

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

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
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela, por
Fuenmayor Jiménez, Carlos E
Para optar al título de Ingeniero Geofísico

Caracas, Mayo de 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARTOGRAFIADO DEL SISTEMA HIDRÁULICO DE LA HACIENDA LA FLORESTA EN CARACAS DURANTE LOS SIGLOS XVIII Y XIX APLICANDO EL MÉTODO *GROUND PENETRATING RADAR* (GPR).

Tutora Académica:

Nuris Orihuela

Tutora Industrial:

Lilia Vierma

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela, por
Fuenmayor Jiménez, Carlos E
Para optar al título de Ingeniero Geofísico

Caracas, Mayo de 2013

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 Br. Carlos Eduardo Fuenmayor J, titulado:

“CARTOGRAFIADO DEL SISTEMA HIDRÁULICO DE LA HACIENDA LA FLORESTA EN CARACAS DURANTE LOS SIGLOS XVIII Y XIX APLICANDO EL MÉTODO *GROUND PENETRATING RADAR* (GPR)”

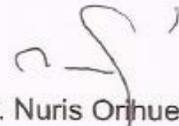
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

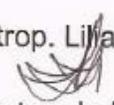
Prof. _____

Jurado

Prof. _____

Jurado


Prof. Nuris Orhuela
Tutor Académico


Antrop. Lilia Vierma
Tutora Industrial

"Tu enfoque determina tu realidad" **Qui-Gon Jinn**

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente a Dios! Por esa fuerza infinita que me ha dado para no rendirme y seguir adelante con determinación y así poder alcanzar todas mis metas.

A la Universidad Central de Venezuela, la casa que vence las sombras, por todas esas bellas experiencias vividas.

A mi tutora académica Nuris Orihulea, por su excelente calidad humana y esa dedicación inquebrantable de enseñar y brindar todo el apoyo necesario, y a mi tutora industrial Lilia Vierma, por toda la paciencia y ayuda brindada durante esta investigación, así como a PDVSA La Estancia, a través de la Gerencia de Patrimonio por permitir el espacio para el trabajo académico, en el marco de la valoración patrimonial de todos los elementos que conforman La Hacienda La Floresta.

A toda la gente de TRX, especialmente a Edward Duran, por toda la ayuda durante la realización de este trabajo especial de grado.

A mis padres, Carlos José Fuenmayor y Yzaida Jiménez por la confianza y apoyo incondicional durante toda mi carrera universitaria.

A Lizzette Carolina Díaz, el motor de mi vida, la luz de mi presente y la magia de mi futuro... la chita del chito!.

A mi hermano Carlos Alberto, que aunque él no lo sepa es una de mis grandes inspiraciones y ha marcado mis ganas de superación y fortalecimiento del día a día.

A mis tías: Flor, Nene, Nery, Evelin, Rosa, Alala, por estar siempre pendientes, y por sus valiosos consejos.

A los profesores Luis Molina y Carlos Alberto Martín, por las asesorías oportunas.

A mi hermano del alma Armando Fajardo por estar ahí en las malas y en las buenas, justo cuando lo necesitaba, a toda la comunidad Piscis, (Mafer, Javier, Johnny, Rosa, Yileima) y al equipo gamer 360 (Julio, Rómulo y Armando) por brindarme su valiosa amistad, así como a todos mis compañeros de la UCV por esos gratos e inolvidables momentos (Manuel Martínez, Mariano Arnaiz, Halis Benítez, Sofía Villanueva, Sara Otero, Alberti Viloría, Fabián Linares, Carlos Corredor).

Fuenmayor Jiménez, Carlos E

“CARTOGRAFIADO DEL SISTEMA HIDRÁULICO DE LA HACIENDA LA FLORESTA EN CARACAS DURANTE LOS SIGLOS XVIII Y XIX APLICANDO EL METODO *GROUND PENETRATING RADAR* (GPR)”

Tutor Académico: Prof. Nuris Orihuela;

Tutor Industrial: Antrop. Lilia Vierma.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geofísica. Año 2013.

Palabras Claves: Georadar, Arqueología, Métodos Electromagnéticos, Radargramas, Acequia.

Resumen

Los métodos de prospección geofísica usados en la delimitación y caracterización de los yacimientos arqueológicos han resultado ser de gran beneficio para el análisis e interpretación de los mismos, por cuanto permite precisar los espacios a intervenir, e incluso la pertinencia o no de hacerlo tomando en cuenta aspectos tales como los riesgos de conservación, recursos financieros, tiempo disponible para la investigación, entre otros. Uno de los métodos geofísicos, no invasivos, con el cual se ha demostrado mayor eficacia en este tipo de estudios es el georadar, también conocido como *Ground Penetrating Radar* “GPR” o radar de penetración, esto debido a la rapidez con la que se pueden obtener los datos, también por la calidad de obtención de imágenes de vestigios arqueológicos, y que es una técnica no invasiva, permitiendo prospectar sin alterar o destruir el área a investigar.

El estudio contempló la recopilación de datos, que nos suministrarán la información deseada. Se aplicó el método GPR con el cual se adquirieron perfiles en las áreas verdes de La Hacienda La Floresta, mediante mallados con líneas longitudinales N-S, y líneas transversales E-O, con una separación entre líneas de 2 m y utilizando un arreglo biestático con antenas de 200 Mhz y 600 Mhz.

Una vez adquiridos todos los perfiles, dichos datos son sometidos a un procesamiento para luego ser interpretados según criterios establecidos, y de esta manera lograr el producto final de este trabajo especial de grado, el cual consistió en la realización del cartografiado del antiguo sistema hidráulico, teniendo como resultados 15 tramos del mismos, estos tramos también se conocen con el nombre Acequia. De esta manera, se añade un fortalecimiento de carácter patrimonial sobre la Hacienda La Floresta, y un valor histórico sobre la misma.

INDICE GENERAL

Contenido	Pág.
Resumen.....	vi
Tabla de contenidos.....	viii
Lista de figuras.....	xi
Lista de tablas.....	xvi
Lista de apéndices.....	xvii
CAPÍTULO I.....	17
INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Planteamiento del Problema.....	17
1.2 Objetivo General.....	19
1.2.1 Objetivos Específicos.....	19
1.3 Ubicación del área de estudio.....	20
1.3 Justificación.....	21
CAPÍTULO II.....	22
MARCO GEOLÓGICO, HISTÓRICO Y ARQUEOLÓGICO.....	22
2.1 Geología Regional.....	22
2.2 Geología Local.....	25
2.3 Marco Histórico y Arqueológico.....	28
CAPÍTULO III.....	33
MARCO TEÓRICO.....	33

3.1 Geofísica aplicada a la Arqueología	33
3.2 Ondas electromagnéticas:	34
3.3 Parámetros electromagnéticos de un medio	35
3.3.1 Conductividad eléctrica.....	35
3.3.2 Permitividad dieléctrica.....	36
3.3.3 Permeabilidad magnética	36
3.4 Propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales	36
3.5 GPR.....	38
3.6 Configuración de los arreglos de adquisición	39
3.7 Procesos físicos que modifican las señales del GPR.....	42
3.7.1 Divergencia geométrica	43
3.7.2 Fenómeno de absorción	44
3.7.3 Fenómeno de reflexión y transmisión	45
3.7.4 Fenómeno de dispersión	46
3.8 Procesamiento de datos	47
3.9 Interpretación.....	48
CAPÍTULO IV.....	51
METODOLOGÍA	51
4.1 Adquisición	51
4.2 Equipo y materiales empleados.....	53
4.3 Mediciones en campo.....	54
4.3.1 Sectores:	57
4.4 Procesamiento.....	58
4.4.1 Abrir mallado.....	60
4.4.2 Selección de Línea	61
4.4.3 Corrección del tiempo cero	62
4.4.4 Filtro <i>Background Removal</i>	63
4.4.5 Filtro pasa banda	64
4.4.6 Ganancia	65
4.4.7 Suavizado.....	66

4.5 Interpretación.....	67
CAPÍTULO V.....	72
RESULTADOS Y ANALISIS	72
5.1 Sector 1	79
5.2 Sector 2	84
5.3 Sector 3	89
5.4 Sector 4	93
5.5 Sector 5	98
CAPÍTULO VI.....	105
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
6.1 CONCLUSIONES	105
6.2 RECOMENDACIONES.....	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de Venezuela y <i>zoom</i> del área de estudio. (Modificado de <i>Google Earth</i>).....	20
Figura 2. Geología del cuaternario del valle de Caracas (André Singer 1974)	26
Figura 3. Columna estratigráfica perteneciente al área de estudio (Peter Katak 2001).....	27
Figura 4 Hacienda La Floresta (Fotos del autor).....	28
Figura 5 Jardines de la Hacienda La Estancia (fotos del autor).....	29
Figura 6. Pátio de secado de café (fotos del autor)	31
Figura 7. Izquierda: Tramo de Acequia de abastecimiento. Derecha: Tramo de Acequia principal (Tomado de Semblanza Historica del Agua en Mexico)	32
Figura 8. Propagación de una onda Electromagnética (Lawrence b. Conyers (2004))	34
Figura 9. Ecuaciones de Maxwell	35
Figura 10. Diagrama de flujo de un sistema típico GPR [Davis, 1989].	39
Figura 11. Arreglo Monoestático (modificado de Annan 2001)	40
Figura 12. Secuencia de un arreglo biestático (Tomado de Bonomo 2007) .	41
Figura 13. Arreglo biestático en CMP (Modificado de Harry M. Jol 2009)	42

Figura 14. Disminución en la intensidad que ilumina un área constante con el aumento de la profundidad, a medida que ésta se incrementa en un valor fijo "d". (Modificado de Bonomo 2007)	44
Figura 15. Esquema de la reflexión y la transmisión de un pulso electromagnético en una interfaz que separa dos medios con distintas permitividades. (Modificado de Bonomo 2007)	45
Figura 16. Ecuación de ley de Reflexión y Transmisión	46
Figura 17. Fenómenos de Dispersión por superficie rugosa y por fluctuaciones en la permitividad. (Modificado de Bonomo 2007)	47
Figura 18. Comparación entre un radargramas sistemático y uno real. (Modificado de GPR theory and applications).....	49
Figura 19. Sectores que conforman el área de estudio.	52
Figura 20. GPR utilizado para la investigación.	53
Figura 21 Visualización de los datos en tiempo real	55
Figura 22. Ubicación de la cinta métrica	56
Figura 23. Mallados que conforman el área de estudio	57
Figura 24. Diagrama del procesamiento de los datos.....	59
Figura 25 Visualización de las líneas transversales y longitudinales del Mallado 2-B.....	60
Figura 26. Mallado 2-B.....	61
Figura 27. Radargramas. a) Original, b) Corrección de tiempo cero.....	62
Figura 28. Radargramas, a) Corrección de tiempo cero, b) Filtro <i>Background Removal</i>	63
Figura 29. Radargramas. a) Filtro <i>Background Removal</i> , b) Filtro paso banda.	64
Figura 30. Radargramas. a) Filtro pasa banda, b) Ganancia.....	65

Figura 31. Radargramas. a) Ganancia, b) Suavizado.....	66
Figura 32. Cuatro radargramas pertenecientes al mallado 2-C listos para su interpretación.	68
Figura 33. Radargramas pertenecientes al mallado 2-C interpretados.....	69
Figura. 34 Anomalías asociadas a una red de tuberías enterradas.....	70
Figura 35. Ubicación del mallado 2-C con las tuberías interpretadas.	71
Figura 36. Anomalías cartografiadas en los jardines.	72
Figura 37. Radargrama mostrando una lectura de una tubería enterrada. ...	73
Figura 38. Anomalía de la Acequia, “Adquisición piloto”	74
Figura 39. a) Anomalías de interés. b) Red de tuberías de los jardines.	75
Figura 40. Tramo de la Acequia localizada en 1989. (Estudio preliminar para el proyecto de restauración de La Hacienda La Floresta).....	77
Figura 41. Puente de ladrillos soporte para la canalización de Acequias. (Tomado del boletín informativo de la asociación Venezolana de Arqueología)	78
Figura 42. Sector 1: a) Tuberías seguras, b) Anomalías de Interés.....	79
Figura 43. Excavaciones realizadas en La Floresta 1989.....	833
Figura 44. Tramos de la Acequia dibujado por el profesor Luis molina	844
Figura 45. Sector 2: a) Tuberías seguras, b) Anomalías de interés.....	85
Figura 46. Sector 3: a) Tuberías seguras, b) Anomalías de interés.....	90
Figura 47. Sector 4: a) Tuberías seguras, b) Anomalías de interés.....	93
Figura 48. Sector 5: a) Tuberías seguras, b) Anomalías de interés.....	98
Figura 49. Cartografiado de las anomalías que cumplen con los criterios establecidos.....	102

Figura 50. *Zoom* de la zona de estudio, identificando las anomalías
consideradas como elementos de la Acequia..... 103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Cinturones que conforman la Cordillera de La Costa	23
Tabla 2 Valores de velocidad, atenuación, conductividad y permitividad dieléctrica, para algunos materiales de interés. *Material saturado con agua fresca. (Modificado de Moorman 2001)	37
Tabla 3. Información de los sectores estudiados, reflejando mallados y cantidad de líneas longitudinales y transversales.....	57
Tabla 4. Tuberías seguras detectadas en el sector 1, indicándose su numeración y la profundidad promedio de detección.....	80
Tabla 5. Anomalías de interés del Sector 1, indicándose su numeración, la profundidad promedio de detección.....	81
Tabla 6. Tuberías detectadas en el Sector 2, indicándose su numeración y la profundidad promedio de detección.....	85
Tabla 7. Anomalías de interés detectados en el Sector 2, indicándose su numeración, la profundidad promedio de detección.	87
Tabla 8. Tuberías detectadas en el Sector 3, indicándose su numeración y la profundidad promedio de detección.....	90
Tabla 9. Anomalías de interés detectados en el Sector 3, indicándose su numeración, y la profundidad promedio de detección.....	91
Tabla 10. Tuberías detectadas en el Sector 4, indicándose su numeración y la profundidad promedio de detección.	94
Tabla 11. Anomalías de interés detectados en el Sector 4, indicándose su numeración, la profundidad promedio de detección.	96

Tabla 12. Tuberías detectadas en el Sector 5, indicándose su numeración y la profundidad promedio de detección.....	99
Tabla 13. Anomalías de interés detectados en el Sector 5, indicándose su numeración, la profundidad promedio de detección	100
Tabla 14. Anomalías pertenecientes al antiguo sistema hidráulico.....	104

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

A través de los años, los investigadores han dado a la prospección geofísica un espacio importante dentro de la investigación científica, vinculada a: la minería, la geotecnia, el petróleo, las amenazas ambientales, y actualmente también en el mundo de la arqueología. La arqueología cuenta con métodos de prospección que pueden ser considerados altamente invasivos, es por ello, que los métodos de prospección geofísica, no invasivos, representan una vía de optimización en la identificación previa de yacimientos arqueológicos, y de esta manera poder conocer el subsuelo sin necesidad de excavar grandes extensiones, y así permitir la colecta de materiales y/o residuos en su contexto antes de ser alterados o removidos, si ese fuera el caso.

Uno de los métodos geofísicos no invasivos con el cual se ha demostrado mayor eficacia en este tipo de estudios es el georadar, también conocido como *Ground Penetrating Radar* “GPR” o radar de penetración, tanto por la rapidez con la que se pueden obtener los datos, como por la calidad de imágenes de vestigios arqueológicos.

En esta oportunidad, el presente estudio se realiza en La Hacienda la Floresta ubicada en la Avenida Francisco de Miranda, en la Urbanización La Floresta, Municipio Chacao, Caracas, Venezuela, fundada a mediados del siglo XVIII, sobre la cual recae una declaratoria bien de Interés Cultural, por el Instituto del Patrimonio Cultural. Los usos actuales del área verde que la circunda y los espacios administrativos en uso, limitan la ejecución de exploraciones arqueológicas de forma tradicional y conduce a la aplicación del GPR para resolver situaciones de interés histórico, entre ellas la localización del antiguo Sistema Hidráulico.

PDVSA La Estancia, brazo social y cultural de Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA), ha desarrollado un proyecto sobre la valoración patrimonial de su sede principal, y esto incluye el interés de conocer a fondo su antiguo sistema hidráulico utilizado entre los siglos XVIII y XIX. Este Trabajo Especial de Grado trata sobre la ubicación del mismo, en las áreas que, por tradición oral de informantes claves, y estudios históricos documentales, han indicado la posible presencia de testigos materiales, así como también en aquellas áreas que por condiciones del terreno, altura, inclinación geomorfológica, podrían indicar la presencia de estructuras relacionadas al sistema antes mencionado.

1.2 Objetivo General

- Localizar mediante el método de GPR, el sistema hidráulico utilizado en la Hacienda La Floresta durante los siglos XVIII y XIX, en el área designada para ello.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Obtener imágenes del subsuelo de la zona de estudio a través del método GPR.
- Interpretar las imágenes obtenidas (radargramas), de la zona definida de interés prospectivo.
- Identificar el antiguo sistema hidráulico de La Hacienda La Floresta, producto de los datos obtenidos.
- Cartografiar el sistema hidráulico previamente identificado.

1.3 Ubicación del área de estudio

La Hacienda La Floresta se ubica en la Avenida Francisco de Miranda, Urbanización La Floresta, Municipio Chacao, Caracas, Venezuela.



Figura 1. Mapa de Venezuela y zoom del área de estudio. (Modificado de *Google Earth*).

Dicho Municipio es el más pequeño de los 5 municipios que conforman el Área Metropolitana de Caracas, siendo uno de los 21 municipios del estado Miranda. El territorio municipal es de apenas 13 km² y con una población de 71.393 habitantes. El Municipio Chacao hace frontera con los municipios Libertador al oeste, Baruta al sur, Sucre al este y con el estado Vargas al norte, y solo posee una parroquia, de nombre homónimo.

1.3 Justificación

La justificación de este trabajo especial de grado radica en satisfacer la necesidad de PDVSA La Estancia en investigar la naturaleza del subsuelo de la Hacienda La Floresta para determinar la “historia hídrica” que ahí subyace. El producto de esta investigación nutre la historia de esta Hacienda en términos de elementos de sustentación y desarrollo que la ayudaron en sus actividades y evolución, y forma parte así de un análisis de las variables históricas, culturales, sociales, económicas y ambientales que coadyuvan a la conceptualización y entendimiento de la razón de ser de esta Hacienda. En este sentido, esta investigación fortalece el valor histórico que tiene La Hacienda la Floresta, al realizar un estudio del subsuelo de carácter no invasivo, con el objetivo de localizar cómo estaba dispuesto el antiguo sistema hidráulico que surtía a la Hacienda, y que servía de sustento natural para sus cultivos, actividades comerciales y de producción, así como también para la utilización cotidiana del personal de dicha Hacienda. Este sistema hidráulico es conocido con el nombre de Acequias, las cuales sirvieron como canalizadores de agua para el riego tradicional de los huertos siguiendo el límite impuesto por la gravedad.

Para la realización de este trabajo se utilizaron herramientas geofísicas, las cuales son usadas en la delimitación y caracterización de los yacimientos arqueológicos, habiendo resultado ser de gran beneficio para el análisis e interpretación de los mismos, por cuanto permiten precisar los espacios a intervenir, e incluso la pertinencia o no de hacerlo tomando en cuenta aspectos tales como los riesgos de conservación, recursos financieros, tiempo disponible para la investigación, entre otros.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO, HISTÓRICO Y ARQUEOLÓGICO

2.1 Geología Regional

El área del valle de Caracas geológicamente pertenece a la cordillera de la costa, formando parte de la cordillera del Caribe con tendencias este-oeste a lo largo de la costa norte de Venezuela. Esta cordillera se extiende desde Barquisimeto, en el oeste, donde se separa por una depresión topográfica y estructural de los Andes Venezolanos, hasta el golfo de Barcelona, en el este. Más hacia el este, separados por el mar Caribe, se extiende a lo largo de las penínsulas de Araya y Paria, y también afloran en la mayor parte de las islas y la península Venezolana de Paraguaná. La cordillera de la costa forma la parte norte de la cordillera del Caribe, limita al norte con el mar Caribe, al este-oeste con el sorprendente sistema de fallas de San Sebastián, y al sur por una depresión axial siguiendo el curso de la falla Victoria, que esta topográficamente marcado por el curso superior del río Tinaco, el lago de Valencia y el curso medio del río Tuy. (Kantak, 2001).

La secuencia metamórfica de la cordillera de la costa comprende un basamento ígneo-metamórfico de edad Precámbrico-Paleozoico. El basamento está cubierto por rocas metasedimentarias de edad mesozoica, que fueron depositados en la parte superior del Jurásico o Cretácico inferior,

e incluye numerosos cuerpos de migmatitas y granitos, así como unidades de serpentinitas y anfibolitas. (Kantak, 2001).

Las rocas metamórficas que forman la cordillera de la costa se pueden dividir en tres cinturones, separadas por sistemas de fallas compresivas principalmente en la dirección este-oeste. A continuación, se indican los límites de estos tres cinturones, así como las condiciones geológicas para ellos. Es importante decir que desde que Urbani propuso una nueva nomenclatura de las unidades geológicas que pertenecen a la parte central de la cordillera de la costa, de conformidad con los convenios internacionales, el nombre de las siguientes unidades geológicas, se dará de acuerdo a esta nueva nomenclatura. Los viejos nombres se encuentran en paréntesis.

Tabla 1. Cinturones que conforman la Cordillera de La Costa.

Asociación metamórfica de La Costa		
Edad: Mesozoico		
(Complejo La Costa)		
Nombre actual	Condición Geológica	Nombre viejo
Mármol de Antimano	Mármol y anfibolitas	Facie de Antimano
Anfibolita de Nirgua	Variedad de Anfibolitas	Facie Nirgua
Esquito Tacagua	Esquisto Grafitosos	Facie Tacagua
Serpentinitas		Sin Nombre Formal
Asociación Metamórfica del Ávila		
dad: Precámbrico-Paleosoico		
(Complejo El Ávila)		

Nombre actual	Condición Geológica	Nombre viejo
Anfibolita de Tócome	Metagabro, anfibolitas	Metaignio Tócome
Metagranito de Naiguatá	Metagranito, gneis	Igual
Metadiorita de Todasana	Metagabro, anfibolitas	Complejo Todasana
Anfibolita de Cabo Codera	Anfibolitas, metagabro	Complejo Cabo Codera
Metagranito de Guaremal	Metagranito	Granito de Guaremal
Gneis de Cabriales	Gneis granítico	Igual
Gneis granítico de Choróní		
Complejo San Julián	Esquistos, gneis, anfibolita	Esquisto San Julián
Augen gneis de Peña Mora	Aunge-gneis	Igual
Asociación metasedimentaria de Ccs		
Edad: Mesozoico		
(Grupo Caracas)		
Nombre actual	Condición Geológica	Nombre viejo
Esquisto de las Mercedes	Esquisto calcáreos	Formación Las Mercedes
Mármol de los Colorados		
Esquistos de Las Brisas	Cuarzo-mica-esquisto	Formación Las Brisas
Metaconglomerado La Mariposa		Paragneis La Mariposa
Metaconglomerado de Baruta		

2.2 Geología Local

El valle de Caracas se puede considerar como un medio graben, descendiendo por el lado norte, debido a la falla de Ávila, perteneciente al sistema de fallas Tacagua-El Ávila, la cual se ve suprimida de este a oeste, y separa el valle del flanco sur del macizo de Ávila. La caída de la falla Ávila es casi vertical, profundizándose parcialmente hacia el sur, y en parte hacia el norte (invertido). El sedimento depositado en esta depresión tectónica consiste principalmente en depósitos de abanicos aluviales originados de la Sierra del Ávila, depósitos fluviales a lo largo de la actual red de drenaje (por ejemplo, el río Guaire y sus afluentes), y los sedimentos lacustres. (Singer, 1974).

En la figura 2, se puede apreciar un mapa en donde se refleja la geología del cuaternario del valle de Caracas, en la cual podemos visualizar eventos del pre-Holoceno que van desde el cuaternario Inferior al superior pasando por el cuaternario medio, también se pueden observar 2 eventos claves pertenecientes al Holoceno, tales como facie Proximal caótico y facies distal fino. En este mapa también se pueden ver formaciones más antiguas como lo son; formación las Mercedes, Las Brisas y Peña Mora, así como también el complejo sistema de fallas que caracteriza el valle de Caracas.

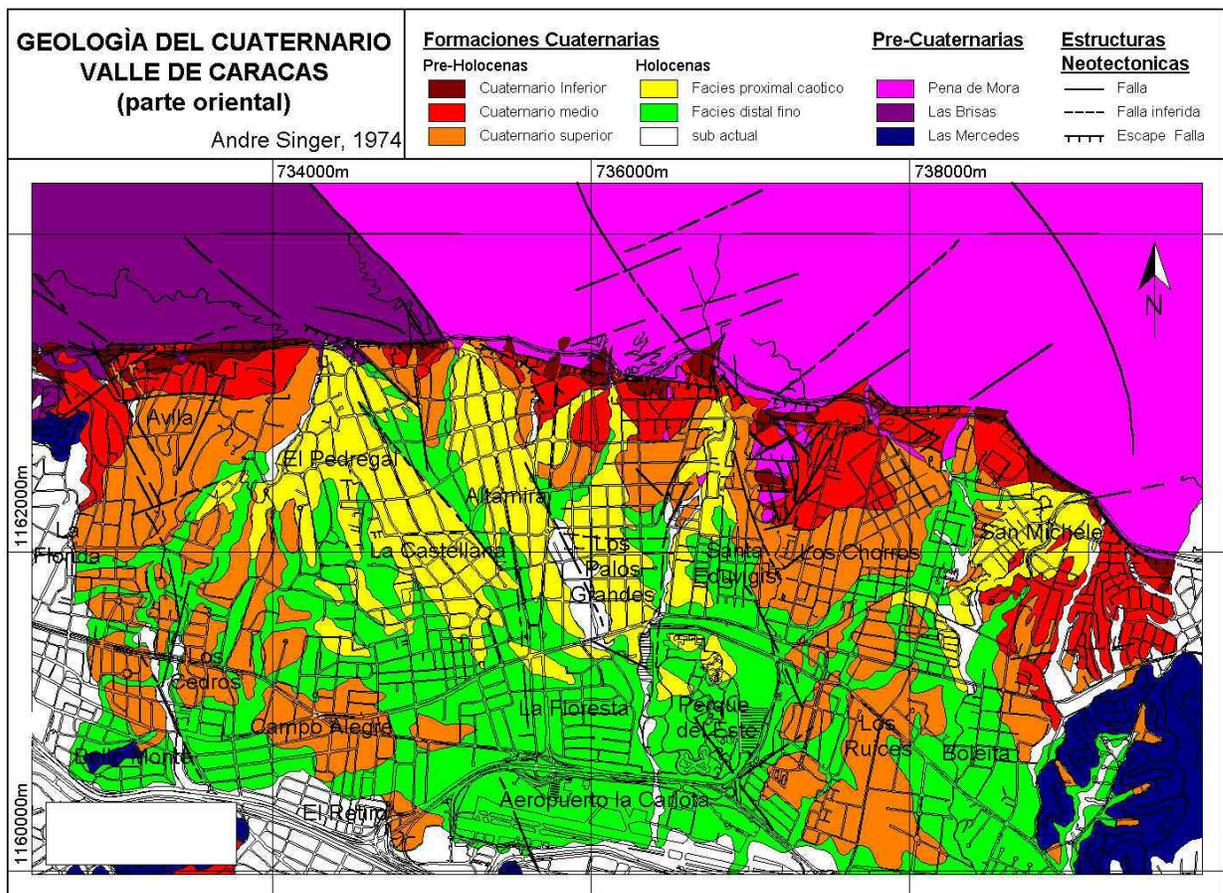


Figura 2. Geología del cuaternario del valle de Caracas (Singer 1974).

El trabajo de Peter Kantak realizado en el 2001, consistió en la realización de una columna estratigráfica de gran parte del valle de Caracas, en la figura 3 podemos apreciar parte de esa columna identificada como sección 27, esta sección está ubicada específicamente en Altamira, zona en la cual se ubica el área de estudio de este trabajo especial de grado.

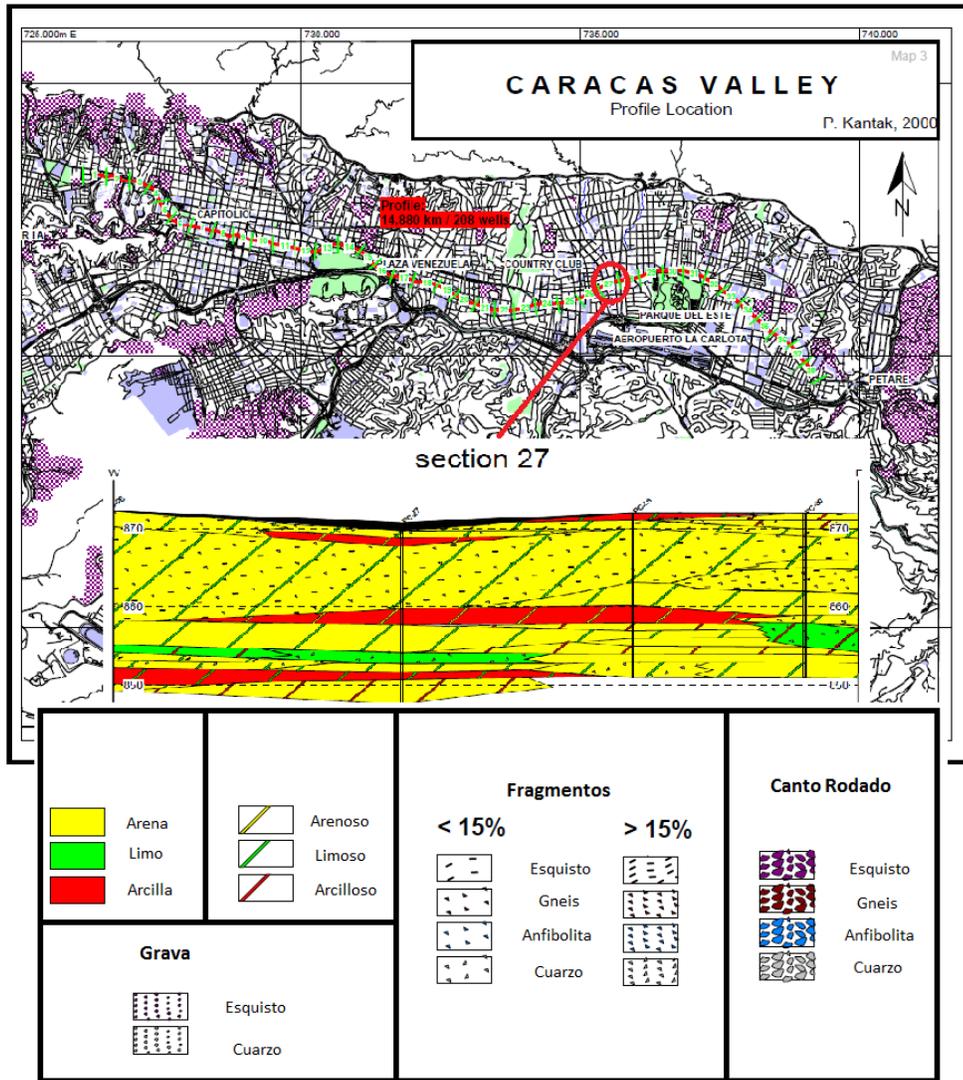


Figura 3. Columna estratigráfica perteneciente al área de estudio (Kantak, 2001).

En esta sección, identificada como 27, domina claramente la facies proximal, lo que refleja la distancia más cercana hacia el Ávila. Aquí las unidades son en forma más lenticulares y canales rellenos que consiste en guijarros y cantos rodados en la matriz de arena, así como el alto contenido de pequeños fragmentos arenosos. Se muestra un considerable espesor en estas capas de hasta 14 m, lo que indica eventos de flujo de escombros muy

fuertes en esta parte del valle. También se observa el tipo de roca de origen constituidas por esquistos y gneis cuarzoso (Kantak, 2001).

2.3 Marco Histórico y Arqueológico

En las Inmediaciones del Pueblo de San José de Chacao, fue fundada La Hacienda la Floresta, exactamente en el año 1768, dicha zona se caracterizaba por presentar plantaciones de caña de azúcar y café. Según Documentos y mapas que datan del año 1855, se registra la existencia de un número importante de Haciendas de café y de caña en las afueras de la capital. A través del estudio de documentos de propiedad de los terrenos vecinos y del primer plano de la Hacienda que data del año 1792, se ha podido establecer que dicha Hacienda colindaba por el norte con el Camino Real de Petare, lo que es ahora la Av. Francisco de Miranda, al oeste con la Quebrada Seca, al sur con el río Guaire, y al este con la Quebrada Sebucán. (Informe PDVSA La Estancia, 2010).

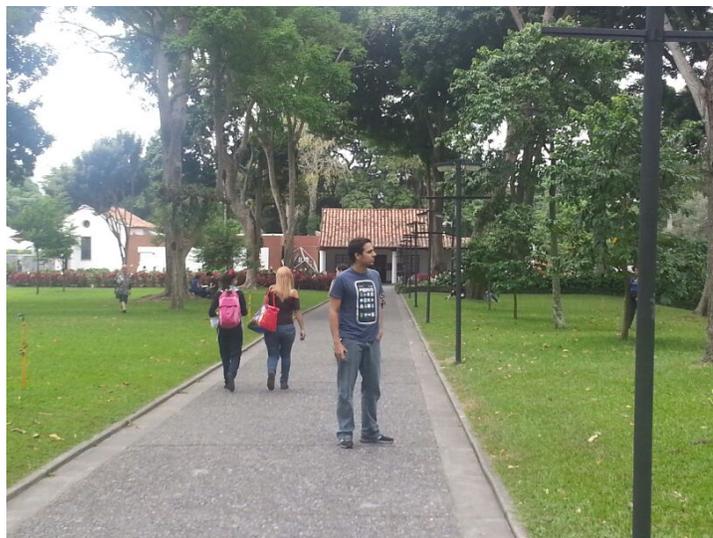


Figura 4. Hacienda La Floresta (Fotos del autor).

La Hacienda La Floresta perteneció a Don Francisco Domínguez, desde mediados del siglo XVIII. Durante la epidemia de Viruela de 1764 a 1765 en Caracas, Domínguez compartió su posesión con la familia Palacios y Sojo (Informe PDVSA La Estancia, 2010).

La Hacienda La Floresta sobrevivió a los embates del terremoto de 1812, los duros años de la gesta independentista, las crisis económicas derivadas de la variación de los precios internacionales del café, la abrupta caída de la agricultura durante la Guerra Federal y todo el proceso sociopolítico de transformación y modernización que experimentó el país durante el siglo XX (Informe PDVSA La Estancia, 2010).



Figura 5 Jardines de la Hacienda La Estancia (fotos del autor).

Las primeras investigaciones arqueológicas realizadas en la Hacienda La Floresta datan de 1989, llevadas a cabo por la Fundación para el Rescate y Conservación de Inmuebles Localidades y Bienes de Valor Histórico, Religioso y Cultural (FUNRECO). Durante la investigación, se practicaron 77 pozos, distribuidos a lo largo de la superficie de la Hacienda de manera

aleatoria. Esencialmente estas exploraciones fueron de pozos de 2 m² y en niveles de 20 cm cada uno (Informe PDVSA La Estancia, 2010). Es importante destacar que La Hacienda La Floresta, fue decretada Monumento Histórico Nacional según Gaceta Oficial N° 34.573, en el año 1990, así como también Bien de Interés Cultural según el I Censo del Patrimonio Cultural Venezolano, reseñado en el Catálogo N° MI-07, Resolución N° 003-05 en el año 2005.

Gracias a los hallazgos realizados por la investigación de FUNRECO en el año 1989, se sabe de la existencia de estructuras y objetos que se encontraban por debajo de las innumerables modificaciones del inmueble, entre los que destacó, el descubrimiento del patio de secado del café (*Coffea arabica*), una serie de muros de drenaje, parte de una trilla, patios de canto rodado, soportes de trojas para el alimento de los caballos en el área de caballerizas, y Acequias; las cuales son el elemento clave dentro de todo el sistema hidráulico construido para riego o canalización de aguas. El papel fundamental de las Acequias es conducir el agua desde su punto de captación hacia un lugar determinado, por ejemplo a los conucos huertas, cultivos, sembradíos, moliendas, entre otros. Desde su inicio, toda Acequia está construida con un ligero desnivel que permite la circulación del agua por gravedad. En este sentido, toda Acequia tiene un margen o límite por encima del cual no podrá hacer circular el agua. Este margen es el que va a delimitar posteriormente la capacidad de transformación del sistema hidráulico, determinando los posibles espacios para la construcción de tanques o la precisa localización de molinos u otras construcciones.



Figura 6. Pátio de secado de café (fotos del autor).

Las Acequias forman parte intrínseca de los sistemas de riego, son el esqueleto o armazón funcional, que permite no sólo la canalización y conducción del agua, sino también la reglamentación de su uso social y su distribución. En este sentido, hay que diferenciar dentro de un mismo sistema hidráulico la existencia de tres tipos de Acequias. En primer lugar existe una Acequia principal o Acequia madre, que siguiendo el límite impuesto por la gravedad va perfilando el perímetro de riego posible adaptándose a los accidentes geográficos. Un segundo tipo de Acequias lo forman aquellas derivaciones que, tomando parte del caudal en forma de filas o bien todo él, permiten el abastecimiento a un área concreta de todo el perímetro, y por último se encuentra un tercer grupo de Acequias que se encargan de hacer llegar el agua directamente a los tanques o aljibes. Esta estructura formal de la red de Acequias dentro de un mismo sistema hidráulico es idéntica, ya se trate de un pequeño espacio irrigado de montaña o de una zona litoral. La circulación del agua por la red de Acequias sigue un orden claramente establecido y es fruto de la reglamentación social precisa (tiempo de uso, usuarios, mantenimiento, temporalidad). Cada Acequia, brazo o ramal tiene su función concreta, que permite la utilización cohesionada de todo el conjunto. Su uso lleva implícito también unas obligaciones de conservación y

limpieza que las comunidades se distribuyen de forma equitativa al uso que de ellas hacen. En la figura7, podemos apreciar un ejemplo de estas estructuras asociadas a un antiguo sistema hidráulico, conocidas con el nombre de acequias.



Figura 7. Tramo de Acequia de abastecimiento (Izquierda) (Semblanza Histórica del Agua en México). Tubo de 2 pulgadas y Tramo de Acequia Madre de La Hacienda La Floresta (Derecha) (Informe N1, PDVSA La Estancia).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Geofísica aplicada a la Arqueología

La localización y mapeo de vestigios arqueológicos enterrados, con muy poca o ninguna indicación en superficie representan para los arqueólogos un verdadero problema, sobre todo considerando los tiempos y costos de excavación que serían invertidos para investigar el subsuelo. Más aún, cuando se tienen presupuestos restringidos que alcanzan, en el mejor de los casos, para excavar y reconstruir una pequeña parte del sitio, por lo que la información sobre la extensión y la naturaleza de las porciones remanentes son necesariamente extrapolaciones de un conjunto de datos limitados. De manera similar, el conocimiento rápido del subsuelo sin necesidad de excavar grandes extensiones, es importante en los trabajos de salvamento arqueológico, ya que permitiría la colecta de materiales y/o residuos en su contexto antes de ser alterados o removidos. (Ortega, 2000).

De lo anterior, se deduce la necesidad de contar con métodos geofísicos, no invasivos ni destructivos de prospección del subsuelo, así como lo es el georadar o radar de penetración, el cual ha demostrado ser el método más rápido y eficiente en la detección de vestigios arqueológicos, basado en el estudio de la propagación y reflexión de los impulsos electromagnéticos emitidos dentro de una banda de frecuencia de 10 a 1500

Megahertz, con longitudes de onda de varios metros a centímetros. (Ortega, 2000).

3.2 Ondas electromagnéticas:

Se puede definir una onda electromagnética como la forma en que se propaga la radiación electromagnética a través del espacio. La principal diferencia que tienen estas ondas, a las ondas mecánicas, es que éstas no dependen de un medio material para poder propagarse; es decir, pueden desplazarse también por el vacío. Estas ondas son producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica, dicha carga eléctrica se encuentra oscilando y genera un campo magnético variable, éste a su vez genera uno eléctrico, de esta forma las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío sin soporte material. Por esto se dice que las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos. (Sears et al., 1971).

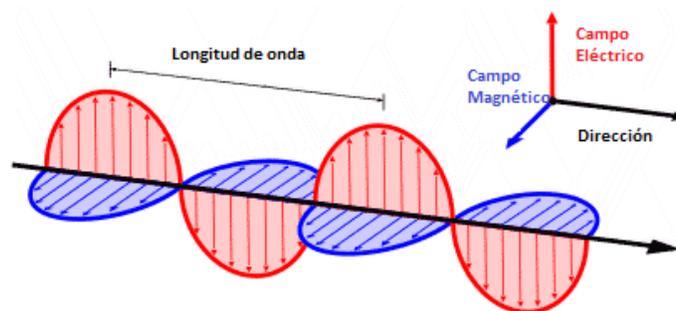


Figura 8. Propagación de una onda Electromagnética (Lawrence et al., 2004).

$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\vec{B} = \mu \vec{H}$	
$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 4\pi\rho$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\vec{j} = \sigma \vec{E}$	$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$

\vec{E} [Newton/Coulomb]- Campo eléctrico existente en el espacio.
 \vec{D} [Coulomb/m²]- Campo dieléctrico que resume los efectos eléctricos de la materia.
 \vec{B} [Tesla]- Campo magnético existente en el espacio.
 \vec{H} [Amperio/metro]-Es el vector inducción magnética
 ρ [Coulomb/m³]- Densidad de cargas existentes en el espacio.
 \vec{j} [Amperio/m²]- Densidad de corriente, mide el flujo de cargas por unidad de tiempo y superficie.
 ϵ [Faradios/metro]- Permitividad eléctrica, característica de los materiales dieléctricos.
 μ [Newton/A²]- Permeabilidad magnética.

Figura 9. Ecuaciones de Maxwell.

3.3 Parámetros electromagnéticos de un medio

Las ecuaciones de Maxwell (Figura 9), permiten relacionar los campos eléctricos y magnéticos con la fuente que los producen, a partir de una serie de parámetros constantes para cada medio determinado. Estas constantes, las cuales son la conductividad, la permitividad dieléctrica y la permeabilidad magnética nos ayudan a definir el medio. (Sears et al., 2004)

3.3.1 Conductividad eléctrica

Es la capacidad que tienen los cuerpos de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí mismos. Esta propiedad natural está vinculada a la facilidad con la que los electrones pueden moverse a través de él. Pueden clasificarse los materiales según su conductividad en conductores, semiconductores y aislantes.

Conductores: Generalmente los podemos asociar a elementos metálicos, ya que éstos permiten el movimiento de las cargas debido a la gran cantidad de electrones libres.

Semiconductores: Constituyen elementos que poseen características intermedias entre los cuerpos conductores y los aislantes, por lo que no se consideran ni una cosa, ni la otra.

Aislantes: Constituyen cualquier material que impide la transmisión de la energía eléctrica en cualquiera de sus formas.

3.3.2 Permitividad dieléctrica

La permitividad está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa forma anular parcialmente el campo interno del material.

3.3.3 Permeabilidad magnética

Es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material. Estos materiales podemos clasificarlos en ferromagnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos.

3.4 Propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales

La mayoría de las reflexiones que obtenemos gracias al GPR son creadas por un cambio abrupto en las propiedades eléctricas (Impedancia eléctrica) del material a través del cual las ondas electromagnéticas viajan. La impedancia eléctrica es dominada por los cambios en la inductividad permitida o la constante dieléctrica del subsuelo. En el caso de una onda

electromagnética normal incidente propagándose a lo largo de un límite o una interfaz plana, el coeficiente de reflexión determina la amplitud que retorna y es grabada como señal (Annan, 1992).

La constante dieléctrica del medio puede cambiar drásticamente ante la presencia de agua o aire en los poros. El momento bipolar natural intrínseco del agua le da a los materiales geológicos porosos una inductividad relativamente alta (Annan, 1992). No obstante, que el agua esté contenida en el subsuelo o en la roca, la conductividad del agua aumenta con el número de iones en la solución de agua. En este caso, dependiendo de la cantidad de iones en un material saturado, un mecanismo de conducción eléctrica surge haciendo que la conductividad del material sea robustamente proporcional al contenido de sólido total disuelto. La Tabla 2 nos muestra las propiedades eléctricas de diferentes materiales.

Tabla 2. Valores de velocidad, atenuación, conductividad y permitividad dieléctrica, para algunos materiales de interés. *Material saturado con agua fresca. (Modificado de Moorman 2001).

Material	Conductividad (σ) [$\Omega \cdot m^{-1}$]	Permitividad Dieléctrica (ϵ_r)	Velocidad [m/ns]	Atenuación (α) [$dB \cdot m^{-1}$]
Vacio	-	1	0,3	0
Aire	0	1,0006	~0,3	0
Agua Destilada	0,01	80	0,033	0,002
Agua Fresca	0,5	80	0,033	0,1
Agua de Mar	30000	80	0,01	1000
Hielo Puro	0,01	3 - 4	0,16	0,1
Permafrost	1 - 8	-	0,106 - 0, 3	-
Arena Seca	0,01	3 - 5	0,15	0,01
Arena Saturada*	0,1 - 1	20 - 30	0,06	0,03 - 0,3
Limo Saturado*	50	10	0,09	26
Limo	1 - 100	5 - 30	0,07	1 - 100
Arcilla Saturada*	500	10	0,09	260
Arcilla	2 - 1000	5 - 40	0,06	1 - 300
Caliza	0,5 - 2	4 - 8	0,12	0,4 - 1
Lutita	1 - 100	5 - 15	0,09	1 - 100
Granito	4 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Cuarzo	-	4,3	0,145	-
PVC, Epoxy y Poliester	-	3	0,173	-
Asfalto	-	3 - 5	0,134 - 0,173	-
Concreto	-	6 - 30	0,055 - 0,112	-

3.5 GPR

Existen varios sinónimos y acrónimos para este método, tales como EMR por sus siglas en inglés (*Electromagnetic Reflections*), SIR (*Surface Interface Radar*), GPR (*Ground Penetrating Radar*), Georadar o radar de penetración terrestre. En efecto, el GPR ha sido utilizado desde los años sesenta con el término de *ecosondas de radio* (RES: Radio Echo Sounding) para medir los espesores de las capas de hielo en Groenlandia, con el propósito de asegurar el aterrizaje de los aviones de la fuerza aérea de los Estados Unidos; desde entonces, ha evolucionado y ampliado sus aplicaciones en los campos de la geología, ingeniería civil, detección de contaminantes, geohidrología y, desde los años ochenta a nivel mundial, en las investigaciones arqueológicas. (Ortega, 2000)

En su forma más simple, el GPR irradia energía electromagnética hacia el subsuelo por medio de una antena transmisora (Figura 10), esto ocurre cuando una corriente es enviada a través de la antena y crea un campo magnético. Este campo magnético induce un campo eléctrico y así sucesivamente, luego, la energía reflejada de las estructuras encontradas en su paso es registrada con una antena receptora. La imagen o radargrama del subsuelo se compone de un número determinado de ondas (trazas) que representan las reflexiones de los objetos y/o las interfaces entre tipos de suelos con características físicas diferentes tales como porosidad, humedad, composición mineralógica y geoquímica. Por un lado tenemos el tiempo que tarda el pulso desde que es emitido por el emisor hasta que es detectado en la superficie por el receptor, esto nos da una medida de la profundidad en donde se encuentra un dado reflector. Por otro lado, la comparación de las amplitudes de los pulsos emitidos y recibidos, nos da información adicional acerca de la composición del suelo. (Ortega, 2000)

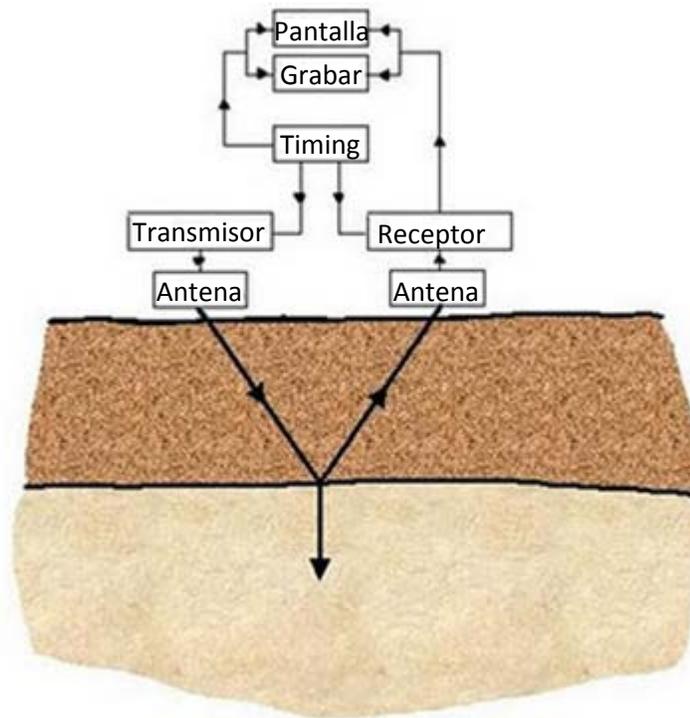


Figura 10. Diagrama de flujo de un sistema típico GPR (Davis, 1986).

3.6 Configuración de los arreglos de adquisición

Es importante considerar una serie de factores a la hora de realizar prospecciones utilizando el GPR, entre ellos el tipo de objetivo a estudiar y sus dimensiones, la profundidad donde se encuentra dicho objetivo, su geometría, las condiciones del terreno, ruido cultural, entre otros. En función a dichos factores es que se va a definir el tipo de antena a utilizar y el arreglo de las mismas, para así diseñar la geometría de adquisición con la finalidad de obtener una buena resolución durante el estudio. (Bonomo et al, 2007)

La configuración típica para realizar prospecciones con un GPR consta de dos antenas ubicadas en la superficie del suelo, una antena emisora y otra receptora, dichas antenas son desplazadas por la zona de interés, calculando de esta manera el tiempo de viaje desde que el pulso es

emitido por la antena emisora hasta que es capturado por la antena receptora para cada punto medido, y es así como se pueden calcular las distintas profundidades de los reflectores para cada punto de la superficie (Bonomo et al, 2007).

Hoy en día, en los equipos de GPR más utilizados, la antena emisora y receptora se encuentran en la misma unidad, inclusive dependiendo del GPR, una misma antena puede operar como emisora y receptora, esta configuración la conocemos como monoestática en su cobertura *single fold* (Figura 11). Otra alternativa es la denominada biestática, la cual consiste en que las antenas emisoras y receptoras estén ubicadas en cajas distintas. La aplicación del método GPR en sus versiones monoestática y biestática con cobertura simple permite obtener planos verticales e incluso planos 3D del subsuelo con alta resolución de los reflectores enterrados (Bonomo et al, 2007)

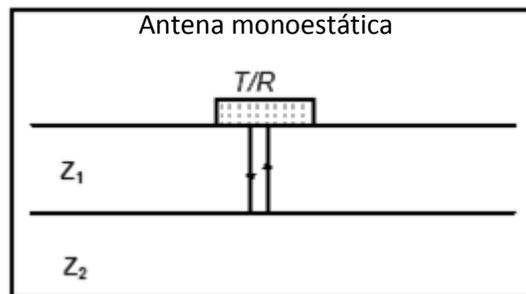


Figura 11. Arreglo Monoestático (modificado de Annan 2001)

En la figura 12 se observa una secuencia donde el emisor emite un pulso, el cual viaja por el subsuelo y el receptor mide la señal reflejada, todo esto repitiéndose para cada punto de medición, este arreglo es el que conocemos como biestático. Para los 3 casos vistos en dicha figura, los tiempos de ida y vuelta registrados por el receptor para los pulsos recibidos

se vinculan con las profundidades “h” de los reflectores según la siguiente expresión matemática $h = \frac{t \cdot v}{2}$, (Annan, 2001).

Donde “t” representa el tiempo de ida y vuelta del pulso, “V” la velocidad de propagación promedio a lo largo de todo el recorrido, y “h” la profundidad del reflector. El factor “2” que divide a la velocidad se debe a que el tiempo transcurrido desde que el pulso es emitido hasta el reflector, es la mitad del tiempo de ida y vuelta. (Annan, 2001).

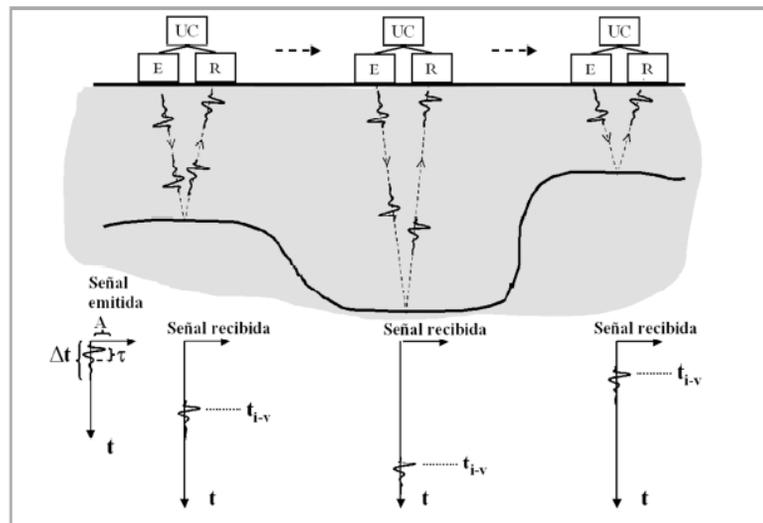


Figura 12. Secuencia de un arreglo biestático (Tomado de Bonomo et al., 2007)

La configuración biestática puede presentar otras metodologías para el caso múltiple *foldin* o cobertura múltiple, como lo es el punto medio común (**CMP**) (Figura 13) en el que la distancia entre fuente-receptor va aumentando mientras se mantiene un punto medio común. Mediante esta técnica, se permite realizar un estudio de velocidad de propagación de la onda electromagnética para hacer la conversión de tiempo-profundidad de otros datos adquiridos con arreglos diferentes (Annan, 2001).

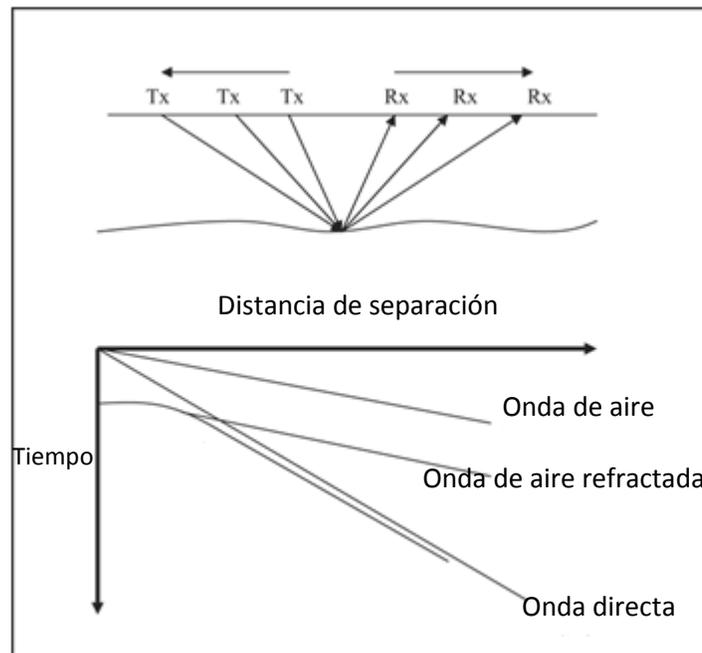


Figura 13. Arreglo biestatico en CMP (Modificado de Harry, 2009)

También existen otros 2 arreglos diferentes, pero de poco uso para la arqueología, los cuales son el *borehole* y el *crosspolar*. En el *borehole*, el receptor o el emisor se desplazan verticalmente dentro de perforaciones en el suelo, generando así imágenes por transmisión. El *crosspolar* utiliza antenas biestáticas separadas a distancia fuente-receptor constante mientras están orientadas perpendicularmente entre ellas. (Bonomo et al., 2007)

3.7 Procesos físicos que modifican las señales del GPR

En el subsuelo, una vez que el pulso es emitido y viaja a través del él, sufre ciertas alteraciones debido a distintos mecanismos físicos. Estos mecanismos físicos o también conocidos como fenómenos físicos, son: la

divergencia geométrica del campo electromagnético, el fenómeno de absorción, fenómeno de reflexión y transmisión, y fenómeno de dispersión. (Bonomo et al., 2007)

3.7.1 Divergencia geométrica

Los sistemas de GPR utilizados para las prospecciones arqueológicas en su mayoría emiten pulsos con extensiones temporales pequeñas y diseñadas para que dichos pulsos sean emitidos de manera perpendicular a la superficie del suelo, de esta manera se debe evitar que los mismos se extiendan en el espacio, más allá de una región de forma aproximadamente cónica, la cual se proyecta por debajo del emisor y que se conoce con el nombre de “huella”. Esto obedece a la necesidad de “iluminar” con mayor intensidad posible aquellas discontinuidades que se ubican por debajo del sistema. (Bonomo et al., 2007)

A medida que el pulso se propaga en el suelo, éste ilumina áreas iguales, pero cada vez con menor intensidad teniendo una tasa de decaimiento de $1/d^2$, de esta manera podemos decir que un pulso que se refleja en un reflector profundo y retorna hacia la antena receptora, cuenta con menos energía por unidad de área que si se refleja en uno superficial. (Figura 14). (Bonomo et al., 2007)

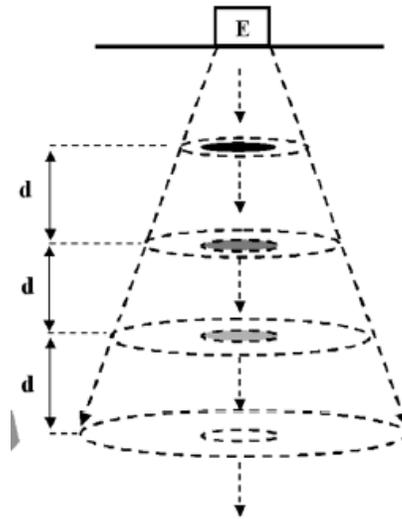


Figura 14. Disminución en la intensidad que ilumina un área constante con el aumento de la profundidad, a medida que ésta se incrementa en un valor fijo "d". (Modificado de Bonomo, 2007)

3.7.2 Fenómeno de absorción

La conductividad eléctrica es la principal magnitud física que determina el fenómeno de absorción, y ésta depende fundamentalmente de las características del medio, en especial de la humedad. A mayor humedad mayor absorción. Asimismo, la absorción aumenta para frecuencias mayores del pulso. Este fenómeno hace que la energía electromagnética emitida por la antena se transforme en calor ocurriendo una pérdida en la intensidad del mismo, es importante decir que en las prospecciones con GPR no es recomendable tener una alta absorción, ya que ésta nos reduce la profundidad de penetración. (Bonomo et al., 2007)

3.7.3 Fenómeno de reflexión y transmisión

Cuando una onda encuentra en su propagación una superficie de separación de dos medios distintos, se originan dos nuevas ondas, una reflejada, que se propaga en el primer medio, y otra transmitida, que se propaga en el segundo medio. La permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética son las encargadas de determinar el fenómeno de reflexión y transmisión. La figura 15 nos muestra el momento en el que un pulso incide sobre una superficie de discontinuidad con un ángulo θ_i , medido respecto de la dirección perpendicular a dicha superficie, los pulsos reflejados y transmitidos se alejan formando ángulos θ_r y θ_t , respectivamente, ambos medidos respecto a la referencia mencionada. (Bonomo et al., 2007)

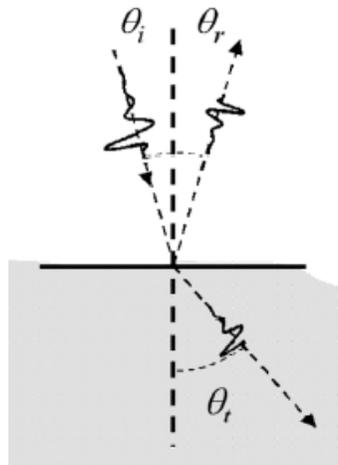


Figura 15. Esquema de la reflexión y la transmisión de un pulso electromagnético en una interfaz que separa dos medios con distintas permitividades. (Modificado de Bonomo et al., 2007).

Las relaciones matemáticas que vinculan estos ángulos con las permitividades relativas ϵ_A y ϵ_B , y las permeabilidades relativas μ_A y μ_B de ambos medios son las siguientes:

$\sin(\theta_i) = \sin(\theta_r)$	$\frac{\sin(\theta_i)}{\sqrt{\mu_A \epsilon_A}} = \frac{\sin(\theta_r)}{\sqrt{\mu_B \epsilon_B}}$
-----------------------------------	---

Figura 16. Ecuación de ley de Reflexión y Transmisión.

La figura 16 muestra las ecuaciones que nos dan la dirección en las cuales se propagan los pulsos que resultan del proceso de reflexión-transmisión, para un ángulo de incidencia dado y para parámetros del subsuelo conocidos.

3.7.4 Fenómeno de dispersión

Existen dos casos particulares donde se produce dicho fenómeno, el primero de ellos es cuando estamos en presencia de una superficie rugosa (Figura 17-I), la cual nos hace disminuir la intensidad disponible. Esto ocurre porque parte de la energía que es reflejada y transmitida en dicha superficie rugosa se desvía en ángulos amplios y en direcciones muy distantes. El segundo de estos fenómenos es el que se da en medios que presentan importantes fluctuaciones en la permitividad, como por ejemplo un pedregal (Figura 17- II) (Bonomo et al., 2007)

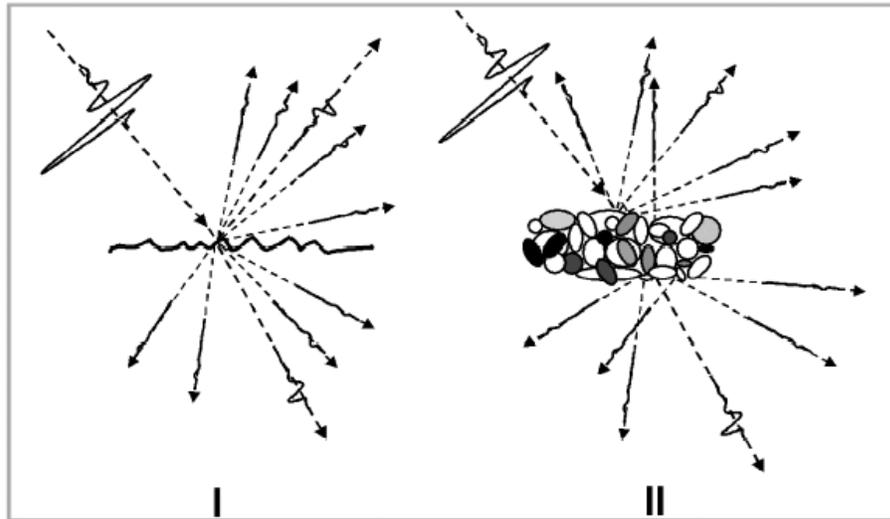


Figura 17. Fenómenos de Dispersión por superficie rugosa y por fluctuaciones en la permitividad. (Modificado de Bonomo et al 2007).

3.8 Procesamiento de datos

Para poder tener una buena calidad de los datos obtenidos y poder realizar una apropiada interpretación de los mismos, es necesario realizar una etapa de procesamiento, si bien sabemos que estos datos pueden ser vistos en tiempo real "dependiendo del GPR a utilizar", también es cierto que vienen cargados de una gran cantidad de errores debido a ruidos generados por el medio, por eso es necesario la aplicación de filtros y otros atributos dependiendo cual sea el caso, para la obtención de una buena calidad de la imagen y poder hacer una buena interpretación de lo que está en el subsuelo.

El procesado de los datos del georadar tiene mucho en común con el procesado sísmico, como por ejemplo, la determinación de la velocidad de las ondas en el subsuelo, para definir la profundidad absoluta a la que se encuentren los reflectores, o anomalías que pudieran corresponder a

vestigios arqueológicos, tales como tumbas, paredes, rellenos, fracturas, fallas estructurales, por mencionar los más importantes. Y dicho procesamiento también puede tener algunas variantes como filtros especiales para eliminar los efectos de la electrónica de recepción de la corriente directa y las bajas frecuencias por nombrar alguna. (Ortega, 2000).

3.9 Interpretación

Luego de realizar el procesamiento de datos y un control de calidad de los mismos, obtenemos los resultados finales de la investigación, dichos resultados serán interpretados para la ubicación de vestigios arqueológicos, como lo es para este trabajo de investigación, el sistema hidráulico de La Hacienda La Floresta.

En la figura 18 se puede observar el estudio de una Acequia de grandes dimensiones, enterrada a 1,7 metros aproximadamente, en la cual se realiza una comparación entre un radargrama sistemático y uno real, en el radargrama real se puede apreciar la reflexión de la Acequia enterrada en forma de hipérbola.

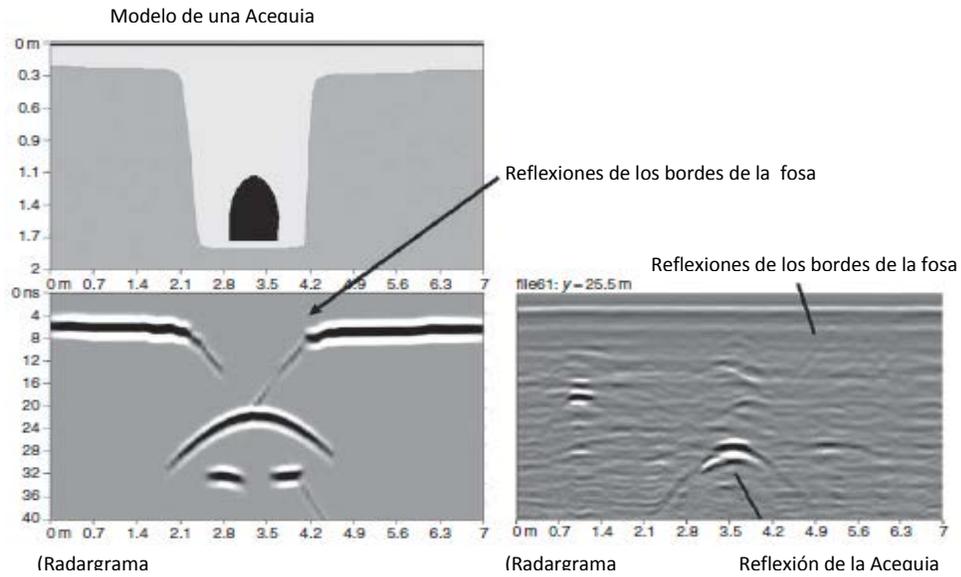


Figura 18. Comparación entre un radargamas sistemático y uno real. (Modificado de GPR theory and applications).

Como se puede apreciar en la figura 18, la señal recibida por la antena receptora refleja una hipérbola. Esto se debe a que el objeto es detectado, aún en posiciones del emisor-receptor lateralmente muy alejadas respecto de la ubicación del mismo. Esto ocurre como consecuencia de que la huella de la fuente que se está utilizando subtiende un ángulo bastante amplio, iluminando lateralmente el objeto. También puede verse que a medida que la distancia entre el objeto enterrado y la fuente-receptor se incrementa, disminuye la intensidad de la señal recibida como respuesta, lo que se debe principalmente a la mayor atenuación producida al incrementarse la longitud del trayecto recorrido por el pulso.

Este ejemplo (figura 18), es una referencia de una imagen ya procesada y lista para su interpretación, de esta manera se procederá a obtener las imágenes pertinentes al área de estudio para su respectivo

análisis geofísico y su debida interpretación, y así localizar el objetivo de dicha investigación.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Adquisición

Para poder hablar de la adquisición en el área de estudio es necesario establecer los parámetros y posibles diseños para su realización, en este caso se hizo, una división del área de estudio la cual consintió en 5 sectores (Figura 19), en los cuales se realizaron los mallados conformados por líneas longitudinales y por líneas transversales.

Para los sectores 1 y 2 se trazaron líneas longitudinales N-S, y líneas transversales E-W, y para los sectores 3, 4 y 5, se trazaron líneas longitudinales N10W y líneas transversales N80E.

Los sectores 1, 3 y 5 estuvieron constituidos por la realización de 2 mallados, y los sectores 2 y 4, por la realización de 3 mallados.

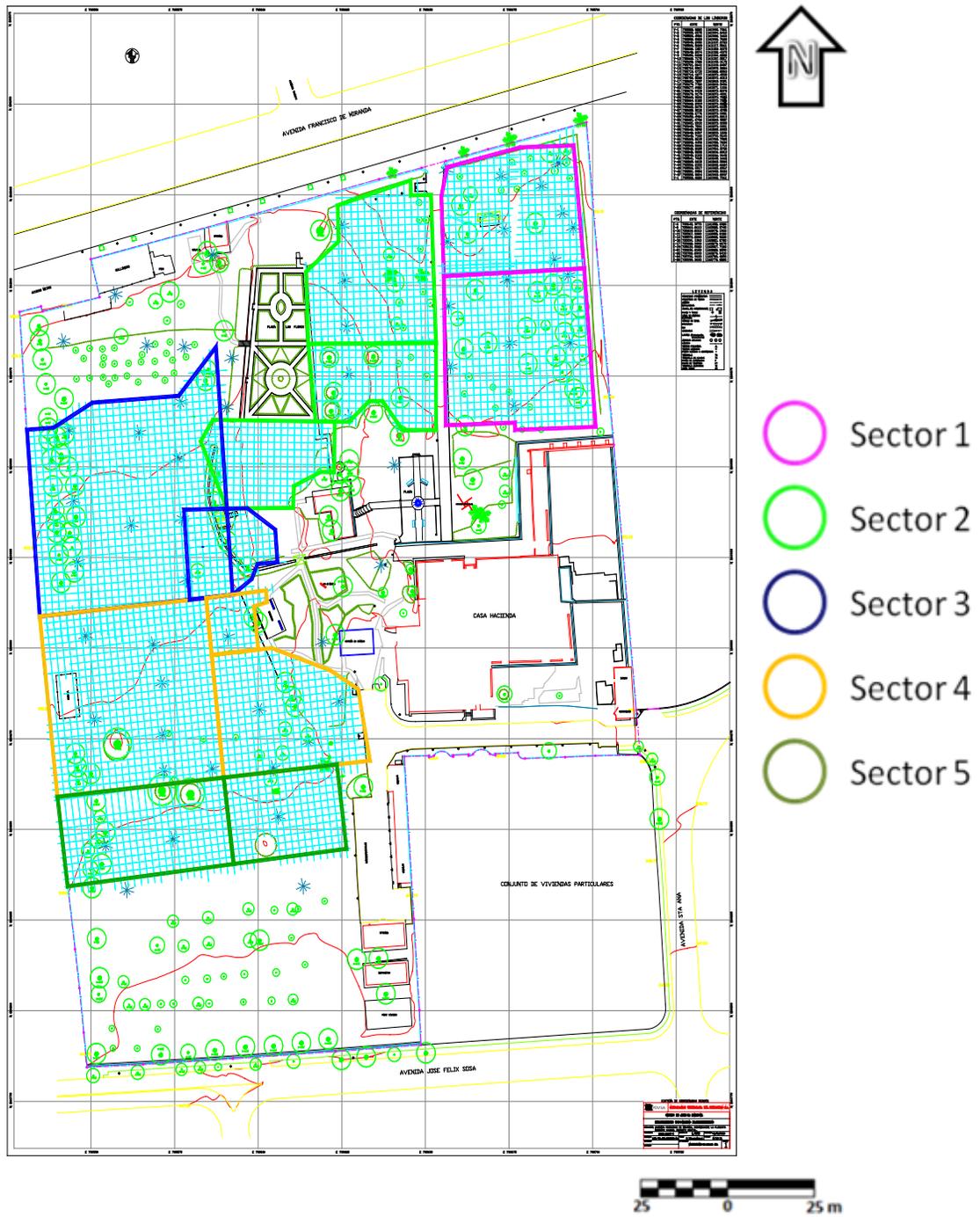


Figura 19. Sectores que conforman el área de estudio.

Para cada uno de los sectores, se realizó un arreglo multicanal con antenas de 200 y 600 Mhz y un espaciamiento de 2x2 m, es decir 2 m de espaciamiento entre líneas longitudinales y 2 m de espaciamiento entre líneas transversales. Cada uno de los mallados se referenciaron a un sistema cartesiano (X,Y), donde se establecieron las líneas longitudinales como paralelas al eje Y, y las líneas transversales como paralelas al eje X. Por lo tanto, cada mallado tiene como referencia un punto de origen, los cuales fueron trasladados a un sistema cartesiano local, mediante el amarre de 1 o más puntos por mallado, esto se hizo para poder desplazar los datos hasta las coordenadas de interés y de esta manera precisar la ubicación exacta del sistema hidráulico motivo de esta investigación. Esto se puede llevar a cabo gracias a la disposición de planos digitales con especificaciones de elementos superficiales del área de estudio.

4.2 Equipo y materiales empleados

El GPR utilizado para este estudio fue el K2, de la firma IDS, *INGEGNERIA DI SISTEMI S.p.A* (Figura 20).



Figura 20. GPR utilizado para la investigación.

Dentro de las características del GPR K2 tenemos que, puede manejar un número máximo de 8 antenas, tiene un promedio de transferencia de datos de 100Mbit/s, tiene un número máximo de apilamiento de hasta 32768, su longitud máxima de registro es de 9999nseg, tiene una tasa de muestreo de hasta 512 muestras / segundo, y una frecuencia de repetición de pulso de hasta 400 Khz, siendo éstas algunas de las especificaciones del instrumento.

Entre otros implementos utilizados para la adquisición tenemos: Cintas métricas de 50 m de longitud, estacas de hierro, lápiz, cuadernos, mecatillo, y una laptop.

4.3 Mediciones en campo

Por motivos de seguridad y política de la administración de La Hacienda La Estancia, toda medición fue realizada a distancias mayores de 2 metros de las zonas protegidas como lo son los jardines, estatuas, letreros y cualquier otro elemento que ameritara un cuidado especial, de esta manera se garantiza el cuidado de los mismos, manteniéndolos intactos y sin alteraciones.

Primero, se realizó un recorrido con la finalidad de hacer un estudio visual del área a manera de evaluar cuál sería la estrategia a tomar para la adquisición de los datos, luego se procedió a calibrar el equipo, para de esta manera comenzar con la adquisición.

Los datos adquiridos por el GPR son visibles en tiempo real, garantizando de esta manera un control de calidad de los mismos. Esta visualización se conoce con el nombre de radargrama (Figura 21).

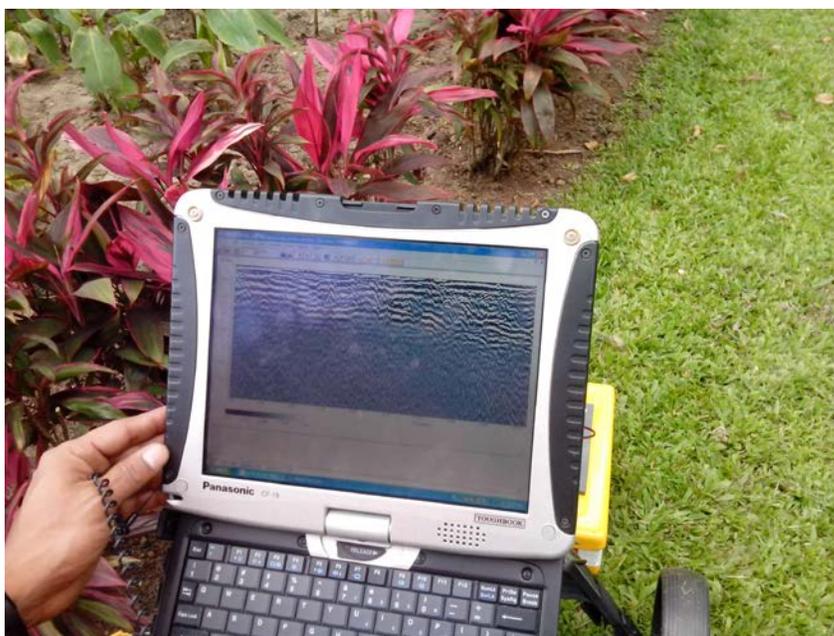


Figura 21. Visualización de los datos en tiempo real.

La primera etapa de este trabajo consiste en realizar una prueba piloto, donde se buscó a qué tipo de respuesta nos íbamos a enfrentar, esta prueba consistió en hacer una pequeña adquisición de 3 líneas sobre un tramo de la Acequia enterrada, lo que permite visualizar que tipo de anomalía estamos buscando, para poder realizar una interpretación clara del estudio.

A continuación se especificará la cantidad de mallados por sector, cantidad de líneas longitudinales y cantidad de líneas transversales. Es importante recalcar que las distancias entre líneas fue de 2 metros, tanto para las líneas longitudinales como para las transversales de todos los mallados, los cuales fueron creados utilizando una cinta métrica de 50 metros, dicha cinta era colocada en el césped y con un mecatillo se trazaba perpendicularmente a la cinta el camino por el cual se iba a pasar el GPR, esto a manera de referencia (Figura 22).



Figura 22. Ubicación de la cinta métrica.

4.3.1 Sectores:

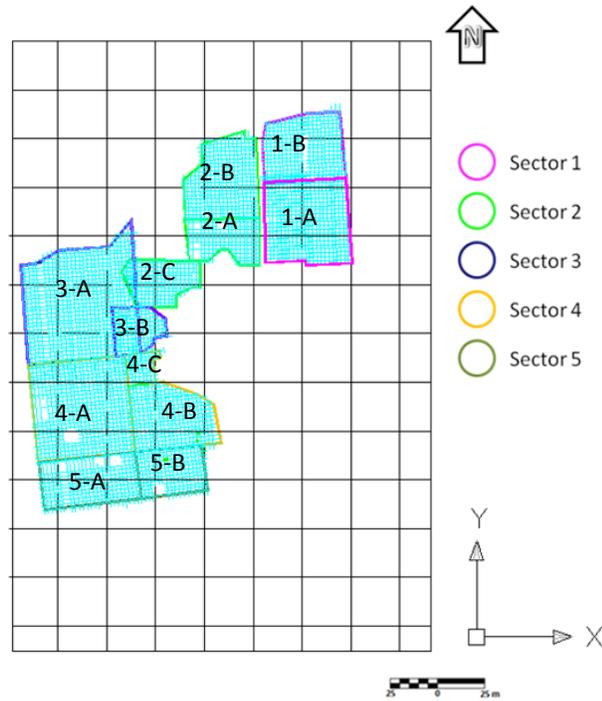


Figura 23. Mallados que conforman el área de estudio.

Tabla 3. Información de los sectores estudiados, reflejando mallados y cantidad de líneas longitudinales y transversales.

SECTORES	MALLADO	LÍNEAS LONGITUDINALES	LÍNEAS TRANSVERSALES
1	1-A	23	24
1	1-B	21	35
2	2-A	17	19
2	2-B	20	21
2	2-C	18	13
3	3-A	32	29
3	3-B	15	21
4	4-A	30	31
4	4-B	23	24
4	4-C	11	13
5	5-A	13	25
5	5-B	23	24

4.4 Procesamiento

Luego de realizar la adquisición en toda la zona de estudio empieza la fase de procesamiento de datos, la cual se realizó con el software *GRED Utilities 3D®*, Software diseñado por la compañía IDS, "INGEGNERIA DI SISTEMI S.p.A", dicho software nos permite procesar, visualizar y modificar los perfiles adquiridos por el GPR en campo, tanto de manera individual como grupal, para posteriormente poder realizar una interpretación de los mismos.

El procesamiento de los datos consistió básicamente en 7 pasos, los cuales consistieron en: Abrir mallado, Seleccionar la línea a procesar, hacer la corrección del tiempo cero, aplicación de filtro *Background Removal*, aplicación de filtro pasabanda, ganancia, y por último aplicar un suavizado al radargrama (Figura 24).

A continuación se realizará una explicación de cada uno de estos pasos de procesamiento aplicando los ejemplos en el mallado número 2-B ubicado en el Sector 2.

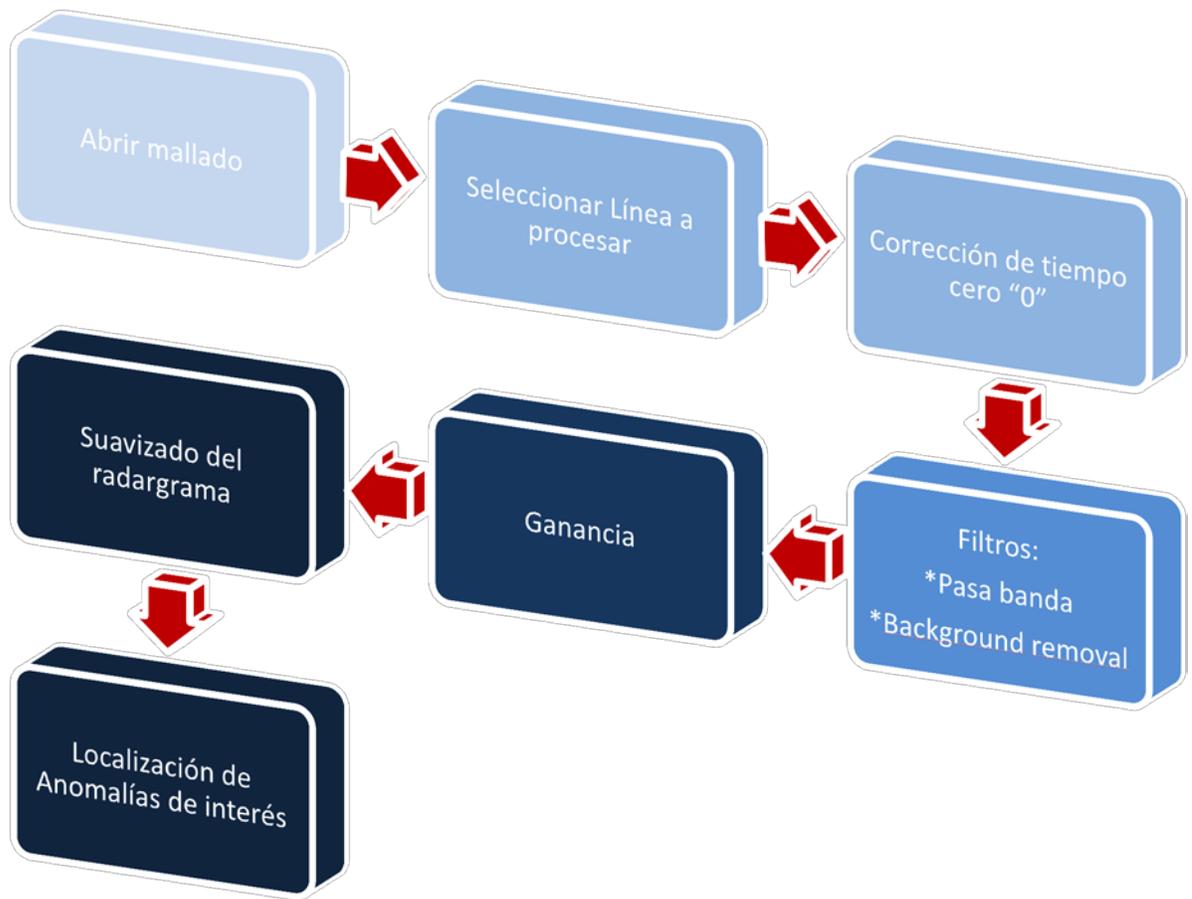


Figura 24. Diagrama del procesamiento de los datos

4.4.1 Abrir mallado

Este es el primer paso a seguir para comenzar a realizar el procesamiento de los datos adquiridos por el GPR, lo primero es exportar los datos desde el computador que tiene integrado el GPR a una computadora donde esté instalado el programa *GREED Utilities 3D®*, una vez ahí, se importan los datos de un mallado en específico (Figura 25).

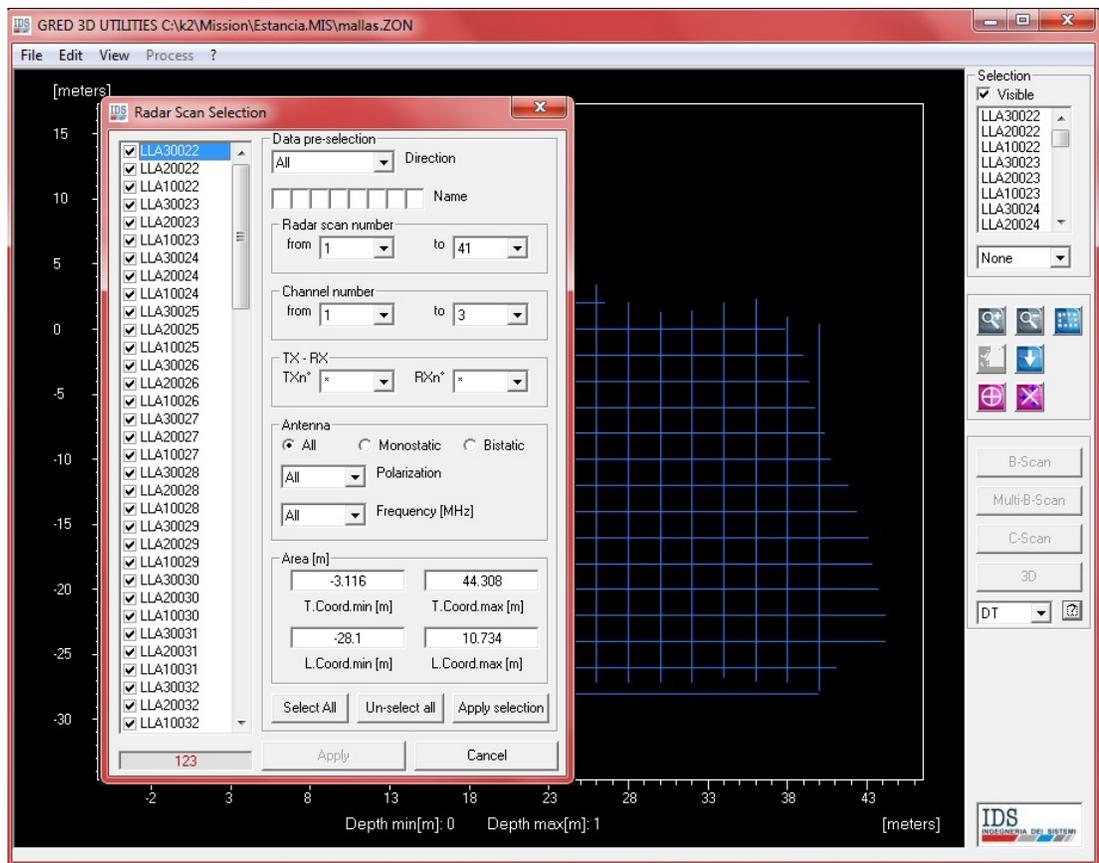


Figura 25. Visualización de las líneas transversales y longitudinales del Mallado 2-B.

4.4.2 Selección de Línea

Una vez abierto el mallado, se escogen las líneas a procesar, longitudinales o transversales, y específicamente se toma una frecuencia, normalmente se comienza con las frecuencias más altas, en este caso la de 600MHz (Figura 26).

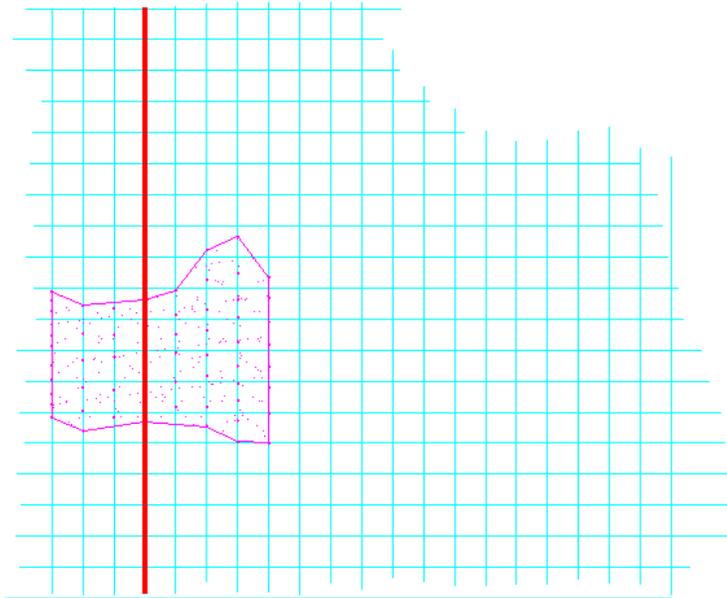


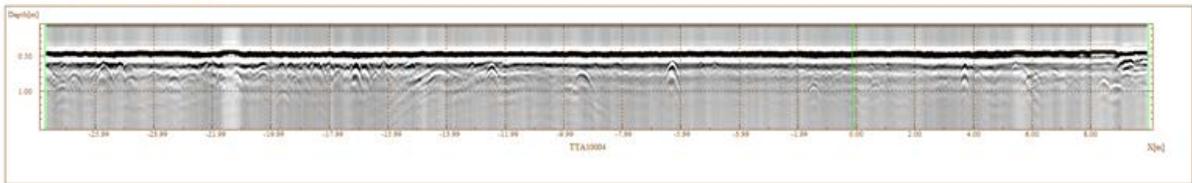
Figura 26. Mallado 2-B

En la figura 26, podemos apreciar el mallado 2-B, y una línea de color rojo, la cual se tomó como referencia para seguir con la explicación del procesamiento, dicha línea será expuesta como un radargrama y le aplicaremos los distintos pasos de procesamiento que vienen a continuación.

4.4.3 Corrección del tiempo cero

La corrección de tiempo cero, no es más que eliminar la capa de aire que se determina por la llegada de las primeras ondas recibidas, siendo éstas las que viajan con una mayor velocidad (Figura 27).

a) Radargrama original



b) Radargrama con corrección de tiempo cero

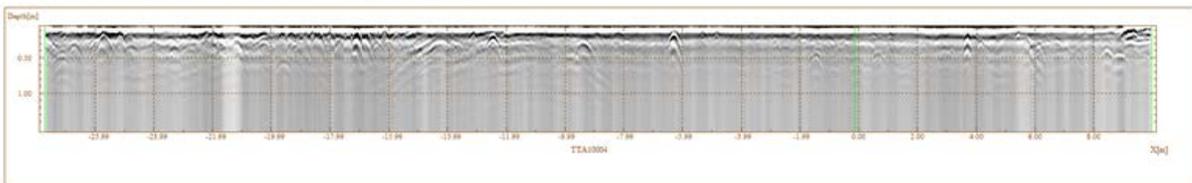


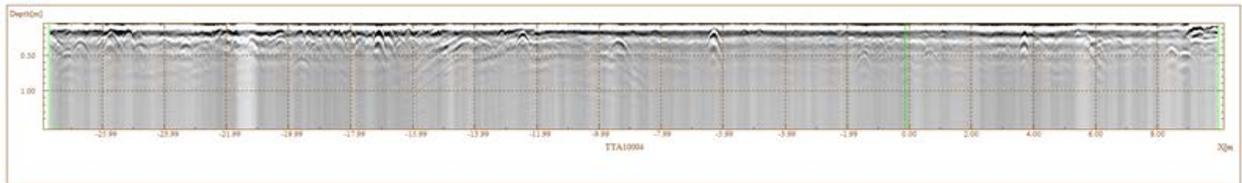
Figura 27. Radargramas. a) Original, b) Corrección de tiempo cero.

Lo que se hace es usar el tiempo igual a cero (t_0) para el momento de la llegada de la onda de aire a la antena receptora. Posterior a esto, todas las trazas en un mismo perfil deberían coincidir en un mismo tiempo cero.

4.4.4 Filtro *Background Removal*

La aplicación de este filtro nos ayuda a desenmascarar información valiosa (Figura 28).

a) Radargrama con corrección de tiempo cero



b) Radargrama con filtro *Background Removal*

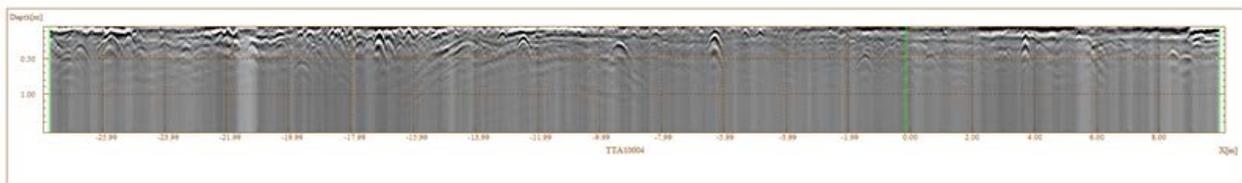


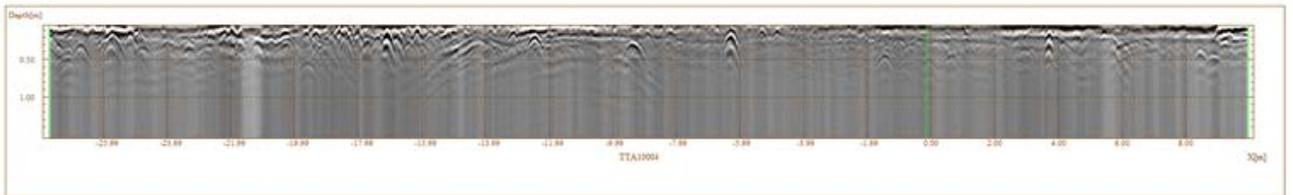
Figura 28. Radargramas, a) Corrección de tiempo cero, b) Filtro *Background Removal*.

Su objetivo es eliminar las bandas horizontales que pueden aparecer a lo largo del radargrama debido al ruido generado por el propio georadar o a interferencias electromagnéticas, esto se hace utilizando todas las trazas que conforman el radargrama con lo que solo se filtran las bandas horizontales que ocupan toda la línea de medida. Con este filtro se realizan promedios entre un número determinado de trazas contenidas en una cierta distancia o ventana espacial la cual se desplaza a lo largo de una línea de medida.

4.4.5 Filtro pasa banda

Con el filtro paso banda, restringimos el paso de una banda de frecuencia, es decir, las frecuencias que estén en el dominio dado las selecciona, y las que están por fuera de los niveles de corte, las rechaza. En este caso para la antena de 200 Mhz, los parámetros del filtro paso banda fueron: corte bajo 100Mhz, y corte alto 800Mhz, y para la antena de 600 Mhz, los parámetros del filtro paso banda fueron: corte bajo 300Mhz, y corte alto 1000Mhz.

a) Radargrama con Filtro Background Removal



b) Radargrama con Filtro paso banda

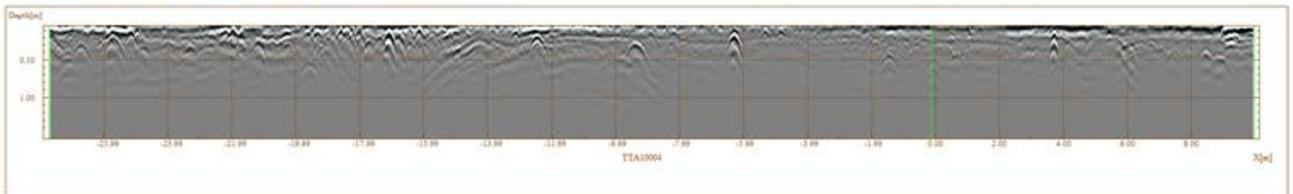


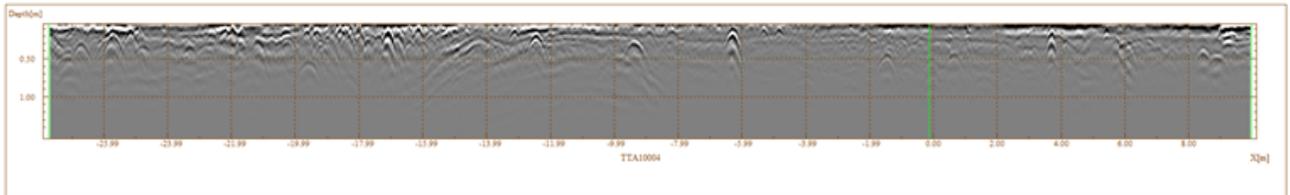
Figura 29. Radargramas. a) Filtro *Background Removal*, b) Filtro paso banda.

El escogimiento de estas frecuencias de corte consistió en realizar varias pruebas, cambiando las frecuencias y realizar comparaciones entre los radargramas, para de esta manera escoger el que arrojara una mejor imagen.

4.4.6 Ganancia

La ganancia nos permite rescatar la energía atenuada durante el tiempo de propagación de la onda durante el medio (Figura 30).

a) Radargrama con filtro pasabanda



b) Radargrama con Ganancia

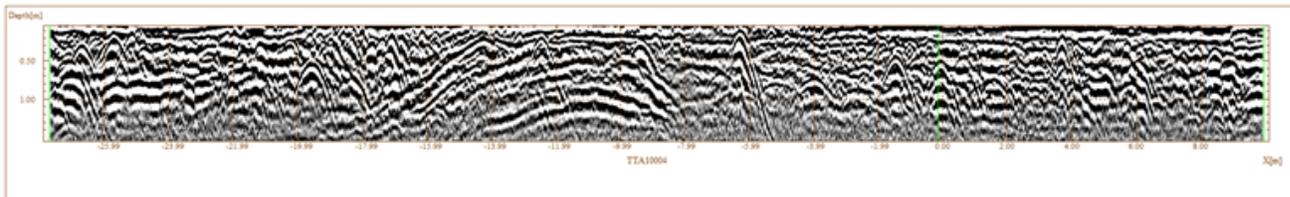


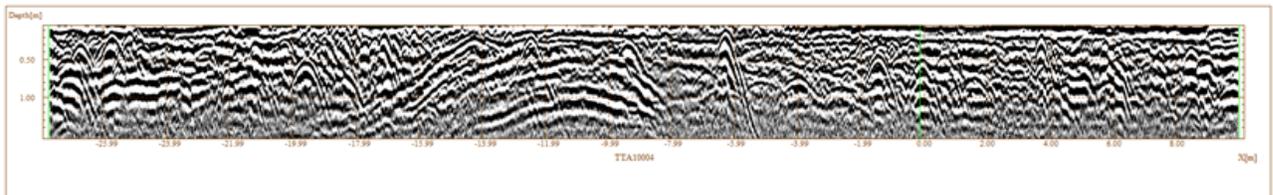
Figura 30. Radargramas. a) Filtro pasa banda, b) Ganancia.

En este paso se utilizó la función de autogancia que el programa de procesamiento ya tenía. La autogancia calcula y aplica una función de ganancia que se adapta al set de datos de entrada. En mayor detalle esta función calcula el decaimiento de la fuerza de la señal average en el tiempo, el inverso es luego usado para amplificar el set de datos.

4.4.7 Suavizado

Los filtros de suavizado tienden a "difuminar los ejes" a causa de que las altas frecuencias de una imagen son atenuadas. Este tipo de filtro es un proceso más de carácter estético para de esta manera poder visualizar las lecturas de los radargramas de forma más amigable.

a) Radargrama con ganancia



b) Radargrama con suavizado

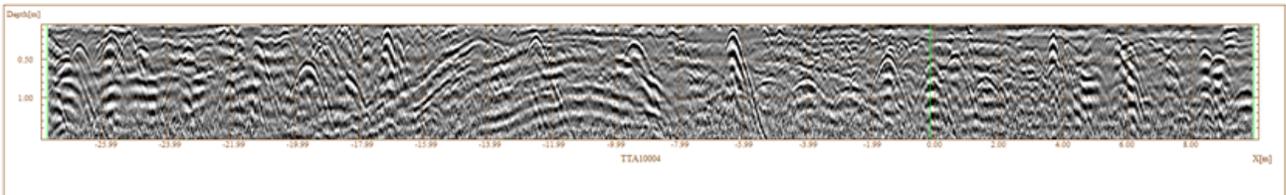


Figura 31. Radargramas. a) Ganancia, b) Suavizado.

Una vez finalizados los 7 pasos del procesamiento, ya la línea está lista para ser interpretada, estos pasos tienen que ser repetidos para todas las líneas longitudinales y transversales de todos los mallados, tanto para las frecuencias de 200 Mhz como para las de 600 Mhz.

4.5 Interpretación

Al finalizar toda la etapa de procesamiento estamos listos para comenzar la búsqueda de anomalías y de esta manera dar inicio a la interpretación de los mismos.

A través del programa GRED Utilities 3D®, se pueden realizar las interpretaciones de una manera amigable, una vez abierto el mallado a interpretar, se selecciona un grupo de radargramas (esto es a gusto del intérprete, para efectos de esta tesis se decidió interpretar de 4 en 4) y de esta manera buscar la continuidad de los elementos que se desea investigar.

En la figura 32 se pueden apreciar 4 radargramas cuya adquisición fue realizada con perfiles Este a Oeste y pertenecen al mallado 2-C, ubicados en el sector 2. Dichos radargramas son colocados uno debajo del otro para visualizar la continuidad de los elementos de una mejor manera, y así poder establecer una interpretación de calidad y con una optimización de tiempo considerable.

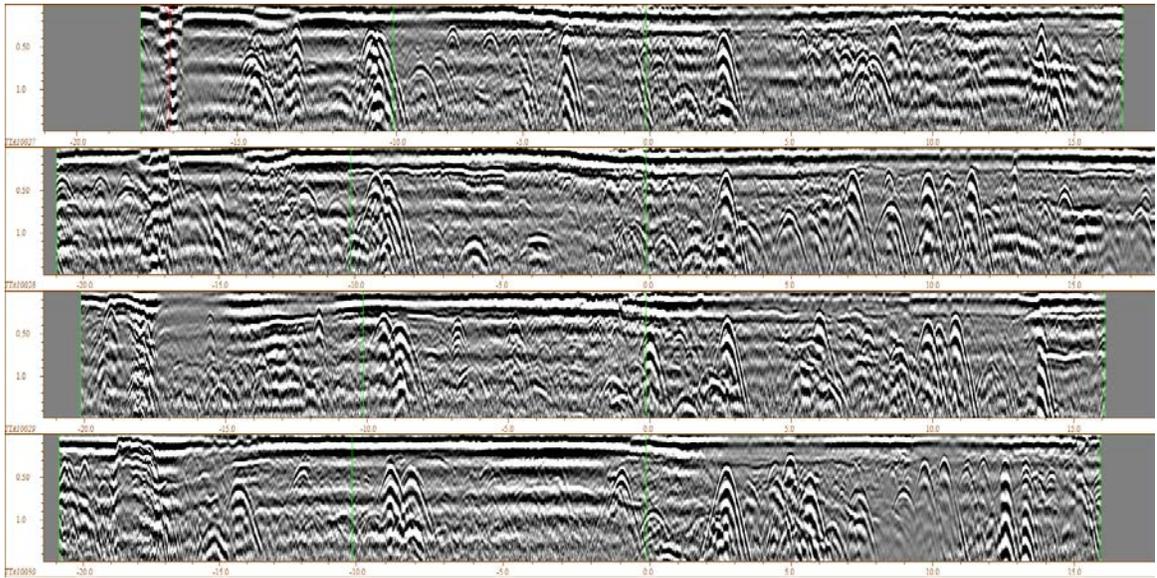


Figura 32. Cuatro radargramas pertenecientes al mallado 2-C listos para su interpretación.

En la figura 32 se aprecian 4 radargramas ya procesados pero sin interpretación alguna, luego, la figura 33 nos muestra los mismos 4 radargramas interpretados, en los cuales se pueden observar elementos como: raíces de árboles asociada a anomalías complejas con una corta continuidad, zonas asociadas a heterogeneidades en el medio, producto de materiales de relleno o diferencias de compactación con el entorno, y elementos aislados visualizados como anomalías puntuales, como por ejemplo rocas enterradas.

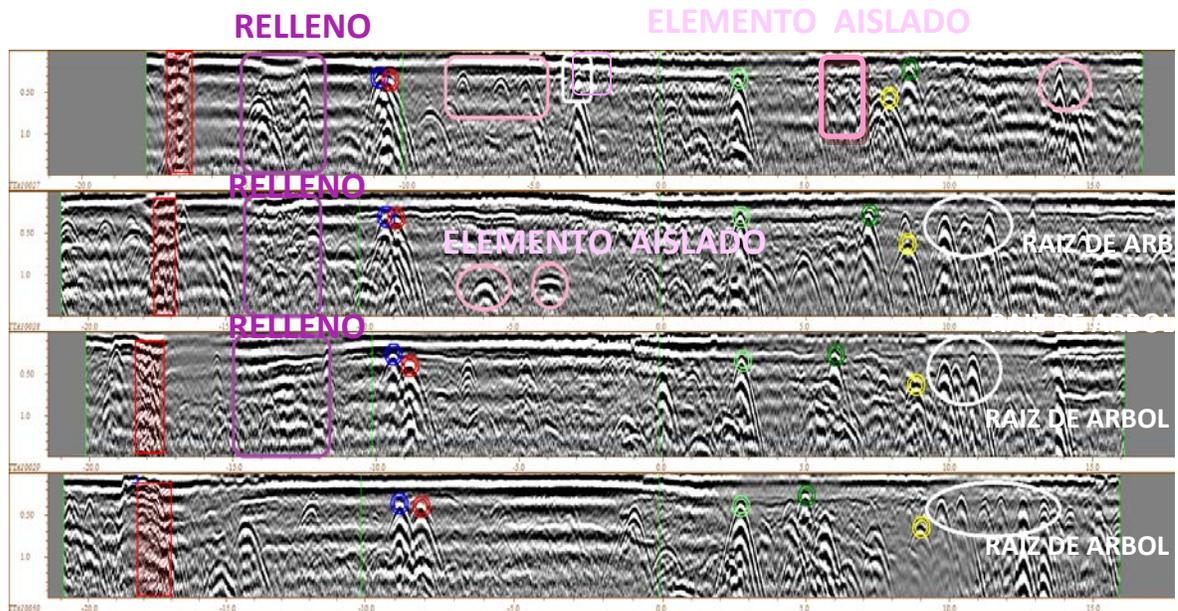


Figura 33. Radargramas pertenecientes al mallado 2-C interpretados.

Existen otros elementos en estos radargramas que no fueron mencionados en la figura anterior (Figura 33) dichos elementos serán explicados a continuación.

En la figura 34 podemos apreciar 3 segmentos de estos radargramas, en los cuales se observa una clara continuidad en las anomalías resaltadas, dicha anomalía es asociada con tuberías enterradas presentes en el terreno, su profundidad oscila entre los 30 centímetros y 60 centímetros.

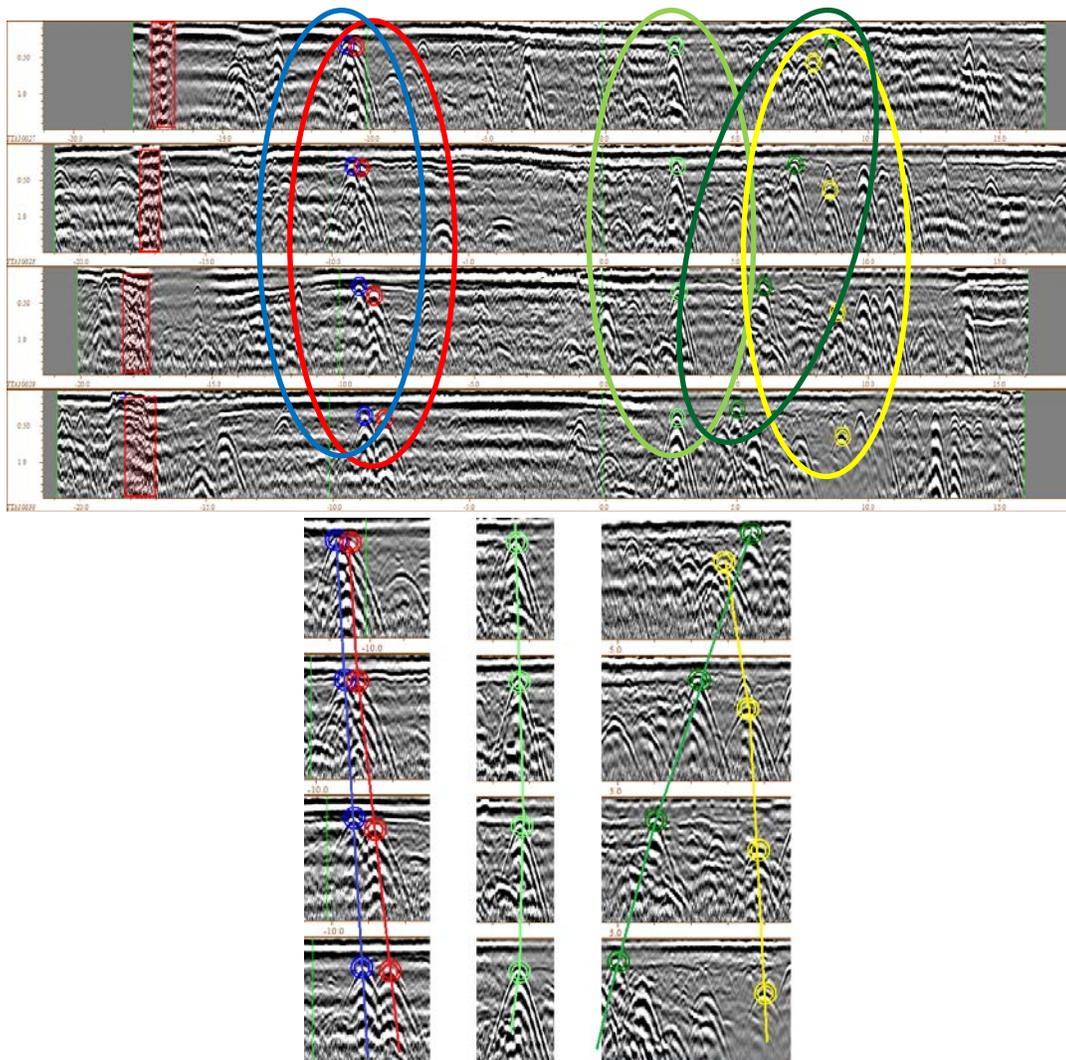


Figura. 34 Anomalías asociadas a una red de tuberías enterradas.

Una vez interpretados los radargramas, e identificadas las anomalías de interés, se procede a plasmarlas en el mallado pertinente para visualizar la ubicación de las mismas.

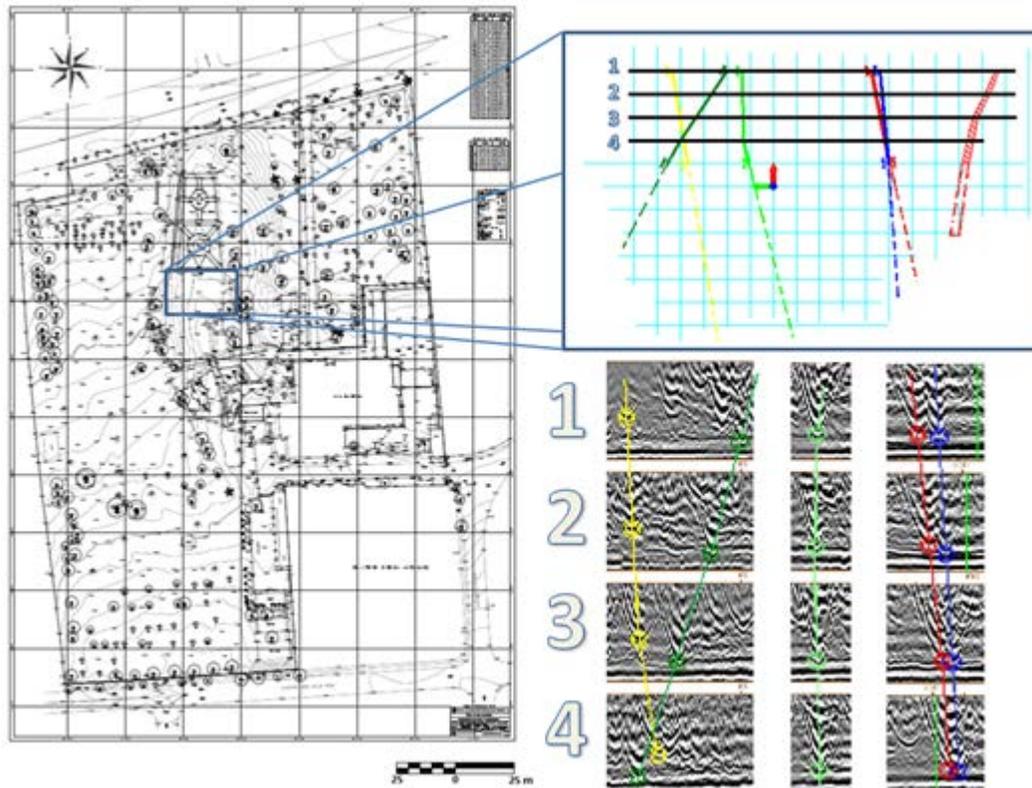


Figura 35. Ubicación del mallado 2-C con las tuberías interpretadas.

En la figura 35 se puede observar el mallado en color turquesa. Las 4 líneas en color negro pertenecen a los 4 radargramas antes interpretados, y por último, las tuberías trazadas según la continuidad que tienen.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANALISIS

A continuación se presentarán los resultados de la investigación (Figura 36), para ello se realizara un análisis detallado de los resultados obtenidos en los 5 sectores del área de estudio.

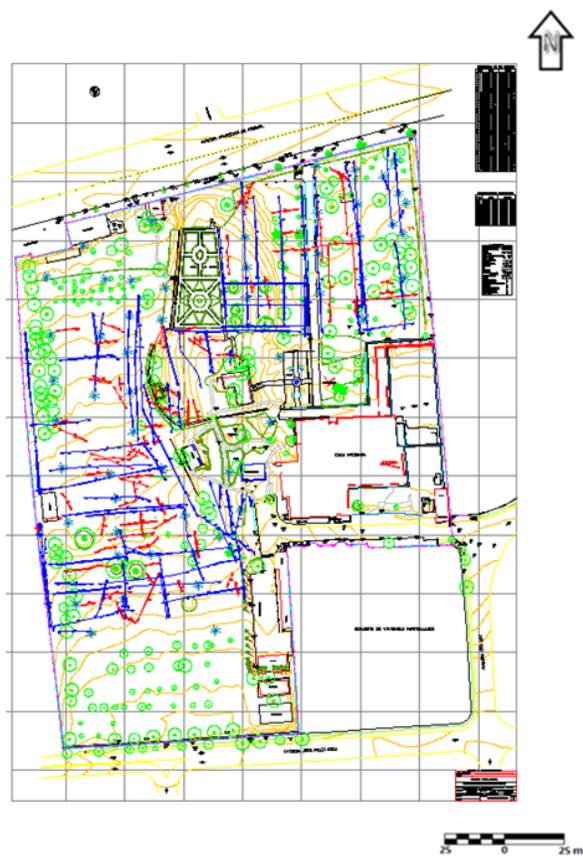


Figura 36. Anomalías cartografiadas en los jardines.

El primer paso, fue detectar las tuberías actuales de La Hacienda, esto se hizo buscando en los radargramas las continuidades de esas difracciones que pueden ser asociadas a la presencia de tubería enterradas (Figura 37).

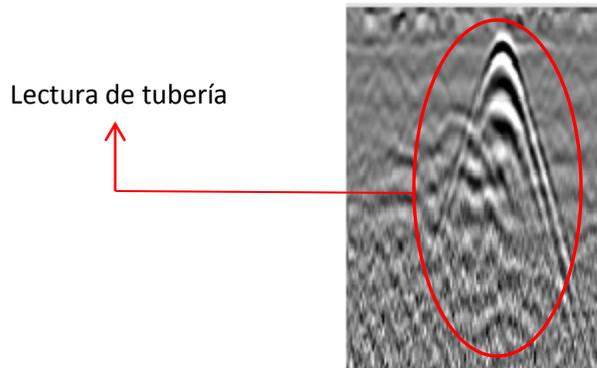


Figura 37. Radargrama mostrando una difracción asociada a la presencia de tubería.

Una vez detectadas esas anomalías que generan continuidades en los radargramas, se procede a llevarlas al plano en su ubicación exacta, una vez ahí, se verifica que esas anomalías coincidan con puntos ya previamente cartografiados en el plano tales como: tuberías de riego, desagües y tomas de aguas blancas, para finalmente clasificarlas como tuberías seguras, mapeándolas en color azul (Figura 36).

Normalmente en este tipo de estudios, los sistemas hidráulicos detectados se clasifican en *Tuberías Seguras* y *Elementos continuos Probables* o para efectos de este trabajo *Anomalías de interés*, siendo las primeras aquellas de las que se tiene certeza tanto en la lectura de los radargramas, la cual establece que estamos en presencia de una tubería y de su emplazamiento y ruta, y siendo las segundas, “*Anomalías de interés*” aquellos elementos que serán identificados a base de criterios establecidos;

para efectos de este trabajo, tenemos un criterio geofísico “adquisición piloto”, y dos criterios arqueológicos de los cuales se hablarán más adelante.

Luego de tener ya cartografiadas las tuberías actuales de La Hacienda, la investigación empieza a enfocarse en el resto de las anomalías que son consideradas como “anomalías de interés”. En dichas anomalías como se dijo anteriormente se procedió a establecer dos criterios, uno geofísico y otro arqueológico. El primero consiste en utilizar la lectura obtenida en la adquisición piloto (Figura 38), la cual nos muestra la respuesta de la Acequia enterrada, dicha respuesta es la de interés para este trabajo de investigación, y es la que nos va a identificar los segmentos del antiguo sistema hidráulico para que luego pueda ser cartografiado.

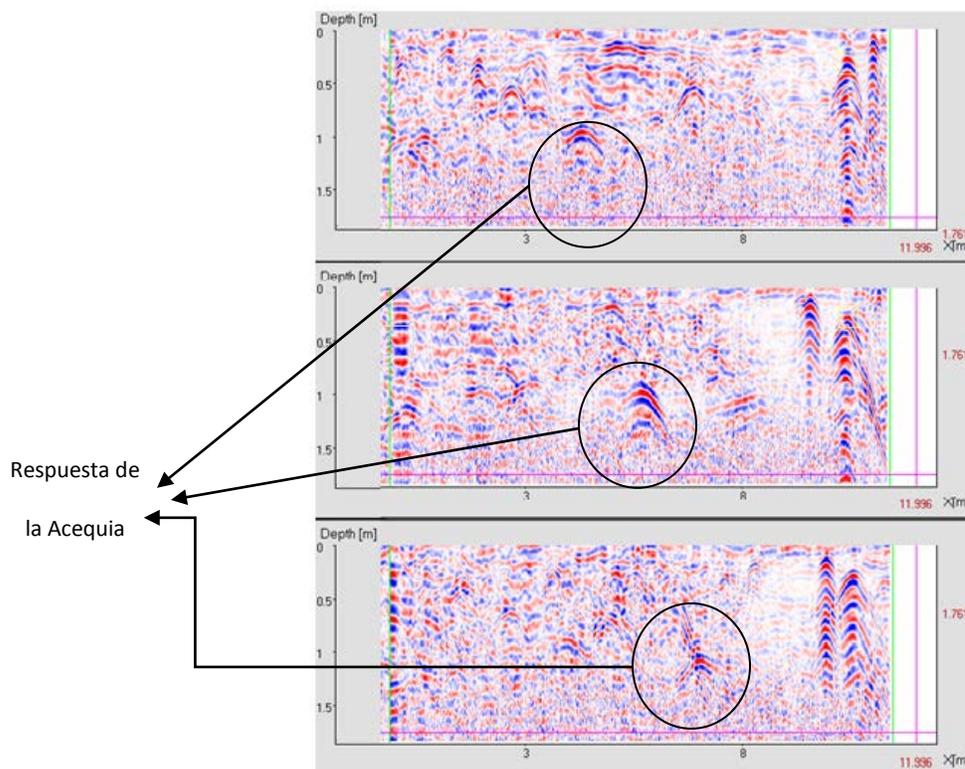


Figura 38. Anomalia de la Acequia, “Adquisición piloto”

Los *Elementos continuos* mapeados como probables, podrían no encontrarse exactamente en el desplazamiento reportado asumiendo un margen de error mínimo; esto debido a la presencia de estructuras como; carteles, letreros, estatuas, jardines, entre otros, que impedían el paso del equipo en línea recta, y tenían que ser bordeados para poder mantener la línea o el perfil que se estaba adquiriendo sin ser interrumpido.

En estos elementos continuos mapeados como probables, los cuales los hemos identificado como “Anomalías de Interés”, es donde se enfoca este trabajo especial de grado, ya que es en ellos donde se encuentran los vestigios arqueológicos del antiguo sistema hidráulico conocido como Acequia.

Las tuberías seguras fueron mapeadas de color azul y los elementos continuos probables "Anomalías de Interés" fueron mapeados en color rojo (Figura 39).

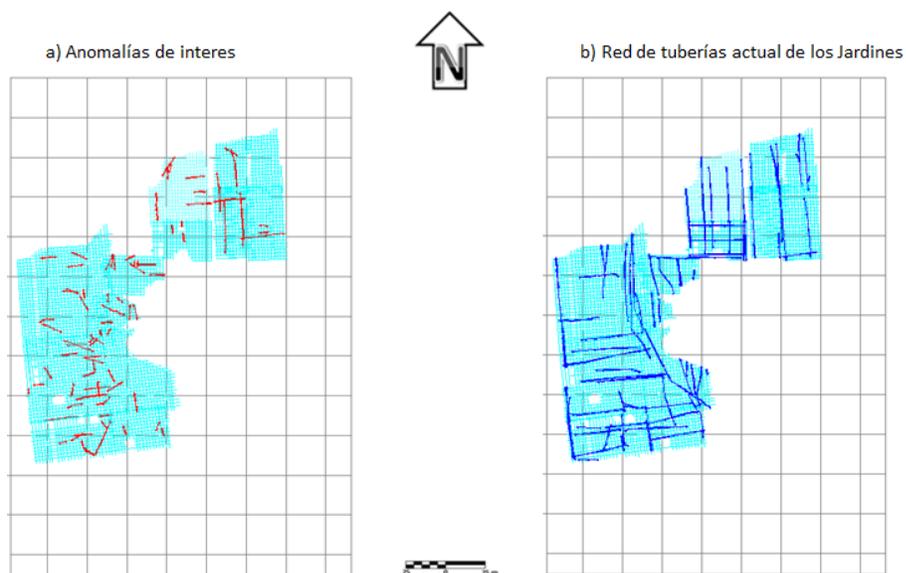


Figura 39. a) Anomalías de interés. b) Red de tuberías de los jardines.

Una vez descartadas las tuberías "seguras" de La Hacienda, se procede a realizar el estudio en las anomalías restantes, que vendrían siendo las anomalías de interés para dicha investigación. Luego de comparar la respuesta obtenida en la "adquisición piloto" con las anomalías de interés, utilizamos un segundo criterio, dicho criterio tiene un enfoque totalmente arqueológico y está sustentado gracias a las investigaciones previas realizadas por la institución FUNRECO en el año de 1989 en La Hacienda La Floresta liderada por el arqueólogo Luis Molina, y otra investigación realizada por Kay Tarble y Jesus E: Vaz, a comienzo de los años 80.

La investigación que hizo FUNRECO en el año de 1989, constó de la excavación de 77 pozos exploratorios, reflejando en algunos de ellos la existencia de un tramo de una de las Acequias que conformaban ese antiguo sistema hidráulico. Dicho estudio se realizó en lo que para esta investigación es el Sector 1 y Sector 2 de La Hacienda. El tramo de la Acequia localizado por el Arqueólogo Luis Molina tenía una orientación N15O, estaba a unos 20 centímetros de profundidad, y media unos 40 centímetros de ancho (Figura 40). Es importante resaltar que los tramos localizados en esa investigación estaban tapados con una superficie curva similar a la de una teja, esto nos ayuda a reforzar la lectura en forma de hipérbola obtenida por el radargrama en la "adquisición piloto", realizada previamente a las adquisiciones en los distintos sectores a estudiar.

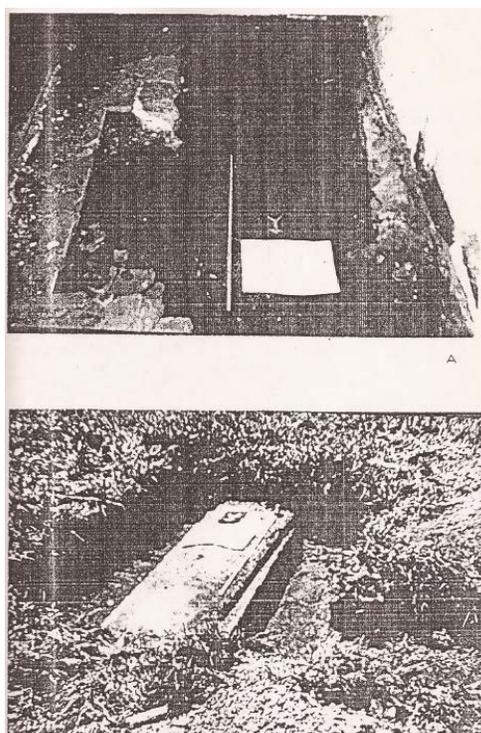


Figura 40. Tramo de la Acequia localizada en 1989. (Estudio preliminar para el proyecto de restauración de La Hacienda La Floresta)

La investigación realizada por Kay Tarble y Jesus E. Vaz, constó en los trabajos de la línea 1 del Metro de Caracas a comienzos de los años 80's, específicamente en la avenida Francisco de Miranda a la altura de la urbanización Altamira, donde gracias a las excavaciones, fue hallado un puente de ladrillos que databa de antes de 1840, dicho puente se cree servía de soporte para la canalización de Acequias de dicha época, y conservaba una orientación Nor-Oeste en sentido hacia La Hacienda La Floresta (Figura 41).

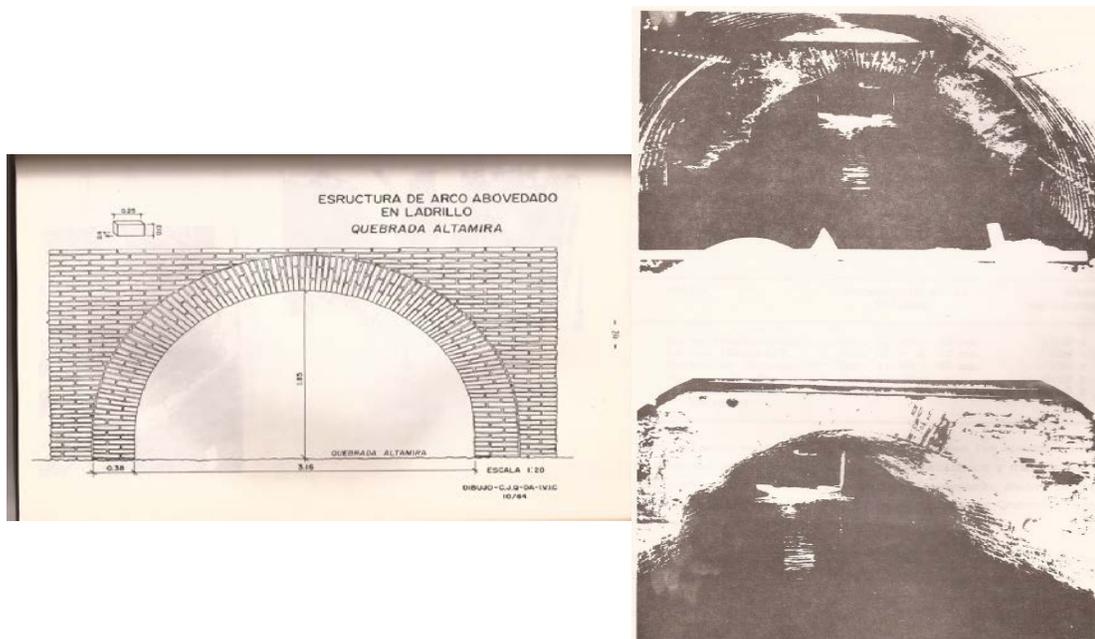


Figura 41. Puente de ladrillos soporte para la canalización de Acequias. (Tomado del boletín informativo de la asociación Venezolana de Arqueología).

Es importante mencionar que en el interior de una de las casa de La Hacienda se conserva un segmento de la Acequia con la misma orientación antes mencionada. En este sentido, las anomalías detectadas en la parte oeste de los jardines que tengan dicho rumbo y compartan la misma lectura de la “adquisición piloto” serán las pertenecientes a dicho sistema hidráulico y serán las que tomaremos en cuenta.

A continuación se mostrarán los resultados en detalle, dando la ubicación de cada elemento encontrado, sea tubería segura o Anomalía de interés, cada uno con la profundidad estimada en metros. Es importante aclarar que las Anomalías de interés fueron nuevamente chequeadas por Sector, haciendo una nueva “limpieza” para finalmente quedarnos solo con las anomalías que nos reflejen vestigios del antiguo sistema Hidráulico.

5.1 Sector 1

El estudio en el Sector 1 se hizo a través de 2 mallados, el primero en la parte sur del sector y el segundo en la parte norte. En la figura 42 podemos ver el mismo sector con diferentes cartografiados, de lado izquierdo las tuberías seguras y del lado derecho las anomalías de interés.

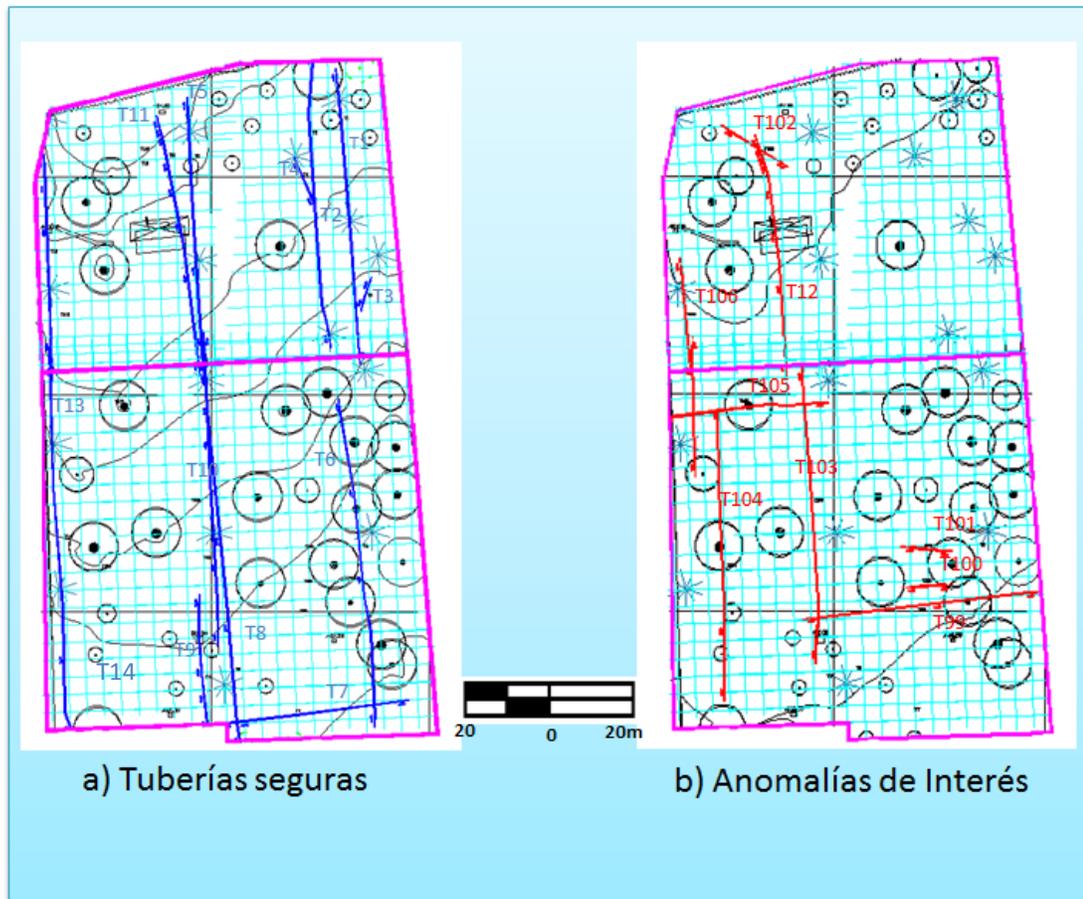


Figura 42. Sector 1: a) Tuberías seguras, b) Anomalías de Interés

A continuación veremos en formato de tablas la profundidad promedio de cada una de las anomalías localizadas en el sector 1.

Tabla 4. Tuberías seguras detectadas en el sector 1, indicándose su numeración y la profundidad promedio de detección.

Tubería	Profundidad Promedio(m)
T1	0.50
T2	0.50
T3	0.50
T4	0.10
T5	0.45
T6	0.15
T7	0.40
T8	0.45
T9	0.55
T10	0.55
T11	0.80
T13	0.20
T14	0.35

Tabla 5. Anomalías de interés del Sector 1, indicándose su numeración, la profundidad promedio de detección.

Anomalías de interés	Profundidad Promedio(m)
T12	0.40
T99	0.40
T100	0.45
T101	0.55
T102	0.20
T103	0.35
T104	0.25
T105	0.40
T106	0.20

En el Sector 1, se visualizan claramente 9 Anomalías que fueron clasificadas de interés, para este Sector, se utilizó el primer criterio arqueológico, el cual esta reflejado en el estudio realizado por FUNRECO en 1989, donde en la figura 43, se pueden ver las excavaciones realizadas en dicha zona, consiguiendo tramos de la Acequia en los pozos 72, 73 y 77, dichos tramos fueron dibujados por el Arqueólogo Luis Molina (Figura 44).

Comparando estos resultados con los obtenidos por el GPR, podemos ver que las anomalías T12, T103 y T105 con una profundidad promedio de 0.4 metros, coinciden con los tramos encontrados en la

excavación realizada en 1989, y la anomalía reflejada por el radargrama coincide claramente con la respuesta buscada.

Las Anomalías T99 detectada a una profundidad de 0.4 m, no fue localizada en los estudios realizados por FUNRECO, sin embargo la respuesta en el radargrama coincide con la realizada en la adquisición piloto. Las Anomalías T100, T101, T102, T104 y T106, fueron descartadas, y no consideradas parte de la Acequia, debido a que no cumplían con los criterios establecidos. Sin embargo esas lecturas son una clara evidencia de vestigios arqueológicos digno de ser estudiados a futuro, no siendo parte de esta investigación.

Las anomalías T12 y T103, presentan todas las características de evidenciar una parte de la Acequia principal o Acequia madre, ya que eran estas las que seguían el límite impuesto por la gravedad, adaptándose a los accidentes geográficos, casi siempre con una orientación N-S, para de esta manera ser las que condujeran la mayor parte del caudal hidráulico, una vez llegando a la zona de depósito comenzaba esa red ramificada de Acequias y es aquí donde entran las anomalías T99 y T105, las cuales presentan otro tipo de características debido a su orientación E-O, las cuales podemos asociarlas a aquellas Acequias denominadas; Acequias de depósito o distribución.

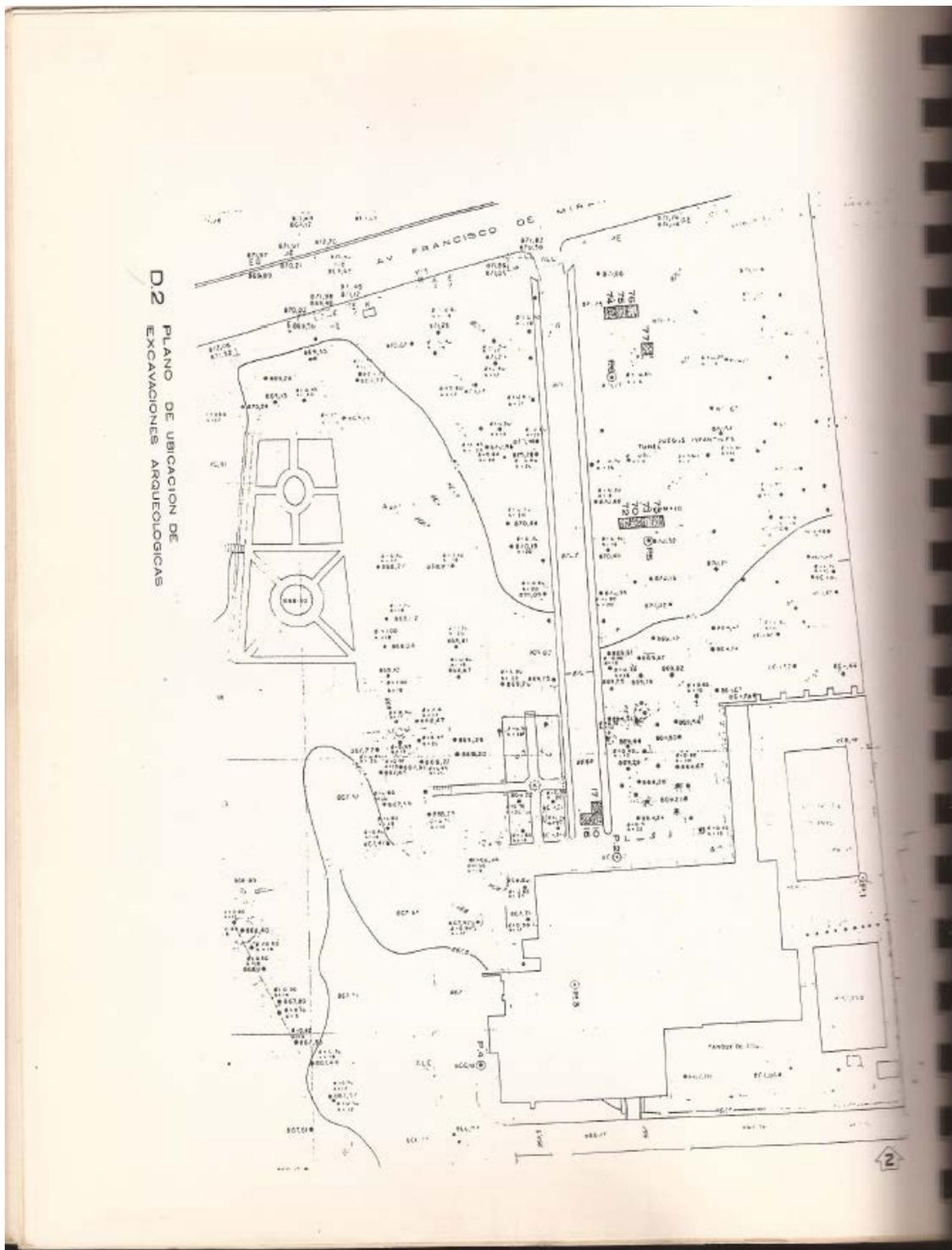


Figura 43. Excavaciones realizadas en La Floresta 1989

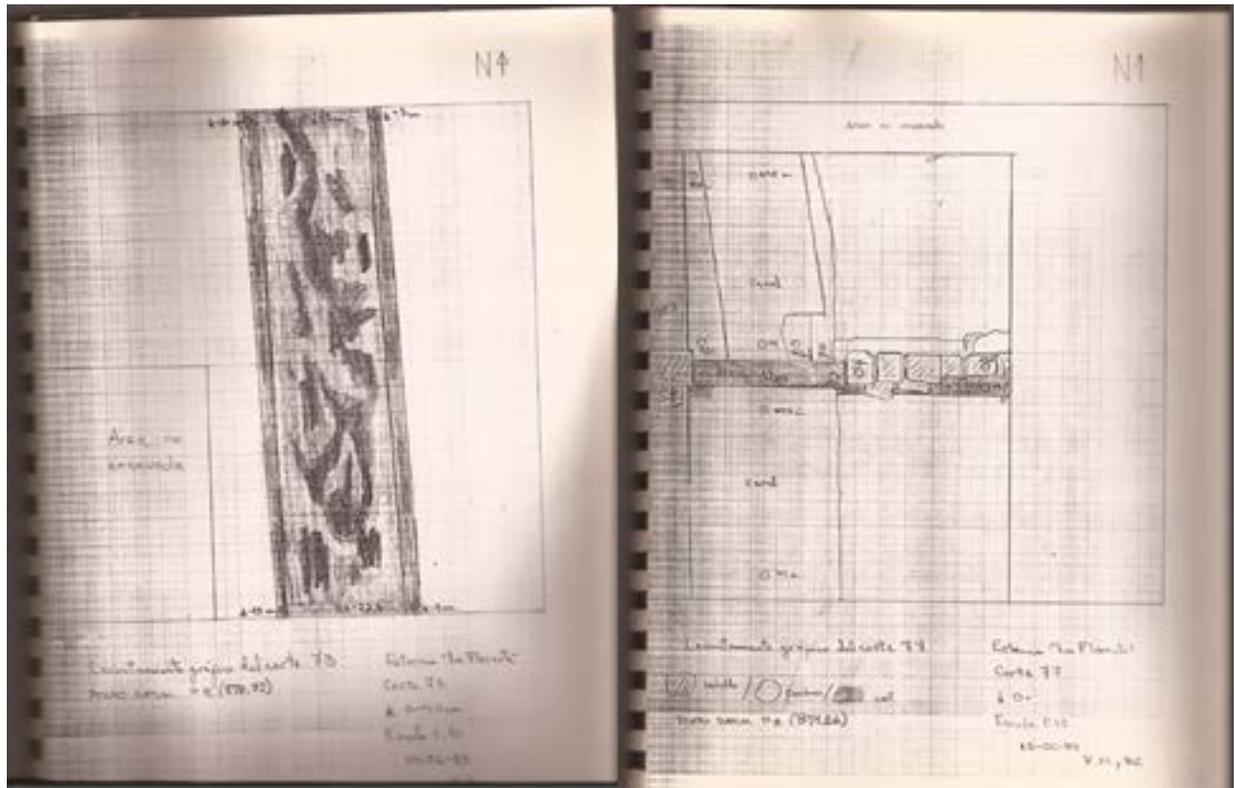


Figura 44. Tramos de la Acequia dibujado por el profesor Luis molina

5.2 Sector 2

El estudio en el Sector 2 se hizo a través de 3 mallados, 2 de ellos en la parte este del sector y el tercero, siendo éste el más pequeño, en la parte sur-oeste. En la figura 45 podemos ver el mismo sector con diferentes cartografiados, de lado izquierdo las tuberías seguras y del lado derecho las anomalías de interés.

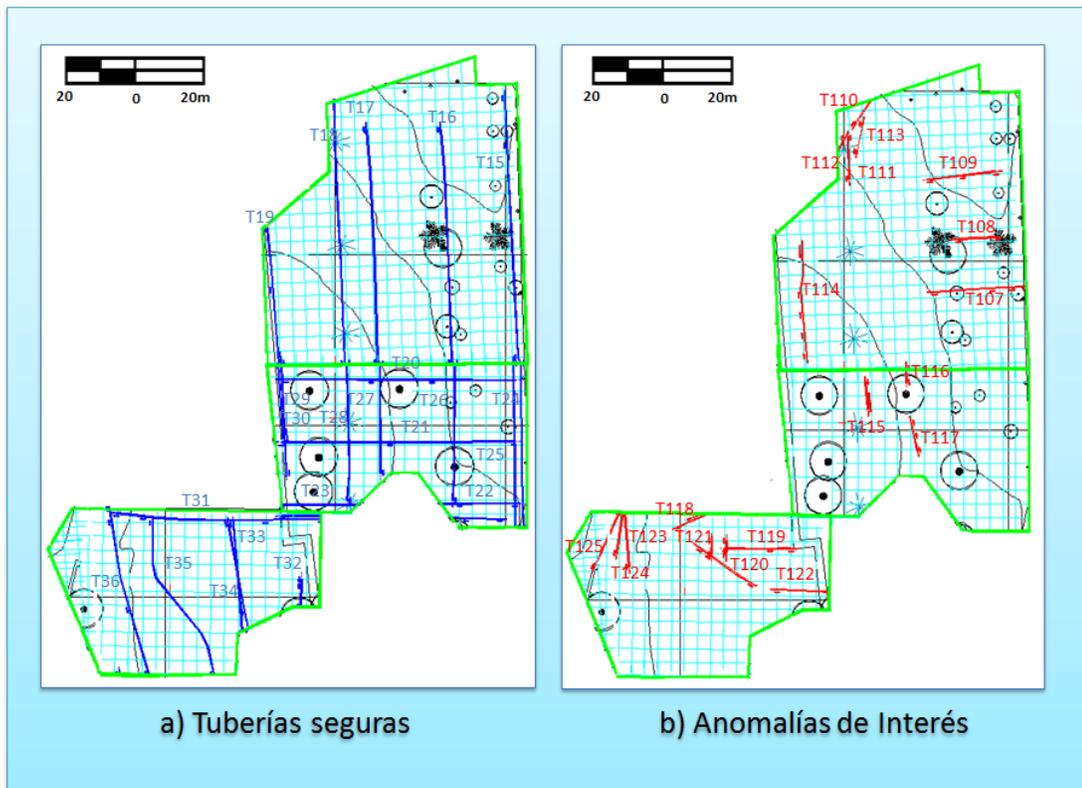


Figura 45. Sector 2: a) Tuberías seguras, b) Anomalías de interés.

Tabla 6. Tuberías detectadas en el Sector 2, indicándose su numeración y la profundidad promedio de detección.

Tubería	Profundidad promedio (m)
T15	0.25
T16	0.05
T17	0.05

Tubería	Profundidad promedio (m)
T18	0.40
T19	0.30
T20	0.15
T21	0.15
T22	0.10
T23	0.20
T24	0.20
T25	0.15
T26	0.05
T27	0.05
T28	0.35
T29	0.30
T30	0.35
T31	0.35
T32	0.25
T33	0.30
T34	0.35

Tubería	Profundidad promedio (m)
T35	0.15
T36	0.50

Tabla 7. Anomalías de interés detectados en el Sector 2, indicándose su numeración, la profundidad promedio de detección.

Anomalías de interés	Profundidad promedio (m)
T107	0.35
T108	0.30
T109	0.30
T110	0.15
T111	0.05
T112	0.10
T113	0.10
T114	0.50
T115	0.45
T116	0.30
T117	0.30

Anomalías de interés	Profundidad promedio (m)
T118	0.8
T119	0.12
T120	0.75
T121	0.8
T122	0.40
T123	0.15
T124	0.15
T125	0.15

En el Sector 2, se obtuvieron 19 Anomalías de interés, pero solo las anomalías T107 y T121 con una profundidad de 0.35 m y 0.8 m respectivamente, cumplían con los criterios buscados para los efectos de este trabajo. La anomalía T107 presenta las mismas características que las obtenidas en la Adquisición piloto y esta referenciada en los estudios de FUNRECO, siendo ésta la continuación de la Anomalía T105 vista en el Sector 1 antes mencionado, la cual presentaba las características de una Acequia de distribución o posiblemente de depósito por su orientación E-O. Luego tenemos la anomalía T121, ubicada en la zona sur del Sector 2, la cual presenta la misma lectura de la anomalía detectada en la adquisición piloto y presenta una inclinación N-O, dicha inclinación forma parte de un

nuevo criterio que gracias a las investigaciones realizada por Kay Tarble y Jesus E. Vaz, la cual sustenta el hecho de que parte del sistema hidráulico de aquella época provenía en dirección N-O, dicha orientación nos dice que estamos en presencia de Acequias de distribución o también conocidas como Acequias de abastecimiento. Es a partir de aquí que se va a tomar en consideración solo aquellas anomalías con dicho rumbo y con las características buscadas en función de la respuesta obtenida en la adquisición piloto.

Sin embargo, como se mencionó en el análisis del Sector 1, se está en presencia de elementos enterrados que pudieran ser asociados a pequeños yacimientos arqueológicos importantes pertenecientes a la historia de dicha Hacienda.

5.3 Sector 3

El estudio en el Sector 3 se hizo a través de 2 mallados, uno ubicado en la parte oeste de los jardines, siendo éste el de mayor tamaño y otro en la zona sur del sector 3 de menor tamaño que el anterior. En la figura 46 podemos observar el mismo sector con diferentes cartografiados, de lado izquierdo las tuberías seguras, y del lado derecho las anomalías de interés.

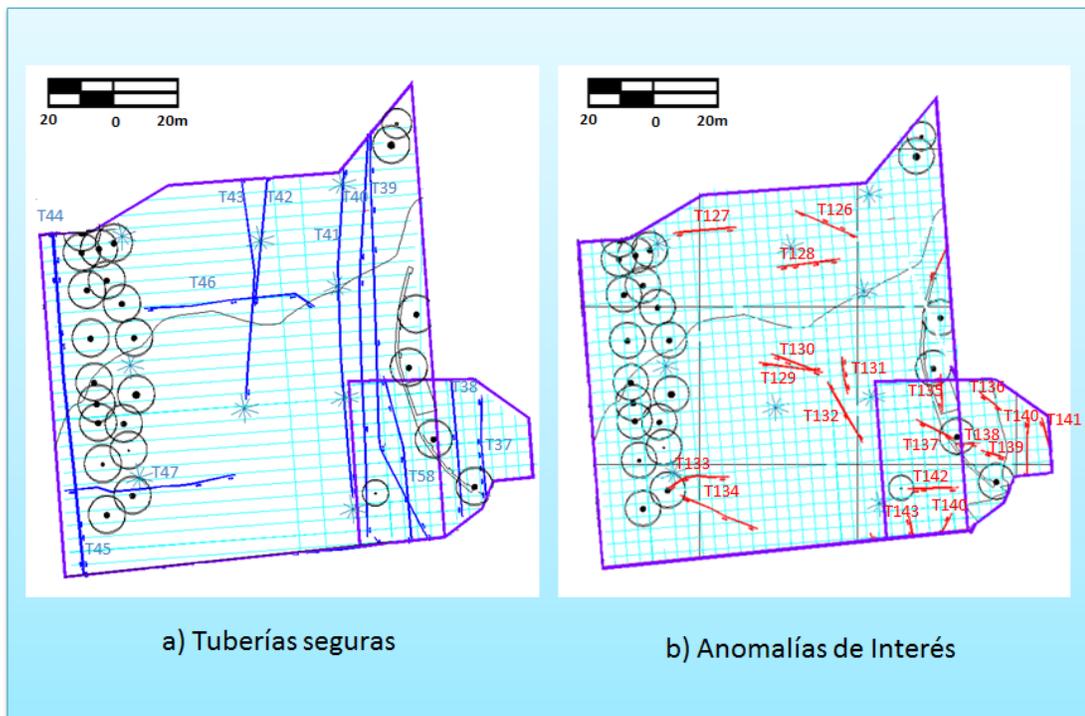


Figura 46. Sector 3: a) Tuberías seguras, b) Anomalías de interés.

A continuación veremos en formato de tablas la profundidad promedio de cada una de las anomalías localizadas en el sector 3.

Tabla 8. Tuberías detectadas en el Sector 3, indicándose su numeración y la profundidad promedio de detección.

Tubería	Profundidad promedio (m)
T37	0.50
T38	0.20
T39	0.50

Tubería	Profundidad promedio (m)
T40	0.15
T41	0.40
T42	0.25
T43	0.20
T44	0.45
T45	0.20
T46	0.40
T47	0.20
T58	0.55

Tabla 9. Anomalías de interés detectados en el Sector 3, indicándose su numeración, y la profundidad promedio de detección.

Anomalías de interés	Profundidad promedio (m)
T126	0.30
T127	0.45
T128	0.45
T129	0.50
T130	0.45

Anomalías de interés	Profundidad promedio (m)
T131	0.40
T132	0.20
T133	0.45
T134	0.45
T135	0.25
T136	0.20
T137	0.25
T138	0.25
T139	0.25
T140	0.20
T141	0.15
T142	0.40
T143	0.15

En el Sector 3 se obtuvieron 18 Anomalías de interés, siendo 8 las anomalías que cumplían con los criterios establecidos, tanto el geofísico, “adquisición piloto”, como el arqueológico, el cual se ve reflejada en la investigación realizada por Kay Tarble y Jesus E. Vaz, tomando como conclusión la orientación N-O de la Acequia, posiblemente siendo estas de abastecimiento o también conocidas como de distribución. Las anomalías

seleccionadas fueron: T126, T129, T130, T132, T134, T137, T138 y T139, las cuales presentaban profundidades que iban desde los 0.20 m, hasta los 0.50 m.

5.4 Sector 4

El estudio en el Sector 4 se hizo a través de 3 mallados, uno ubicado en la parte oeste de los jardines, siendo éste el más grande de los 3, otro en la zona S-E del sector 4, y el tercero siendo el más pequeño de los tres, ubicado en la zona N-O de dicho sector. En la figura 47 se puede observar el mismo sector con diferentes cartografiados, de lado izquierdo las tuberías seguras y del lado derecho las anomalías de interés.

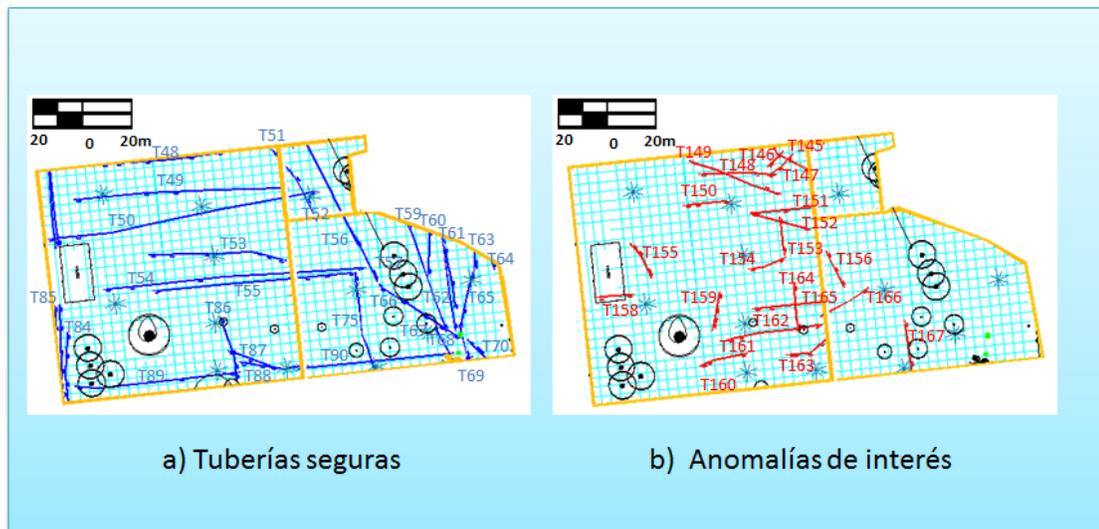


Figura 47. Sector 4: a) Tuberías seguras, b) Anomalías de interés.

A continuación veremos en formato de tablas la profundidad promedio de cada una de las anomalías localizadas en el sector 4.

Tabla 10. Tuberías detectadas en el Sector 4, indicándose su numeración y la profundidad promedio de detección.

Tubería	Profundidad promedio (m)
T48	0.30
T49	0.35
T50	0.35
T51	0.50
T52	0.55
T53	0.30
T54	0.45
T55	0.30
T56	0.45
T57	0.45
T59	0.10
T60	0.75
T61	0.55
T62	0.50
T63	0.55
T64	0.55

Tubería	Profundidad promedio (m)
T65	0.35
T66	0.45
T67	0.45
T68	0.60
T69	0.30
T70	0.90
T75	0.05
T84	0.40
T85	0.25
T86	0.25
T87	0.15
T88	0.35
T89	0.45
T90	0.40

Tabla 11. Anomalías de interés detectados en el Sector 4, indicándose su numeración, la profundidad promedio de detección.

Anomalías de interés	Profundidad promedio (m)
T145	0.20
T146	0.30
T147	0.30
T148	0.40
T149	0.25
T150	0.80
T151	0.15
T152	0.50
T153	0.15
T154	0.15
T155	0.45
T156	0.60
T157	0.15
T158	0.35
T159	0.45

Anomalías de interés	Profundidad promedio (m)
T160	0.10
T161	0.60
T162	0.10
T163	0.35
T164	0.15
T165	0.10
T166	0.20
T167	0.60

El Sector 4 fue el que más anomalías de interés arrojó, sin embargo, solo una de ellas (T152) cumplía con los criterios establecidos, tanto el criterio geofísico como el arqueológico ya antes mencionado. La anomalía T152 fue localizada a una profundidad de 0.50 m y asociada a un tramo de una Acequias de distribución por su orientación.

Como se ha mencionado anteriormente, el resto de las lecturas consideradas anomalías de interés, son una clara evidencia de vestigios arqueológicos dignos de ser estudiados a futuro, no siendo éstas parte, de esta investigación.

5.5 Sector 5

El estudio en el Sector 5 se hizo a través de 2 mallados, uno ubicado en la parte oeste de dicho sector, y el otro ubicado en la parte este del mismo. En la figura 48 podemos ver el mismo sector con diferentes cartografiados, en la parte superior las tuberías seguras y en la parte inferior las anomalías de interés.

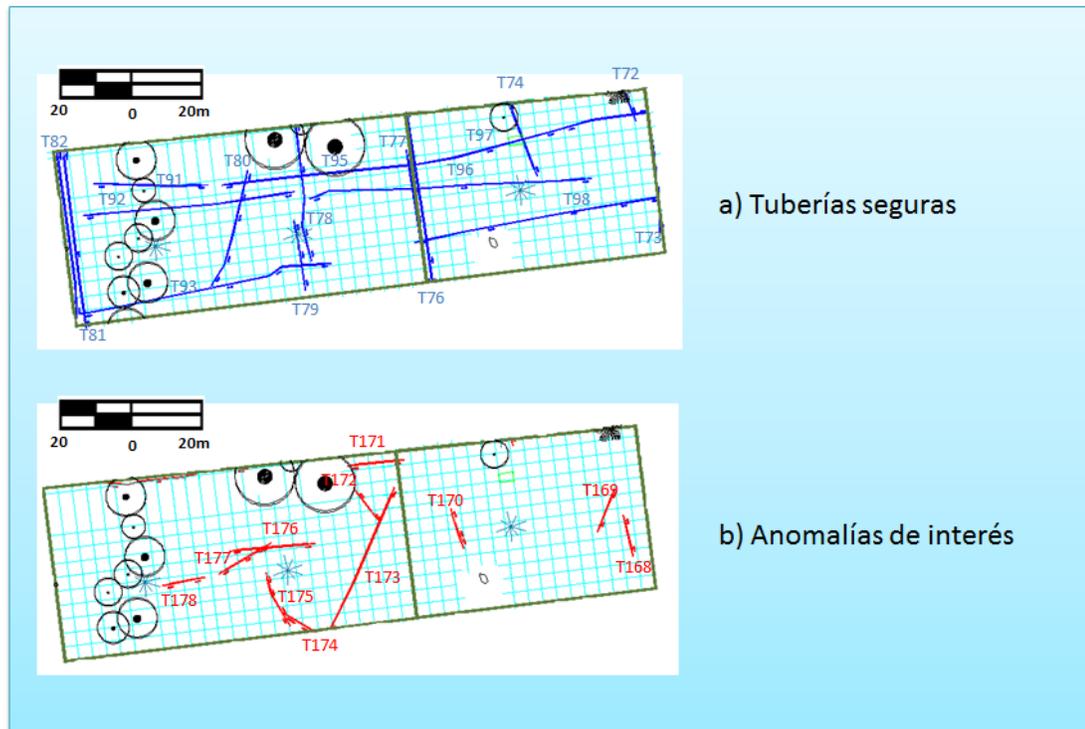


Figura 48. Sector 5: a) Tuberías seguras, b) Anomalías de interés.

A continuación veremos en formato de tablas la profundidad promedio de cada una de las anomalías localizadas en el sector 5.

Tabla 12. Tuberías detectadas en el Sector 5, indicándose su numeración y la profundidad promedio de detección.

Tubería	Profundidad promedio (m)
T72	0.30
T73	0.45
T74	0.05
T76	0.15
T77	0.10
T78	0.65
T79	0.30
T80	0.65
T81	0.60
T82	0.25
T91	0.35
T92	0.40
T93	0.35
T95	0.20
T96	0.35

Tubería	Profundidad promedio (m)
T97	0.30
T98	0.25

Tabla 13. Anomalías de interés detectados en el Sector 5, indicándose su numeración, la profundidad promedio de detección

Anomalías de interés	Profundidad promedio (m)
T168	0.15
T169	0.10
T170	0.80
T171	0.05
T172	0.15
T173	0.05
T174	0.65
T175	0.80
T176	0.40
T177	0.80
T178	0.65

El Sector 5 fue el que menos anomalías de interés reveló, y ninguna de ellas cumplía con los criterios establecidos. Dicha zona era de poco interés a nivel de estudio, ya que en esos límites de los jardines se duda de la presencia de sistemas hidráulicos antiguos.

Una vez localizadas todas las anomalías observadas a partir del GPR en el mapa, y haber discriminado entre la red de tuberías seguras y las anomalías de interés, el enfoque de trabajo empieza a dirigirse hacia esos elementos que como un rompecabezas pudieran establecernos parte de la red hidráulica antigua utilizada por La Hacienda en los siglos XVIII y XIX, dichos elementos son aquellos que cumplieron con los criterios establecidos inicialmente, para así finalmente ser cartografiados en el plano y poder establecer así su recorrido.

Como resultado final se obtuvo el cartografiado de los tramos pertenecientes a la Acequia. En las figura 49 y 50 se observan los 15 tramos asociados a dicho sistema hidráulico.

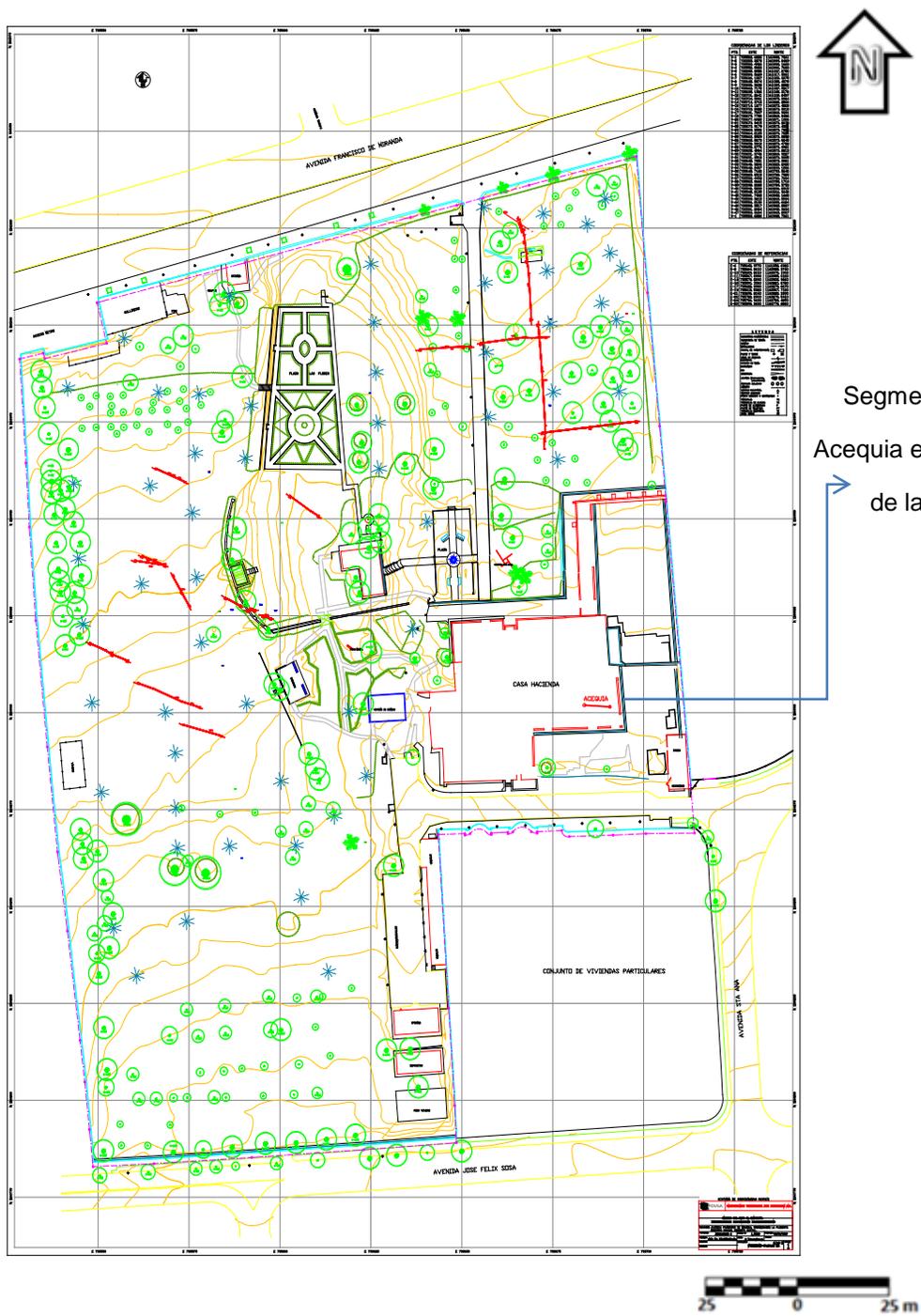


Figura 49. Cartografiado de las anomalías que cumplen con los criterios establecidos.

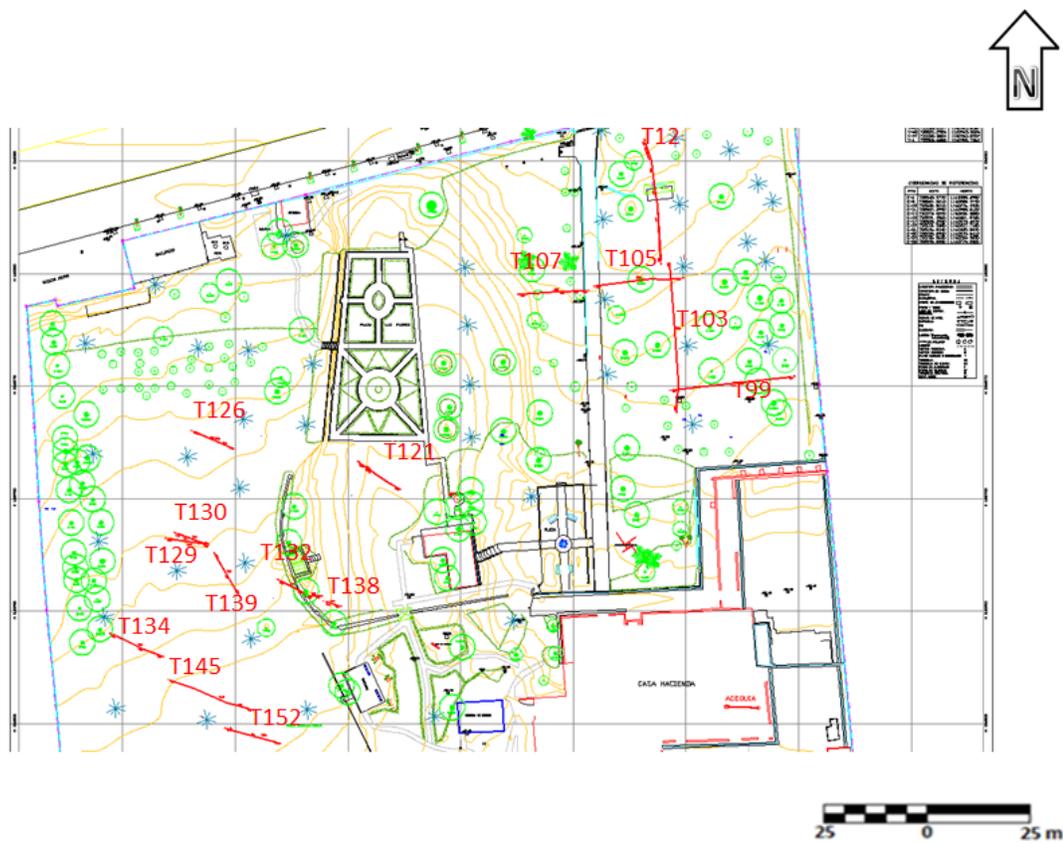


Figura 50. Zoom de la zona de estudio, identificando las anomalías consideradas como elementos de la Acequia.

La figura 50 nos muestra las 15 anomalías pertenecientes al antiguo sistema hidráulico, Como se mencionó anteriormente, el sistema hidráulico estaba constituido por tres tipos de Acequias, la Acequia principal la cual podemos asociarla a las anomalías T12 y T103 por su orientación, y también las Acequias de depósito y distribución, siendo estas las T99 y T107 ubicadas en el sector 1 y 2 respectivamente, y todas las encontradas en la zona oeste de La Hacienda con orientación Nor-Oeste. Se cree que estas últimas proviene de otra Acequia madre ubicada al oeste de la ciudad, posiblemente utilizada para el uso de poblados cercanos a La Hacienda.

Tabla 14. Anomalías pertenecientes al antiguo sistema hidráulico.

Tramos	Profundidad promedio (m)
T12	0.45
T99	0.40
T103	0.20
T105	0.40
T107	0.35
T132	0.20
T139	0.25
T121	0.85
T126	0.30
T134	0.45
T129	0.50
T130	0.45
T145	0.20
T138	0.25
T152	0.50

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

1. Se lograron obtener de manera satisfactoria las imágenes del subsuelo asociadas a la zona de estudio a través del método de GPR.
2. Se logró interpretar las imágenes obtenidas del subsuelo pudiendo hacer una separación entre las anomalías asociadas a la red hidráulica actual "tuberías seguras", y entre las anomalías de interés, asociados a eventos arqueológicos importantes que forman parte de la historia de La Hacienda.
3. La identificación del antiguo Sistema Hidráulico se hizo tomando en cuenta los criterios establecidos, tanto el geofísico, obtenido en la adquisición piloto, como los arqueológicos, referenciados en las investigaciones de FUNRECO y en la investigación realizada por Kay Tarble y Jesus E. Vaz.
4. Se realizó de manera exitosa el cartografiado final, dicho cartografiado consto de 15 tramos identificados como parte del antiguo sistema hidráulico conocido con el nombre de Acequia, encargada de suministrar de agua a La Hacienda durante los siglos XVIII y XIX.

5. La Hacienda La Floresta ha sufrido intervenciones a lo largo de la historia, ocasionando deterioro y alteraciones de los eventos arqueológicos ahí presentes, por ende se dificulta establecer con precisión el recorrido de la Acequia y realizar un cartografiado definitivo.

6. El equipo utilizado para esta investigación, "GPR" ha demostrado ser un instrumento de gran valor para las prospecciones arqueológicas debido al carácter no invasivo del mismo, garantizando que la zona a estudiar no se vea afectada ni presente alteración alguna.

6.2 RECOMENDACIONES

- 1.** Es recomendable realizar como complemento a este trabajo, otro estudio sobre las zonas donde se encontraron los elementos pertenecientes a la Acequia, utilizando un patrón de adquisición distinto, como por ejemplo realizar mallados con un espaciamiento entre líneas no mayor a 30 centímetros, y de esta manera hacer un estudio más minucioso sobre las áreas de interés.
- 2.** Estudiar la posibilidad de integrar una materia electiva al pensum de la escuela de geofísica, que esté asociada a la realización de prospecciones geofísicas con aplicación en el mundo arqueológico y de esta manera estrechar lazos de conocimientos entre ambas ramas científicas.
- 3.** Aprovechar la experiencia de este trabajo, documentado bien, y extender todo este conocimiento, de tal manera que PDVSA La Estancia, promueva dentro de su política de valoración patrimonial, otros trabajos afines de interés arqueológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNAN, A. (2001). Ground Penetrating Radar. Workshop Notes. Sensors & Software Inc. Ontario, Canada. 197 p.

BONOMO NESTOR Y MATÍAS DE LA VEGA (2007) "Método de Georadar".
Publicación. 76-81 p

COMISION NACIONAL DEL AGUA (2009) Semblanza Histórica del agua en
Mexico. 12, 16p.

DAVIS, J. L., AND ANNAN, A. P., 1986. High resolution sounding using
ground probing radar. Geoscience Canada, Vol. 13, p. 205-208.

ERIKA WAGNER Y MARTA TARTUSI (1984) Boletín Informativo de la
asociación venezolana de arqueología.

FERNANDEZ, MARCOS LUIS. (2012) "Estudio 3D en Alta Resolución de
Métodos No Invasivos: Microtemores y Georadar con Fines Geotécnicos en
Caracas".

FUNRECO (1989) Estudio Preliminar para el proyecto de restauración de La
Hacienda La Floresta.

HARRY M. JOL 2009 Ground Penetrating Radar, Theory and Applications.
Langford Lane, Kidlington, Oxford. 504, 505 p.

INGEGNERIA DEI SISTEIMI (IDS) (s/f). Especificaciones técnicas de GPR
modelo K2. Obtenido de <http://www.idscopy.it>

KANTAK, PETER, SCHMITZ, MICHAEL y AUDEMARD, FRANCK. (2001)
Sediment Thickness and a WEST-EAST Geologic Cross Section in the
Caracas Valley. *Rev. Fac. Ing. UCV*. 20-32, 35, 49, 56, 57, 84 p.

LEXICO ESTRATIGRAFICO DE VENEZUELA (L.E.V). 1992. tercera edición. Ministerio de Energía y Minas, Boletín de Geología.

LASCANO, E., OSELLA, A., DE LA VEGA, M., BUSCAGLIA, S., LANATA, J., (2002). Archaeological prospection of clay-brick walls using resistivity methods and GPR at San Julian Bay, Argentina,. *Env. & Eng. Geophys. 1Soc.*, Electronic Ed. 133-139p

LAWRENCE B. CONYERS (2004) "Ground Penetrating radar for Archaeology". Edición Altamira Press. 16-18, 24 p

MOORMAN, B. Ground Penetrating Radar Applications in Paleolimnology. Earth Science Program, University of Calgary. Calgary. Pp. 1-22. (2001)

ORTEGA-RAMÍREZ (2000) Métodos geofísicos para la conservación del patrimonio arqueológico e histórico. Institut de Physique du Globe. Université Louis Pasteur de Strasbourg, France *La Jornada*

PDVSA La Estancia. (2010) "Informe de Gerencia de Patrimonio y unidad de Investigación y documentación".

ROMERO, J. (2009). Prospección Geofísica Aplicando GPR en la Iglesia Santa Ana del Norte, Municipio Gómez, Estado Nueva Esparta. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 32, 33 p.

SEARS, F. W; ZEMANSKY, M. W; YOUNG, H. D; FREEDMAN, R. A. 2004. Física Universitaria. Vol 1. Decima Primera Edición, Person Education, México. 201-209p.

SESTO E. (2008) Caracterización Geoeléctrica del cementerio de los ingleses en Aroa Edo Yaracuy. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 33 p.

SINGER, (1974) Acumulación torrencial catastrófica, de posible origen sísmico, y movimientos neotectonicos de subsidencia en la parte oriental del

Valle de Caracas. Primer congreso Venezolano de sismología e ingeniería sísmica, en Revista GEOS, escuela de geología, minas y geofísica UCV. 22, 24: 60-65.

ZURITA, O. y CATALDI, A. (2002). Adquisición y procesamiento de Datos de GPR. TRX Consulting, Caracas Venezuela.

ANEXOS