron sedimentos cuaternarios (Acero y Domínguez, 2005; González, 2011).

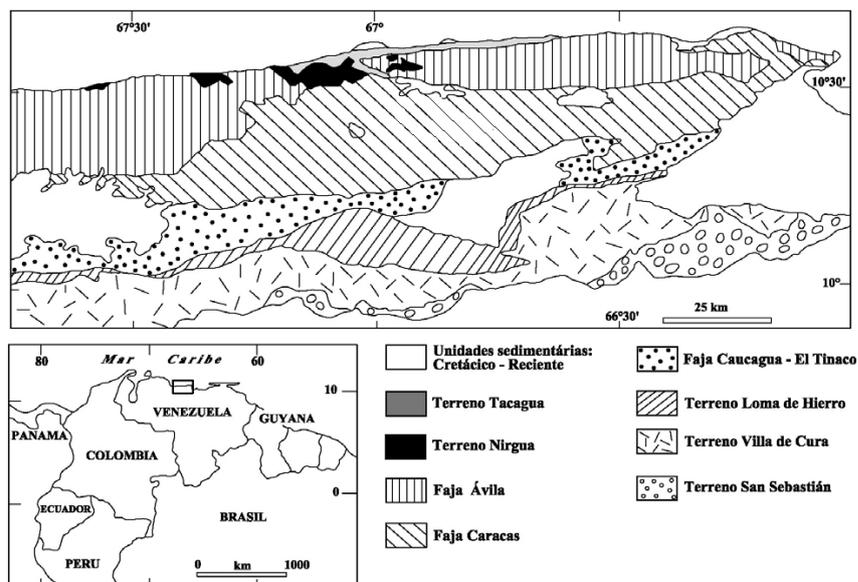


Figura 2.1. Mapa geológico de la Cordillera de la Costa mostrando a los esquistos de las Las Brisas, Las Mercedes y Chuspita, ubicados en la Faja Caracas (Modificado de Urbani *et al.*, 2012).

Los suelos de la Universidad Central son en general de relleno con sedimentos que ocupan los primeros 6,2 m y cuya roca de origen es el esquisto cuarzo – micáceo, caracterizado por una secuencia de gravas, arenas, arcillas y limos. La Casona Ibarra se encuentra ubicada en una unidad caracterizada por arcillas de baja plasticidad y baja plasticidad arenosa, las cuales son materiales finos representados por coluviones (materiales sueltos y heterogéneos depositados por derrubios de gravedad); los afloramientos presentes en sus cercanías son de esquistos meteorizados (Acero y Domínguez, 2005).



Figura 2.2. Muestra de esquisto meteorizado del tipo cuarzo-micáceo tomada en las cercanías de la Casona Ibarra (Acero y Domínguez, 2005).

2.2. CONSIDERACIONES HISTÓRICAS

La Casona de la antigua Hacienda Ibarra fungía como la vivienda del propietario de esta hacienda. Ubicada en la parte más elevada del terreno para visualizar los cultivos y aprovechar los vientos, esta edificación alojaba tanto al propietario como al mayordomo, a los esclavos y a los trabajadores libres. Hoy en día esta construcción es la viva representación de lo que antes fuera una importante hacienda utilizada para la siembra de la caña de azúcar y la producción del “Aguardiente Ibarra” (Velasco, 2004).

La Casona ha sufrido desde su construcción modificaciones surgidas de las necesidades de ajuste o acoplamiento a diferentes usos y condiciones del momento (Del Castillo, 2008). Una hipótesis evolutiva sólida a nivel arquitectónico y

estructural hecha por Velasco (2004) y, posteriormente, Del Castillo (2008), organizó los hechos más trascendentales a través de síntesis y planos generados por Del Castillo (2008), los cuales muestran los cambios más resaltantes ocurridos en la edificación:

A) Principios del Siglo XVIII:

Para esta época la casa grande consta de una distribución sencilla, con habitaciones, cocina, un salón principal, un patio para la faena animal y construida con techos de teja y madera. Cabe destacar también el nacimiento del Dr. Francisco de Ibarra y Galindo, Arzobispo de Venezuela y rector de la Universidad de Caracas.

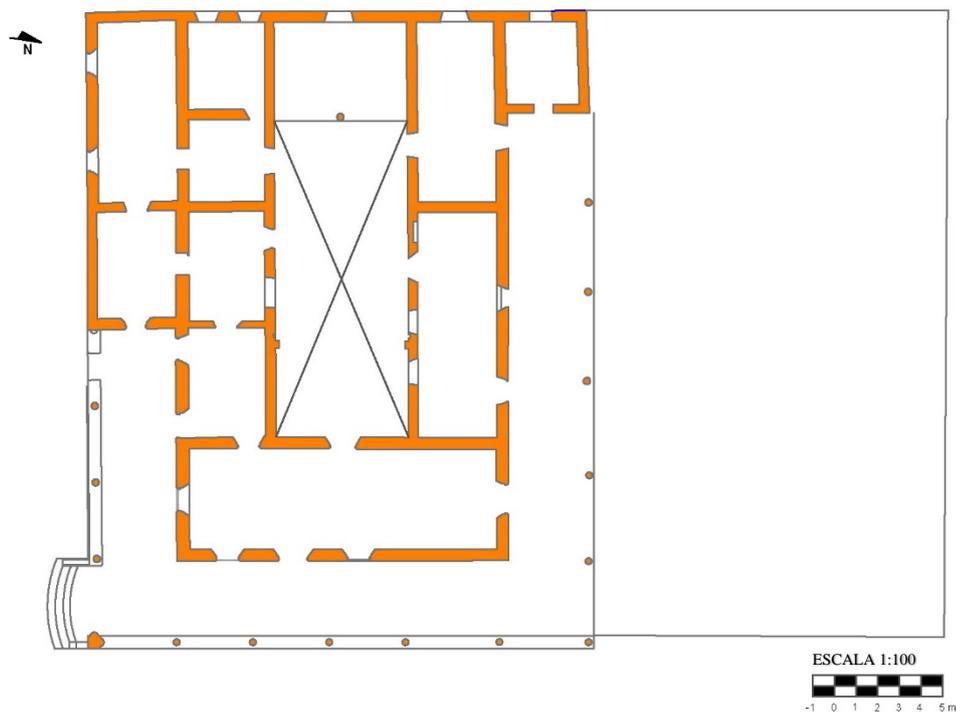


Figura 2.3. Plano de la Casona para el Siglo XVIII (Modificado de Del Castillo, 2008).

B) Entre 1730 y 1830:

El Registro Principal contiene el documento de propiedad más antiguo conseguido hasta la actualidad: el título de propiedad del año 1744 perteneciente a doña María Petronila de Ibarra. Posteriormente dicho título pasaría por varios propietarios hasta

llegar a las manos de don Diego de Ibarra y Rodríguez del Toro, primo del Libertador Simón Bolívar. Una reestructuración de la casa principal debido a la falta de mantenimiento con la adición de un oratorio y la elevación de nuevas paredes hacia el área de las caballerizas (antes jardines abiertos) fue realizada. En 1799 ocurre el nombramiento de Francisco de Ibarra como Obispo de Caracas (posteriormente Arzobispo de Venezuela en 1804) y la presunta visita de Alejandro de Humboldt a la casa luego de su viaje por la entonces Provincia de Cumaná. Otros eventos de importancia son los nacimientos de los edecanes del Libertador Diego y Andrés Ibarra, así como su hospedaje en 1827 por un lapso de seis meses con fines estratégicos en los cuales discutió y decretó junto a José María Vargas la Reforma de la Universidad de Caracas.

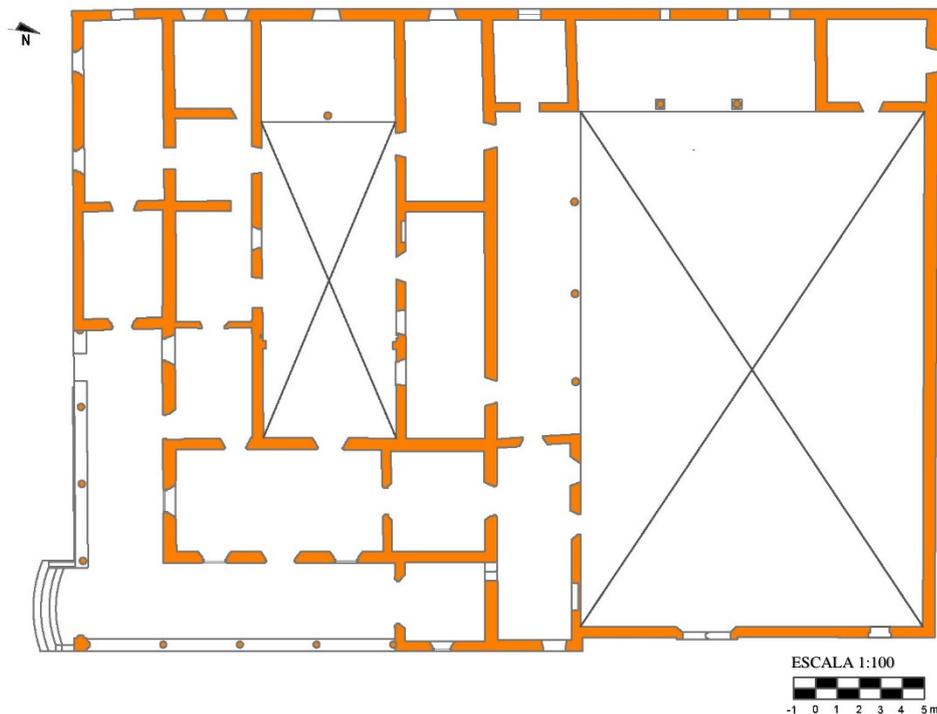


Figura 2.4. Plano de la Casona entre 1730 y 1830 (Modificado de Del Castillo, 2008).

C) Entre 1830 y 1930:

En 1852 la casa llega a las manos de Vicente de Ibarra y Mutis luego de la muerte de su padre, Diego de Ibarra y Rodríguez del Toro. La misma sufrió nuevas

modificaciones dejándola en el estado que es visible en la actualidad. Estas constaron de cambios en la distribución habitacional y social para la mejora de la calidad de vida de los residentes y la implementación de tecnologías debido al desarrollo agrícola, las cuales permitieron una mayor producción de aguardiente. Cabe acotar también los levantamientos topográficos para el lugar realizados por Ricardo Zuloaga en 1885.

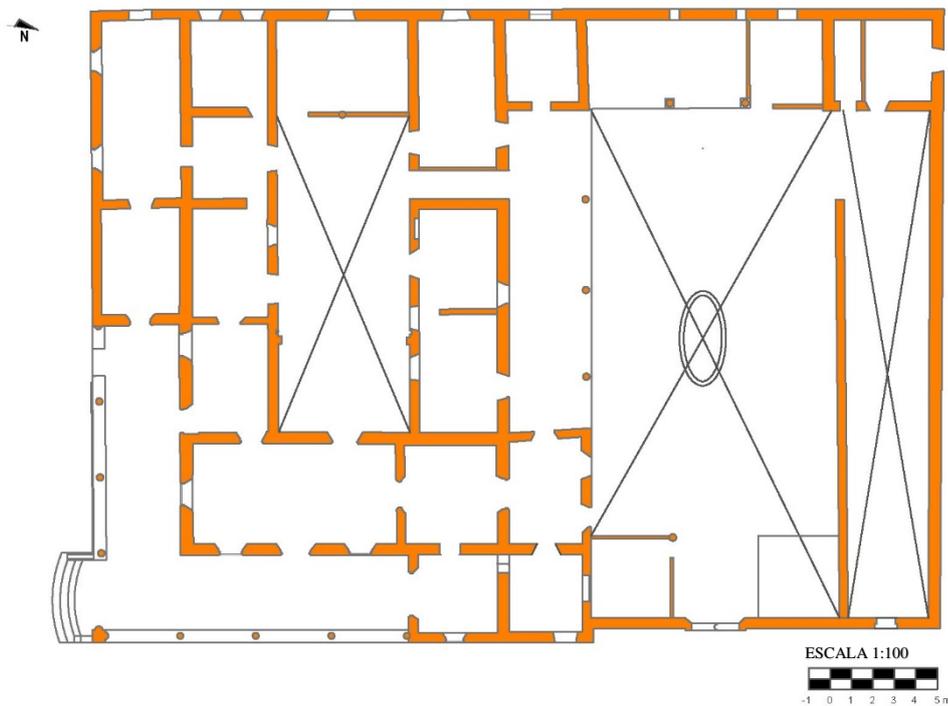


Figura 2.5. Plano de la Casona entre 1830 y 1930 (Modificado de Del Castillo, 2008).

D) Entre 1930 y 1943:

Se agregaron los techos a la zona de las caballerizas y se diseñaron otras construcciones para el apoyo en la producción de la caña de azúcar. Para 1932 la hacienda alcanza su esplendor en la producción de aguardiente, manteniendo este ritmo hasta 1943. Para este momento, el gobierno de Isaías Medina Angarita compró los terrenos de la hacienda, los cuales ocuparían la futura Ciudad Universitaria; se crea también el Instituto Ciudad Universitaria el cual se encargaría de coordinar y administrar la construcción de las distintas obras del campus.

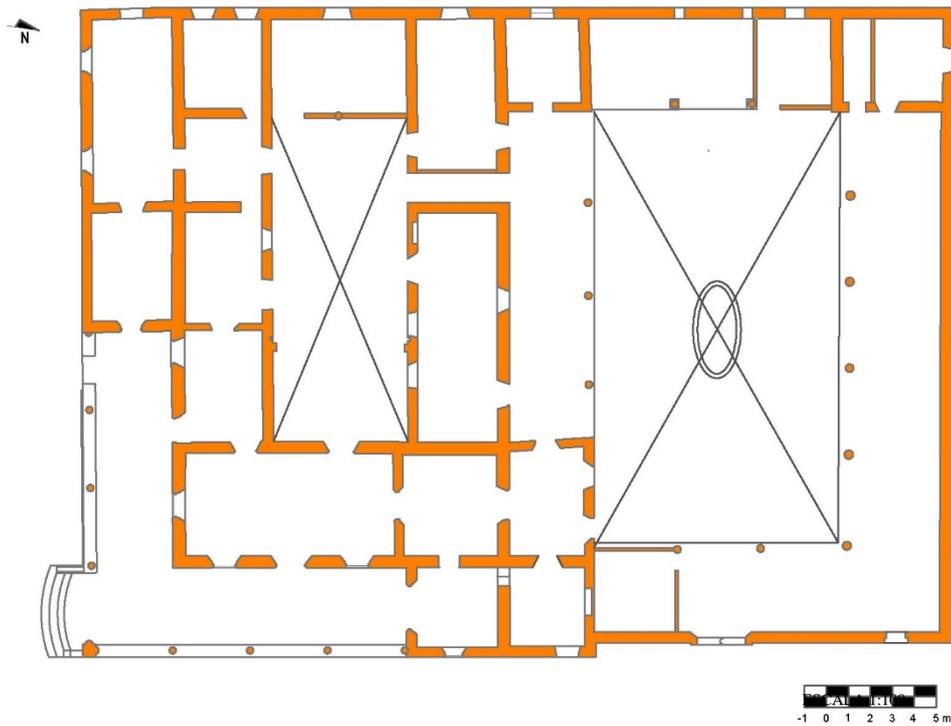


Figura 2.6. Plano de la Casona entre 1930 y 1943 (Modificado de Del Castillo, 2008).

E) Entre 1943 y 1958:

En 1953 se inauguró de forma oficial la Ciudad Universitaria de Caracas y se dieron algunas modificaciones internas destinadas a los dibujantes y computistas relacionados con el Instituto Universitario de Caracas. En 1954 se demolió el edificio del Trapiche de la Hacienda Ibarra, el cual albergaba los laboratorios de producción del Aguardiente Ibarra. Para 1958, y luego de la caída del régimen de Marcos Pérez Jiménez, la Casona pasa a ser propiedad de la Universidad Central de Venezuela por decreto gubernamental.

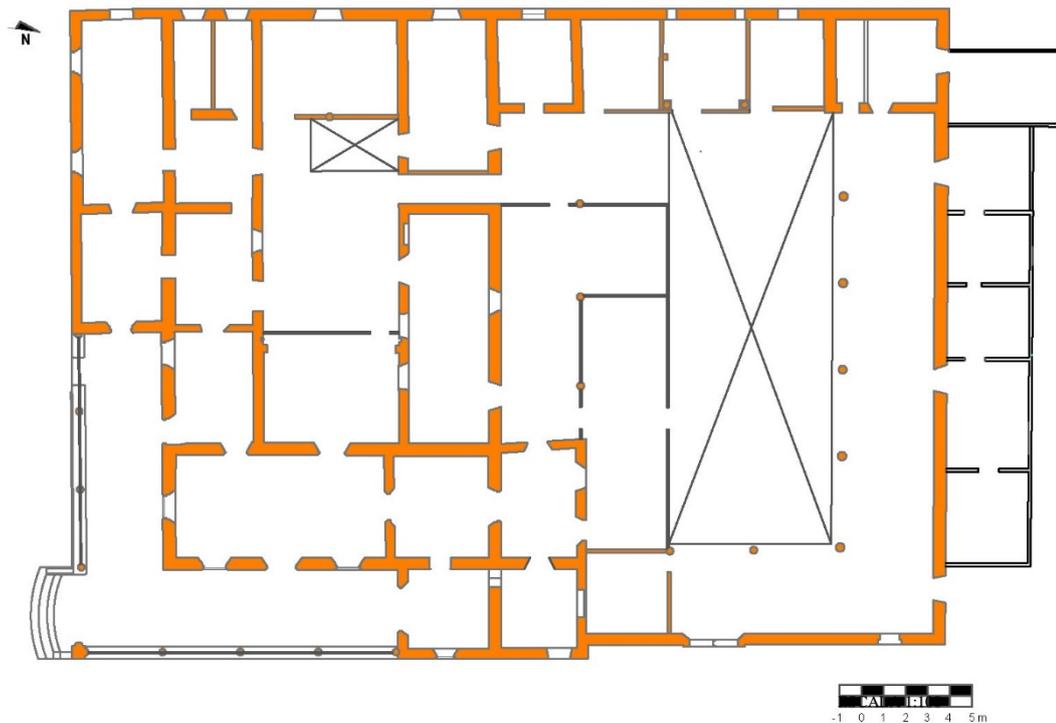


Figura 2.7. Plano de la Casona entre 1943 y 1958 (Modificado de Del Castillo, 2008).

F) Entre 1958 y 2004:

A pesar de su declaración como Monumento Histórico Nacional en 1970 y el ordenamiento en 1971 para su restauración y conversión en Museo, es un período en el cual se dan la mayor cantidad de modificaciones en el interior de la Casona con una intervención agresiva e intensa la cual comprometió su conservación. Dicho proceso, el cual se mantuvo hasta el 2004, se caracteriza por la ocupación de los empleados de Servicios Generales y Mantenimiento de la UCV, adicionando áreas de sanitarios y servicios, colocando techos livianos, sobrepesos, instalando equipos, mobiliarios, sistemas, tabiquerías, anexos y galpones.

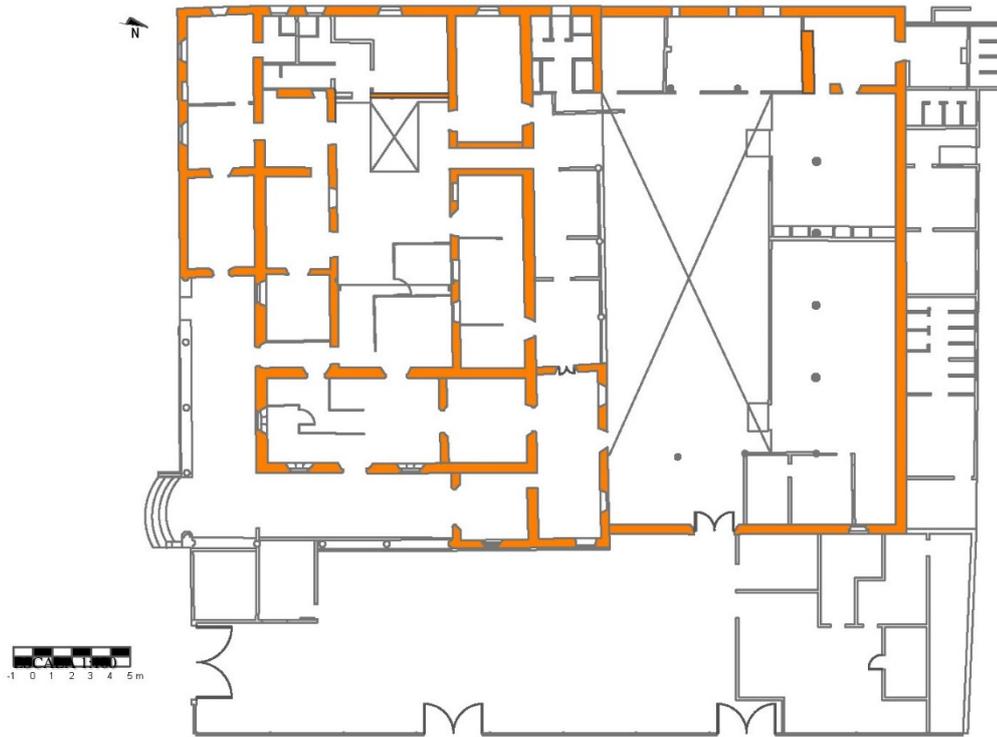


Figura 2.8. Plano de la Casona entre 1958 y 2004 (Modificado de Del Castillo, 2008).

G) Entre 2004 y 2008:

Posterior a la declaración de la Ciudad Universitaria de Caracas como Patrimonio Mundial por parte de la UNESCO, se da la creación del Consejo de Preservación y Desarrollo de la Universidad Central de Venezuela (COPRED) con el objetivo de gestionar y preservar tanto a la Ciudad Universitaria como a la Casona, logrando la desocupación de esta en el 2004. A partir de este momento se realizaron las labores de liberaciones y demoliciones de los elementos sin valor dentro de la edificación con la dirección de la arquitecta Fabiola Velasco y con el debido conocimiento por parte del Instituto del Patrimonio Cultural (IPC). Este proceso es el que trajo la apariencia que desde el 2008 posee este lugar.

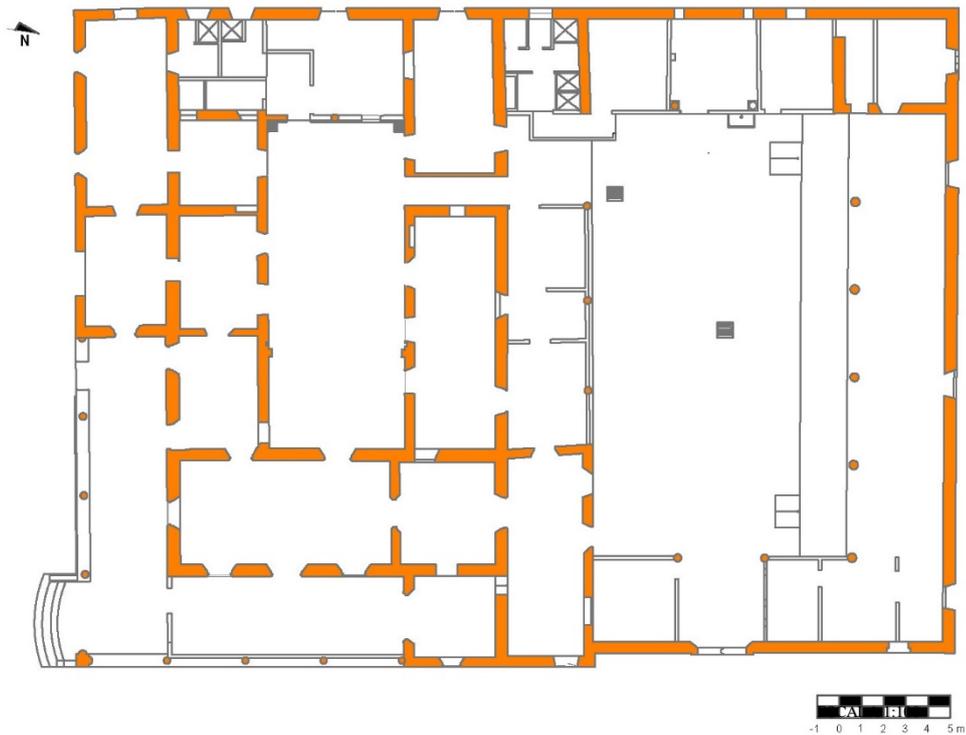


Figura 2.9. Plano actual de la Casona (Modificado de Del Castillo, 2008).

2.3. CONSIDERACIONES ARQUEOLÓGICAS

Molina y Amodio (2008) expusieron que debido al incremento paulatino en los estudios arqueológicos y antropológicos en Caracas con resultados satisfactorios y con aportes a la recolección de cultural material, esta edificación representa una oportunidad para aportar un conocimiento a la evolución de la ciudad así como también permitiría la localización de estructuras importantes relacionadas tanto con la actividad doméstica como con la actividad agraria de sus ocupantes a lo largo de la historia. Con el fin de justificar dicha propuesta, los autores recurrieron al hecho de que las experiencias previas de investigación demostraron que, a través del estudio arqueológico e histórico de las antiguas haciendas azucareras de Caracas, se pueden obtener datos relevantes acerca de su funcionamiento, su construcción y sus actividades diarias. Esto al tener estrecha relación con la Casona, representa una oportunidad meritoria para el conocimiento histórico de la Universidad Central.

A pesar de que este proyecto no se ha ejecutado hasta la fecha debido a problemas presupuestarios, se procederá a explicar su estructuración. La principal tarea fue la

identificación de ocho (8) puntos de excavación o zonas de interés arqueológico para explorar acerca de la ocupación, uso y crecimiento de los espacios de la Casona (Figura 2.10). Seguidamente, se propusieron las limitaciones a este trabajo tales como la presencia del personal de Conservación de Obras de Arte o la existencia de archivos históricos en el lugar, los cuales presentaron dificultades para su desocupación temporal al momento de la adquisición.

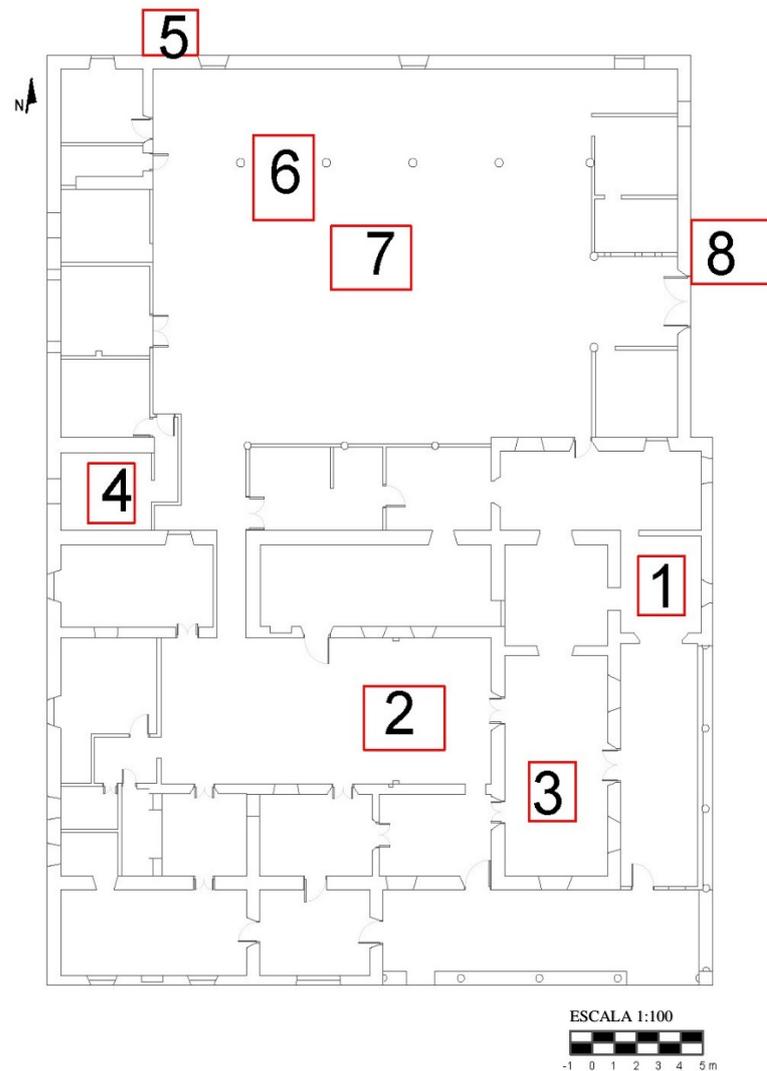


Figura 2.10. Plano con los ocho (8) posibles pozos de excavación asociados a zonas de interés arqueológico (Modificado de Molina y Amodio, 2008).

Posterior a este proyecto, Martín y Mosquera (2013) llevaron a cabo un nuevo trabajo con el objetivo de recolectar cultura material la cual proporcionó

información acerca de la vida en la Casona así como también de su ocupación colonial y republicana a lo largo de lo que es hoy el *campus* universitario. En este trabajo se delimitaron cinco (5) zonas de recolección desde la Casona hasta el Jardín Botánico con sistemas de cuadrículas de 1 m² para la recolección de hallazgos superficiales.

Los autores destacaron que se encontraron dos (2) piezas dentales que sugieren la necesidad de delimitar posibles zonas de enterramiento. Dichas piezas, pertenecientes a diferentes individuos con edades de entre los 20 y 40 años, mostraron signos de cálculo, de fractura, de posible bruxismo y de tabaquismo. Las piezas de cerámica tales como la Reyware, Gaudy Duth o Anular Ware, los botones de vestido elaborados en nácar, los huesos de ganado vacuno y los restos de fauna alimentaria los cuales, en conjunto con las piezas bucales, brindaron información acerca de las actividades sociales, tecnoeconómicas y cotidianas.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. MICROGRAVIMETRÍA

3.1.1. Concepto

La técnica de la microgravimetría consiste en medir las pequeñas variaciones que existen en la aceleración gravitatoria de la Tierra (del orden de varios μGal) debido a los cambios en la distribución de densidades de los materiales que componen el subsuelo, siendo aplicada principalmente en la detección de cavidades y contrastes de alta densidad. Típicamente las anomalías producidas por cavidades están entre 10 y 100 μGal (Wightman *et al.*, 2003; Peña, 2011).

Esta rama de la gravimetría tradicional nace en 1968, cuando la firma LaCoste & Romberg introdujo al mercado el gravímetro modelo D, con una precisión de 1 μGal , es decir, 1×10^{-6} Gal. Variadas adquisiciones de campo, técnicas de procesamiento y métodos de interpretación fueron realizados para utilizar la elevada sensibilidad de la prospección microgravimétrica, logrando su incorporación a las prospecciones petrolíferas. Otras aplicaciones de esta rama se encuentran en la prospección de oro, el mapeo a detalle de estructuras tectónicas y en arqueología (Blizkovsky, 1979; Lakshmanan y Montlucon, 1987). Debido a que la aceleración de gravedad varía por los cambios laterales de densidad en el subsuelo, las mediciones de la gravedad en este tipo de prospección deben ser adquiridas de forma precisa y deben contar también con correcciones adecuadas para lograr detectar anomalías relacionadas con vacíos creados por el hombre, variaciones en la profundidad de la roca madre y estructuras geológicas de interés en la ingeniería (Wightman *et al.*, 2003).

3.1.2. Fundamentos

El campo gravitatorio es un campo potencial de la Tierra que provee información de los materiales en el subsuelo de la misma. Posee líneas de fuerza direccionadas hacia el centro del planeta y debido a su naturaleza, su fuerza y su dirección dependen de la posición de observación, es decir, con el alejamiento de la fuente, la fuerza disminuye o viceversa (Lillie, 1999). Lo anterior se resume en la Ley de Gravitación Universal de Newton, la cual se define matemáticamente como

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

donde $G=6,673 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{Kg}^2$ y representa la constante gravitacional universal, r es la distancia entre las masas m_1 y m_2 .

Como la aceleración gravitacional solo depende de las características intrínsecas de la Tierra, la Ecuación 3.1 debe ser igualada con la Segunda Ley de Newton ($F = m \cdot a$), quedando que

$$g = \frac{GM}{R^2} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

donde g representa la aceleración gravitacional en la superficie de la Tierra, M su masa y R la distancia del punto de observación al centro de masas del planeta.

Las unidades oficiales del Sistema Internacional utilizadas para estudiar la aceleración gravitacional son el Gal, el mGal y el μGal (Pasteka y Götze, 2009)

$$1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2 = 0,001 \text{ Gal}$$

$$1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2 = 0,001 \text{ mGal}$$

3.1.3. Consideraciones en la prospección

Una estricta organización previa en conjunto con una ardua recolección de información de diversa índole son necesarias para contar así con la mayor cantidad posible de detalles acerca del lugar de trabajo, sus condiciones, el espacio disponible e inclusive, las leyes que protejan al lugar en caso de ser un bien cultural. Como parte de dicha organización, las consideraciones que se explicarán a continuación deberán ser tomadas en cuenta:

A) Grilla o mallado: debido a que la escala del problema en microgravimetría es generalmente pequeña, tanto los levantamientos gravimétricos convencionales como los aplicados en la exploración petrolífera son inadecuados, por lo que se requiere de una preservación en la precisión con el fin de detectar y analizar objetos de entre 1 y 10 m en tamaño, sin embargo, la interpretación estará limitada por la ambigüedad y la asunción de la homogeneidad debido a que una pequeña masa a poca profundidad puede llegar a producir el mismo efecto que una masa de mayor volumen a mayor profundidad (Wightman *et al.*, 2003).

La prospección gravimétrica en arqueología debe ser especialmente precisa debido a que las anomalías gravitatorias locales en edificaciones antiguas pueden ser tan pequeñas como 30 o 40 μGal (Slepek, 1997). Generalmente la grilla o mallado suele contener estaciones separadas a 1 m de distancia, cuyas coordenadas son obtenidas utilizando estaciones totales automatizadas, cubriendo áreas de distintas escalas, por ejemplo, 25 m² con estaciones separadas a 1 y 2,5 m (Slepek, 1997); 600 m² con un total de 460 puntos separados a 1 m (Pasteka y Zahorec, 2000); aproximadamente un área de 300 m² con un total de 258 estaciones separadas a 1 m (Panisova *et al.*, 2013) y 165 m² con un total de 351 estaciones, algunas separadas a 1 m y otras a 0,5 m (Panisova *et al.*, 2016).

B) Control de la deriva y control estadístico: para el gravímetro *Scintrex CG-5* la baja deriva es el resultado de un ambiente operacional para el sistema elástico de cuarzo extremadamente estable, el cual permite predecir con precisión el comportamiento a largo plazo de su sensor (*long-term drift*); además, este instrumento cuenta con correcciones automáticas por efecto de mareas, por deriva

instrumental estática, por inclinaciones o por temperatura (Scintrex Limited, 2012; Arocha, 2014). A pesar de esto, una incorrecta descripción de la deriva podría causar errores importantes en el procesamiento de los datos, generando así falsas anomalías que se pueden confundir con las anomalías reales (Pasteka y Zahorec, 2000).

Es por lo antes mencionado que en la adquisición diaria se debe controlar la deriva de corto plazo (*short-term drift*) seleccionando una estación base estable en la cual los circuitos serán iniciados y cerrados de forma regular durante intervalos de 40 a 60 minutos a lo largo de la adquisición, agregando a esto una repetición aleatoria de cierto porcentaje de las estaciones regulares (entre un 10 y 20% del total) y también un análisis estadístico de diferentes días con el fin de estudiar la precisión y repetibilidad del gravímetro (Pasteka y Zahorec, 2000; Panisova y Pasteka, 2009; Panisova *et al.*, 2013, 2016).

C) Control de alturas: con el propósito de reducir la lectura gravimétrica al nivel de marca en el suelo, el gradiente teórico de $308,6 \mu\text{Gal}$ por 1 m de altura debe ser utilizado ($1 \mu\text{Gal}$ por cada 3,24 mm) y, además, se debe medir cuidadosamente la altura al instrumento por encima del nivel de la estación (Padín *et al.*, 2012). Para lograr esto, la microgravimetría se vale de la utilización de estaciones totales y niveles automatizados, los cuales permiten obtener la diferencia de cota relativa existente entre la base seleccionada y las estaciones regulares con precisiones en escala milimétrica, por ejemplo, 1 mm de precisión (Panisova y Pasteka, 2009), 13 mm de precisión (Panisova *et al.*, 2013), 4 mm de precisión (Panisova *et al.*, 2016).

D) Efectos de las edificaciones y estructuras: cuando una adquisición es llevada a cabo en el interior de una edificación, las estructuras creadas por el hombre disminuyen el valor medido de las estaciones más cercanas a las mismas debido a su atracción gravitatoria. Estos efectos pueden alcanzar severos o cientos de μGal y deben ser establecidos adecuadamente en conjunto con la topografía de la zona debido a que pueden ser mayores que la amplitud de las anomalías esperadas. La determinación del efecto gravitacional de las edificaciones hace única a la prospección microgravimétrica y debe ser tomada con particular precaución.

La mayoría de las edificaciones poseen una forma geométrica regular o se componen de ciertos elementos geométricos regulares tales como cilindros, esferas o rectángulos, por lo que la atracción que las mismas ejercen puede ser calculada a partir la sumatoria de prismas rectangulares o por la sumatoria de prismas de longitud finita con secciones transversales poligonales y de varios espesores. La precisión de esta corrección dependerá de la eficiencia del modelo digital de los elementos en las edificaciones, así como también de la adopción de valores promedio de densidad para las paredes, pilares, pisos o techos (Panisova y Pasteka, 2009, 2011; Padín *et al.*, 2012; Panisova *et al.*, 2016).

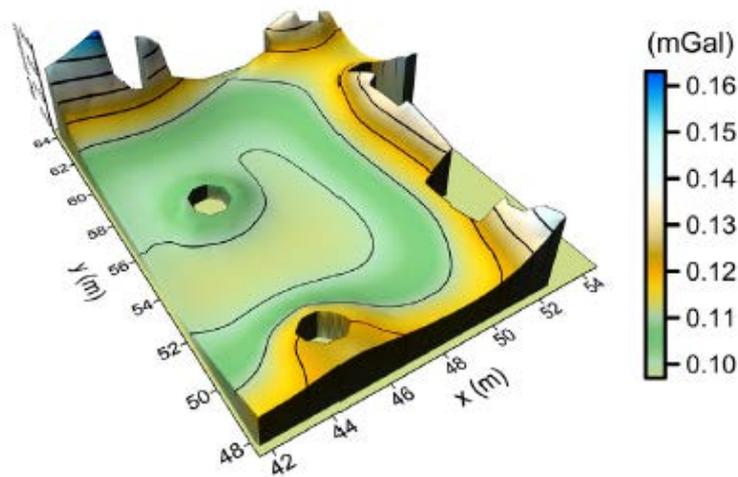


Figura 3.1. Corrección por pared calculada para una densidad promedio de 2.2 g/cm³ (Modificado de Panisova *et al.*, 2016).

E) Anomalía de Bouguer: en el procesamiento de datos microgravimétricos se puede calcular directamente dicha anomalía de la forma siguiente

$$AB = G_{\text{obs}} - G_{\text{base}} - C_{\text{lat}} - C_{\text{atm}} + C_{\text{AL}} - C_{\text{B}} + C_{\text{T}} + C_{\text{P}} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

donde

G_{obs} y G_{base} → son la gravedad observada y la gravedad de la base.

C_{lat} → es la corrección por latitud (Padín *et al.*, 2012).

C_{atm} → es la corrección atmosférica (Hinze *et al.*, 2007).

$C_{AL} \rightarrow$ es la corrección de aire libre de segundo orden, agregando a la misma la diferencia en metros existente entre Δh (elevación de cada estación en la posición del sensor del gravímetro CG-5, es decir, unos 26 cm aproximadamente) y el nivel de referencia (elevación de la base) (Hinze *et al.*, 2007; Padín *et al.*, 2012; Panisova *et al.* 2013, 2016; Panisova y Pasteka, 2009).

$C_B \rightarrow$ es la corrección de Bouguer de segundo orden, tomando en cuenta la densidad promedio de los materiales en la zona de estudio, el efecto por la curvatura de la Tierra y la diferencia en metros entre cada estación y la base (Hinze *et al.*, 2007; Padín *et al.*, 2012; Panisova *et al.* 2013, 2016; Panisova y Pasteka, 2009).

$C_T \rightarrow$ es la corrección topográfica (Panisova *et al.*, 2016).

$C_P \rightarrow$ es la corrección por pared (*wall correction*), la cual se debe tomar en cuenta al momento de medir en el interior de las mismas, así como en otras estructuras (Padín *et al.*, 2012; Panisova y Pasteka, 2009; Panisova *et al.*, 2016). Panisova y Pasteka (2011), en base a la información provista por Götze y Lahmeyer (1988), exponen que la misma se basa en el efecto gravitacional causado por un poliedro y la superposición de sus superficies individuales (triángulos), quedando expresado de la forma siguiente

$$g_z(P) = \kappa\sigma \sum_{k=1}^K \cos(n_k, z) \sum_{i=1}^3 \left[w_{k,i} \ln \frac{v_{k,i} + A}{u_{k,i} + B} + \frac{|z_k|}{|w_{k,i}|} \left(\arctan \frac{v_{k,i}|z_k|}{|w_{k,i}|A} - \arctan \frac{u_{k,i}|z_k|}{|w_{k,i}|B} \right) + 2\pi|z_k|\delta \right] \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

$$\text{con } A = \sqrt{v_{k,i}^2 + w_{k,i}^2 + z_k^2}; \quad B = \sqrt{u_{k,i}^2 + w_{k,i}^2 + z_k^2} \quad ; \quad \delta = \begin{cases} 0 & \notin S_k \\ 1, & \text{si } P_{\perp} \in S_k, \\ \varepsilon & \in \partial S_k \end{cases} \quad 0 < \varepsilon < 1;$$

$u_{k,i}$, $v_{k,i}$, $w_{k,i}$ y z_k como las coordenadas cartesianas transformadas del punto P al sistema local de coordenadas de cada triángulo; k como el índice de los triángulos; i como el índice de elementos del triángulo; el coseno como determinante de la componente z de $g(P)$; κ como la constante gravitacional y σ como una densidad constante. S_k es el área superficial del poliedro y n_k la normal de la misma.

F) Cuerpos que generan anomalías en el orden del μGal : estos pueden ser estudiados a partir de la descripción hecha por Lillie (1999) para un cuerpo geométrico sencillo como lo es una esfera (Figura 3.1). Se tiene que la anomalía producida por una esfera es

$$\Delta g_z = 0.02794 \cdot \Delta\rho \cdot R^3 \cdot \frac{z}{(X^2 + z^2)^{3/2}} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

donde Δg_z viene dada en mGal , $\Delta\rho$ viene dada en g/cm^3 , el radio R viene dado en metros, X representa la distancia horizontal en metros entre el punto de observación y un punto directamente por encima del centro de la esfera, y la letra z representará la distancia vertical en metros desde la superficie hasta el centro de la esfera.

El valor máximo de la anomalía ($\Delta g_{z\text{máx}}$) es alcanzado cuando el perfil de la misma es simétrico con respecto al origen y la profundidad (z) es tomada directamente desde el centro quedando que

$$\Delta g_{z\text{máx}} = 0,02794 \cdot \Delta\rho \cdot R^3 \cdot \frac{1}{z^2} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

La profundidad z puede ser encontrada a través de un perfil como el mostrado en la Figura 3.1 ya que $\Delta g_z = \Delta g_{z\text{máx}}/2$, $z = 1,3 \cdot x_{1/2}$, con $x_{1/2}$ como la mitad de la amplitud del perfil, es decir, la mitad del ancho en la mitad del valor máximo (Telford *et al.*, 1990).

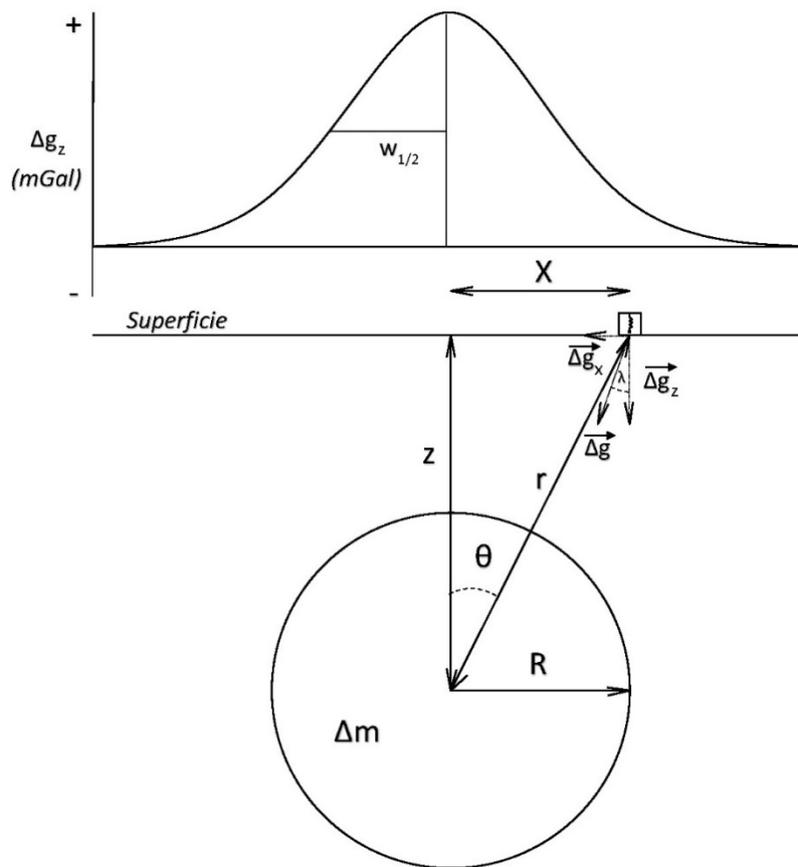


Figura 3.2. Gráfico demostrativo para la atracción que surge entre una esfera de masa anómala y un punto de observación (Modificado de Lillie, 1999).

Este es un modelo que implica propiedades fundamentales de las anomalías gravitatorias tales como:

- a) El incremento en la masa (Δm) implica un mayor contraste de densidades ($\Delta \rho$) y un aumento en la componente vertical (Δg_z). Caso contrario (déficit de masa), implicará un menor $\Delta \rho$ y una disminución de Δg_z .
- b) Una esfera mucho más masiva (mayor $\Delta \rho$ o mayor R) tendrá una anomalía de mayor amplitud ($|\Delta g_z|$).
- c) La anomalía se atenúa a medida que la profundidad hacia la esfera (z) aumenta, trayendo consigo una disminución de Δg_z .
- d) El ancho de la anomalía aumentará con el aumento de la profundidad hacia la esfera (z).

Para un rango de anomalías de Bouguer del orden del μGal se muestran a continuación tres (3) casos con tres (3) esferas en conjunto con su cálculo a partir de la Ecuación 3.6.

- a) Esferas con un mismo $\Delta\rho$ ($0,2 \text{ g/cm}^3$), mismo R ($0,5 \text{ m}$) y con z de $0,25 \text{ m}$ (negro); $0,5 \text{ m}$ (rojo) y 1 m (cian):

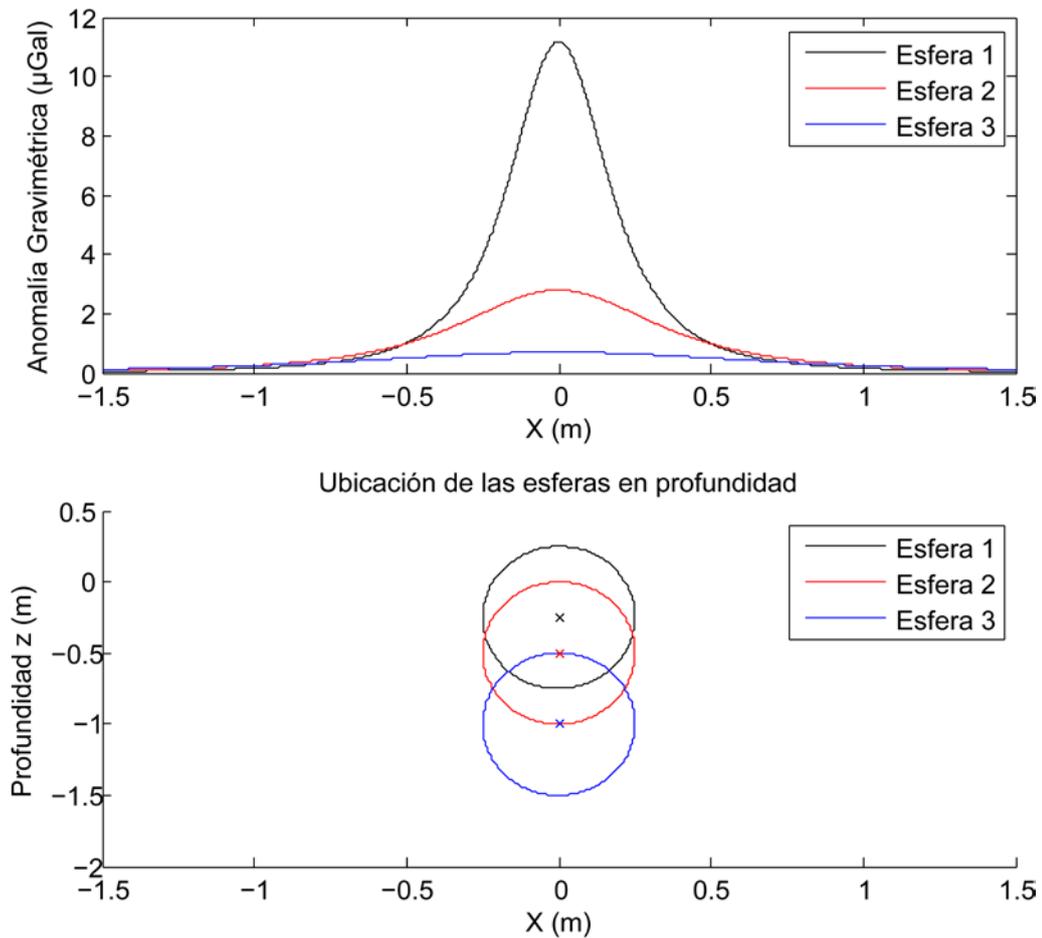


Figura 3.3. Anomalías de Bouguer de tres (3) esferas ubicadas a diferentes profundidades.

- b) Esferas con un mismo $\Delta\rho$ ($0,2 \text{ g/cm}^3$), mismo z ($0,5 \text{ m}$) y con R de $0,25 \text{ m}$ (negro); $0,5 \text{ m}$ (rojo) y 1 m (cian):

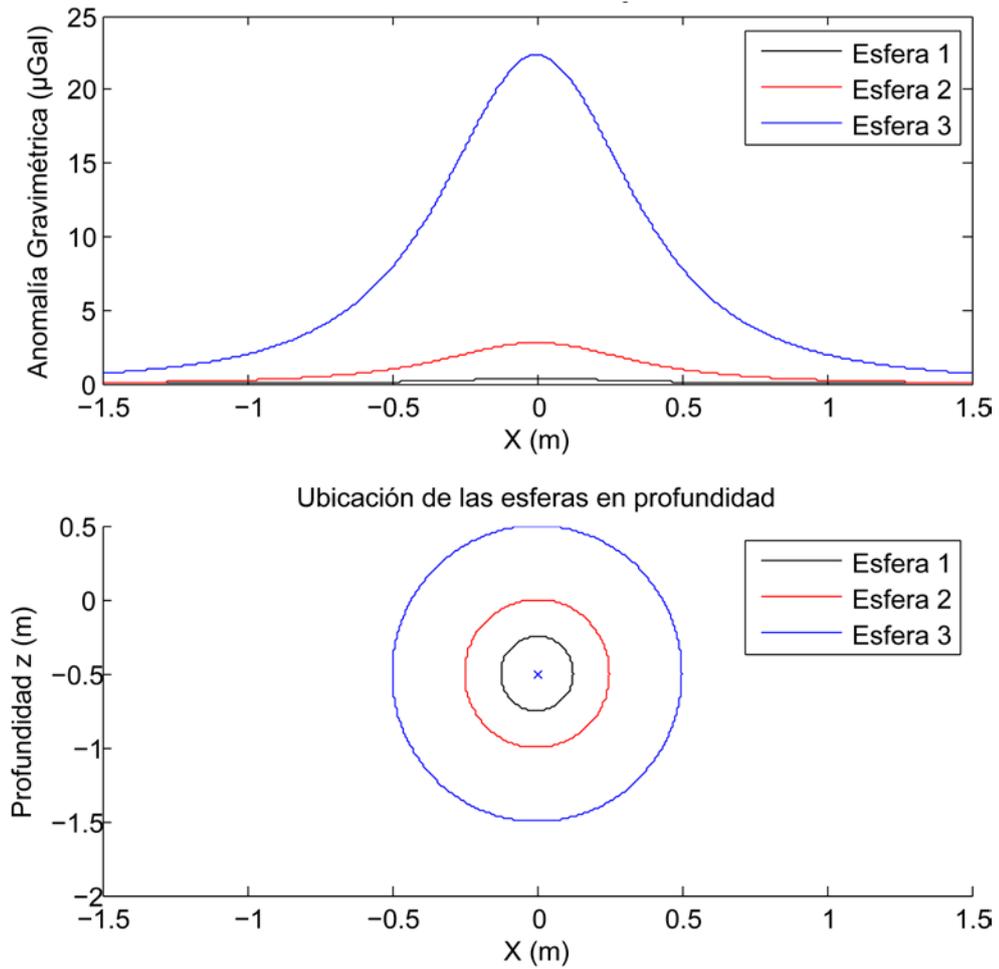


Figura 3.4. Anomalías de Bouguer de tres (3) esferas con diferentes radios.

- c) Esferas con un mismo R (0,5 m), mismo z (0,5 m) y $\Delta\rho$ de $0,2 \text{ g/cm}^3$ (negro); $0,3 \text{ g/cm}^3$ (rojo) y $0,4 \text{ g/cm}^3$ (cian):

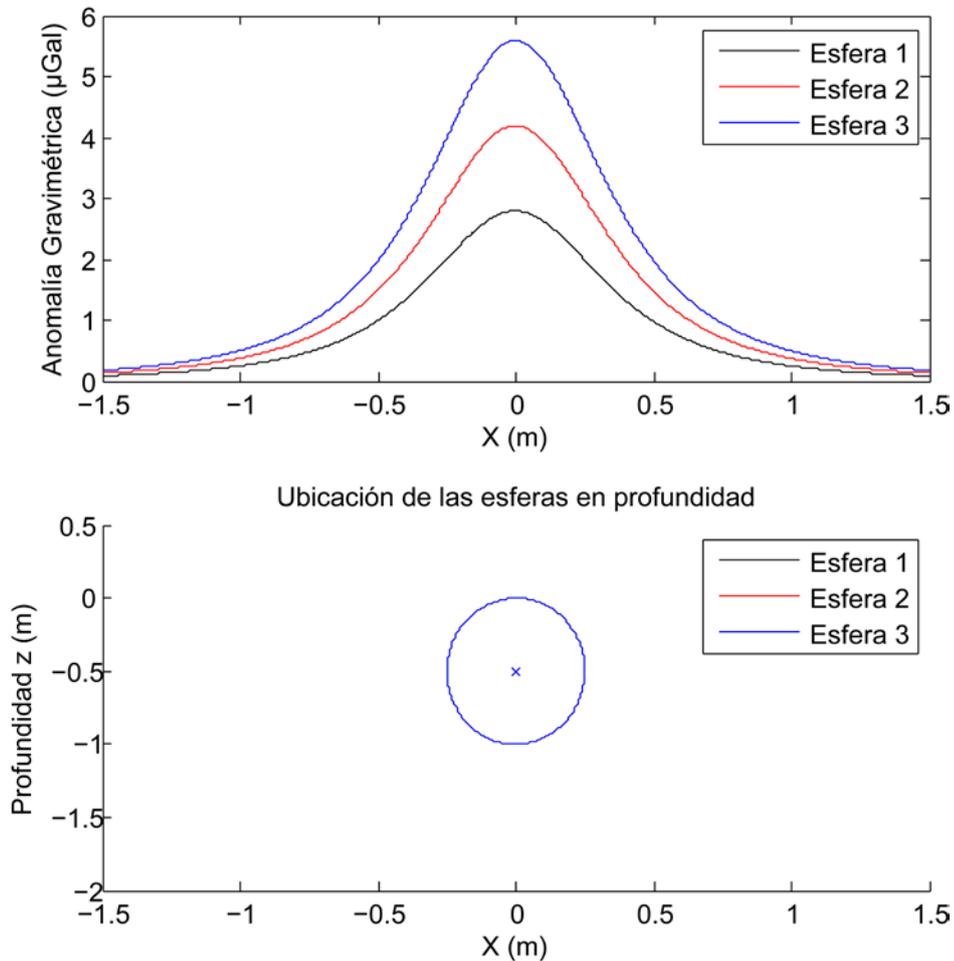


Figura 3.5. Anomalías de Bouguer de tres (3) esferas con diferentes contrastes de densidad ρ .

Estas tres (3) situaciones demuestran de forma ideal las dimensiones mínimas que debería tener un objeto emplazado a cierta profundidad y con cierto contraste de densidades con respecto del medio que lo rodea.

3.2. GPR (*GROUND PENETRATING RADAR*)

3.2.1. Concepto

El georadar o GPR es una técnica que permite la detección de estructuras enterradas en el subsuelo empleando ondas electromagnéticas, típicamente entre los 1 y 1000 MHz. Su principio básico es la transmisión en profundidad de un pulso electromagnético de corta duración con una frecuencia específica, grabando la energía reflejada en función del tiempo, amplitud y fase. Las principales

propiedades de los materiales que producen variaciones en las ondas electromagnéticas son la permitividad dieléctrica, la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética. Su velocidad viene dada por:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

donde c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s), μ_r es la permeabilidad magnética relativa y ϵ_r es la permitividad dieléctrica relativa (Annan, 2001; Kearey *et al.*, 2002; Kirsch, 2006; Benedetto y Pajewski, 2015).

Los sistemas GPR son conceptualmente simples, ya que su objetivo es el medir la amplitud del campo (ondas electromagnéticas) versus el tiempo luego de la excitación. Constan de una unidad de tiempo, la cual controla la generación y detección de señales. La mayoría de los GPR operan en el dominio del tiempo, sin embargo, las mediciones en el dominio de la frecuencia son mucho más utilizadas en la actualidad para sintetizar la respuesta en tiempo (Jol, 2009).

El sistema de radar hace que la antena transmisora (Tx) genere un tren de ondas que se propagan en un amplio haz. Debido a que las ondas de radio viajan a altas velocidades (300.000 km/s o 0,3 m/ns), el tiempo de viaje de las mismas desde su transmisión instantánea hasta su subsecuente regreso a una antena receptora (Rx) está en el orden de las décimas y centésimas de nanosegundos (10^{-9} segundos), por lo cual se requiere de una instrumentación precisa que mida dicho instante de tiempo de forma razonable. Estas antenas pueden ser utilizadas de forma monoestática (la antena funciona como transmisor y receptor) o de forma biestática (las antenas son separadas, una para la transmisión y otra para la recepción) (Figura 3.6) (Reynolds, 1997).

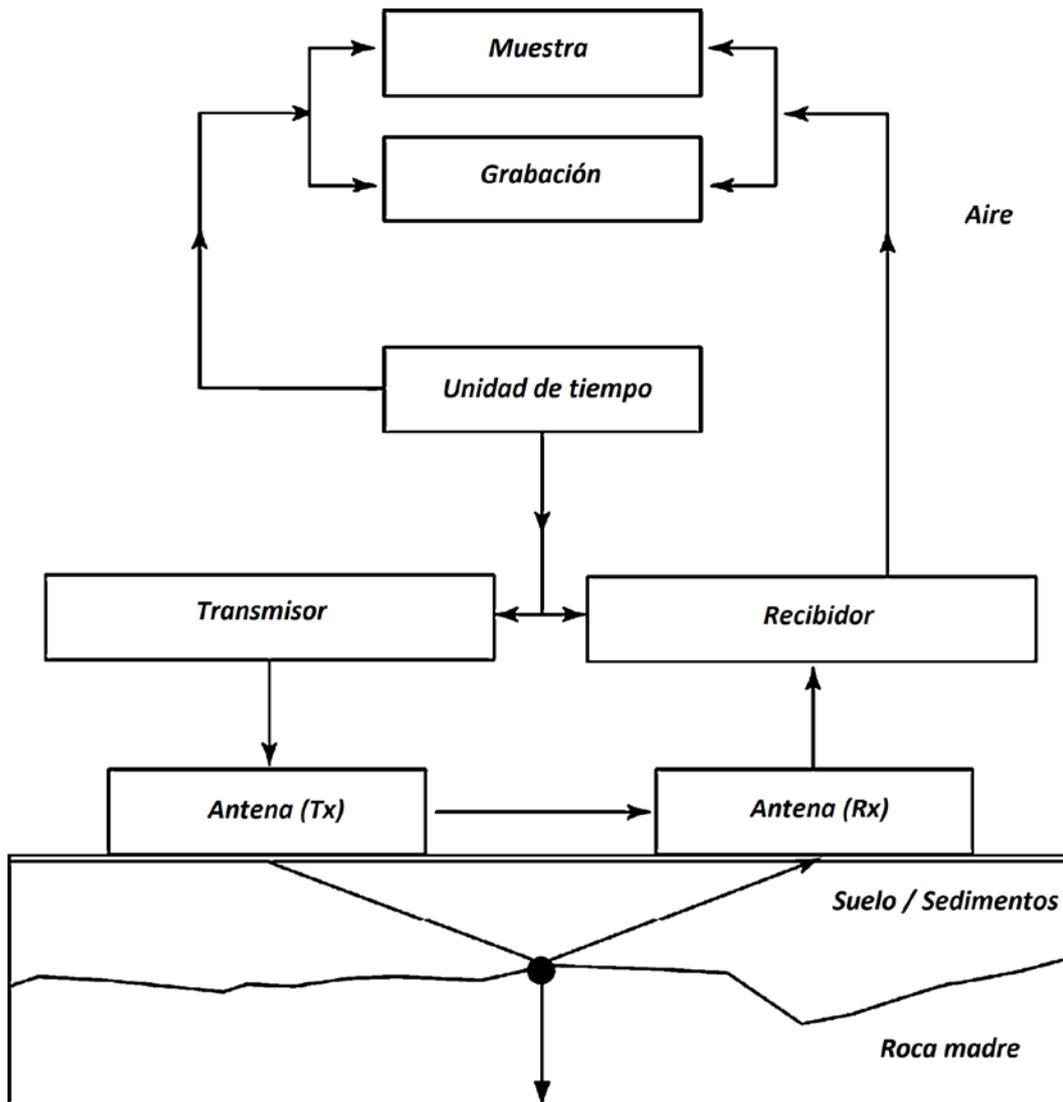


Figura 3.6. El diagrama de un sistema GPR y su funcionamiento (Modificado de Jol, 2009).

3.2.2. Fundamentos

Los métodos electromagnéticos utilizan la respuesta del suelo ante la propagación de ondas electromagnéticas incidentes, las cuales están constituidas por dos componentes vectoriales ortogonales entre sí; una de ellas es la intensidad eléctrica (E) y la otra es la fuerza magnética (H), ambas ubicadas en planos perpendiculares a la dirección de viaje (Figura 3.7). Un campo magnético puede ser generado al pasar una corriente alterna a través de una espiral comprimida (bobina) o también a través de un largo cable de trayectoria circular (Reynolds, 1997).

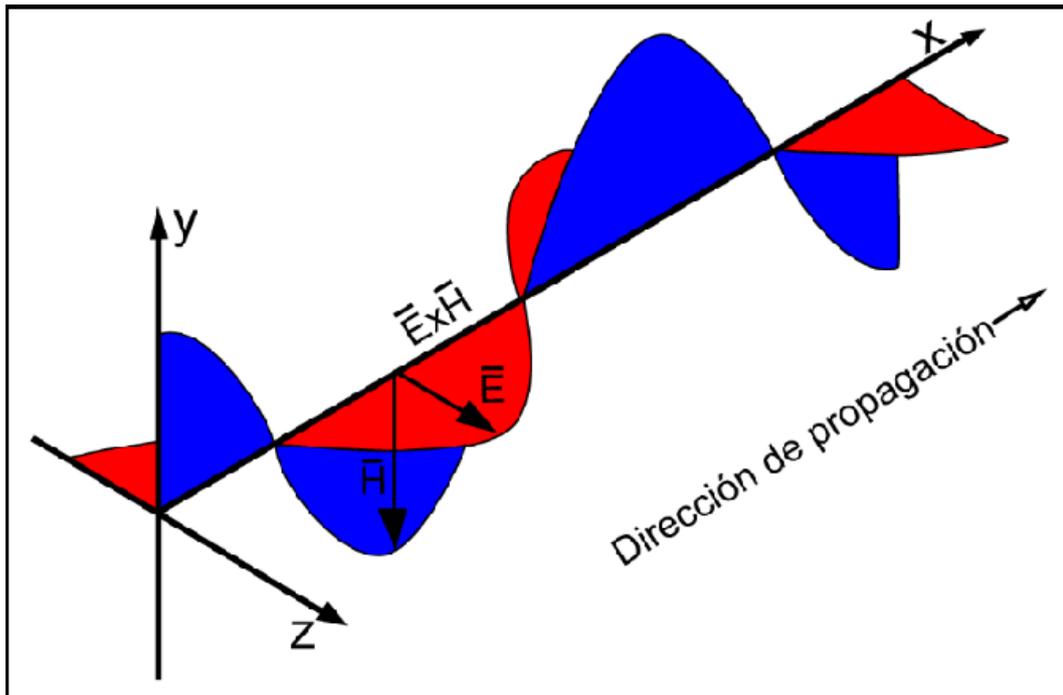


Figura 3.7. Elementos básicos de una onda electromagnética (Modificado de Reynolds, 1997).

El funcionamiento de estos métodos en general consta de un campo electromagnético que viaja desde una espiral transmisora a una receptora a través de caminos tanto por encima como por debajo de la superficie. Cuando el subsuelo es homogéneo y no existe diferencia entre los campos que se propagan tanto por encima como a través del mismo, ocurre una ligera reducción en amplitud entre el campo original y el posterior. Sin embargo, la Figura 3.8 muestra que, al existir un cuerpo conductor, la componente magnética del campo electromagnético que penetra el suelo induce corrientes alternas en el mismo, las cuales generan un propio campo electromagnético (campo secundario) que viaja al receptor. El receptor responde posteriormente a las llegadas de los campos primario y secundario, los cuales diferirán tanto en fase como en amplitud con respecto al campo primario en solitario. Son estas diferencias las que proveen información acerca de la presencia del conductor, su geometría y sus propiedades eléctricas (Kearey *et al.*, 2002).

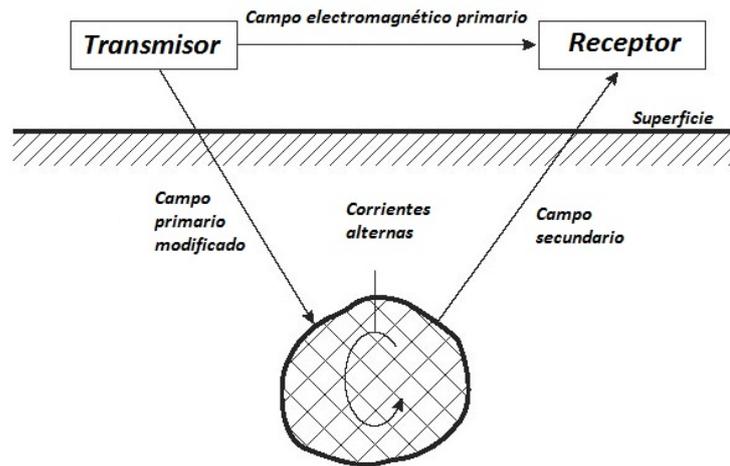


Figura 3.8. Principio general del funcionamiento de la prospección electromagnética (Modificado de Kearey *et al.*, 2002).

Las ecuaciones de Maxwell son las que describen la física de los campos electromagnéticos y las relaciones o ecuaciones constitutivas son las que cuantifican las propiedades de los materiales. La combinación de ambas provee los fundamentos para describir cuantitativamente las señales GPR. En términos matemáticos, los campos electromagnéticos y sus relaciones se expresan de la forma siguiente:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

donde \vec{E} es el vector del campo eléctrico (V/m) ; q es densidad de carga eléctrica (C/m^3); \vec{B} es el vector de densidad de flujo magnético; \vec{J} es el vector de densidad de corriente eléctrica (A/m^2); \vec{D} es el vector de desplazamiento eléctrico (C/m^2); t es el tiempo (s) y \vec{H} es la intensidad de campo magnético (A/m) (Jol, 2009).

Las relaciones o ecuaciones constitutivas son los medios utilizados para describir la respuesta de un material a los campos electromagnéticos; ellas proveen una descripción macroscópica (o comportamiento generalizado) de cómo los electrones, átomos y moléculas responden en masa ante la aplicación de un campo electromagnético. Para el GPR, las propiedades eléctricas y magnéticas son de importancia.

$$\bar{\mathbf{J}} = \tilde{\sigma} \bar{\mathbf{E}} \quad (\text{Ecuación 3.12})$$

$$\bar{\mathbf{D}} = \tilde{\epsilon} \bar{\mathbf{E}} \quad (\text{Ecuación 3.13})$$

$$\bar{\mathbf{J}} = \tilde{\mu} \bar{\mathbf{H}} \quad (\text{Ecuación 3.14})$$

La conductividad eléctrica $\tilde{\sigma}$ caracteriza el movimiento de las cargas libres (crean corriente eléctrica) cuando un campo eléctrico está presente. La permitividad dieléctrica $\tilde{\epsilon}$ caracteriza el desplazamiento de las cargas intrínsecas en la estructura del material ante la presencia de un campo eléctrico, el cual resulta en almacenamiento de energía en el material. La permeabilidad magnética $\tilde{\mu}$ describe la respuesta de los momentos magnéticos de los átomos y moléculas ante la presencia de un campo magnético. En la mayoría de las aplicaciones con GPR, basta con asumir la forma escalar y constante para ϵ , μ y σ , con ϵ y σ como las más importantes y, además, con el uso de la permitividad dieléctrica relativa como:

$$\kappa = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{Ecuación 3.15})$$

donde ϵ_0 es la permitividad en el vacío, $8,89 \times 10^{-12}$ F/m (Jol, 2009).

3.2.3. Consideraciones en la prospección

A) Grilla o mallado: las prospecciones GPR más comunes son las de reflexión, las cuales utilizan un transmisor y un receptor, aunque existen configuraciones múltiples para aplicaciones especializadas. El objetivo de la prospección GPR de reflexión es estudiar la reflectividad del subsuelo versus la posición espacial y usualmente son llevados a cabo en líneas rectas con sistemas diseñados para operar en dicha configuración. Para cubrir un área, se recurre más a menudo al diseño de una grilla o mallado rectilíneo (Figura 3.9) (Jol, 2009).

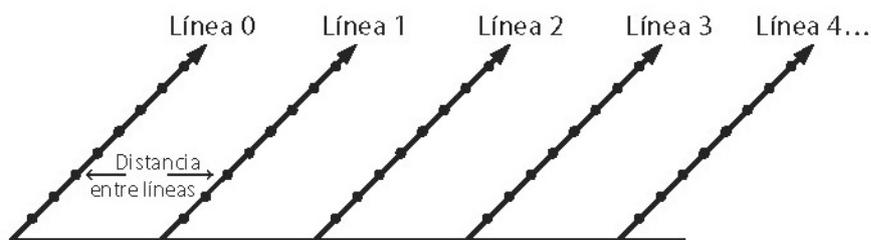


Figura 3.9. Área de adquisición con sus respectivas líneas (Modificado de Jol, 2009).

Los perfiles en el mado son definidos por líneas perpendiculares entre sí, cubriendo toda el área a investigar. El espaciado entre líneas suele ser fijo. En ocasiones, en los sectores que cuentan con un mayor interés puede aumentarse la densidad de líneas, por ejemplo, duplicarse para obtener un mayor detalle del subsuelo. La interpretación de los radargramas suele ser más sencilla en caso de las grillas rectangulares, aunque pueden existir grillas con líneas de distintas longitudes o con arreglos no ortogonales. El tamaño del espaciado entre líneas suele ser elegido en el orden de la resolución horizontal. Un espaciado menor produciría información redundante y uno mayor podría traer zonas sin muestreo. La localización de las grillas deben contar con localización precisa con referencias estables en el terreno, cintas métricas, teodolitos o GPS (Bonomo y de la Vega, 2006).

B) Resolución vertical y horizontal: la capacidad de diferenciar entre dos (2) señales que se hallan próximas en el tiempo es un concepto aplicable a la distinción de interfaces asociadas. Cuanto más cercanas las interfaces, más corto debe ser el pulso para resolver sus señales. Considerando un pulso de un solo período T, el valor de esta resolución lo da la siguiente expresión matemática:

$$\lambda = \frac{vT}{4} = \frac{v}{4f} \quad (\text{Ecuación 3.16})$$

con f como la frecuencia de radiación emitida y v como la velocidad de propagación promedio en el suelo. Esta fórmula indica que la resolución vertical disminuye cuando disminuye la velocidad de propagación en el medio, aumentando a su vez

con la frecuencia. Citando la Ecuación 3.4, se tiene que la resolución vertical es menor para ε y μ altas.

La discriminación de interfaces adyacentes en la dirección horizontal es la resolución horizontal. Se vincula directamente al ancho de la fuente con la profundidad, es decir, su huella. Cuanto más angosta, menor será la resolución horizontal y menor será la distancia entre dos objetos distinguibles. Caso contrario si es más amplia. Su expresión matemática aproximada es:

$$\lambda_h \cong \frac{v}{4f} + \frac{p}{\sqrt{\varepsilon+1}} \quad (\text{Ecuación 3.17})$$

con f como la frecuencia, v como la velocidad de propagación promedio, p como la profundidad de interfaz y ε como la permitividad relativa promedio del suelo. Esta relación muestra que la resolución horizontal mejora a medida que la frecuencia y la permitividad crecen (Bonomo y de la Vega, 2006).

C) Propiedades de los materiales: la profundidad de penetración de las ondas de radio dependerá de su frecuencia y de la naturaleza del material que está siendo estudiado (Figura 3.10) (Kearey *et al.*, 2002). Cuando el material es un no conductor, disminuye su comportamiento dieléctrico y contribuye con la absorción de las ondas de radio que viajan por el subsuelo. Caso contrario ocurre si el material es conductor, ya que la conductividad contribuirá a pérdidas intrínsecas (Tabla 3.1) (Reynolds, 1997).

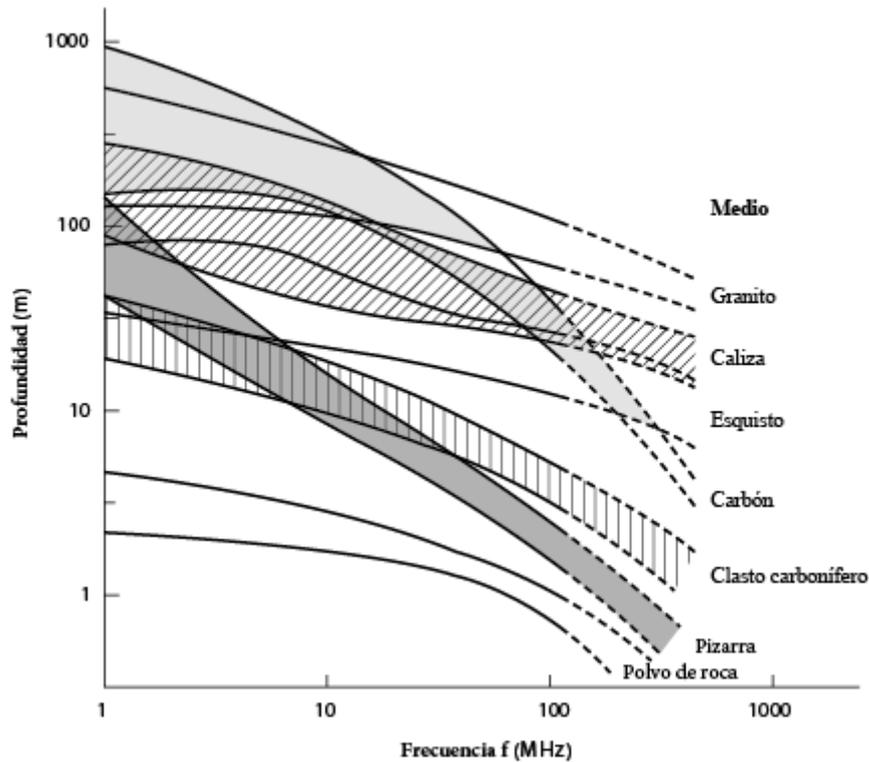


Figura 3.10. Relación de las frecuencias con la máxima profundidad para obtener información de diversos materiales (Modificado de Kearey *et al.*, 2002).

Tabla 3.1. Valores de diversas propiedades físicas para diferentes materiales (Modificado de Bonomo y de la Vega, 2006).

Material	Permitividad relativa ϵ	Velocidad de propagación v (m ns ⁻¹)	Conductividad σ (mS m ⁻¹)
Aire	1	0.3	0
Agua salada	80	0.033	3000
Agua dulce	80	0.033	0.5
Granito seco	5	0.13	0.01
Arena seca	5	0.13	0.01
Arcilla húmeda	10	0.095	500
Suelo:			
Arenoso seco	2.6	0.19	1.4
Arenoso húmedo	25	0.06	69
Arcilloso seco	2.5	0.19	2.7
Arcilloso húmedo	19	0.07	500
Congelado	6	0.12	0.1
Caliza lacustre	50	0.04	-
Estrato cultural bajo agua	70	0.04	-

D) Ancho de banda: el espectro de frecuencias que componen a una señal no consta de una única frecuencia sino que posee un continuo de frecuencias que ocupan todo un rango llamado ancho de banda. El valor que normalmente es denominado frecuencia central, dominante o principal corresponde a la posición del máximo de

dicha distribución de frecuencias. En general, cuanto menor es el ancho de banda, mayor es la extensión temporal del pulso, es decir, el mismo contiene una mayor cantidad de lóbulos. Contrariamente, cuanto más extensa es la banda de frecuencias que componen un pulso, el mismo es más corto, poseyendo menor cantidad de lóbulos.

Las antenas comerciales de radar, producen pulsos con frecuencias principales ubicadas en el rango 10 MHz a 1000 MHz. Aunque las distribuciones de frecuencias que componen los pulsos varían de antena en antena, como regla aproximada puede decirse que la mayoría de los sistemas de uso general poseen antenas cuyos espectros se extienden aproximadamente entre una frecuencia mínima igual a la mitad del valor de la frecuencia dominante y una frecuencia máxima igual a dos veces la misma. Por ejemplo, una antena de 400 MHz con estas características producirá energía dentro una banda que va desde los 200 MHz hasta los 800 MHz, aproximadamente (Figura 3.11) (Bonomo y de la Vega, 2006).

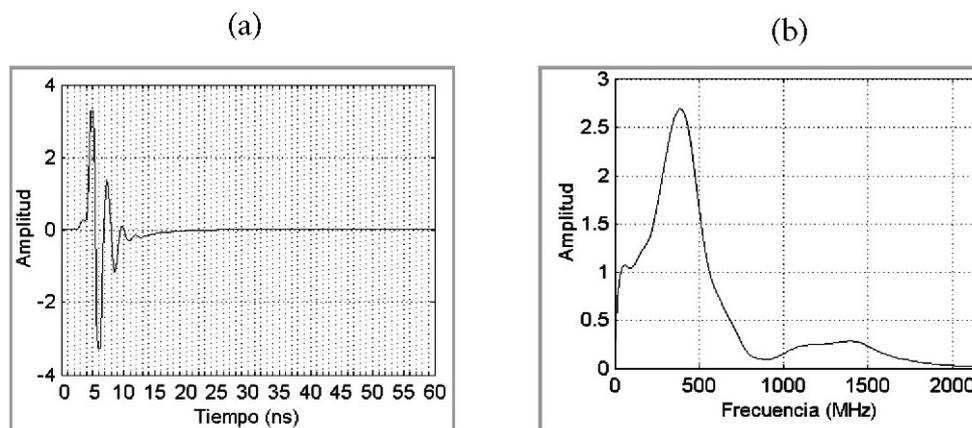


Figura 3.11. Señal real de una antena GPR de 400 MHz en (a) y su espectro de frecuencias en (b) (Modificado de Bonomo y de la Vega, 2006).

E) Frecuencia de operación: la selección de una frecuencia óptima no es simple. Debe existir un equilibrio entre la resolución espacial, la profundidad de penetración y el manejo del sistema. Como una regla, es mejor intercambiar la resolución por la penetración ya que no es de utilidad tener una gran resolución sino se puede detectar el objetivo. Una forma rápida para seleccionar la frecuencia central es con la utilización de la siguiente tabla, la cual está basada en la suposición

de que la resolución espacial requerida es el 25% de la profundidad objetivo (Tabla 3.2) (Annan, 2001).

Tabla 3.2. Valores de frecuencia central en función de la profundidad de exploración (Modificado de Annan, 2001).

Profundidad (m)	Frecuencia central (MHz)
0.5	1000
1.0	500
2.0	200
7.0	100
10.0	50
30.0	25
50.0	10

3.3. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA APLICADA A LA ARQUEOLOGÍA

El patrimonio cultural como testimonio de la actividad humana del pasado en conjunto con su conservación para las futuras generaciones posee un significado relevante. En el caso de los métodos geofísicos no es necesario la destrucción de las estructuras antiguas para su implementación, por lo que las imágenes 2D obtenidas o los modelos 3D del subsuelo se pueden incorporar a la información histórica previamente recopilada, logrando así su desarrollo (Panisova *et al.*, 2016).

Debido a que los arqueólogos en su labor de localizar y cartografiar material cultural enterrado pueden contar con muy poca o ninguna indicación en superficie, además de poseer poco tiempo y elevados costos de excavación con presupuestos restringidos, recurren con la prospección geofísica al conocimiento rápido del subsuelo sin necesidad de excavar grandes extensiones. Lo anterior es de suma importancia para el salvamento arqueológico, ya que permite la colecta de materiales y residuos en su contexto antes de ser alterados o removidos (Fuenmayor, 2013).

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados en esta investigación se aplicaron las metodologías de adquisición de datos y procesamiento descritas a continuación.

4.1. MICROGRAVIMETRÍA

4.1.1. Diagrama general

En la prospección microgravimétrica, los siguientes pasos fueron llevados a cabo:

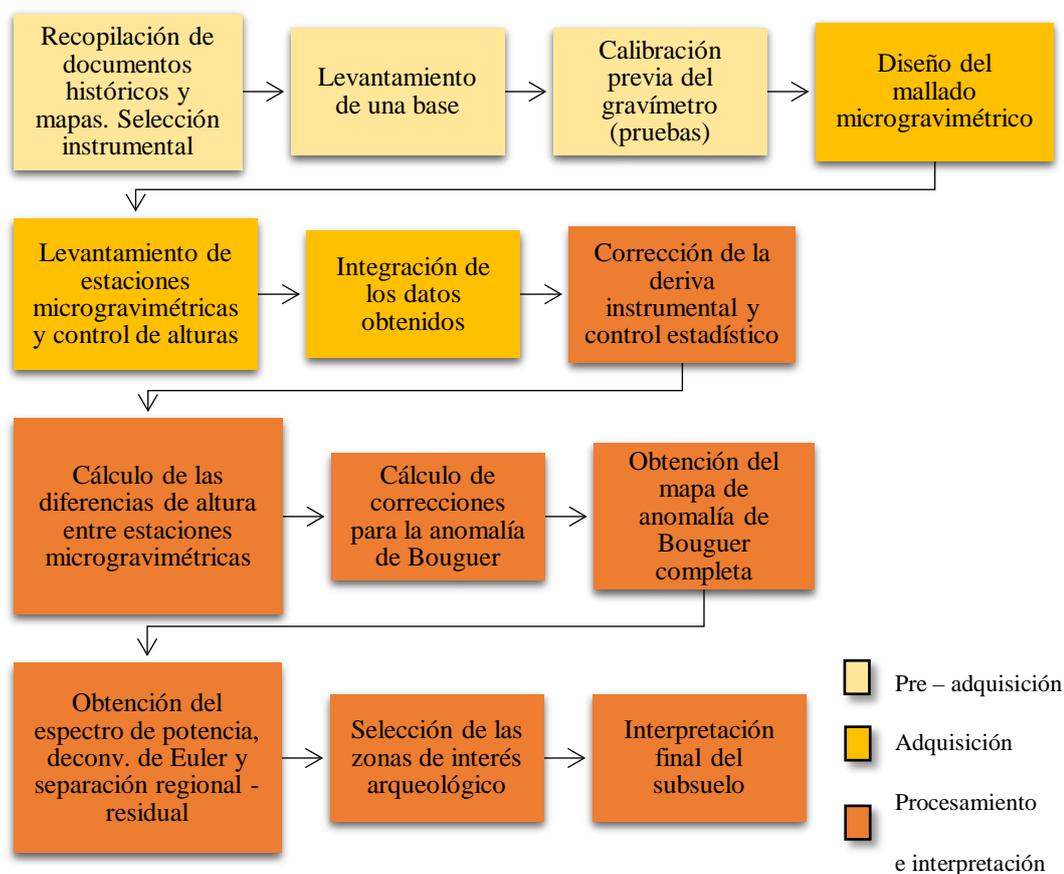


Figura 4.1. Flujograma representativo de la metodología de prospección microgravimétrica.

4.1.2. Etapa de pre – adquisición

El equipo escogido para cubrir el estudio microgravimétrico fue el gravímetro *CG-5 Autograv*, fabricado por la compañía *Scintrex*. Dicho instrumento es un gravímetro relativo para investigaciones de campo detalladas o de escala regional y estudios geodésicos (Scintrex Limited, 2012). Su elemento sensor está basado en un sistema de muelle elástico de cuarzo fundido del que pende una masa que se desplaza entre las placas de un condensador modificando su capacidad; con la variación de dicha capacidad, un transductor genera un voltaje en las placas del condensador, produciendo una fuerza electrostática para que la masa retorne a su posición de equilibrio. Finalmente, el voltaje se convierte en una señal calibrada que se transmite al sistema de adquisición de datos del instrumento, siendo digitalizada, procesada, visualizada y almacenada (Arocha, 2014). Además de esto, el *CG-5* cuenta con una excelente protección de los cambios ambientales en temperatura y presión atmosférica, así como también de las variaciones en el campo magnético (menores a 0,5 mT) gracias a que el elemento sensor es no magnético y está sellado en una cámara al vacío de temperatura estable. Es por lo anterior que el *CG-5* logra un rango de medición por encima de los 8000 mGal sin reiniciarlo, una resolución de 0,001 mGal y una deriva menor a los 0,02 mGal por día. Cuenta también con correcciones automatizadas por mareas, deriva instrumental, temperatura, filtrado avanzado de ruido en las lecturas, filtro de ruido sísmico, filtro de respuesta finita (*FIR*) (Scintrex Limited, 2012).



Figura 4.2. Gravímetro CG-5 en funcionamiento.

Para el levantamiento de la base, se recurrió al diseño y ejecución de un circuito de triple repetición (Figura 4.3). Dicha metodología establece que, a partir de un punto de control o *benchmark* (*BM*) cuyo valor de gravedad y cota son conocidos, se puede levantar una nueva base y asignarle a la misma un valor de gravedad estudiando las diferencias observadas en los cambios relativos de las mediciones realizadas. Esto se llevó a cabo al ejecutar tres (3) circuitos entre la base ubicada en Tierra de nadie del campus universitario (previamente establecida en el marco de la cátedra “Geofísica de campo 2016” con un valor de 978058,454 mGal) y la base ubicada en el monumento frente a la Casona (Figura 4.4).



Figura 4.3. Descripción gráfica de un circuito de triple repetición.



Figura 4.4. Base establecida previamente en Tierra de nadie (izq.) y base levantada en el monumento frente a la Casona (der.).

El estudio de deriva de este instrumento requirió de un lugar con las condiciones idóneas de aislamiento y ausencia de ruido para garantizar por un período de 12 horas continuas un estudio estable. El sitio seleccionado fue el sótano de la sede del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), en Caracas (Figura 4.5), al cual se trasladó el CG-5 el día 29 de mayo y se programó para realizar ciclos de tres (3) mediciones, cada una con un (1) minuto de duración. El gravímetro se retiró del lugar el día 30 de mayo y a partir de allí se procedió a la descarga de un total de 719 valores relativos de gravedad que luego fueron corregidos, promediados, estudiados y finalmente graficados (Figura 4.6).



Figura 4.5. Ubicación del sótano para el estudio de la deriva instrumental.

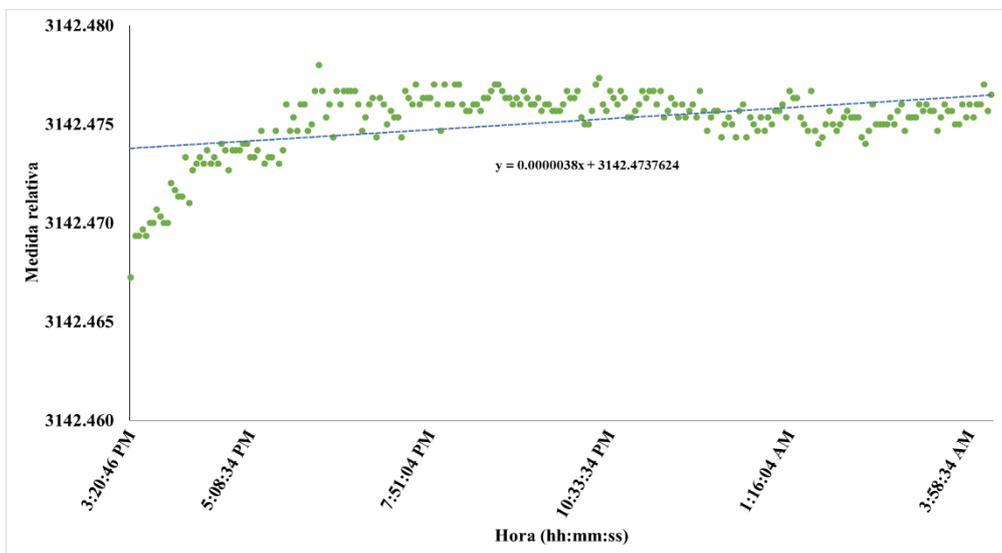


Figura 4.6. Gráfico de la deriva instrumental para el CG-5 corrida en el IGVSB.

4.1.3. Etapa de adquisición

En primer lugar, se ejecutó el diseño de mallados para las estaciones microgravimétricas. Dicha tarea, basada en metodologías como las de Panisova y Pasteka (2009) o Panisova *et al.* (2013, 2016), constó de una investigación previa de toda la zona para conocer su distribución, las zonas de difícil acceso, los impedimentos estructurales, modificaciones u otros elementos que pudieran limitar la adquisición. Posteriormente se procedió a:

- A) Obtener el área y dimensiones de cada habitación, esto es, largo y ancho.
- B) Diseñar un sistema local de coordenadas (X, Y) y colocar un punto de origen con su respectiva posición (0,0).
- C) Cuantificar las filas, columnas y estaciones para el mallado a partir de un punto inicial o punto base. En el caso de este trabajo, se estableció que el punto antes mencionado se ubicaría en la zona de la habitación más cercana a la entrada de la casa, es decir, más al sur y, a partir de allí las estaciones se ubicarían con una separación de 1 m.
- D) Asignar un código para cada estación regular en el siguiente orden:
 - Inicial de cada habitación o zona
 - Un número arábigo para la estación
 - Un número romano para la fila

Por ejemplo, Pe151-IX, perteneciente a la estación 151 de la fila IX en la zona llamada “patio externo” (Figuras 4.7 y 4.9).

- E) Marcar a nivel superficial cada estación subsecuente a la de origen, manteniendo una separación de 1 m (separación ideal) y anotación del código con marcador (Figura 4.8).
- F) Estudiar con la brújula el rumbo para el perfil y luego colocar las estaciones manteniendo entre las mismas la separación de 1 m.



Figura 4.7. Estación representativa de la zona patio externo.



Figura 4.8. Estaciones microgravimétricas distribuidas en la habitación llamada taller.



Figura 4.9. Plano de la Casona mostrando los nombres para cada zona y habitación en conjunto con las estaciones levantadas.

El levantamiento de 561 estaciones a lo largo de la Casona y un total de 11 estaciones en el perfil externo (Figura 4.9) estuvo basado en lo descrito en Capítulo III, sección 3.1.3 y requirió del cumplimiento a cabalidad de:

- A) Un estudio previo de la zona a través de pruebas de ruido, las cuales permitieron definir parámetros tales como los ciclos de medición o el rango de aceptación para la desviación estándar (*SD*).

- B) Configuración del gravímetro para ciclos de medición de un (1) minuto con el fin de evitar el menor ingreso posible de ruido externo.
- C) Establecimiento de circuitos de una (1) hora de duración para permitir así una correcta determinación de la deriva instrumental.
- D) Control de las inclinaciones (*tiltsing*) y su error, definiendo un rango de ± 3 para los ejes X e Y (Figura 4.10).
- E) Control estadístico con la repetición de un 10% del total de estaciones levantadas, seleccionando aquellas cuya desviación estándar estuviera por encima del promedio diario multiplicado por 1,5. Esto es, para toda la adquisición, un valor mínimo de 0,020661; un máximo de 0,048853 y un promedio total de 0,03052159.
- F) Control de alturas a través de la medición punto a punto de las cotas con la estación total *GTS-239W*, de la casa japonesa *Topcon*, con 3 mm de precisión. Para dicha tarea se contó con el apoyo del personal del IGVSB (Figura 4.11).



Figura 4.10. Proceso de nivelación del gravímetro CG-5 en campo.



Figura 4.11. Distintas etapas de medición con la estación total.

Es importante destacar que para la organización e integración de los datos obtenidos en el levantamiento microgravimétrico se recurrió a la anotación diaria de los valores de gravedad relativa, las coordenadas X e Y del mallado y la desviación estándar en hojas de cálculo de *Excel*. Para la parte topográfica se configuró la

estación total para que guardase datos de coordenadas y cota, los cuales fueron posteriormente descargados con la ayuda del software llamado *Topcon Link v.7.3*.

4.1.4. Etapa de procesamiento e interpretación

En lo que respecta a la deriva, luego de anotar y organizar diariamente las mediciones relativas de gravedad en hojas de *Excel*, las mismas pasaban por un proceso para convertirse en valores de gravedad observada (μGal):

- A) Separación de los circuitos de medición y anotación en tablas del nombre de la estación, hora de medición, lectura relativa y desviación estándar.
- B) Conversión del tiempo a minutos y amarre del mismo al llamado “tiempo cero”, es decir, el momento de apertura del circuito.
- C) Corrección de las lecturas por variación por minuto (VARMIN) entre el tiempo de apertura y cierre de cada circuito.
- D) Proceso de amarre o unión de todas las lecturas relativas de gravedad de las estaciones ordinarias al valor de gravedad relativa de la estación base.
- E) Conversión de las lecturas relativas a valores de gravedad observada reducida al μGal gracias a que se cuenta con un levantamiento previo de base.

Tabla 4.1. Procesamiento de datos en *Excel*.

	Estación	Hora	Lectura (Grav. Rel.)	Desviación estándar	Hora (minutos)	Tiempo relativo	Lectura corregida
Circuito 2	Base AP	10:50:59	3145.449	0.02	650.983	0	3145.449
	Ac01-I	11:48:39	3145.352	0.02	708.650	57.667	3145.328
	Ac02-I	11:51:07	3145.345	0.019	711.117	60.133	3145.320
	Base CR	11:55:18	3145.476	0.026	715.300	64.317	3145.449
						VARMIN	0.00041980

Tabla 4.2. Amarre de los valores relativos de gravedad al valor de la base.

VALOR BASE	3147.105
CIRCUITO 2 ORIGINAL	CIRCUITO 2 AMARRADO
3145.449	3147.105
3145.328	3146.984
3145.320	3146.976
3145.449	3147.105
Δ AMARRE	-1.656

Tabla 4.3. Conversión de las medidas de gravedad relativa a observada reducida.

Estac.	Grav. Rel.	ΔG_{rel}	Grav. Obs.	Grav. Obs. Red.
Base	3147.105		978057.614	613.75718
Ac01-I	3146.984	-0.121	978057.493	492.54884
Ac02-I	3146.976	-0.129	978057.485	484.51334

Un control estadístico fue llevado a cabo sobre los datos con la organización y corrección diaria de los mismos con las herramientas siguientes del software *MATLAB R2014a*, desarrollado por *MathWorks*:

- A) Histogramas para estudiar la frecuencia, distribución y comportamientos predominantes de las mediciones diarias.
- B) Diagramas de caja y bigotes con el fin de determinar el valor máximo, el valor mínimo, los cuartiles de la distribución, la dispersión y la simetría de la muestra.

Un nuevo estudio al total de datos microgravimétricos adquiridos fue realizado con el fin de contar con una estadística completa y detallada.

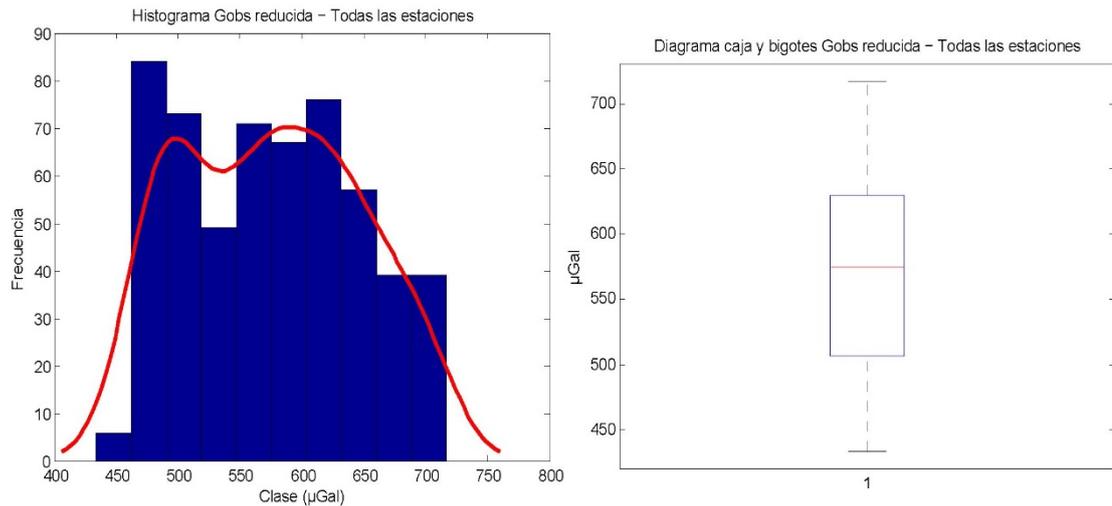


Figura 4.12. Histograma (izq.) y diagrama de caja y bigotes (der.) para los datos de gravedad observada reducida.

El cálculo de las alturas entre las estaciones se realizó a través de la selección de un nivel de referencia, el cual fue la mínima cota relativa (no referenciada) en dos (2) sectores de estudio; el primero de ellos a lo largo de toda la Casona (100,494 m) y

el segundo entre las 11 estaciones levantadas en el perfil externo (100,32 m). A estas diferencias se les agregó la altura al sensor del gravímetro CG-5, es decir, unos 26 cm aproximadamente (Figura 4.13).

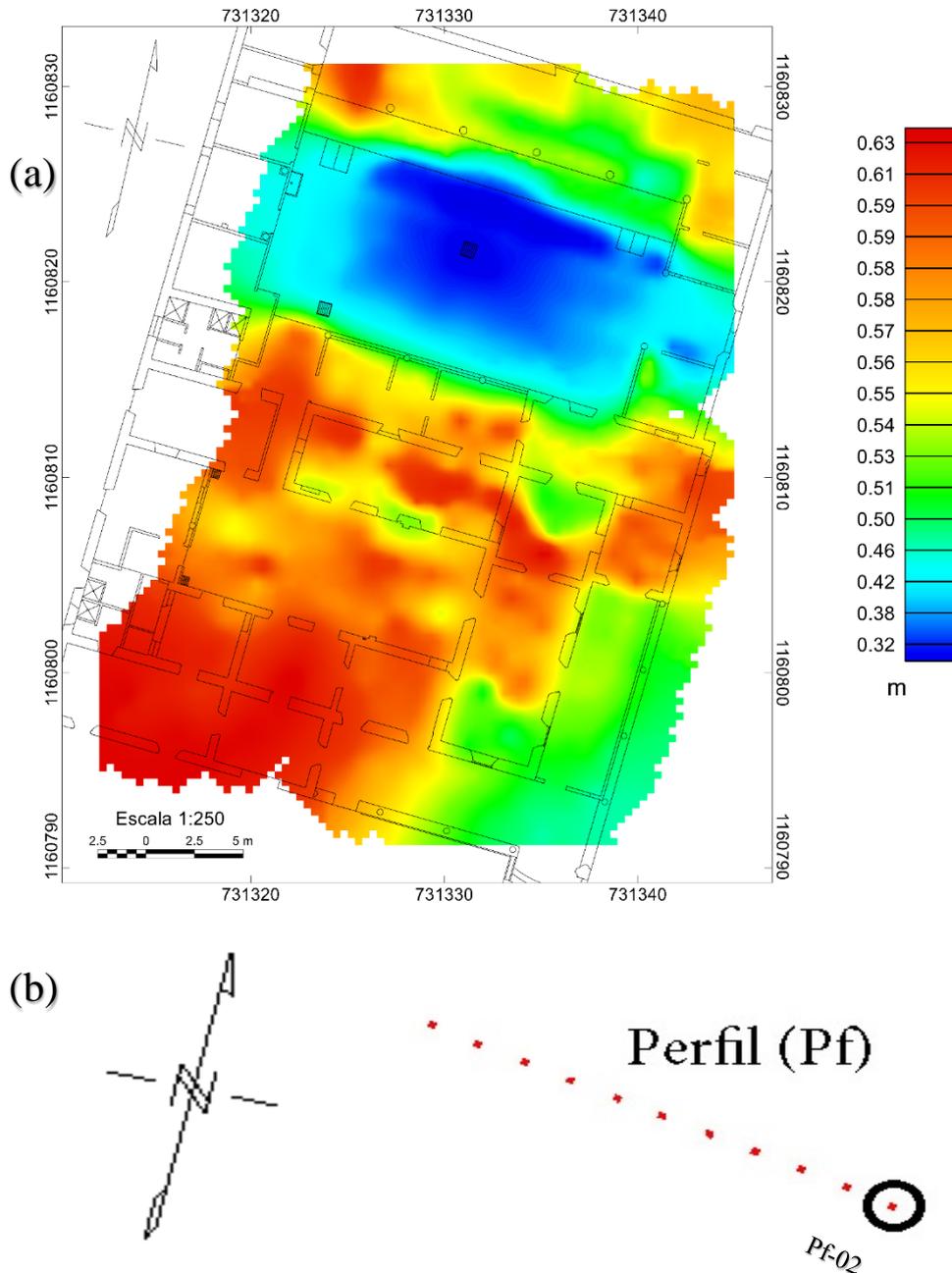


Figura 4.13. En (a) el mapa topográfico de la Casona y en (b) el perfil con la estación de menor cota (círculo negro).

La obtención de la anomalía de Bouguer completa se realizó siguiendo la Ecuación 3.12 a través de la programación de un código o algoritmo en el software *MATLAB R2014a*. Se tuvieron las consideraciones siguientes:

- A) Para la C_B se escogió la densidad real del cemento ($3,035 \text{ g/cm}^3$) en base a la información de un plano contenido en el trabajo de Del Castillo (2008) (Anexos, Figura A.2) y también contando con la información del trabajo experimental realizado por Erreyes (2014).
- B) La corrección topográfica (C_T) se obtuvo mediante el software *Oasis Montaj 6.4.2*, desarrollado por *Geosoft*, a través de la carga de su menú *Gravity*. Cabe acotar que la densidad escogida para esta corrección fue de $2,6 \text{ g/cm}^3$
- C) La corrección por pared (C_P) fue calculada a través del algoritmo de corrección topográfica del menú *Gravity* estableciendo los siguientes parámetros:
 - Una distancia máxima de corrección de 20 m en todas las direcciones de la casa.
 - Selección de un rango de densidades para las paredes de la Casona en base a la información de otro plano mostrado por Del Castillo (2008) (Anexos, Figura A.3). Las mismas están hechas en su mayoría de tapia pisada, la cual es una técnica traída a Venezuela por los españoles en el siglo XVI que consta de la fabricación de encofrados de madera con tierra comprimida y apisonada llamados tapiales (Gil, 2012). Sus valores de densidad oscilan entre $1,72$ y $1,99 \text{ g/cm}^3$ (García *et al.*, 2013).
 - Pruebas de correlación para la anomalía de Bouguer con los dos (2) valores antes descritos, mostrando una diferencia de $1 \text{ } \mu\text{Gal}$ y quedando seleccionada la densidad de $1,99 \text{ g/cm}^3$ (Figura 4.14b).
- D) Control estadístico del total de datos de la anomalía de Bouguer completa a través de histogramas y diagramas de caja y bigotes (Figura 4.15).

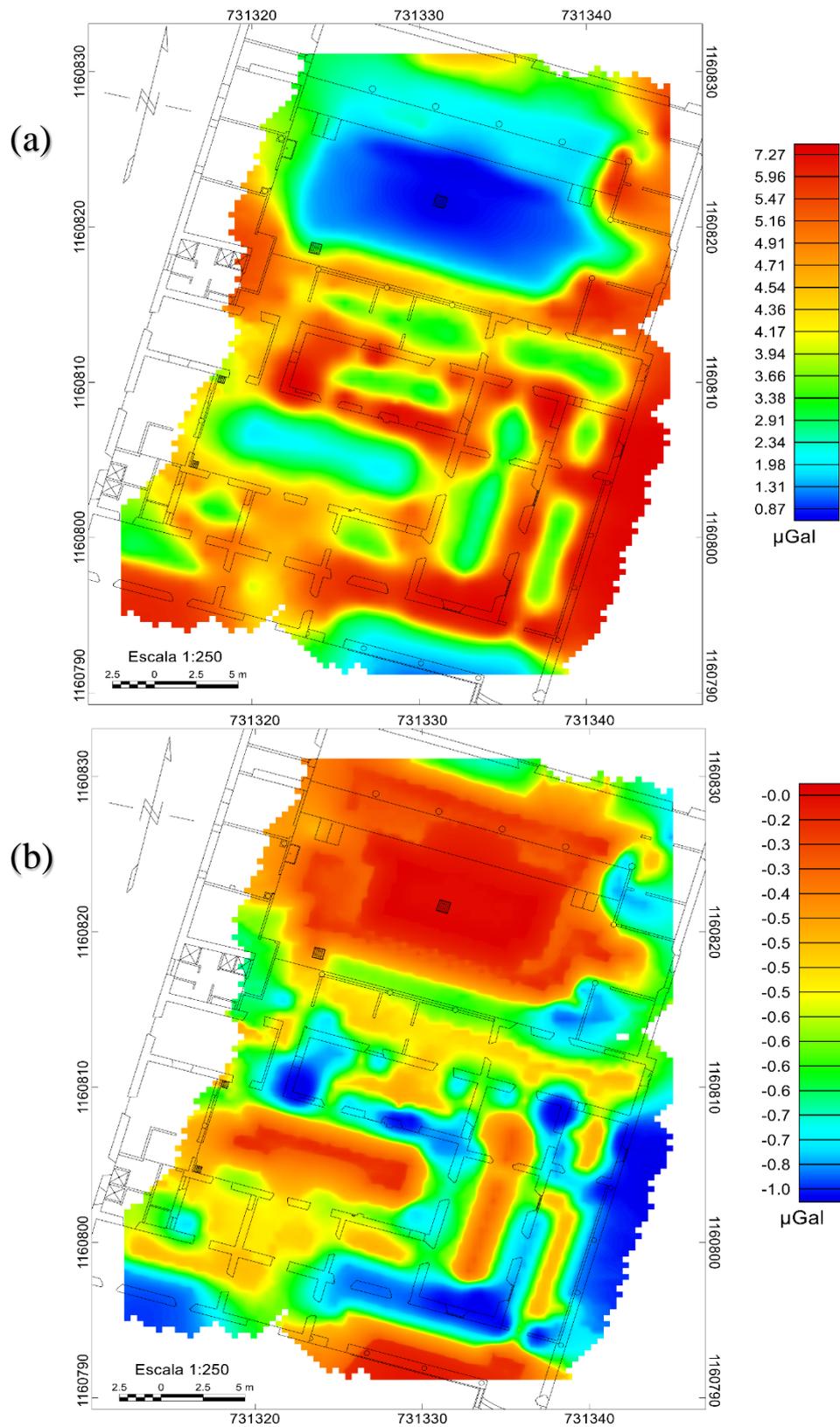


Figura 4.14. En (a) el mapa de corrección por pared y en (b) el mapa de correlación entre las dos (2) anomalías de Bouguer completas.

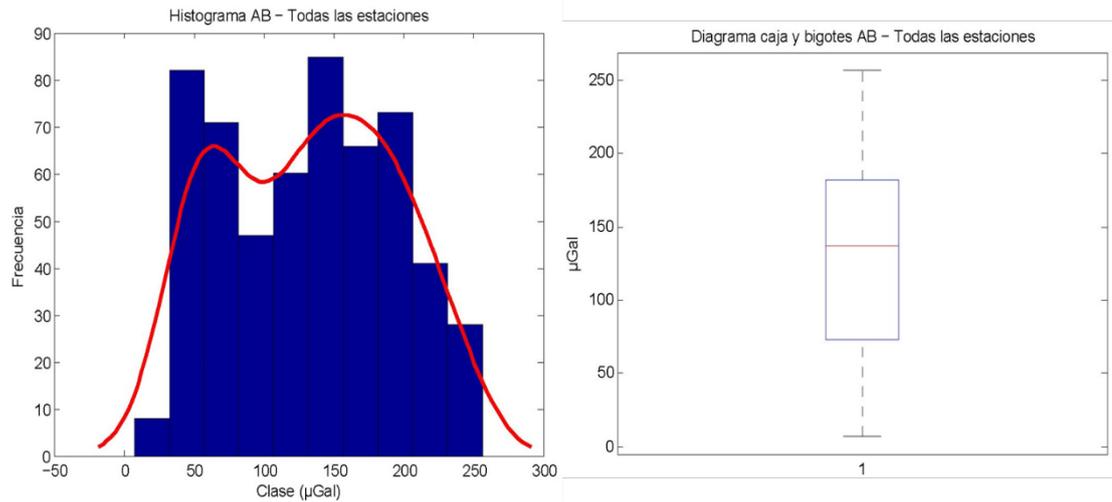


Figura 4.15. Histograma (izq.) y diagrama de caja y bigotes (der.) para los datos de la anomalía de Bouguer completa.

Con la anomalía de Bouguer completa se procedió a la generación del mapa para la misma a través del menú *Grid* de *Oasis Montaj*. A partir de allí se aplicó la deconvolución de Euler a través del *script* ejecutable en *MATLAB* *regder2_0v5.m*, el cual calcula esta deconvolución de forma clásica en dos (2) y tres (3) dimensiones en base a las metodologías de Thompson (1982) y Reid *et al.* (1990), además, evalúa sus derivadas regularizadas con la metodología propuesta por Pasteka *et al.* (2009).

Se seleccionó en primer lugar el rango por defecto para el parámetro alfa (α), esto es, 1 y 1×10^{20} unidades. Con el mismo se logró la obtención de la norma regularizada de cada derivada (x, y, z). Seguidamente se colocó por defecto el parámetro para el tamaño de la ventana (10), un índice estructural 1 y un grado cero para el polinomio de interferencia. Posterior a esto se obtuvieron el mapa con todas las soluciones y los gráficos estadísticos que permitieron filtrar y dejar únicamente las soluciones de interés. Estas últimas soluciones fueron colocadas sobre el mapa de la anomalía de Bouguer total (Figura 5.3, Capítulo V) y también se les realizó el adecuado control estadístico.

Del total de la anomalía se obtuvo el espectro de potencia, el cual permite una estimación adecuada de la profundidad de la fuente en base a la representación de un extenso número de paralelepípedos rectangulares independientes (Spector y

Grant, 1970). A partir de acá se aplicó un filtro gaussiano con desviación estándar de 59,65 para obtener sus componentes regional y residual. De la componente regional se calculó su porcentaje de aporte para el total de las anomalías de Bouguer asumiendo que el 100% de las anomalías en la zona de estudio se encuentran en el mapa total (Figura 5.1, Capítulo V).

En la componente residual se realizó lo siguiente:

- A) Un nuevo control estadístico con *MATLAB* (Figura 4.16).
- B) Obtención de la derivada vertical (z) de primer orden también con el módulo *Interactive Filtering*. Se le agregó un filtro de continuación analítica del campo hacia arriba de 0.1509 metros.
- C) Obtención de la derivada horizontal total. A través del cálculo de las derivadas en x e y para luego juntarlas a través de la Ecuación 4.1 (Cooper y Cowan, 2008).

$$DHT = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

donde f es el campo potencial gravitatorio.

Seguidamente se le aplicó un suavizado a través de un filtro gaussiano cuya desviación estándar fue de 1282.

- D) Extracción de perfiles coincidentes con la dirección de las líneas GPR a lo largo de toda la zona para el proceso interpretativo.

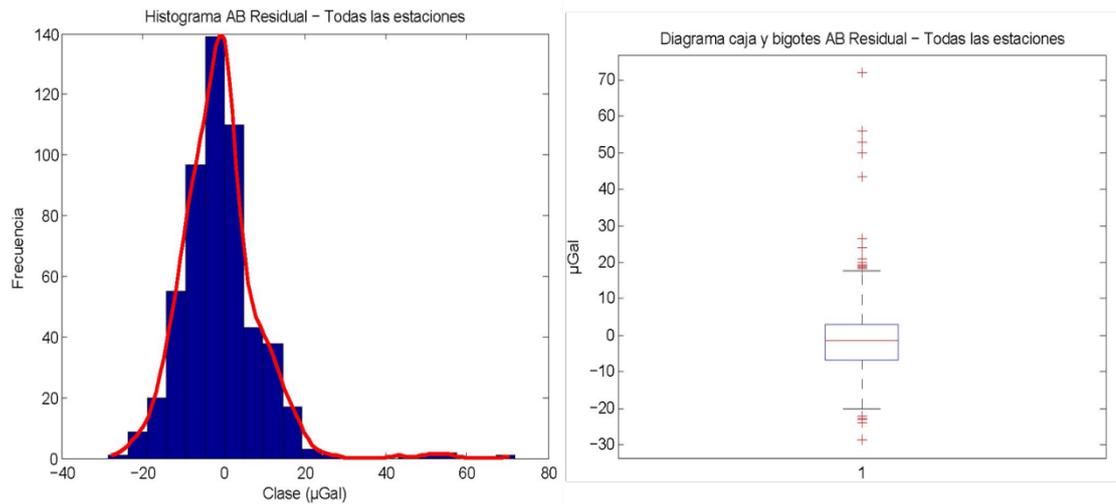


Figura 4.16. Histograma (izq.) y diagrama de caja y bigotes (der.) para los datos de la anomalía de Bouguer residual.

4.2. GPR (*GROUND PENETRATING RADAR*)

4.2.1. Diagrama general

La secuencia de pasos cumplidos en la prospección con GPR son mostrados en el siguiente flujograma:

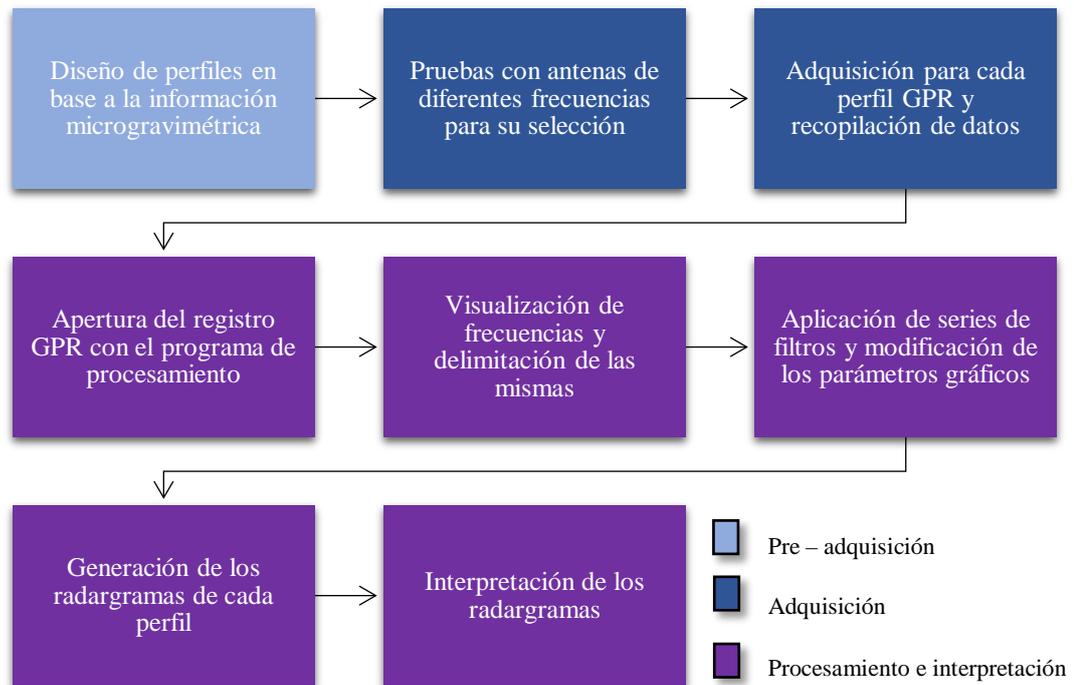


Figura 4.17. Flujograma representativo de la metodología de prospección GPR.

4.2.2. Etapa de pre – adquisición

Conocidas las zonas de interés arqueológico, se procedió al diseño de la adquisición GPR. Para esta tarea, se definieron un total de cinco (5) zonas tanto para la Casona como sus adyacencias y la cantidad de perfiles para las mismas quedó definida en la adquisición. Dichas zonas se llamaron de la siguiente forma: zona trapiche (TP), zona frente (FT), zona patio interno (PI), zona interna (ZI) y zona patio externo (PE).

Las antenas para la prospección fueron provistas por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y son fabricadas por la casa IDS (*Ingegneria Dei Sistemi*) en sus versiones de 40, 80 y 200 MHz. Pertenecen al sistema *RIS One* y *RIS Plus* (Radares de Investigación de Suelos), pudiendo alcanzar profundidades máximas de sondeo de alrededor de 10 m (con la antena de 40 MHz) (Aray, 2016; IDS, 2007). Debido a que la antena de 40 MHz es no blindada, se descartó para esta adquisición. Fueron seleccionadas las antenas blindadas de 80 MHz y 200 MHz.

4.2.3. Etapa de adquisición

La referenciación de los perfiles a un sistema de coordenadas transversal-longitudinal (T-L) se realizó de acuerdo a los parámetros de adquisición, los objetivos, el estado del terreno y la información consultada en los trabajos de Pérez y Vioria (2013), Aray (2016) e IDS (2014). Dependiendo de su ubicación en el sistema, se le dio nombre a cada uno de los perfiles (Figura 4.18). Por ejemplo, en el caso de un perfil transversal, su nomenclatura fue T1.

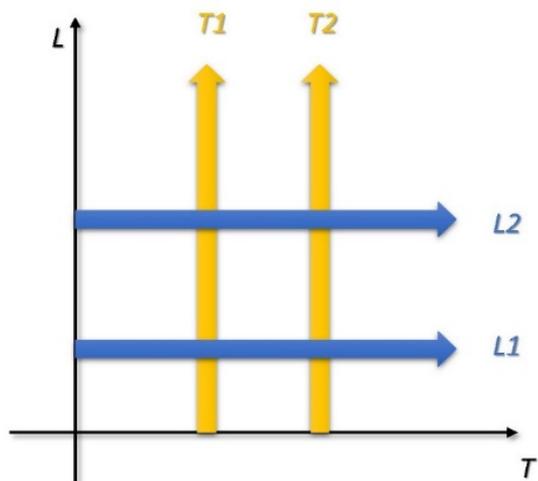


Figura 4.18. Sistema de coordenadas para los perfiles GPR.

Seguidamente, el ensamblaje y conexión para ambas antenas se ejecutó siguiendo las indicaciones del personal de FUNVISIS en conjunto con la información recopilada en el manual IDS (2005) y en el trabajo de Pérez y Vilorio (2013) (Figura 4.19). El software utilizado en la adquisición fue el *K2 FastWave v02.00.006* de IDS (IDS, 2009) el cual permitió generar en tiempo real una visualización de los perfiles.



Figura 4.19. Antena de 200 MHz conectada y ensamblada.

Se realizaron pruebas en las diversas zonas con el fin de diferenciar cuál de ellas generaba una imagen de alta definición de los primeros metros del subsuelo (objetivo arqueológico). Al ser la antena de 200 MHz la que generó una imagen precisa hasta los 2,5 m de profundidad, se escogió la misma para el trabajo de adquisición (Figura 4.20).



Figura 4.20. Adquisición de datos con la antena de 200 MHz.

Un total de 17 perfiles dispuestos en las Figuras 4.21 y 4.22 fueron generados y almacenados en el computador portátil a lo largo del trabajo prospectivo. Su distribución fue:

- Zona trapiche (TP) → dos (2) perfiles
- Zona frente (FT) → dos (2) perfiles transversales separados a 1 m
- Zona patio interno (PI) → un (1) perfil transversal

- Zona interna (ZI) → ocho (8) perfiles, cinco (5) longitudinales separados a 1 m y tres (3) transversales
- Zona patio externo (PE) → cuatro (4) perfiles, dos (2) longitudinales separados a 6 m y dos (2) transversales separados a 5 m



Figura 4.21. Plano de las líneas GPR dentro de la Casona.

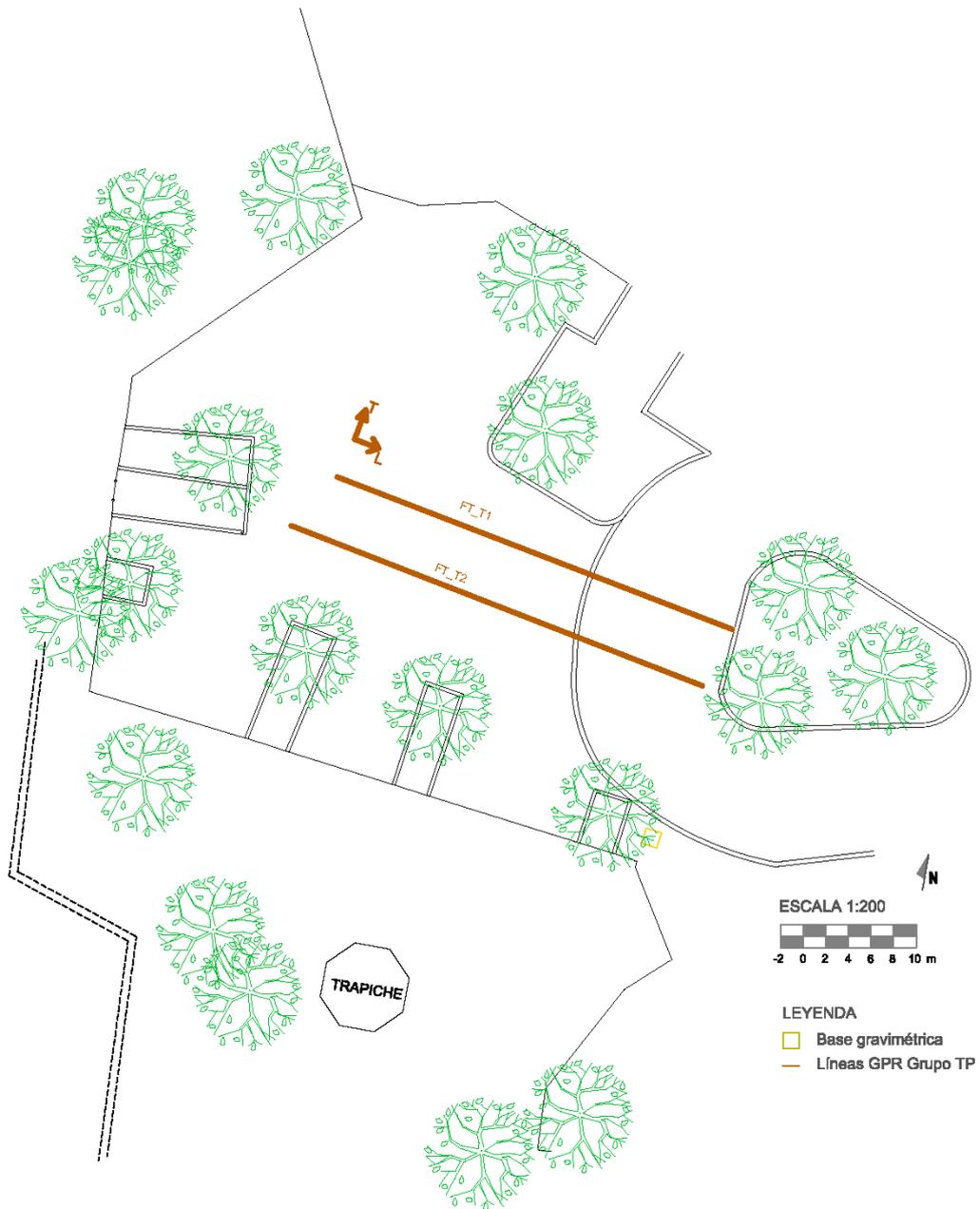


Figura 4.22. Plano de las líneas GPR en su patio frontal.

4.2.4. Etapa de procesamiento e interpretación

El software *GresWin2 05.01.002*, perteneciente a la casa IDS fue utilizado para el trabajo con los perfiles de forma preliminar en campo para el control de los datos y con mayor detalle en FUNVISIS. Parámetros como la delimitación, visualización y mejora de los perfiles con filtros y ganancias fueron aplicados con el fin de lograr la conversión de los perfiles a radargramas que posteriormente pasarán por una etapa interpretativa.

En base al manual de IDS (2003), se delimitó el rango de frecuencias adecuado en la ventana *Processing Parameter Setting* dependiendo de la antena utilizada (200 MHz como mínima frecuencia y 400 MHz como máxima frecuencia). Luego, siguiendo la secuencia interactiva de filtros *Move start time - Background removal - Vertical bandpass filter - Linear Gain*, se transformaron los perfiles en radagramas. Siguiendo la ruta *File – Hardcopy* o presionando en el teclado las teclas *CTRL + H*, se guardaron los radagramas en formato .bmp, dejándolos preparados para su posterior interpretación.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. MICROGRAVIMETRÍA

5.1.1. Mapa de anomalías de Bouguer

En el mapa de anomalías de Bouguer total (Figura 5.1) destacan el predominio de los contornos en dirección N80W, con un gradiente de aproximadamente 22 $\mu\text{Gal}/\text{m}$ con anomalías que decrecen desde un máximo absoluto de 255,21 μGal hasta un mínimo absoluto de 8,75 μGal y una zona anómala rodeada de valores inferiores (100 μGal aproximadamente), cuyo inicio está en las coordenadas 731335 y 1160825 m respectivamente. La ubicación particular de la Casona en una de las mayores elevaciones del *campus* universitario hace que la anomalía de Bouguer total refleje en su mayoría un sistema geológico característico con una distribución bimodal (Figura 4.14, Capítulo IV); a pesar de lo anterior, el mismo no es de interés para esta investigación.

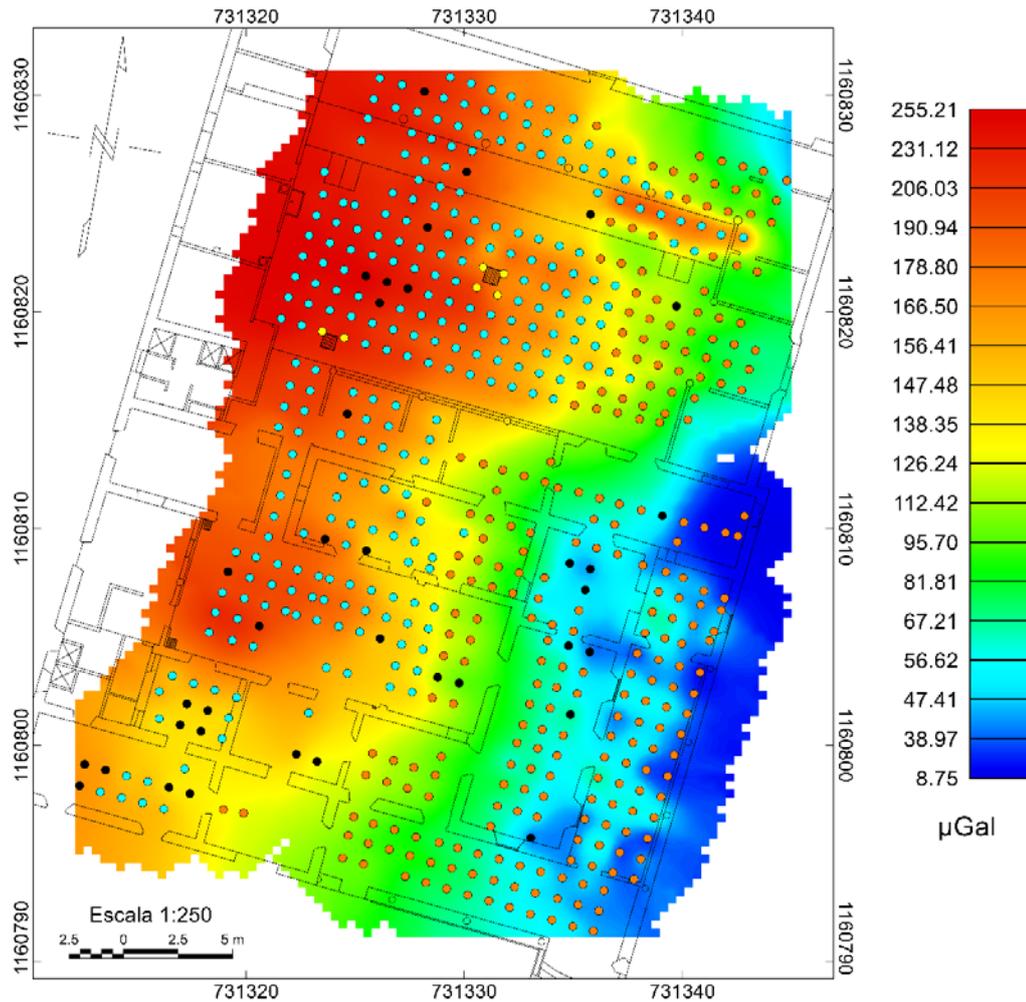


Figura 5.1. Mapa de anomalías de Bouguer. En amarillo, estaciones cerca de alcantarillas; en negro estaciones con alguna dificultad de medición.

5.1.2. Espectro de potencia de la anomalía de Bouguer

El espectro de potencia muestra tres (3) pendientes que se pueden asociar a dos (2) fuentes gravimétricas y a ruido. La primera profundidad (3,6 m) se corresponde con la fuente más profunda de la anomalía de Bouguer, es decir, su componente regional. Para la segunda profundidad (0,9 m) se presume su correspondencia para con las fuentes residuales de la anomalía y, finalmente, la tercera profundidad (0,3 m) no es asociable a una fuente gravimétrica.

Tabla 5.1 Profundidades calculadas en metros a partir del espectro de potencia de la anomalía de Bouguer.

Prof 1 (m)	Prof 2 (m)	Prof 3 (m)
3,6	0,9	0,3

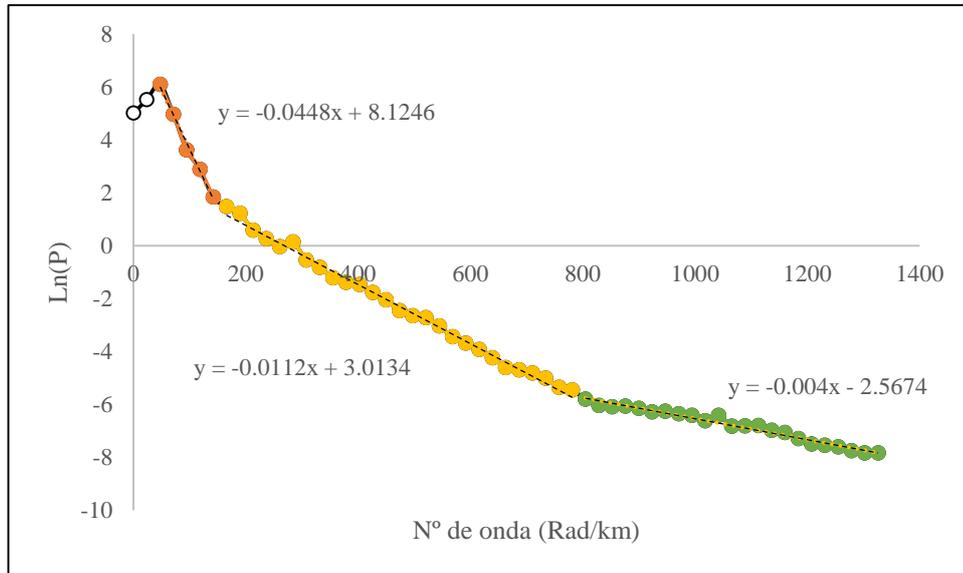


Figura 5.2. Espectro de potencia para la anomalía de Bouguer.

5.1.3. Deconvolución de Euler

En el mapa de soluciones de la deconvolución de Euler (Figura 5.3) se puede observar que, en su mayoría, los valores obtenidos se ubican entre 0,5 y 1,5 m de profundidad, con un promedio de 1 m. Dicho promedio va de la mano con la segunda profundidad mostrada por el espectro de potencia (0,9 m) y se puede asociar también a las fuentes residuales de la anomalía de Bouguer. Las soluciones ubicadas en el rango de 2 a 2,5 m se pueden asociar con la fuentes más profundas y, por tanto, de mayor longitud de onda.

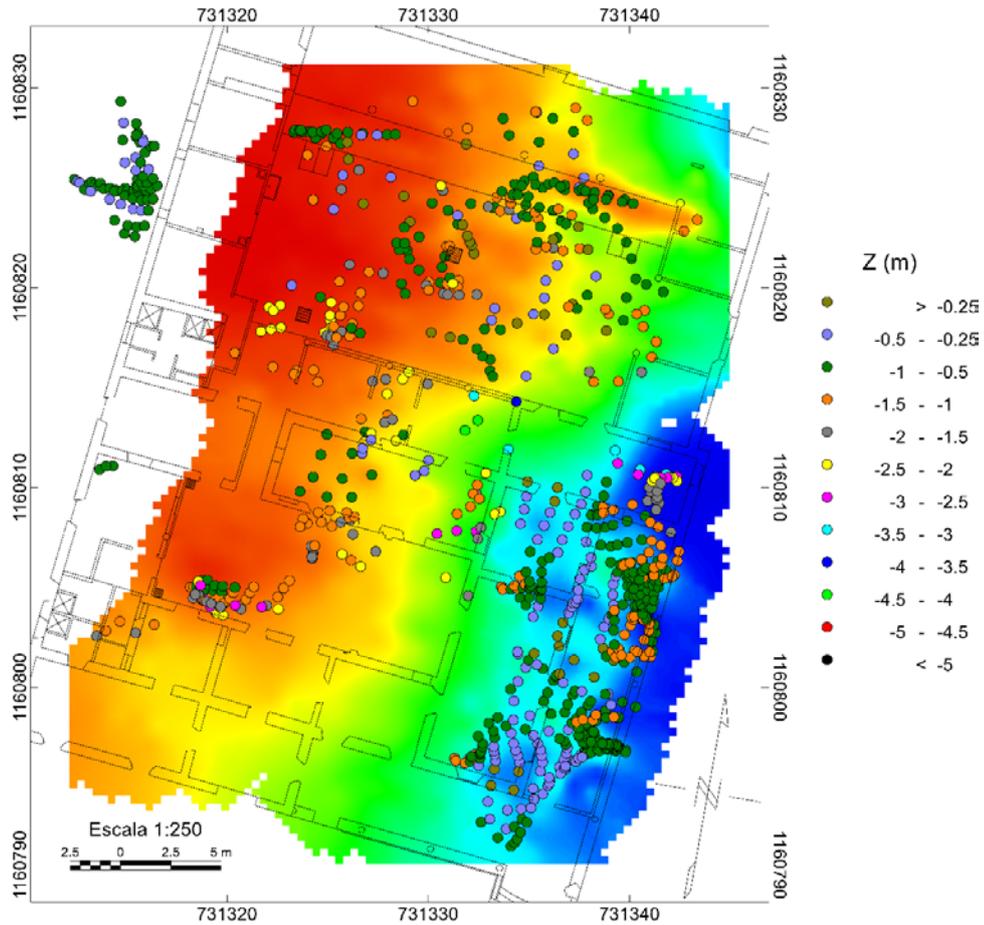


Figura 5.3. Mapa de la solución de la deconvolución de Euler.

En la Figura 5.4 se visualiza una distribución normal con una media de 0,95 m, una mediana de 0,8 m; una moda de 1,04 m; un mínimo de 0,03 m y un máximo de 4,2 m de profundidad. El diagrama de caja y bigotes se achica hacia la parte superior acumulando el 50% de los datos, los cuales se ubican en el rango de 0,5 y 1 m. Los valores superiores a los 2 m de profundidad van por fuera del bigote inferior debido a que superan el largo máximo del mismo, es decir, un y media vez el mínimo valor (aproximadamente 1,2 m), dándole a la curva su sesgo negativo. A partir de estos datos estadísticos se mantuvo el control de calidad y se determinó también la profundidad promedio de 1 m.

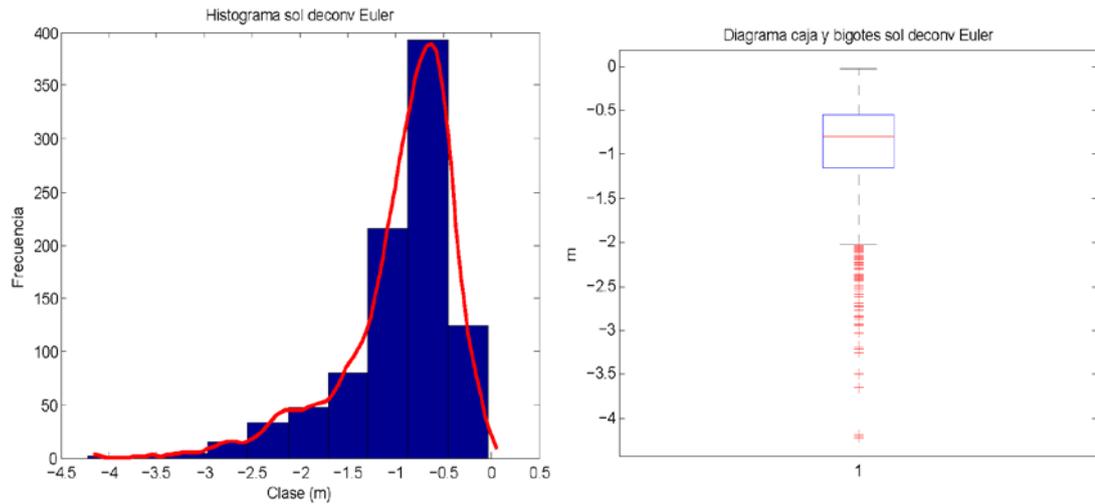


Figura 5.4. Histograma (izq.) y diagrama de caja y bigotes (der.) para las soluciones de la deconvolución de Euler.

5.1.4. Mapa de la componente regional de la anomalía de Bouguer

Aproximadamente un 98% de las anomalías son producidas por la componente de mayor profundidad y amplitud. Al comparar este resultado con el 2% restante para la parte residual queda entendido que sobre este mapa la interpretación arqueológica no es factible; sin embargo, se pueden describir cuestiones visibles en la Figura 5.5 tales como la similitud en la dirección de los contornos con respecto a la anomalía de Bouguer total (N80W), un gradiente de aproximadamente $21 \mu\text{Gal}/\text{m}$, un máximo absoluto de $253,09 \mu\text{Gal}$ y un mínimo absoluto de $17,81 \mu\text{Gal}$

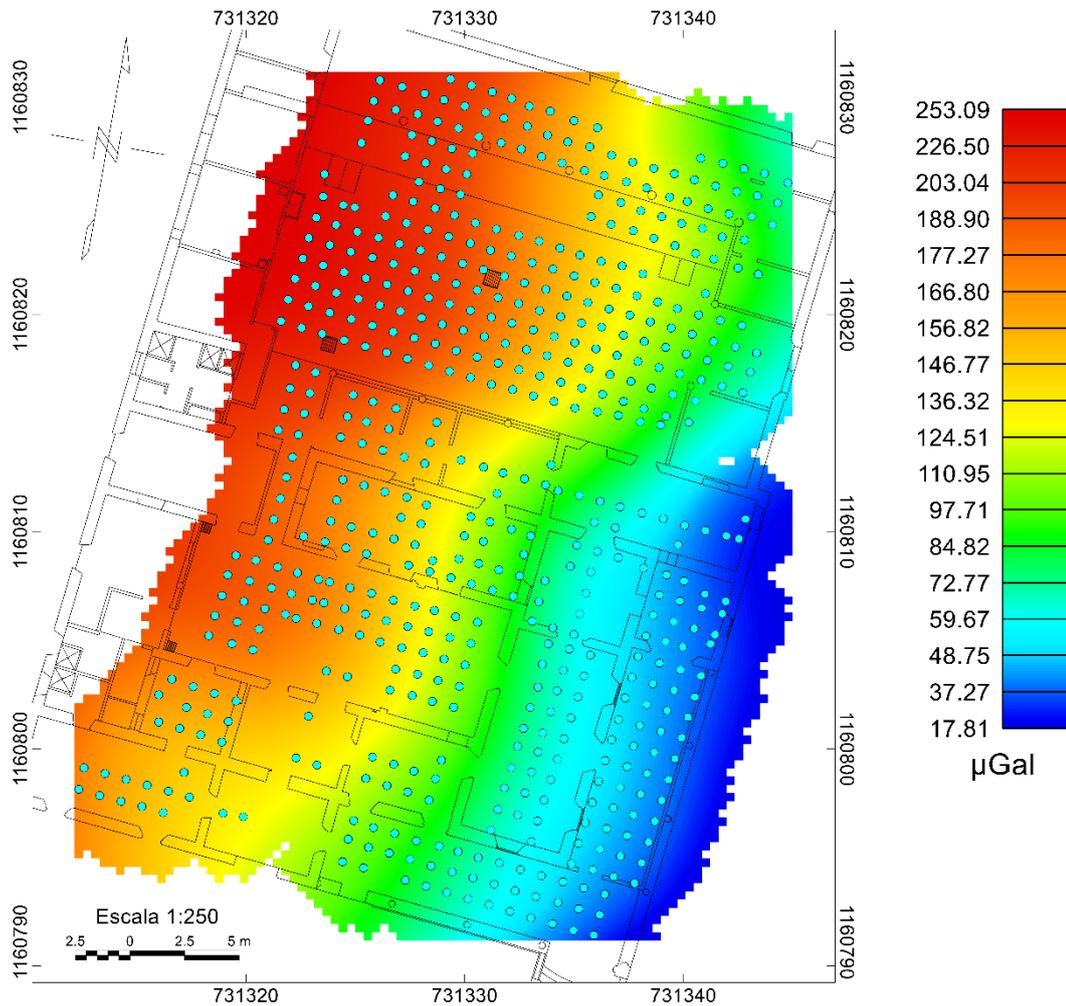


Figura 5.5. Mapa de la componente regional de la anomalía de Bouguer.

5.1.5. Mapas residuales de la anomalía de Bouguer y sus derivadas

Esta sección se compondrá principalmente de cuatro (4) mapas relacionados al trabajo sobre esta componente y el aporte de cada uno de ellos a la interpretación arqueológica de la zona de estudio. El criterio de esta división radica en dos (2) cuestiones, la primera de ellas es la resolución mínima del estudio, la cual es de 1 m y, por tanto, limita el rango de visualización de anomalías; la segunda son las múltiples asociaciones que se pueden hacer en la Casona para los tipos de anomalías características, lo cual requiere del estudio de las variaciones locales a través de los gradientes de cada componente del campo gravitatorio y sus diferencias en amplitud.

Observando la Figura 5.6a, se tiene que la mayor parte de las anomalías positivas están concentradas en las paredes antiguas de la casa, destacando un máximo absoluto de 72,4 μGal (coordenadas 731342 y 1160823 m), asociado al efecto que ellas producen y, por su parte, las anomalías negativas destacan en el patio externo e interno, en los archivos A, B, C y D, en el cuarto, en el taller, en la sala y en la capilla dos (2), lo cual da indicios de un mismo tipo de fuente para ellas. Por otra parte, el mínimo absoluto es de -28,43 μGal (coordenadas 731331 y 1160823) que se puede asociar con el sistema hidráulico de la zona exterior.

Sabiendo que al remover la larga longitud de onda a través del filtrado se resaltan las fuentes más superficiales y que las derivadas en las tres (3) componentes del campo gravitatorio ayudan no solo a destacar la parte somera del dato o a delimitar sus bordes sino que son una medición del gradiente de las anomalías en alguna dirección (Saad, 2006; Cooper y Cowan, 2008; Contreras y López, 2013), se puede entender que este sistema hidráulico mayormente notable en las Figuras 5.6b y 5.6c posee una dirección preferencial E-W entre los 731320 y 731340 m con valores entre los -6 y -4 μGal y queda muy bien delimitado al estudiar su gradiente en todas las componentes. El tipo de anomalía antes descrita es solo visible en esta zona y no existen posibles indicios de correlación para con ninguna otra anomalía en la casa; además, se debe agregar que esta zona es una de potencial arqueológico (Figura 2.10, Nro. 7) por estar relacionada a posibles medios de canalización de fluidos (acequias) los cuales fueron re-utilizados y modernizados en tiempos más recientes. Otra ubicación de potencial interés (Figura 2.10, Nro. 6) queda representada con la anomalía de aproximadamente 7 μGal coordenadas 731325 y 116830 m, Figura 5.6b) con un gradiente similar en las tres (3) componentes.

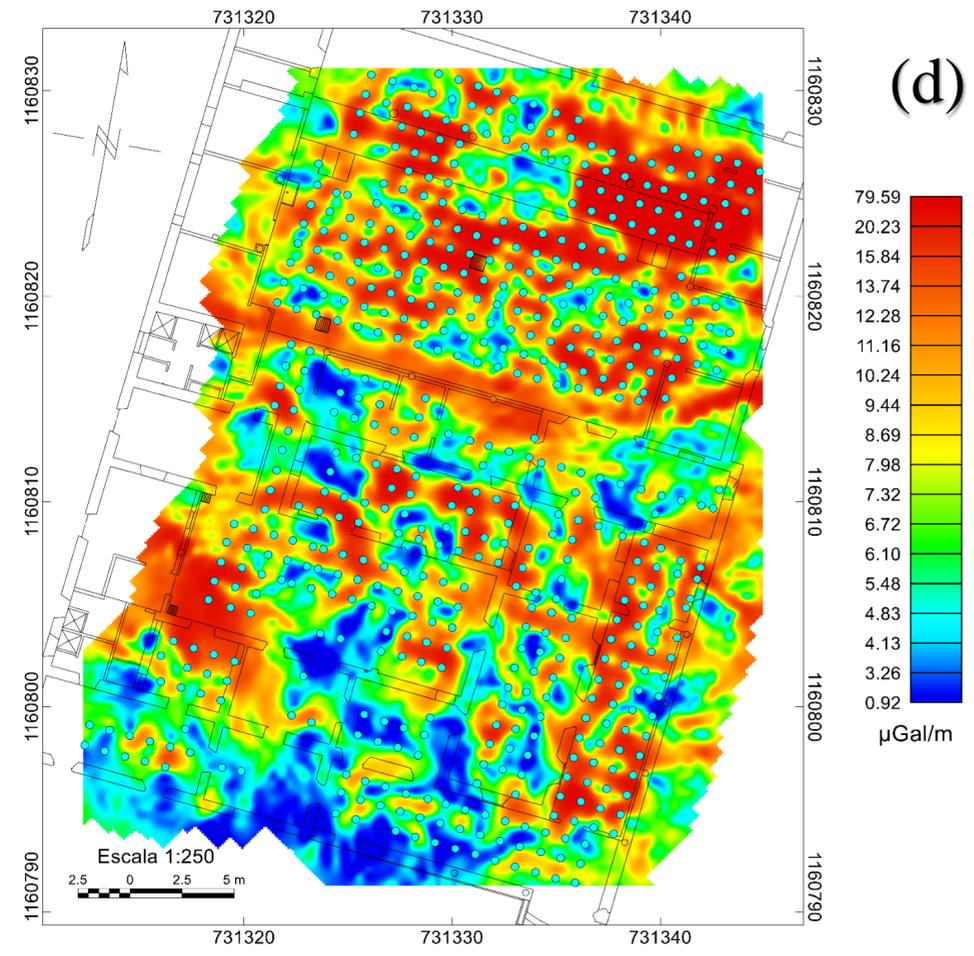
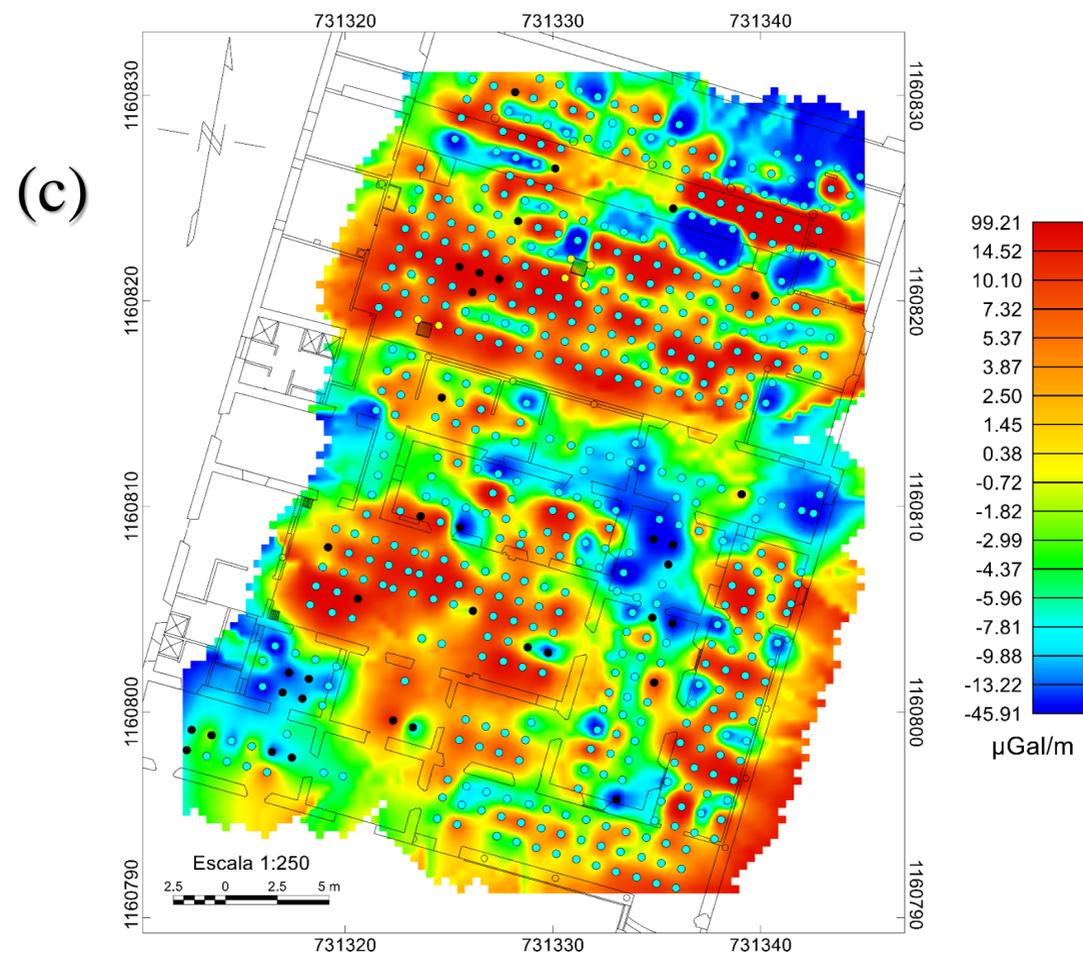
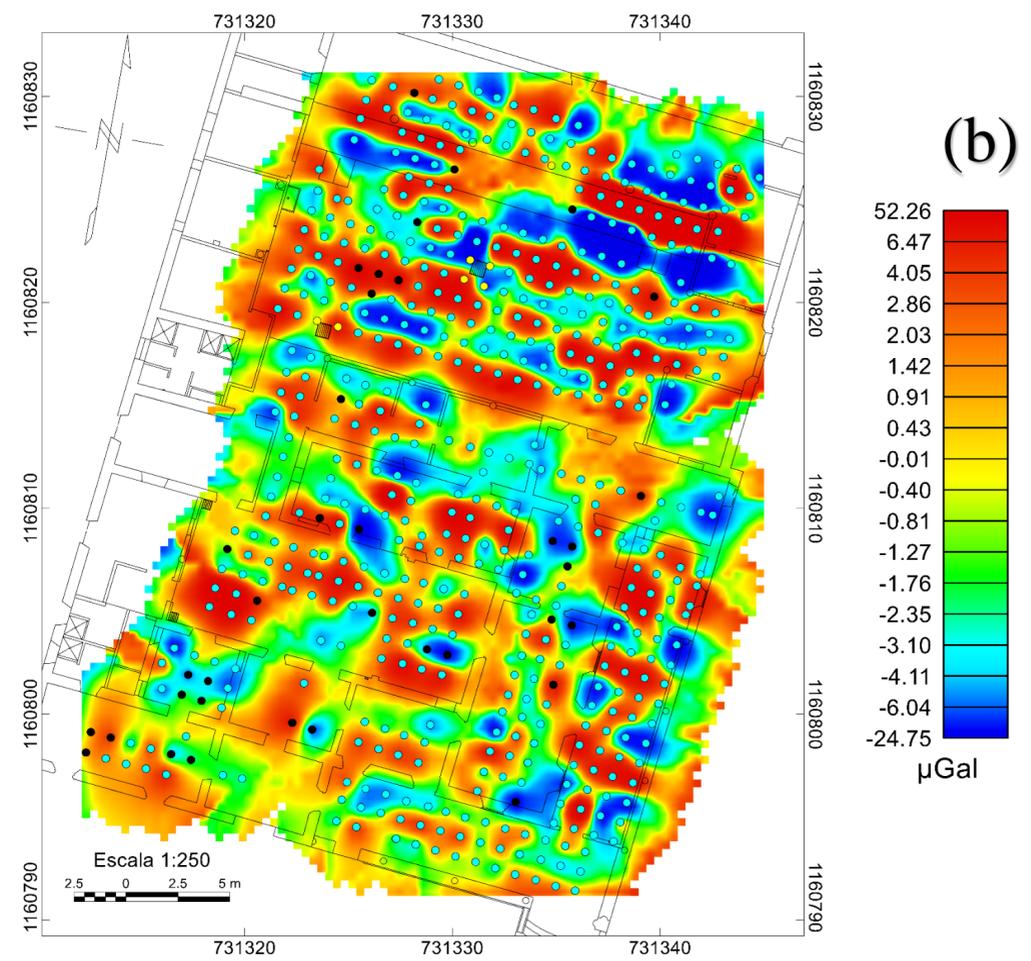
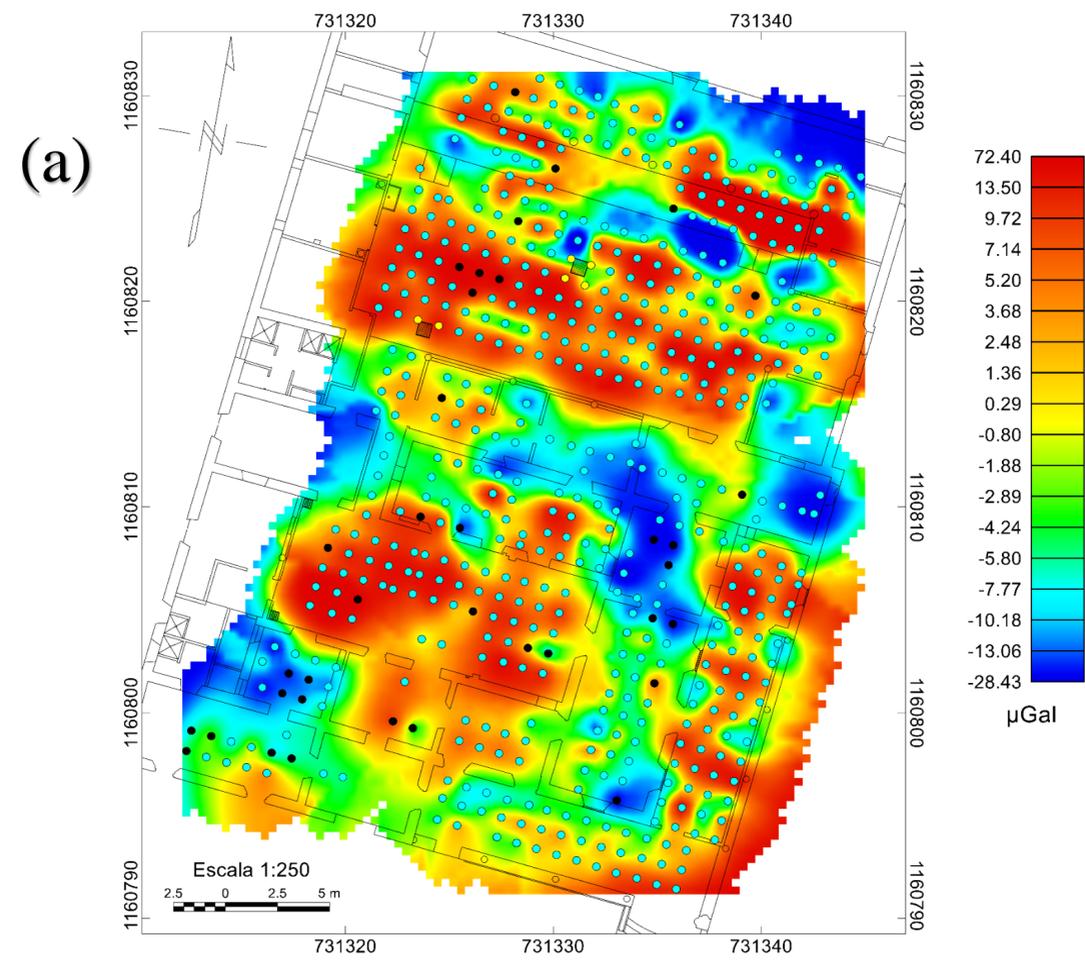


Figura 5.6. En (a) la anomalía de Bouguer residual y en (b) la misma anomalía sin la larga longitud de onda. En (c) la derivada en z y en (d) la derivada horizontal total para la componente residual.

Otro elemento importante son las zonas de vacío, estrechamente relacionadas con las anomalías negativas. A través del golpeteo en los pisos se corroboró *in situ* la existencia de cavidades someras. Los lugares con cavidades son el patio interno, los archivos C y D, el cuarto y la capilla dos (2). Desde el punto de vista histórico se puede discernir que estas cavidades fueron realizadas de forma voluntaria para proveer material en la construcción de la Casona, para el almacenamiento de agua (aljibes) o como base para la construcción de alguna pila bautismal (caso capilla dos), sin embargo, no se descarta la posibilidad de que puedan ser zonas de colapso del suelo por penetración de fluidos. Es meritorio agregar que algunos de estos lugares son ubicados también como zonas de potencial arqueológico, según lo mostrado en la Figura 2.10 (Nros. 2 y 3).

La distribución de las zonas y habitaciones según sus acabados de piso se puede realizar con la ayuda de las Figuras 5.6a y 5.6c y también con el plano mostrado por Del Castillo (2008) (Anexos, Figura A.2, Nros. 3,9 y 13). Un primer grupo de habitaciones con acabados de losas de cemento octogonales es visible, el mismo contiene a la zona del frente, a la capilla dos (2) y a la capilla uno (1), presentando anomalías entre los -5 y 17 μGal aproximadamente. Un segundo grupo de menor densidad con respecto al primero contiene a la sala, a la habitación (H), al pasillo y a los archivos A, B y C con acabados de cementos lisos y repujados y con valores de anomalía entre los -20 y los 4 μGal (Anexos, Figura A.2, Nros. 1, 12, 17 y 18). Para el tercer grupo, el cual se puede discriminar mejor con el mapa mostrado en la Figura 5.6b, se encuentran los acabados de linóleo en el taller, el cuarto, el dormitorio, el archivo D y parte del patio externo (coordenadas 731344 y 1160824 m) (Figura A.2, Nros. 5, 6, 8, 15 y 25-1) con anomalías entre los -14 y 14 μGal y de menor densidad con respecto al cemento. El cuarto y último grupo lo conforman el patio interno y el externo (en su mayoría), con acabados de cemento liso repujado y cemento liso, respectivamente (Anexos, Figura A.2, Nros. 11, 20, 22, 23 y 27); además, poseen la mayor variabilidad de anomalías con valores entre los -18 y 18 μGal . A pesar de esto, la zona anómala previamente descrita se puede asociar a un

tipo de material distinto el cual genera un contraste de densidades existente entre los acabados de este grupo y las fundaciones de las columnas.

Como antes se mencionó, buena parte de las anomalías de valores positivos están concentradas en las paredes antiguas de la casa con valores entre 0.3 y -3 μGal , asentando el hecho de estar hechas de tapia (Figuras 5.6a y A.3). Por otra parte, los agregados más recientes en la zona de la capilla dos (2), en la habitación (H), en el pasillo y en el patio externo muestran anomalías con valores entre 3 y 9 μGal aproximadamente, símbolo de estar hechas con materiales distintos (Figura A.3). En lo referente a las columnas, las ubicadas entre el frente y la capilla dos (2) presentan valores de aproximadamente 5 μGal , mientras que las del patio externo muestran valores de 15 μGal , lo cual indica diferentes tiempos para su construcción con distintos materiales.

En la zona de mayor potencial arqueológico (Figura 2.10, Nro. 1), ubicada en la capilla uno (1) (coordenadas 731440 y 1160808 m) destaca principalmente una zona de menor densidad la cual genera un contraste de anomalías presente en todos los mapas de la Figura 5.6. La misma posee una forma alargada con orientación parcial N-S, pudiendo estar asociada a un vacío resultante de un antiguo enterramiento, un relleno posterior realizado de forma voluntaria o por derrumbe de materiales. Debido a la ambigüedad que puede surgir en esta interpretación, se deben tomar en cuenta dos (2) herramientas que pueden facilitar lo que yace en el subsuelo. La primera de ellas está en el mapa para la deconvolución de Euler (Figura 5.3), la cual afirma un rango de profundidad al centro de masas del cuerpo de aproximadamente 1 m y la segunda es un modelo sintético de un cuerpo esférico cuya amplitud para la anomalía de Bouguer residual esté entre -8 y -6 μGal .

Al observar este cuerpo esférico mostrado en la Figura 5.7 se pueden resaltar ciertas características; la primera de ellas radica en el hecho de que el contraste de densidades apropiado para producir una anomalía del rango antes descrito puede ubicarse entre los -0,6 y -0,4 g/cm^3 , con un radio promedio de 0,7 m y una profundidad entre los 0,5 y 1 m. Seguidamente, es pertinente decir que el posible ancho de este sitio podría ser de 1 m con un contraste no muy elevado, lo cual sugiere la existencia de material en el interior de la cavidad.

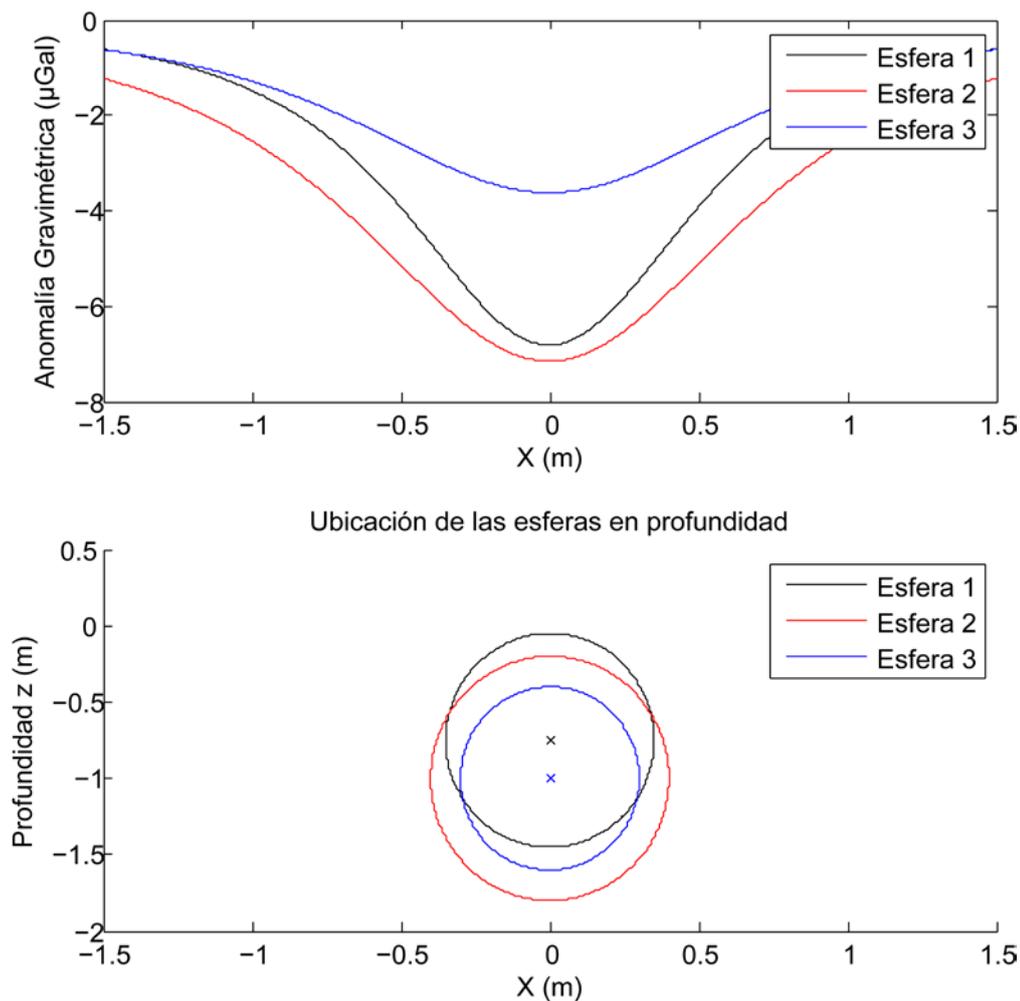


Figura 5.7. Modelo de anomalías de Bouguer para la zona arqueológica de interés.

5.2. INTERPRETACIÓN CONJUNTA

Varios puntos de interés fueron catalogados al integrar la información provista por los perfiles microgravimétricos extraídos del mapa de la anomalía de Bouguer residual coincidentes con las líneas GPR trazadas, lo cual permitió afirmar las zonas de potencial arqueológico así como también el conocimiento de elementos estructurales en el interior de la casa. Es importante aclarar que tanto la microgravimetría como el georadar (GPR), al medir propiedades físicas diferentes (diferencias de densidades e impedancias electromagnéticas del subsuelo, respectivamente), su interpretación conjunta puede no ser apropiada para toda la Casona. Por esta razón los radargramas descartados del proceso interpretativo debido a la falta de resolución y también por no poseer información relevante en la

búsqueda de sitios de interés fueron FT_T1, ZI_L2, ZI_L3, ZI_L4 y ZI_L5 (Apéndices, Figuras A.4 y A.5).

5.2.1. Zona frente (FT)

En la zona del frente, el radargrama FT_T2 contiene un reflector a 1,5 m en el extremo SE asociado a las zapatas de las columnas, coincidiendo con un máximo 4 μGal (línea naranja, Figura 5.8). A 1,5 m de profundidad en el extremo NW se encuentran las fundaciones de la antigua pared de tapia coincidiendo con un mínimo gravimétrico para la pared de -8 μGal (línea naranja, Figura 5.8). Lo anterior afirma la utilización de los diferentes materiales de construcción para estos lugares. Otro aspecto a mencionar es la región a menos de 50 cm de profundidad que contiene un contraste de reflexiones con altos en la anomalía residual de aproximadamente 3 μGal (letra A, Figura 5.8).

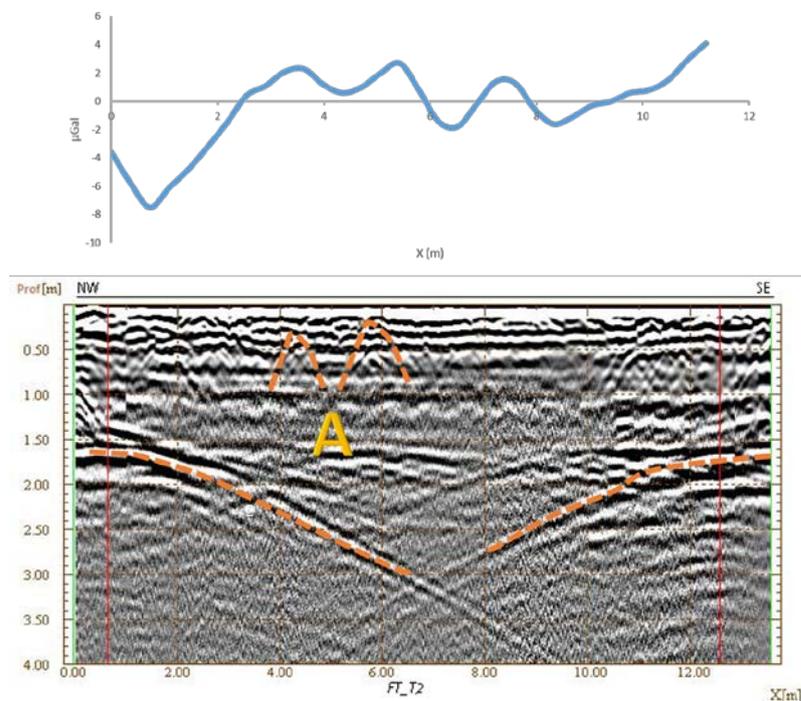


Figura 5.8. Radargrama FT_T2 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.

5.2.2. Zona patio externo (PE)

En el patio externo, el radargrama PE_L1 muestra un reflector en el extremo SW asociado a las fundaciones de la pared ubicadas 1,5 m de profundidad (línea naranja,

Figura 5.9), el cual va acompañado de una disminución en la anomalía desde los 8.5 hasta los 3 μGal , indicando un posible colapso. Dicha pared está hecha de bloques y ladrillos así como también contiene pilares de concreto. Otro aspecto es el comportamiento heterogéneo a partir de $X = 2$ m en el perfil, abarcando el primer metro de profundidad, lo cual sugiere posibles objetos enterrados o derrumbe de materiales a lo largo del tiempo (región B, Figura 5.9)

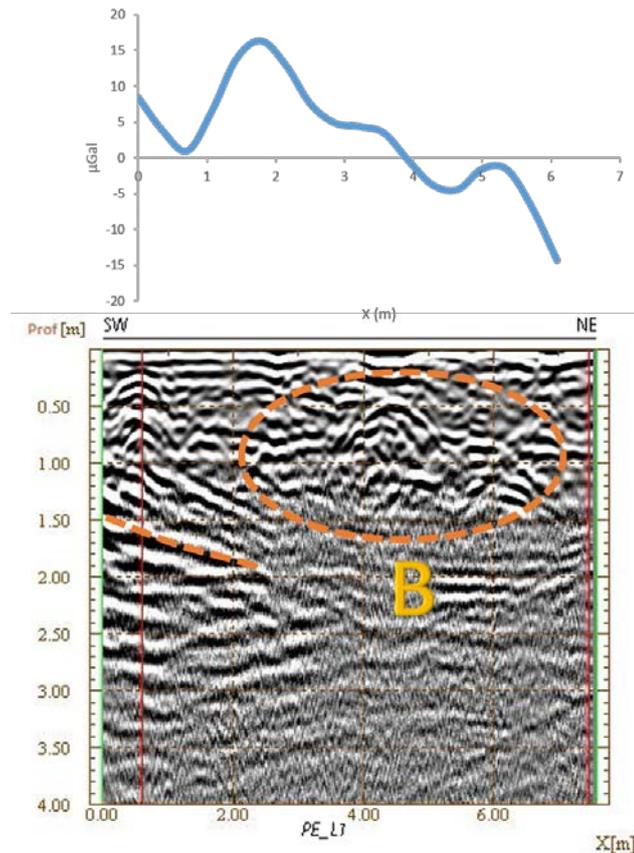


Figura 5.9. Radargrama PE_L1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.

El radargrama PE_L2 muestra en el extremo SW las fundaciones asociadas a la pared más reciente antes mencionada (línea naranja, Figura 5.10) con una disminución de 10 a 6 μGal , posiblemente por colapso. Una zona que contiene un posible cuerpo enterrado abarcando desde los 3 hasta los 4 m de longitud coincide con el máximo de 15 μGal para la anomalía residual (región A, Figura 5.10), pudiendo estar asociado a un terreno perturbado por la re-utilización del sistema hidráulico o por la capa más reciente de cemento colocada en la zona. La alcantarilla

presente en la zona genera sus reflexiones características y va acompañada de un mínimo en la anomalía de $-5 \mu\text{Gal}$ (líneas naranja, Figura 5.10).

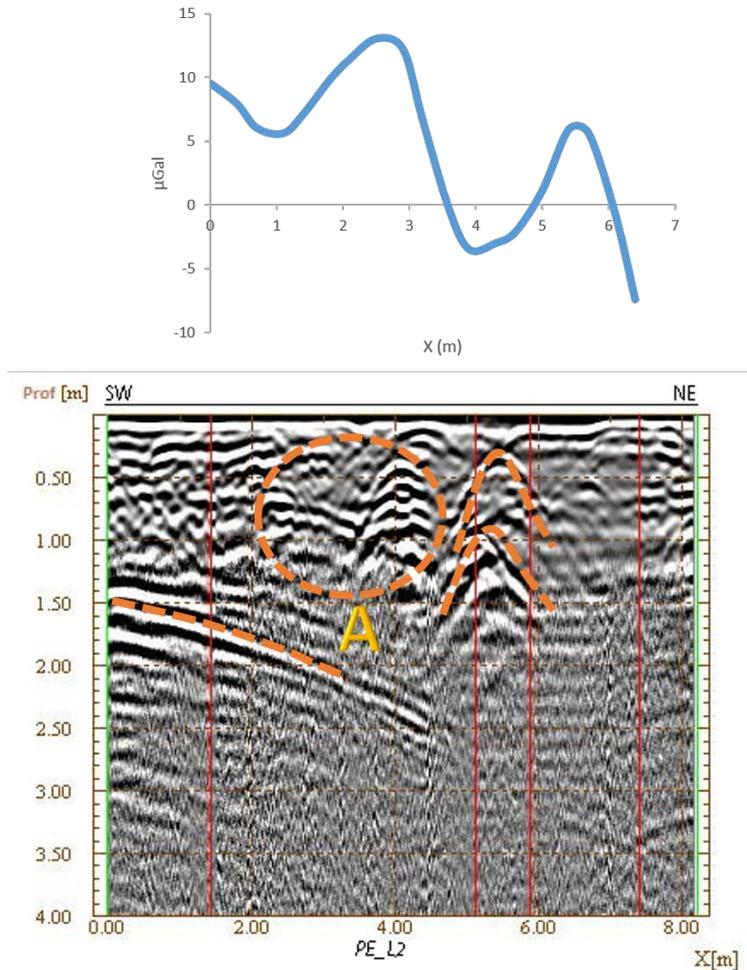


Figura 5.10. Radargrama PE_L2 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.

El radargrama PE_T1 contiene la respuesta característica de una alcantarilla, es decir, la respuesta de una cavidad vertical (región A, Figura 5.11). Se tienen tres (3) cuerpos enterrados asociados a posibles restos materiales acumulados por soterramiento, el primero de ellos a 6 m de longitud con una respuesta coincidente con el aumento en la anomalía hasta $10 \mu\text{Gal}$ (región B, Figura 5.11); el otro, ubicado a 12 m de longitud en el radargrama, se muestra con un aumento para la anomalía hasta unos $16 \mu\text{Gal}$ (región C, Figura 5.11) y el tercero, ubicado a unos 16 m de longitud en el radargrama muestra un valor de aproximadamente $8 \mu\text{Gal}$ (región D, Figura 5.11). Las fundaciones de las paredes de bloques y pilares de

concreto son visibles al inicio y final del radargrama, ubicadas a 1,5 m de profundidad (líneas naranja, Figura 5.11). Las mismas muestran comportamientos diferentes en anomalía con una disminución desde los 16 hasta los 6 μGal (pared ubicada en el extremo NW) y un aumento desde los 6 hasta los 10 μGal (pared ubicada en el extremo SE), pudiéndose asociar a distintos tiempos para su construcción. Este radargrama permite también ver una clara diferenciación electromagnética entre la zona NW y la zona SE debido a la presencia de humedad (zonas tenues) en la primera de ellas con respecto a la otra.

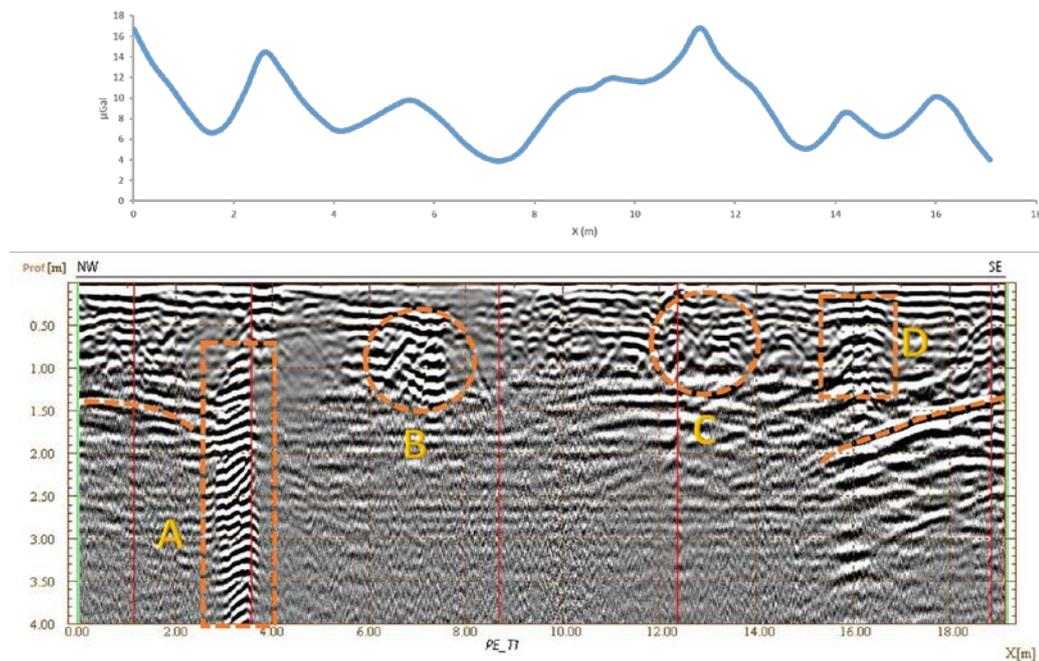


Figura 5.11. Radargrama PE_T1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.

En el radargrama PE_T2 se visualiza un reflector en el extremo SE asociado a la presencia de las fundaciones de la puerta de arco que da entrada al patio externo, ubicadas a 1,5 m de profundidad y con un mínimo de $-6 \mu\text{Gal}$ (línea naranja, Figura 5.12). Existe una pequeña zona de posible interferencia interrumpiendo el paquete de reflectores antes mencionado (región A, Figura 5.12). El posible derrumbe por percolación es notable en la zona de la alcantarilla en coincidencia con un mínimo gravimétrico de unos $-8,5 \mu\text{Gal}$ (región B, Figura 5.12). La presencia de las fundaciones de la pared en el extremo NW generan una elevación en la anomalía de aproximadamente $6 \mu\text{Gal}$ (línea naranja, Figura 5.12). A diferencia de PE_T1,

en este radargrama son más notables las zonas borrosas debido al efecto de la humedad en el subsuelo, lo cual afirma la existencia de un canal asociado a los efectos mostrados en los mapas de anomalías de Bouguer residuales (Figura 5.6b).

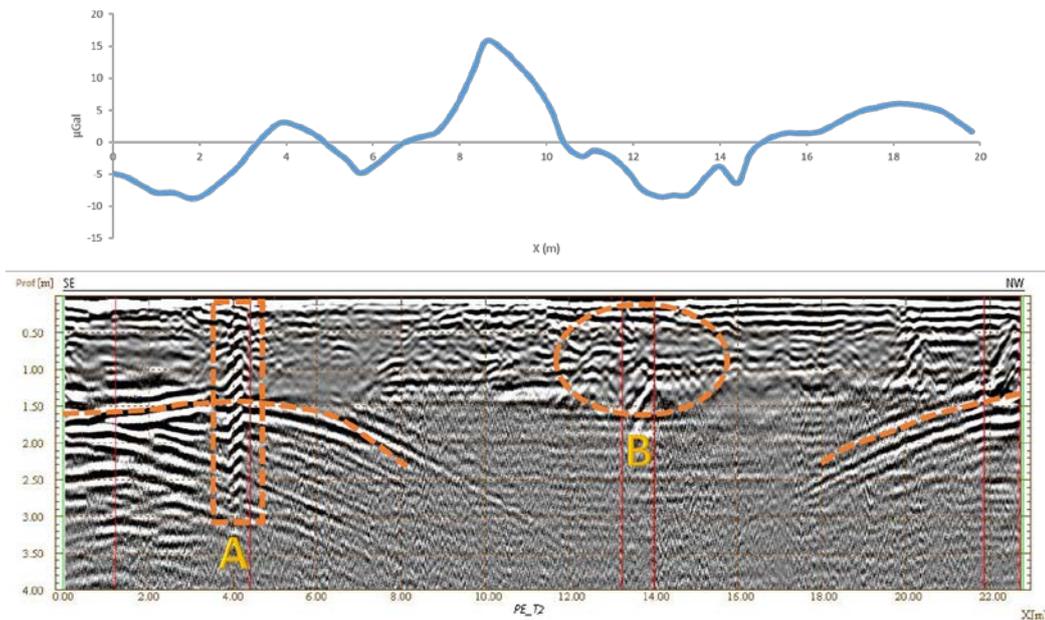


Figura 5.12. Radargrama PE_T2 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.

5.2.3. Zona patio interno (PI)

En el único radargrama para esta zona, PI_T1, es visible la alcantarilla ubicada a 10 m de longitud del radargrama, con una disminución en su anomalía hasta $10 \mu\text{Gal}$ (región A, Figura 5.13). Esta zona probablemente pueda estar envuelta en agua por percolación o pueda poseer objetos derrumbados a su alrededor debido al aumento en la anomalía. Otro lugar importante es la zona de cavidad de aproximadamente 1,5 m de longitud, con un mínimo de unos $2 \mu\text{Gal}$ (región B, Figura 5.13) y con reflectores característicos, la cual pudo ser utilizada como fuente de materia prima para la elaboración de las paredes. Una zona de cavidad también está presente posiblemente en $X=11,5$ m con una nueva disminución en la anomalía (región C, Figura 5.13). En el extremo SE, la presencia de las fundaciones para la pared antigua de tapia no son claras pudiendo ser más profundas por sus reflectores con distintos comportamientos ubicados a 2 m de profundidad posiblemente por soterramiento o por una excavación mayor (líneas naranja, Figura 5.13).

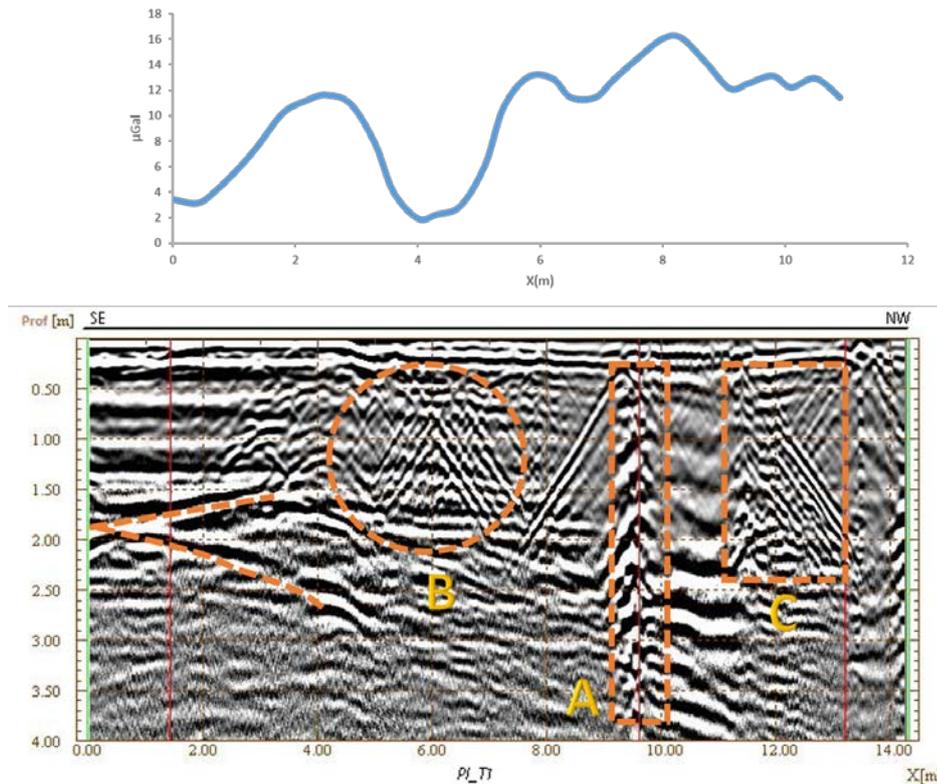


Figura 5.13. Radargrama PI_T1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.

5.2.4. Zona trapiche (TP)

En esta zona, con dos (2) radargramas paralelos entre sí se tiene como elemento principal para TP_T1 el cambio entre la zona asfaltada y la zona de tierra en $X=6,5$ m notable con la presencia reflexiones entre 0,5 y 1 m (líneas naranja – región A, Figura 5.14) y su parcial desaparición entre los 6,5 y 8 m (región B, Figura 5.14). La zona coincidente con el perfil microgravimétrico posee un contraste entre las hipérbolas presentes, lo cual muestra indicios de posibles estructuras enterradas cuya asociación se debe realizar en conjunto con la información recopilada.

Los registros históricos de la Casona provistos por Leal (1996) y Velasco (2004), sugieren que este lugar contaba según un inventario de 1854 con un trapiche con sus ruedas de agua, bombas, un portillo para robar agua, calderos, alambiques y hierros para fabricar papelón. Este tipo de estructuras fueron las más utilizadas en la Provincia de Venezuela y en las áreas cercanas a Caracas ya que eran los de mayor productividad. Por otra parte, las obras de riego y canalizaciones para

inundar a las tierras de las haciendas azucareras era realizada trayendo el agua desde el río más cercano a través de conductos o “acequias”; estas se construían buscando el punto más elevado para colocar la toma o “acequia madre” que hará correr el agua hacia el terreno que se quiere regar y finalmente se distribuye por sub-ramificaciones llamadas “regatos”. Todo esto permite establecer un nexo entre el funcionamiento del trapiche y su relación con los canales de distribución acuífera.

El contraste antes mencionado se extiende hasta los 1,5 m de profundidad con reflexiones mucho más marcadas (líneas naranja – región C, Figura 5.14) que podrían estar relacionadas a la presencia de tuberías o elementos estructurales metálicos enterrados en la zona, mientras que las menos visibles podrían estar relacionadas con otros elementos como la mampostería o acequias por sus mínimos en anomalías (línea naranja – región D, Figura 5.14). Esto se puede corroborar al visualizar una fotografía en la que es notable la presencia de encofrados y mampostería enterrada (Figura A.1, Apéndices).

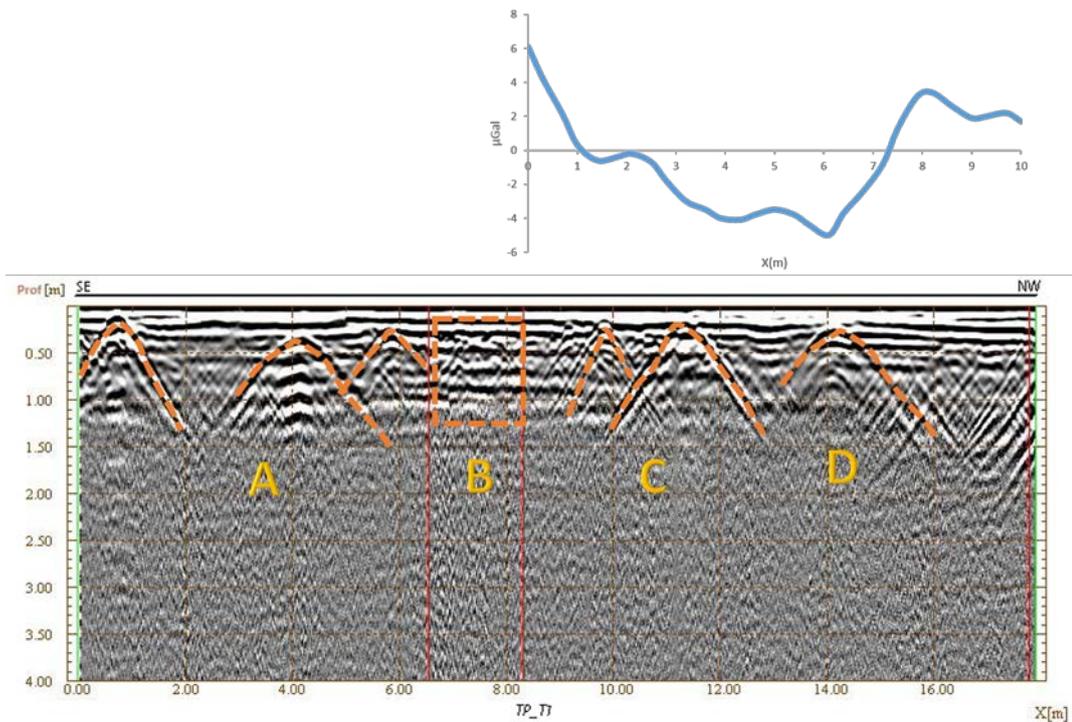


Figura 5.14. Radargrama TP_T1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.

El radargrama TP_T2, al estar en dirección inversa con respecto a su contraparte (TP_T1), muestra entre los 1,75 y 4 m aproximadamente reflectores horizontales poco distinguibles probablemente por algún problema de interferencia en la antena (región A, Figura 5.15). Seguidamente en B se afianza una zona de contraste entre reflexiones de mayor y menor concavidad (líneas naranja – región B, Figura 5.15). A partir de los 13,75 m aproximadamente se da el cambio a la zona de asfalto, mostrando sus reflexiones características (líneas naranja – región C, Figura 5.15)

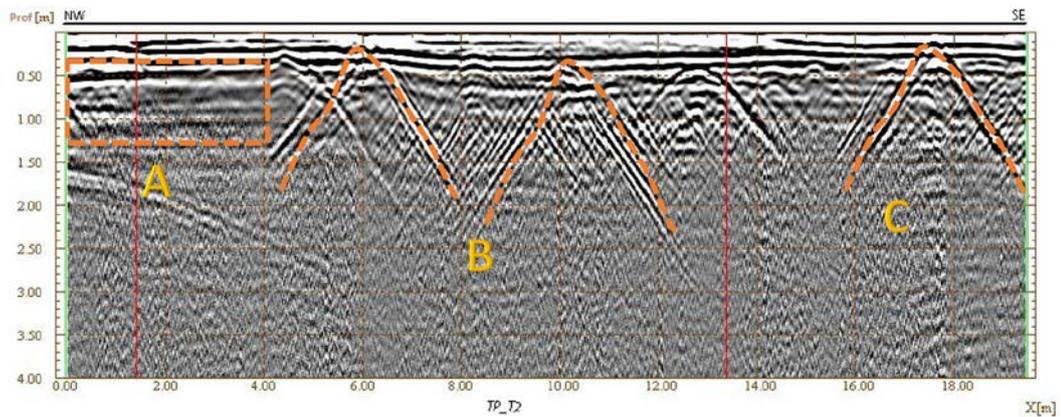


Figura 5.15. Radargrama TP_T2 paralelo a TP_T1.

5.2.5. Zona interna (ZI)

En el radargrama ZI_L1 se reflejan dos (2) características principales, la primera de ellas está asociada a la zona de cavidad, es decir, una zona de intervención de las capas del subsuelo natural, la cual es coincidente con el mínimo gravimétrico de $-18 \mu\text{Gal}$ (región A, Figura 5.16). Este valor es visible también en los mapas de anomalías residuales (Figura 5.6) en la zona del archivo C. Seguidamente, es notable la presencia de un cuerpo enterrado a menos de 50 cm que está coincidiendo con el máximo de $-2 \mu\text{Gal}$ y se podría colocar como una zona de potencial interés arqueológico (región B, Figura 5.16).

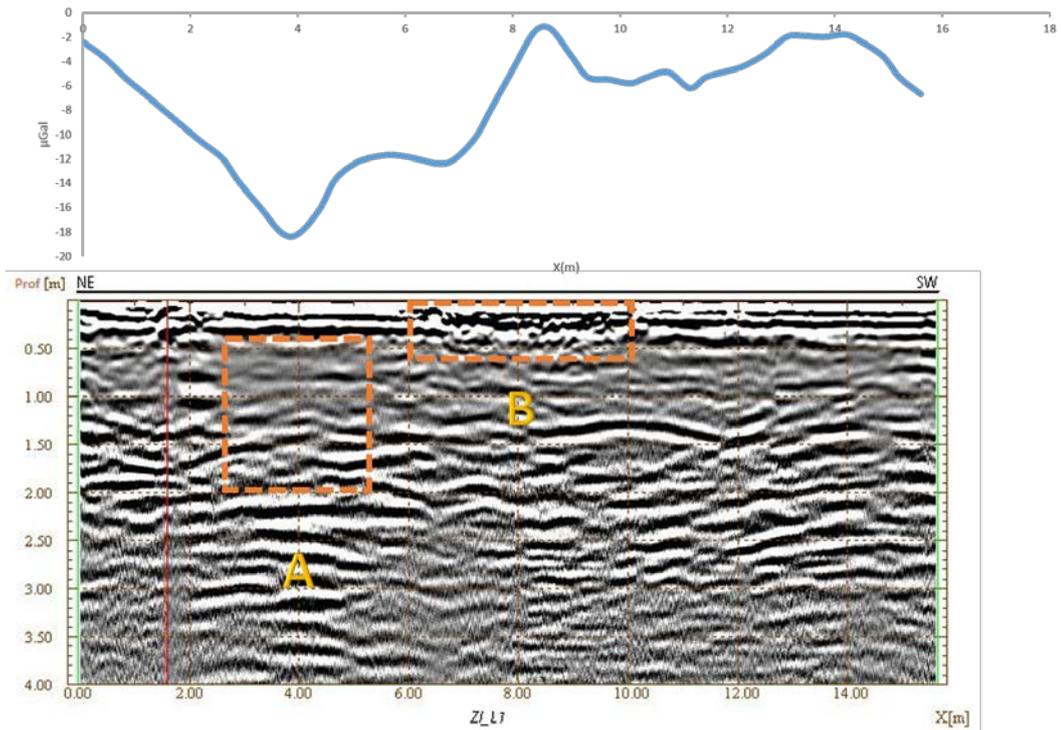


Figura 5.16. Radargrama ZI_L1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.

En el radargrama ZI_T1 (Figura 5.17) es relevante mencionar que a lo largo de todo el radargrama a 1,5 m se observa una respuesta bastante plana de los reflectores a lo largo de las habitaciones H y los archivos A y B, demostrando que ya se está llegando al nivel compacto del subsuelo y, por tanto, existirá una respuesta mucho más sólida por parte de las rocas emplazadas a ese nivel. Esto es sinónimo de descarte de zonas huecas en estos lugares, a pesar de que existan zonas de mínimos gravimétricos en los mapas residuales (Figura 5.6).

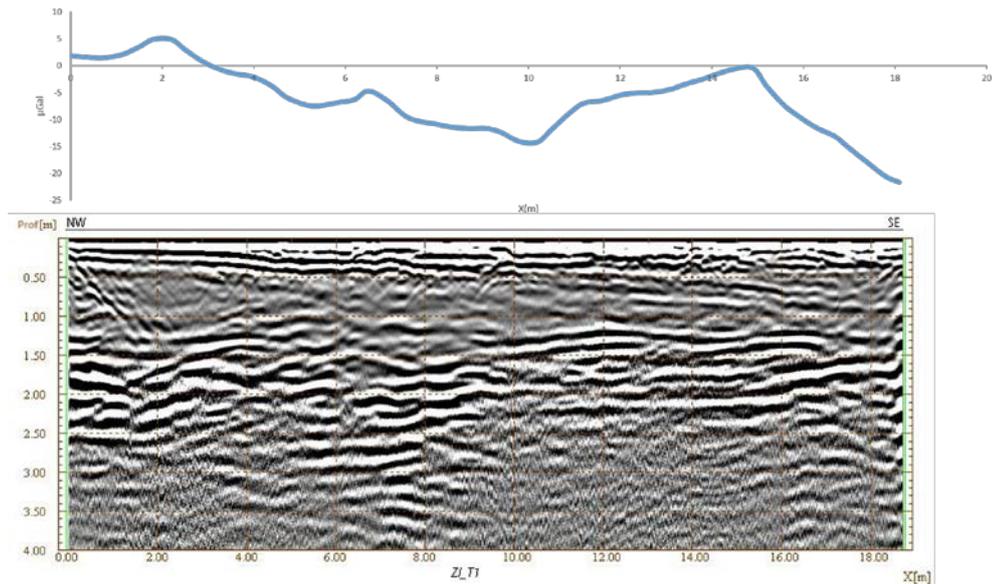


Figura 5.17. Radargrama ZI_T1 coincidente con el perfil de la anomalía de Bouguer residual.

Finalmente, la combinación de los radargramas ZI_T2 y ZI_T3 muestra zonas de un material mucho más blando que el que se distingue a partir de 1,5 m debido a la respuesta sólida del subsuelo que sugiere la presencia de roca maciza (regiones A y C, Figura 5.18). El contraste entre estos dos (2) comportamientos da indicios de una posible remoción del terreno con una cavidad previamente utilizada y luego rellenada con un material distinto al original. A pesar de lo anterior, los elementos en estos radargramas no son lo suficientemente concluyentes para con la gravimetría, haciendo que la descripción del posible cuerpo enterrado antes mencionada quede todavía en un estado ambiguo. Esto se puede deber a que al ser dos (2) propiedades distintas las que se miden, en todos los casos no se podrá lograr una correcta correlación. Otros elementos a describir son la reflexión asociada a las fundaciones de la antigua pared en el extremo SE (líneas naranja, Figura 5.18) con valores entre 8 y 10 μGal y el mínimo en la anomalía residual de 6 μGal , asociado también con la zona de roca blanda (región D, Figura 5.18).

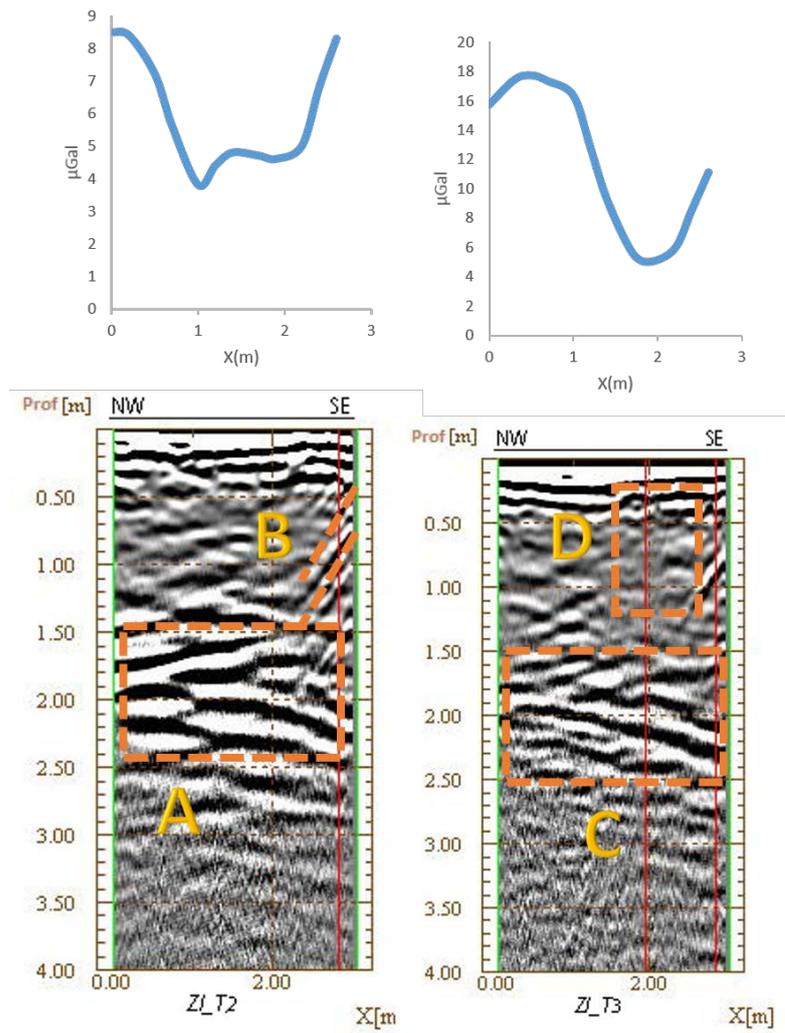


Figura 5.18. Radargramas ZI_T2 y ZI_T3 coincidentes con los perfiles de la anomalía de Bouguer residual.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

A) La prospección geofísica integrada con microgravimetría y GPR permitió la correcta caracterización y delimitación de las zonas con posibilidad de existencia de cultura material, garantizando una alternativa no invasiva ni destructiva para los arqueólogos que ahorre tiempo y dinero.

B) El dato microgravimétrico permitió delimitar cavidades de diversos orígenes y la diferenciación de elementos estructurales como sistemas hidráulicos.

C) La prospección GPR demostró ser un complemento importante para corroborar – en su mayoría – la existencia de zonas con marcados contrastes de densidad asociadas a diversos aspectos arqueológicos previamente documentados. Un ejemplo de esto está en las fundaciones asociadas a las antiguas paredes y a las columnas.

D) Una anomalía residual negativa localizada en la capilla 1 podría encontrarse asociada a la actual o previa existencia de un foso funerario. El primer caso estaría representado por un contraste de densidades promedio de $-0,5 \text{ g/cm}^3$ y una ubicación a 1 m de profundidad. En el segundo caso, la anomalía representa el efecto causado por un material sedimentario removido, trayendo consigo cambios en la densidad.

E) La presencia de canales hidráulicos re-utilizados en la zona del patio externo sugiere la existencia de zonas antiguas de transporte de fluidos (acequias) con diversos fines a lo largo del tiempo.

F) Frente al trapiche se evidencia la posible existencia de zonas de acequias asociadas al antiguo funcionamiento de este sistema mecanizado, el cual procesaba la materia prima para el trabajo.

G) Se descarta que la existencia de cavidades aisladas sin patrón alguno en el interior de la casa haya estado asociada al diseño y construcción de depósitos de agua (aljibes).

6.2. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones para futuros trabajos de esta índole son:

A) Ampliar el estudio microgravimétrico en las zonas no exploradas (ala NW de la casa) debido a que no se pudieron realizar, con el fin de determinar la presencia o no de nuevas zonas de interés arqueológico.

B) El complemento a través de la prospección con georadar debe ser realizado con antenas de mayor frecuencia con el fin de aseverar las zonas arqueológicas previamente delimitadas o conseguir algunas nuevas.

C) En caso de llevarse a cabo un proyecto importante de excavación arqueológica se recomienda contar con la información provista a través de los métodos indirectos con el fin de facilitar las tareas relacionadas con este tipo de prospección.

D) Es imperante la determinación de la densidad de los elementos estructurales presentes en la casa de forma indirecta con el fin de obtener un valor apropiado que permita corregir los datos microgravimétricos de forma mucho más precisa.

E) A pesar de su deterioro progresivo, el significado patrimonial y cultural de la Casona Ibarra queda en realce y en evidencia a través de este trabajo, haciendo falta destinar una cantidad de recursos para la exploración arqueológica la cual, a través de la excavación, logrará la reconstrucción histórica definitiva del lugar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero, M. y J. Domínguez. (2005). *Estudio geológico – geotécnico y evaluación de las condiciones del terreno que constituye el campus de la Ciudad Universitaria de Caracas (CUC)*. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geología. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 98 p.
- Annan, A.P. (2001). *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*. Sensors & Software Inc. Ontario, Canadá. 197 p.
- Aray, J. (2016). *Evaluación del subsuelo con el empleo de la técnica de GPR, en la búsqueda de evidencias de deformación por fallas activas en los estados Táchira y Mérida, Venezuela*. Trabajo de Grado, Magíster Scientiarum en Ciencias Geológicas. Departamento de Geología. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 232 p.
- Blizkovsky, M. (1979). *Processing and applications in microgravity surveys*. *Geophysical Prospecting* 27: 848-861.
- Benedetto, A. y L. Pajewski. (2015). *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Ed. Springer. 373 p.
- Bonomo, N y de la Vega, M. (2006). *Capítulo 4: El Método de Georadar en Arqueogeofísica*. Ed. Fundación de Historia Natural Félix de Azara, Departamento de Ciencias Naturales y Antropológicas, CEBBAD – CONICET; e Instituto Superior de Investigaciones, Universidad Maimónides, Argentina. 196 p.
- Chávez, R., M. Encarnación Cámara, R. Ponce y D. Argote. (2005). *Use of Geophysical Methods in Urban Archaeological Prospection: The Basilica*

de Nuestra Señora de La Salud, Patzcuaro, Mexico. Geoarchaeology: An International Journal 20(5):505-519.

Contreras, A. y L.A. López. (2013). *Interpretación de datos gravimétricos con la señal analítica 3D. Estudio de caso: Los Naranjos – Facatativá (Colombia)*. Boletín de Geología 35(1):97-107.

Cooper, G.R.J. y D.R. Cowan. (2008). *Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics*. Geophysics 73(3):H1-H4.

Del Castillo, N. (2008). *Proyecto de Restauración y Adecuación de Uso Casona Ibarra*. Ciudad Universitaria de Caracas.

Erreyes, J. (2014). *Densidad real del cemento*. Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.

Fuenmayor, C. (2013). *Cartografiado del sistema hidráulico de la Hacienda La Floresta en Caracas durante los siglos XVIII y XIX aplicando el método Ground Penetrating Radar (GPR)*. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 110 p.

García, N., M. Delgado y M. Bayona. (2013). *Experimentación, comportamiento y modelación de la tapia pisada*. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, Colombia 22(35):47-59.

Gil, J. (2012). *La tecnología constructiva de tapia: tradición arquitectónica e identidad cultural de los Pueblos del Sur del estado Mérida, Venezuela*. Anuario GRHIAL Universidad de Los Andes (6):231:258.

González, J. (2011). *Estimación de parámetros geotécnicos por métodos geofísicos en la Ciudad Universitaria de Caracas – Universidad Central de Venezuela*. Trabajo de Grado, Magíster Scientiarum en Geofísica. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 118 p.

- Götze, H.J y B. Lahmeyer. (1988). *Application of three-dimensional interactive modeling in gravity and magnetics*. Geophysics 53(8):1096-1108.
- Hinze, W., C. Aiken, J. Brozena, B. Coakley, D. Dater, G. Flanagan, R. Forsberg, T. Hildenbrand, G. Randy Keller, J. Kellogg, R. Kucks, X. Li, A. Mainville, R. Morin, M. Pilkington, D. Plouff, D. Ravat, D. Roman, J. Urrutia-Fucugauchi, M. Véronneau, M. Webring y D. Winester. (2007). *New standards for reducing gravity data: The North American gravity database*. Geophysics 70(4): J25-J32.
- IDS (Ingegneria dei Sistemi). (2003). *The GresWin2 Software Module. Rev. 1.0*. Pisa, Italia. 28 p.
- IDS (Ingegneria dei Sistemi). (2005). *Easy Guide. How to assemble the backpack kit. Rev. 1.0*. Pisa, Italia. 20 p.
- IDS (Ingegneria dei Sistemi). (2005). *Easy Guide. How to assemble the IDSTR25/IDSTR40 Antennas. Rev. 1.0*. Pisa, Italia. 20 p.
- IDS (Ingegneria dei Sistemi). (2007). *IDS GPR Product Catalogue: Leading edge multi-frequency and multi-channel systems*. GeoRadar Division. Pisa, Italia. 61 p.
- IDS (Ingegneria dei Sistemi). (2009). *Software K2 – User’s Guide. Rev. 1.0*. Pisa, Italia. 92 p.
- IDS (Ingegneria dei Sistemi). (2014). *GPR Configuration for Archeology and Cultural Heritage Application*. GeoRadar Division. Pisa, Italia. 64 p.
- Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB). (2007). *Mapa topográfico*. Hoja 6847 III NO A1. Caracas. Escala 1:5000.
- Jiménez, V. (2016). *Caracterización arqueológica en el Parque San Felipe El Fuerte, estado Yaracuy usando el método del georadar*. Trabajo Especial de Grado. Decanato de Estudios Profesionales. Coordinación de Ingeniería Geofísica. Universidad Simón Bolívar, Caracas. 92 p.

- Jol, H. (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Ed. Elsevier. 402 p.
- Kearey, P., M. Brooks e I. Hill. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Ed. Blackwell Science Ltd. 262 p.
- Kirsch, R. (2006). *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology*. Ed. Springer. 500 p.
- Lakshmanan J. y J. Montlucon. (1987). *Microgravity probes the Great Pyramid*. The Leading Edge 6:10–17.
- Leal, I. (1996). *La Casona de la Hacienda Ibarra: Origen de la Ciudad Universitaria*. Secretaría de la Universidad Central de Venezuela y Oficina Central de Información de la Presidencia de la República.
- Lillie, R. (1999). *Whole Earth Geophysics: An Introductory Textbook for Geologists and Geophysicists*. Ed. Prentice Hall. 361 p.
- Martín, C. y V. Mosquera. (2013). *Bioarqueología en la Hacienda Ibarra, Caracas, Venezuela*. Escuela de Antropología, Universidad Central de Venezuela (UCV) y Odontología Forense, Cuerpo Técnico de Investigaciones Científicas y Criminalísticas (CICPC).
- Molina, L. y E. Amodio. (2008). *Propuesta de investigación arqueológica e histórico – antropológica de la antigua Hacienda Ibarra, hoy Ciudad Universitaria de Caracas*. Escuela de Antropología. Facultad de Ciencias Económicas y Sociales. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 7 p.
- Padín, J., A. Martín y A. Belén Anquela. (2012). *Archaeological microgravimetric prospection inside don church (Valencia, Spain)*. Journal of Archaeological Science 39:547-554.
- Panisova, J. y R. Pasteka. (2009). *The use of microgravity technique in archaeology: A case study from the St. Nicolas Church in Pukanec, Slovakia*. Contributions to Geophysics and Geodesy 39(3):237-254.

- Paniso, J. y R. Pasteka. (2011). *New Method for calculation of the building effect correction in microgravity technique*. Near Surface P18.
- Paniso, J., M Frastia, T. Wunderlich, R. Pasteka, R y D. Kusnirak. (2013). *Microgravity and Ground-penetrating Radar Investigations of Subsurface Features at the St Catherine's Monastery, Slovakia*. Archaeological Prospection 20:163-174.
- Paniso, J., I. Murín, R. Pasteka, J. Halickova, P. Bruncak, V. Pohanka, J. Papco y P. Milo. (2016). *Geophysical fingerprints of shallow cultural structures from microgravity and GPR measurements in the Church of St. George, SvätýJur, Slovakia*. Journal of Applied Geophysics 127:102-111.
- Peña, J. (2011). *Estudio geofísico mediante microgravimetría, para la detección de cavidades en una parcela situada en la calle Ángela López de la Llana N° 8, en la localidad de Priego (Cuenca)*. Geofísica Consultores, España. 14 p.
- Pérez, M y Vilorio, A. (2013). *Caracterización del subsuelo en el tramo de las estaciones Bello Monte – Las Mercedes y la estación Bello Campo de la línea cinco del Metro de Caracas, aplicando GPR y métodos geológicos*. Trabajo Especial de Grado. Departamentos de Geología y Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 108 p.
- Pasteka, R. y P. Zahorec. (2000). *Interpretation of microgravimetric anomalies in the region of the former church of St. Catherine, Dechtice*. Contributions to Geophysics and Geodesy 30(4):373-387.
- Pasteka, R., F. P. Richter, R. Karcol, K. Brazda y M. Hajach. (2009). *Regularized derivatives of potential fields and their role in semi-automated interpretation methods*. Geophysical Prospecting 57(4):507–516.
- Pasteka, R. y H. Götze. (2009). *Micro-gravity method in archaeology*. INCA. 52 p.

- Reid, A.B., J.M. Allsop, H. Granser, A.J. Millett e I.W. Somerton. (1990). *Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution*. *Geophysics* 55:80 – 91.
- Reynolds, J. (1997). *An Introduction to Applied and Enviromental Geophysics*. Ed. John Wiley & Sons Ltd. 796 p.
- Romero, J. (2009). *Prospección Geofísica Aplicando GPR en la Iglesia Santa Ana del Norte, Municipio Gómez, Estado Nueva Esparta*. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 115 p.
- Saad, A. (2006). *Undestanding gravity gradients – a tutorial*. *The Leading Edge* 25(8): 942-949.
- Sesto, E. (2008). *Caracterización geoelectrica del Cementerio de Los Ingleses en Aroa, Estado Yaracuy*. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 108 p.
- Slepek, Z. (1997). *Complex Geophysical Investigations for Studying the Cultural Layer and Remains of Ancient Buildings in the Territory of Kazan Kremlin, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia*. *Archaeological Prospection* 4:207-218.
- Spector, A. y F. Grant. (1970). *Statistical models for interpreting aero-magnetic data*. *Geophysics* 35(2):293-302.
- Telford, W.M., L.P. Geldart y R.E. Sheriff. (1990). *Applied Geophysics*. Ed. Cambridge University Press. 751 p.
- Thompson, D. T. (1982). *EULDPH: A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data*. *Geophysics* 47:31–37.

- Urbani, F. (2002). *El Río Miguelena de Camurí Grande, Estado Vargas: Una ventana a la geología de la Cordillera de la Costa. Guía de excursión*. UCV, Facultad de Ingeniería. Departamento de Geología. FUNVISIS. 62 p.
- Urbani, F., S. Grande, M. Lucarelli, L. González y L. Melo. (2012). *Notas sobre los esquistos de Las Mercedes y Chuspita, estado Miranda, Venezuela*. Geos Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra 42:15-29.
- Velasco, F. (2004). *Valoración y conservación de los elementos significativos de La Casa Grande de la antigua Hacienda Ibarra*. Trabajo de Grado, Magíster Scientiarum en Conservación y Restauración de Monumentos. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Central de Venezuela. 136 p.
- Wightman, W. E., F. Jalinoos, P. Sirles y K. Hanna. (2003). *Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems*. Federal Highway Administration (FHWA) IF-04-021, Estados Unidos. 744 p.

APÉNDICES

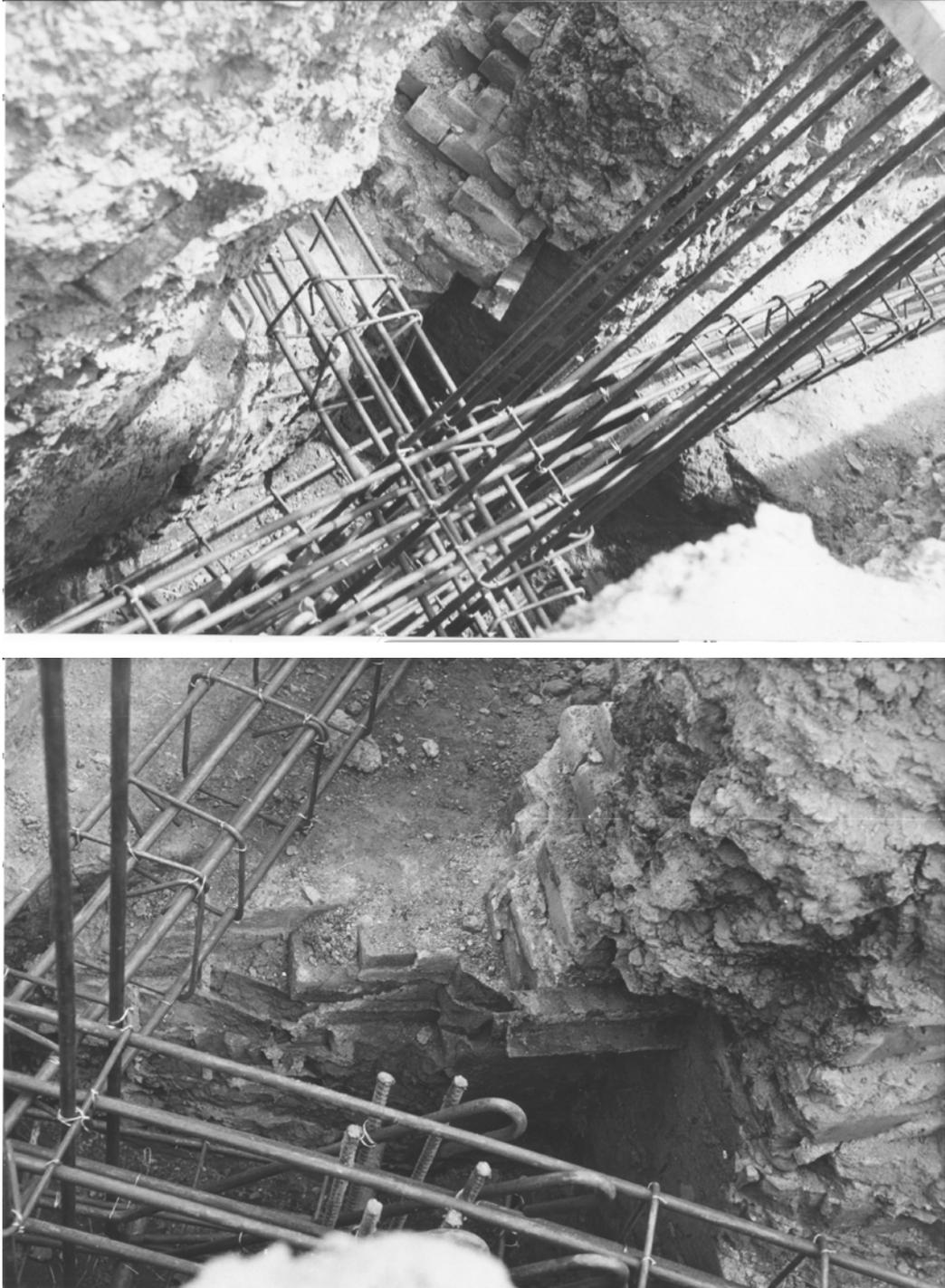


Figura A.1. Distintas tomas para una mampostería presente en la zona sur de la Casona (ICU, 1958).



Figura A.2. Planos con los acabados de pisos para la Casona (Del Castillo, 2008).

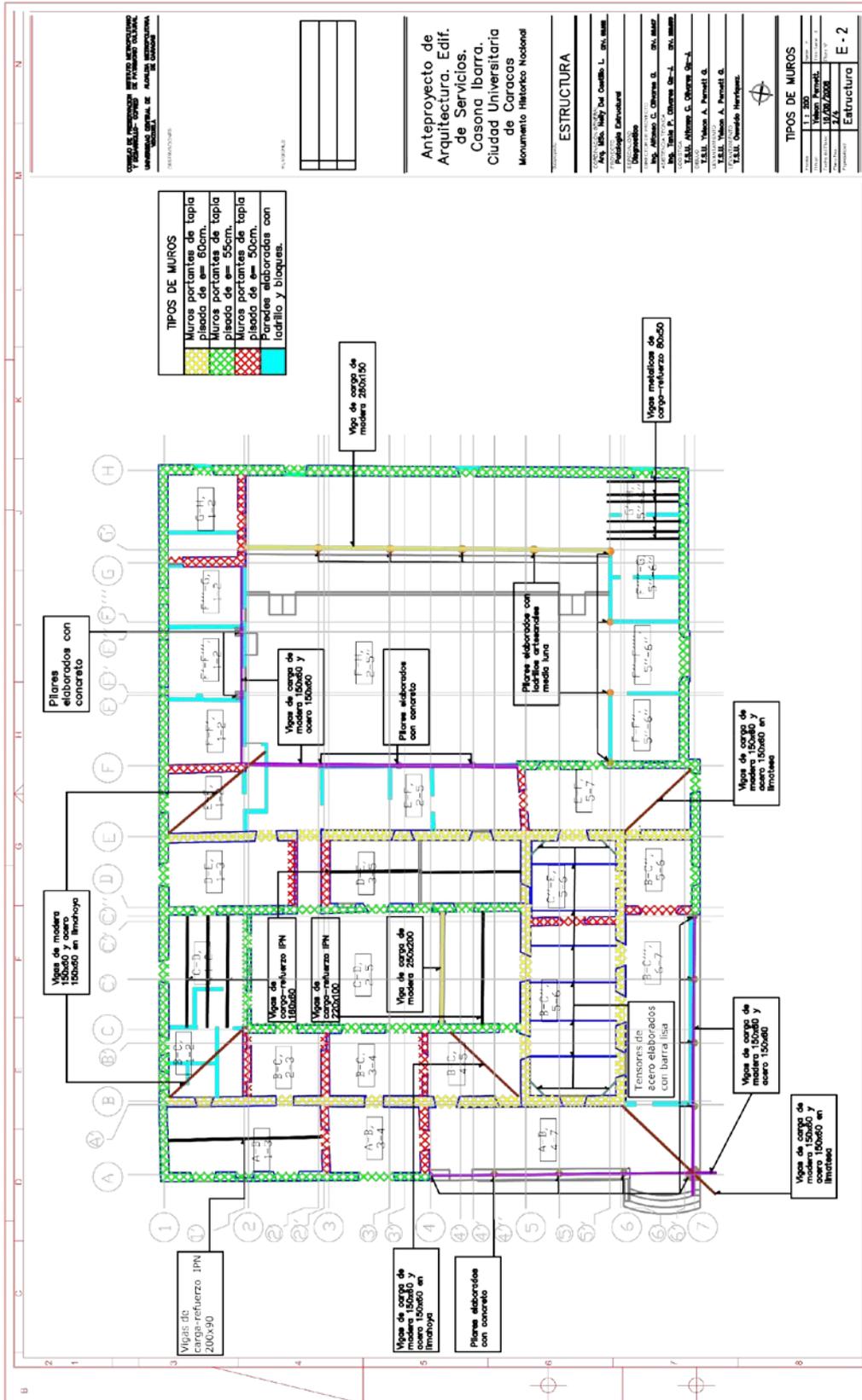


Figura A.3. Plano con los tipos de paredes en la Casona (Del Castillo, 2008).

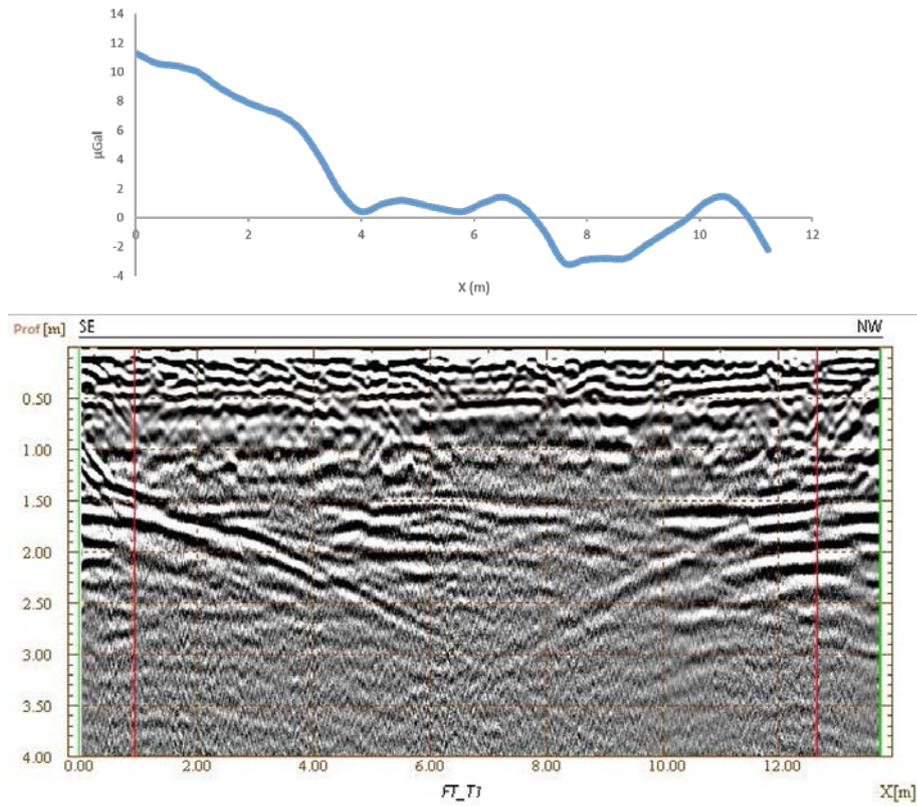


Figura A.4. Radargrama FT_T1 con su respectiva anomalía de Bouguer residual.

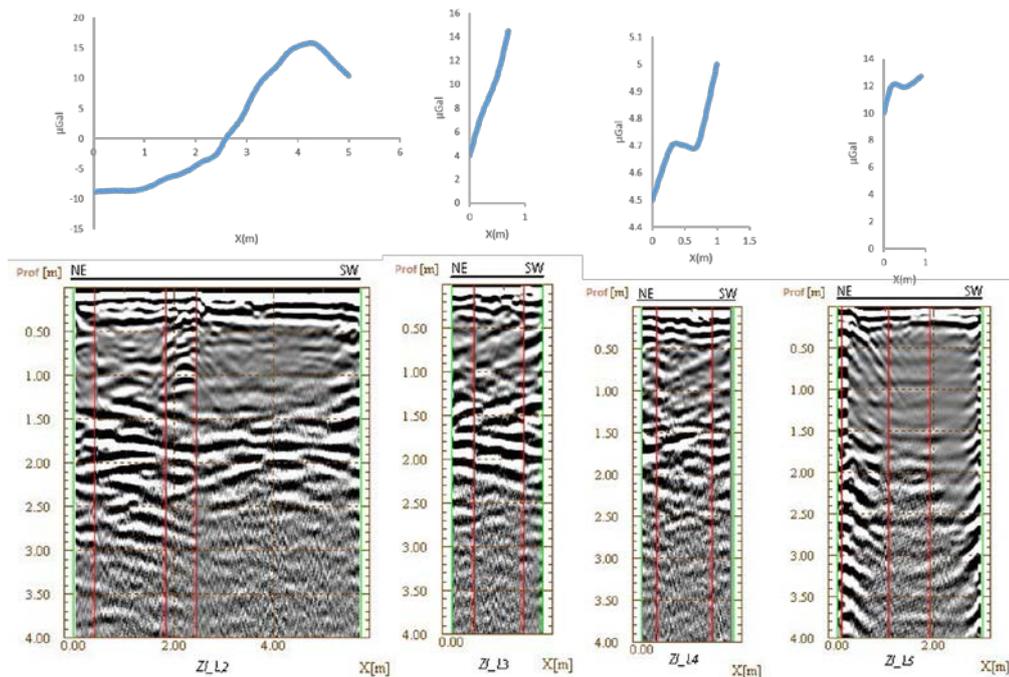


Figura A.5. Radargramas ZI_L2, L3, L4 y L5 con sus respectivas anomalías de Bouguer residuales.