



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**CARACTERIZACIÓN DE RELLENOS GRANULARES EN
PUENTES PATRIMONIALES EN AGUASCALIENTES MEDIANTE
MÉTODOS NO INVASIVOS**

PRESENTA

Ing. Andrea Maldonado Arévalo

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA EN INGENIERÍA
CIVIL CON ESPECIALIDAD EN CONSTRUCCIÓN**

TUTOR

Dr. Miguel Ángel Soto Zamora

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Raudel Padilla Cenicerros

M. Jorge Guadalupe Villanueva Clavel

Aguascalientes, Ags., 17 de mayo de 2021

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

DR. EN C. T. C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **TUTOR** designado de la estudiante **ANDREA MALDONADO ARÉVALO** con ID **165198** quien realizó la tesis titulado: **CARACTERIZACIÓN DE RELLENOS GRANULARES EN PUENTES PATRIMONIALES EN AGUASCALIENTES MEDIANTE MÉTODOS NO INVASIVOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a día 16 de mayo de 2021.



DR. MIGUEL ANGEL SOTO ZAMORA
Tutor de Tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Dr. en C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como *COTUTOR* designado de la estudiante *ANDREA MALDONADO ARÉVALO* con ID *165198* quien realizó la tesis titulada: *CARACTERIZACIÓN DE RELLENOS GRANULARES EN PUENTES PATRIMONIALES EN AGUASCALIENTES MEDIANTE MÉTODOS NO INVASIVOS*, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *ella* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 15 de mayo de 2021


Dr. Raudel Padilla Ceniceros

Cotutor de tesis

El nombre completo que aparece en el Voto Aprobatorio debe coincidir con el que aparece en el documento pdf. No se puede abreviar, ni omitir nombres

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

**Dr. en C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E**

Por medio del presente como ASESOR designado de la estudiante **ANDREA MALDONADO ARÉVALO** con ID **165198** quien realizó la tesis titulada: **CARACTERIZACIÓN DE RELLENOS GRANULARESEN PUENTES PATRIMONIALES EN AGUASCALIENTES MEDIANTE MÉTODOS NO INVASIVOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"**

Aguascalientes, Ags., a 15 de mayo de 2021



**MRSM Arq. Jorge Guadalupe Villanueva Clavel
Asesor de tesis**

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 17/05/2021

NOMBRE: ANDREA MALDONADO ARÉVALO **ID** 165198

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL **LGAC (del posgrado):** ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

TIPO DE TRABAJO: () Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DE RELLENOS GRANULARES EN PUENTES PATRIMONIALES EN AGUASCALIENTES MEDIANTE MÉTODOS NO INVASIVOS

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): ESTA TESIS APORTA AL AMBITO DE LA CARACTERIZACION Y CONSERVACION DEL PATRIMONIO EDIFICADO AL PERMITIR REALIZAR EXPLORACIONES DE ALTA RESOLUCION Y CONFIABILIDAD A UN MUY BAJO COSTO EN APOYO DEL INAH Y LAS INSTANCIAS INVOLUCRADAS.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>	
SI	El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI	La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI	Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI	Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI	Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI	El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI	Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI	Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>	
SI	Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI	Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI	Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.	Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI	Coincide con el título y objetivo registrado
SI	Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI	Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.	Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>	
N.A.	Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.	El estudiante es el primer autor
N.A.	El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.	La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado: Sí No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

DR. MIGUEL ÁNGEL SOTO ZAMORA

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

DR. MARTÍN HERNÁNDEZ MARÍN

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

DR. ALEJANDRO ACOSTA COLLAZO

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Dr. EN C. T. C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por permitirme desarrollar mi investigación dentro de sus instalaciones, además de presentarme las facilidades para la utilización de los equipos utilizados para la realización de los sondeos necesarios para mi proyecto. De la misma forma agradezco a CONACYT por brindarme la oportunidad de participar en su programa de becas nacionales, permitiéndome de esta forma continuar con mi posgrado.

De la misma forma doy gracias a mi tutor, el Dr. Miguel Ángel Soto Zamora, quien despertó en mi un espíritu de investigación desde mi formación universitaria y que con la continuación en este posgrado me apoyó con su conocimiento y buenas recomendaciones. Al Dr. Raudel Padilla Ceniceros quien me motivó semana a semana para llevar a cabo mi proyecto siempre presente y paciente ante mis dudas. Además, quiero agradecer al Arquitecto Jorge Guadalupe Villanueva Clavel por darme un panorama de la historia de Aguascalientes motivándome a luchar por la inclusión de esta variable en mi tesis. Gracias ustedes por brindarme parte de su conocimiento, los admiro y respeto siempre.

A mis padres Magdalena y Héctor, quienes ante la duda siempre estuvieron presentes apoyándome incondicionalmente, teniéndome paciencia y amor. Sin ustedes soy nada, los amo.

A todos mis compañeros y amigos que me ofrecieron un momento de alegría durante mi estancia en la universidad y aquellos quienes me apoyaron para lograr mis objetivos gracias.

Un especial agradecimiento a mis compañeros de servicio social quienes fueron parte fundamental. Gracias por su tiempo y dedicación.

Gracias a quien me motivó en un primer acercamiento a un posgrado, sin tus palabras, no lo habría hecho.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

DEDICATORIAS

Dedico mi tesis a mis padres Magdalena y Héctor, quienes desde que era pequeña me han ayudado en mi formación siempre dándome una palabra de aliento ante los momentos difíciles. Gracias por creer en mí, los amo.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ACRÓNIMOS	14
RESUMEN.....	15
ABSTRACT.....	16
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	18
1.1 Prólogo.....	18
1.2 Objetivo General.....	19
1.3 Objetivos Particulares	19
1.4 Alcances.....	20
1.5 Justificación	21
1.6 Hipótesis.....	23
1.7 Narrativa por capítulos.....	23
a) Capítulo I Introducción.....	23
b) Capítulo II Marco Teórico	23
c) Capítulo III Metodología de la Investigación.....	24
d) Capítulo IV Análisis de los Resultados.....	24
e) Capítulo V Conclusiones	24
CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	26

2.1	Estado del Arte	26
2.1.1	Aplicación de prospección eléctrica a edificaciones.....	26
2.1.2	Rellenos en edificaciones	29
2.2	Geofísica y sus métodos de exploración.	30
2.3	Modelos de representación	31
2.4	Anomalías.....	31
2.5	Métodos electromagnéticos (EM)	32
2.5.1	Georradar terrestre de penetración (GPR)	33
2.5.2	Radargramas	35
2.5.3	Principio de Funcionamiento.....	36
2.5.4	Procesamiento de datos (Filtrado)	36
2.5.5	Parámetros del medio	37
2.5.6	Conductividad.....	38
2.5.7	Permitividad dieléctrica	38
2.5.8	Permeabilidad magnética	38
2.5.9	Interpretación de radargramas	38
b)	Opacos	38
2.6	Métodos eléctricos	40
2.6.1	Resistividad Eléctrica.....	40
2.6.2	Factores que modifican los valores de la resistividad	40
2.6.3	Tomografía De Resistividad Eléctrica	42

2.6.4	Arreglos entre electrodos.....	45
2.6.5	Paleta de colores utilizadas en modelos resistivos	47
2.6.6	Error Cuadrático Medio (RMS).....	48
2.6.7	Resistencia de contacto	48
2.7	Caracterización de materiales	50
2.8	Edificaciones Patrimoniales	51
2.9	Legislaciones sobre edificaciones patrimoniales	53
2.10	Puente de San Ignacio y sus características.....	55
2.10.1	Etapas de construcción	56
2.10.2	Restauración del Puente de San Ignacio.....	58
CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		62
3.1	Metodología del Estudio	63
3.2	Definición de variables.....	64
3.3	Diseño del experimento	67
3.3.1	Etapa 1.....	69
3.3.2	Etapa 2.....	69
3.3.3	Etapa 3.....	70
3.3.4	Etapa 4.....	71
3.3.5	Etapa 5.....	72
3.3.6	Etapa 6.....	75
3.3.7	Etapa 7.....	75

3.4	Pruebas Piloto	76
3.4.1	Procedimiento	79
3.5	Análisis y discusión de los resultados de la prueba piloto	79
3.6	Modelo experimental	82
3.1.1	Aplicación de los métodos de estudio en el modelo experimental.....	85
3.1.2	Retícula	85
3.7	Sondeos de Tomografía de Resistividad Eléctrica	86
3.8	Características del modelo experimental.....	88
3.8.1	Primera etapa de sondeos	88
3.8.2	Segunda etapa de sondeos	89
3.8.3	Tercera etapa de sondeos	90
3.9	Rellenos y elementos	91
3.9.1	Elementos de contraste	91
3.10	Modalidades entre arreglos.....	92
3.11	Aplicación del método ERT basado en pseudo secciones en 2D para la obtención de un modelo 3D.....	93
3.11.1	Profundización del modelo 3D.....	93
3.9.2	Resultados obtenidos con pseudo-secciones	94
3.12	Electrodos utilizados. Ventajas y desventajas	96
3.13	Sondeos Radar de Penetración Terrestre	99
	CAPÍTULO IV: RESULTADOS	102
4.1	Resultados con GPR.....	102

4.1.1	Utilización de filtros para el procesamiento de datos	102
4.1.2	Radargramas primera etapa: Relleno de tepetate, tubo de PVC y tablón de madera.	104
4.1.3	Radargramas segunda etapa: Sin relleno	108
4.1.4	Radargramas tercera etapa: Relleno de grava, tubo de PVC de 6" y placas de metal.	108
4.2	Resultados con ERT	112
4.2.1	Primer Modelo.....	112
4.2.2	Segundo Modelo.....	113
4.2.3	Tercer Modelo.....	114
4.2.4	Aplicación de las pseudo-secciones para el modelo en 3D. Cuarto Modelo.....	115
4.3	Aplicación en el puente de San Ignacio	118
4.4	Aplicación de la metodología en sitio. Casa Terán	125
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS		130
5.1	Resultados de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Radar de Penetración Terrestre en muro experimental.	131
5.2	Resultados de Tomografía de Resistividad Eléctrica en Puente de San Ignacio.....	133
5.3	Resultados de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Radar de Penetración Terrestre en Casa Terán.....	135
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES.....		137
6.1	Conclusiones Generales	137

6.2 Conclusiones Particulares 140

6.3 Nichos de Investigación 141

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 143

ANEXOS..... 153

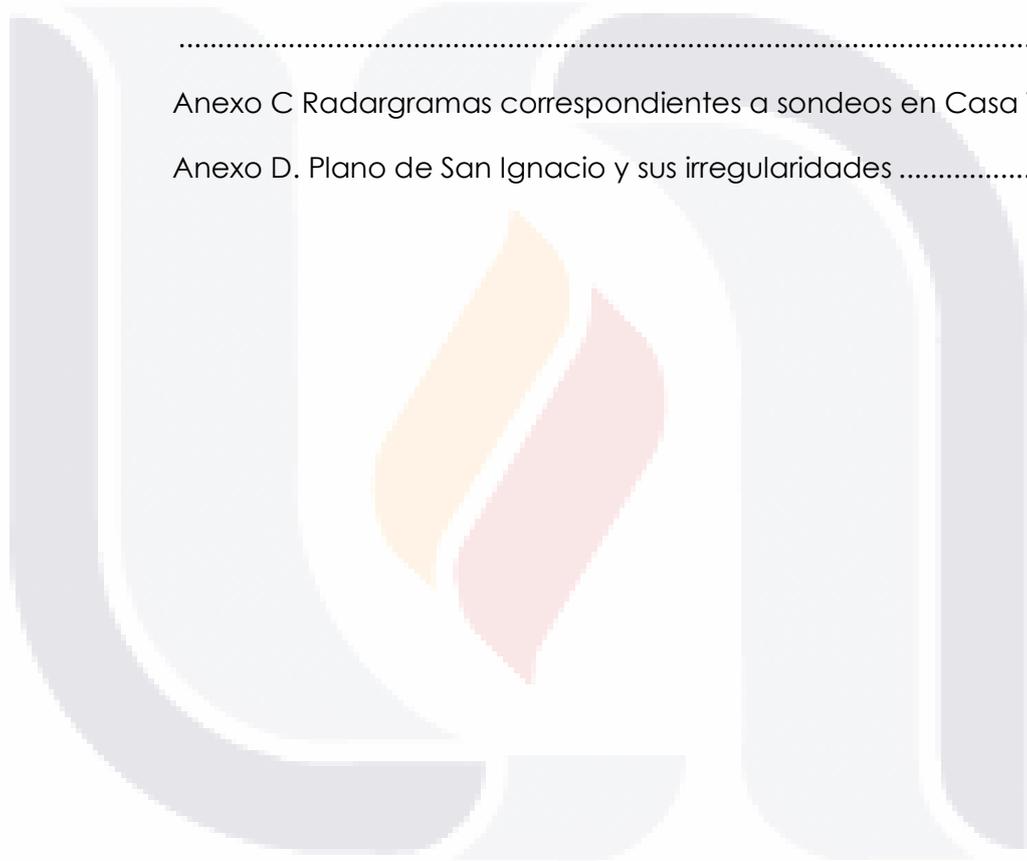
Anexo A Mediciones correspondientes al sondeo automático..... 153

Anexo B Sondeos de GPR realizados en muro experimental..... 154

..... 154

Anexo C Radargramas correspondientes a sondeos en Casa Terán 155

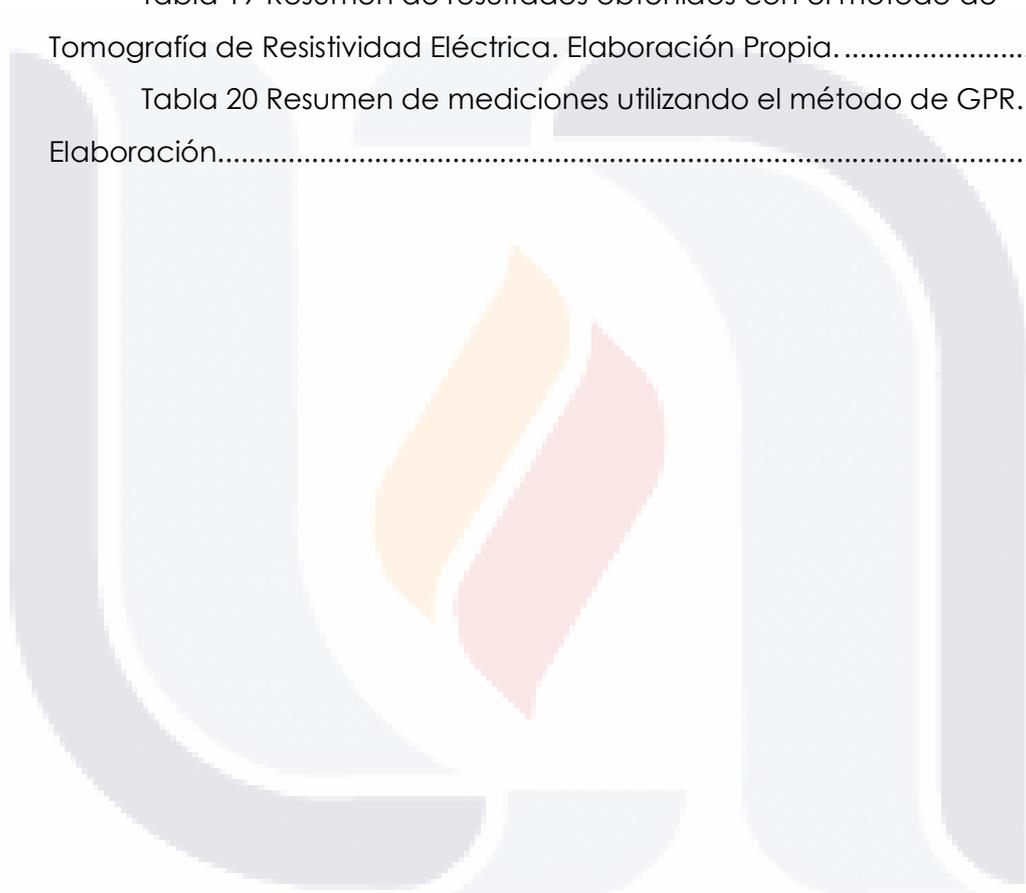
Anexo D. Plano de San Ignacio y sus irregularidades 159



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Caracterización Morfológica de los rellenos. Adaptada de (Ramos, 2012)	29
Tabla 2 Frecuencias usuales en GPR. Elaboración Propia.....	34
Tabla 3 Combinación de filtros utilizados para representación en GPR. Elabración Propia.....	39
Tabla 4 Valores genéricos de resistividades de algunos materiales. Adaptada de (SPTM CIMEMOR, 2007)	45
Tabla 5 Documentos internacionales en donde se hace mención al Patrimonio Edificado. Elaboración Propia adaptado de (Azkarate, Ruiz de Ael, & Santana, 2003)	54
Tabla 6 Definición de Variables en el experimento. Elaboración propia	65
Tabla 7 Dimensiones de probetas para resistividad. Elaboración Propia	77
Tabla 8 Resultados de probetas en estado saturado y normal. Elaboración propia	80
Tabla 9 Mediciones en muro con TER. Elaboración propia.....	87
Tabla 10 Sondeos para el modelo 3D. Elaboración Propia.....	95
Tabla 11 Características de los diferentes electrodos utilizados. Elaboración Propia	98
Tabla 12 Calendarización y pruebas de GPR. Elaboración Propia.....	100
Tabla 13 Radargramas y filtrado de datos con GPR. Elaboración Propia.....	103
Tabla 14 Recopilación de irregularidades (drenajes y sondeos) en el Puente de San Ignacio. Elaboración propia	122
Tabla 15 Localización de los sondeos sobre la calzada. Elaboración Propia.....	123

Tabla 16 Resultados de tomografía de resistividad eléctrica en Casa Terán.	126
Tabla 17 Resultados de tomografía de resistividad eléctrica en Casa Terán Muro exterior. Elaboración Propia	127
Tabla 18 Resultados de radargramas en Casa Terán. Elaboración Propia.....	128
Tabla 19 Resumen de resultados obtenidos con el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica. Elaboración Propia.....	130
Tabla 20 Resumen de mediciones utilizando el método de GPR. Elaboración.....	131



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 Aplicación del método ERT en Pañhú y la zona arqueológica en Hidalgo (INAH, 2012)	26
FIGURA 2 Diferentes arreglos para mediciones en el basamento piramidal trunco "El Castillo" (Tejero-Andrade, y otros, 2017).....	27
FIGURA 3 Electrodo planos utilizados en sondeos ERT en Chichén Itzá (Tejero-Andrade, y otros, 2017)	28
FIGURA 4 Dibujo de lo que puede representar una anomalía. Adaptación de (Aguayo, 2020)	32
FIGURA 5 Diferentes tipos de antenas utilizadas como GPR. Tomada de (Unit, 2021) y (Goelec, 2021)	34
FIGURA 6 Reflexión de ondas electromagnéticas del georadar. Elaboración Propia.	35
FIGURA 7 Ejemplo de procesamiento de datos con un filtro de ganancia de potencial, a) Antes del procesado. b) Después del procesado de acuerdo a (Prego Martínez, Nieto Matarranz, & Solla Carracelas, 2017) ..	39
FIGURA 8 Grafica de valores de resistividad de diferentes rocas, minerales y químicos (Orellana, 1982)	42
FIGURA 9 Esquema del método resistivo eléctrico. Modificado de (Rodrigo Molina, 2004).	43
FIGURA 10 Diagrama de los principales arreglos para el método resistivo eléctrico. Obtenido de (Arrubarrena, 2010)	47
FIGURA 11 Clasificación de la caracterización de materiales Elaboración Propia basada en . (Skoog & Leary, 1996)	50
FIGURA 12 Palacio de Bellas Artes, Inmueble considerado Patrimonio Cultural y Edificado en México, Tomada de (INBAL , 2021)	52
FIGURA 13 Puente de San Ignacio previo a restauraciones 2019. Elaboración propia.....	56
FIGURA 14 Inicio de la restauración del puente de San Ignacio. Diciembre 2020. Elaboración propia.	59

FIGURA 15 Visita de obra al Puente de San Ignacio donde se muestran parte de las obras hidráulicas alternas. Elaboración Propia.....59

FIGURA 16 Tratamiento de cal y mucílago de nopal para recubrimientos. (García, 2021)60

FIGURA 17 Retiro de la primera capa de bloques de fundición a los costados de la calzada. (Villanueva Clavel, 2020)61

FIGURA 18 Restauración del puente de San Ignacio. Marzo 2021. (García, 2021)61

FIGURA 19 Rellenos granulares y de contraste considerados variables en el modelo. Elaboración Propia.64

FIGURA 20 Diagrama de metodología planteada. Elaboración propia68

FIGURA 21 Resistivímetro aplicado en las pruebas de todo el experimento. Elaboración Propia.....69

FIGURA 22 Antena de GPR y pantalla del equipo utilizado Elaboración Propia.....70

FIGURA 23 Diseño del modelo experimental. Elaboración Propia71

FIGURA 24 Formato de cronogramas para realización de sondeos Elaboración propia.....72

FIGURA 25 Diagrama de proceso de obtención de pseudo perfiles de ERT parte A-D. Elaboración Propia74

FIGURA 26 Puente de San Ignacio, caso de estudio. Elaboración Propia.....76

FIGURA 27 Elementos necesarios para obtención de resistividades de probetas. Elaboración Propia78

FIGURA 28 Ensayos de algunas probetas Elaboración Propia.79

FIGURA 29 Gráfico resumen de valores de resistividad con materiales analizados. Elaboración Propia82

FIGURA 30 Modelo de mampostería para experimentos. Elaboración Propia.....83

FIGURA 31 Proceso constructivo del modelo experimental. Elaboración Propia.....84

FIGURA 32 Muro experimental final parte frontal. Elaboración Propia.84

FIGURA 33 Retícula en el modelo experimental parte posterior. Elaboración Propia.85

FIGURA 34 Diagrama y fotografía de la primera etapa de las mediciones en el muro experimental. Elaboración Propia.88

FIGURA 35 Fotografía de la segunda etapa de las mediciones en el muro experimental. Elaboración Propia.89

FIGURA 36 Diagrama y fotografía de la tercera etapa de las mediciones en el muro experimental. Elaboración Propia.90

FIGURA 37 Electrodo médico utilizado en sondeos. Elaboración Propia.....96

FIGURA 38 Muro experimental con electrodos médicos colocados para sondeo97

FIGURA 39 Sondeos con GPR en el muro experimental. Superior y lateral. Elaboración Propia.....99

FIGURA 40 Sondeo 116. Primera etapa. Elaboración Propia.....105

FIGURA 41 Sondeo 120. Primera Etapa. Elaboración Propia.....106

FIGURA 42 Sondeo 121. Primera Etapa. Elaboración Propia.....107

FIGURA 43 Sondeo 135. Tercera etapa. Elaboración Propia.....109

FIGURA 44 Sondeo136. Tercera etapa. Elaboración Propia.....110

FIGURA 45 Sondeo 133. Tercera etapa. Elaboración Propia.....111

FIGURA 46 Aplicación de un sondeo manual con electrodos de CPVC. Elaboración Propia112

FIGURA 47 Primer modelo de unión en el modelo experimental. Elaboración Propia.113

FIGURA 48 Segundo modelo en unión en el muro experimental. Elaboración Propia.114

FIGURA 49 Sondeo manual sobre el muro experimental. Elaboración Propia.....115

FIGURA 50 Pseudo-sección a una altura de 30 centímetros desde la base.....116

FIGURA 51 Pseudo-sección a una altura de 40 centímetros desde la base.....116

FIGURA 52 Pseudo-sección a una altura de 48 centímetros desde la base.....116

FIGURA 53 Modelo elaborado a partir de pseudo-secciones.....117

FIGURA 54 Irregularidades presentes en la calzada de San Ignacio. a) 7mo sondeo entre los electrodos 11 y 12. b) 6to sondeo al frente del electrodo 9. Elaboración Propia.120

FIGURA 55 Sondeos en San Ignacio a) Sondeo 2 b) Sondeo 3 c) Sondeo 19. Elaboración Propia121

FIGURA 56 diagrama de resistividades en el puente de San Ignacio. Elaboración Propia.124

FIGURA 57 Aplicación de la metodología en Casa Terán125

FIGURA 58 Irregularidades sobre la calzada del puente de San Ignacio134

FIGURA 59 Cortes del Puente de San Ignacio trazo entre ejes A y B Zona húmeda.....134

FIGURA 60 Modelo 5 y 6 realizados en el muro experimental.....153

FIGURA 61 Sondeo 119. Primera etapa. Elaboración Propia.....154

FIGURA 62 Sondeo 132. Tercera etapa. Elaboración Propia.....154

FIGURA 63 Sondeo 134. Tercera etapa. Elaboración Propia.....154

FIGURA 64 Radargrama Casa Terán - Dato 151.....155

FIGURA 65 Radargrama Casa Terán - Dato 158.....156

FIGURA 66 Radargrama Casa Terán - Dato 153.....156

FIGURA 67 Radargrama Casa Terán - Dato 165.....157

FIGURA 68 Radargrama Casa Terán - Dato 160.....157

FIGURA 69 Radargrama Casa Terán - Dato 161.....158

FIGURA 70 Radargrama Casa Terán - Dato 169.....158

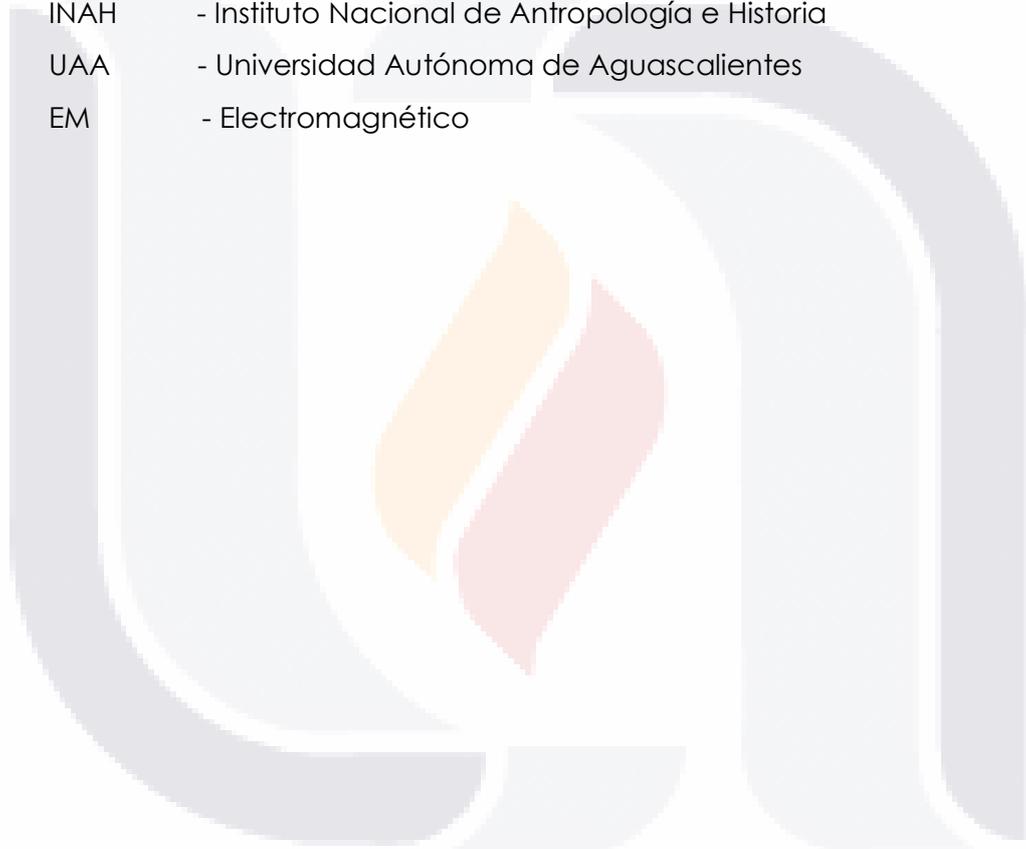
FIGURA 71 Radargrama Casa Terán - Dato 167.....159

FIGURA 72 Radargrama Casa Terán - Dato 172.....159



ACRÓNIMOS

NDT	-Non Destructive Methods
ERT	- Tomografía de Resistividad Eléctrica
GPR	- Radar de Penetración Terrestre
RMSE	- Error Cuadrático Medio / Root Mean Square Error
INAH	- Instituto Nacional de Antropología e Historia
UAA	- Universidad Autónoma de Aguascalientes
EM	- Electromagnético



RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se muestran una serie de experimentos aplicados a un muro de mampostería construido con elementos propios de la región, con el principal objetivo de caracterizar los diferentes rellenos que pudiera contener dentro de su particular estructura, además de relacionar los métodos utilizados en su experimentación desde un enfoque no destructivo hacia el patrimonio edificado en el estado de Aguascalientes, desde la adaptación del instrumento de medición hasta la obtención de los resultados y su interpretación enfocándonos en las características de un relleno granular, especialmente logrando una aplicación del conocimiento generado con esta metodología en una estructura considerada patrimonio en el estado de Aguascalientes, el Antiguo Puente de San Ignacio, edificación que actualmente gracias al propósito de la conservación se encuentra en una restauración activa por parte del INAH y el gobierno del estado. Con la metodología propuesta se pretende una aplicación sistemática en otras estructuras de mampostería consideradas patrimonio del estado, que puedan presentar alguna zona de deterioro y con la cual se logre la efectiva detección de anomalías como oquedades o humedades. Dada su versatilidad y eficacia puede ser una alternativa efectiva previa a trabajos de restauración ya que aporta diferentes características del medio analizado, incluso en un modelo 3D del elemento analizado, aportando un cuidado a las estructuras desde un enfoque al cuidado de la salud estructural del inmueble.

Palabras Clave

Rellenos Granulares, Tomografía de Resistividad Eléctrica, Radar de Penetración Terrestre, Caracterización de rellenos granulares, Antiguo Puente de San Ignacio

ABSTRACT

In this research work we show a series of experiments applied to a masonry wall built with elements specific to the region, with the main objective of characterizing the different fillings that it might contain within its particular structure, in addition to relating the methods used. In its experimentation from a non-destructive approach to the built heritage in the state of Aguascalientes, from the adaptation of the measurement instrument to obtaining the results and their interpretation, focusing on the characteristics of a granular fill, especially by applying the knowledge generated with this methodology to a structure considered heritage in the state of Aguascalientes, the Antiguo Puente de San Ignacio, a building that is currently under active restoration by the INAH and the state government due to the purpose of conservation. The proposed methodology aims at a systematic application in other masonry structures considered to be State heritage, which may show some area of deterioration and which will effectively detect anomalies such as cavities or dampness. Given its versatility and effectiveness, it can be an effective alternative prior to restoration work as it provides different characteristics of the analyzed environment, even in a 3D model of the analyzed element, providing care to the structures from a focus on the structural health of the building.

Keywords

Granular Fillings, Electrical Resistivity Tomography, Ground Penetration Radar, Characterization of granular fillings, Ancient Bridge of San Ignacio

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



CAPÍTULO

I

INTRODUCCIÓN

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Prólogo

La protección a las obras patrimoniales es un tema multidisciplinar, toma como parte suya diversas materias, desde la historia que engloba a una construcción, hasta su contexto económico social, y es gracias a este que se nos explica la importancia de este tipo de construcciones en la actualidad, describiendo la identidad de una sociedad y su desarrollo en las ciudades, ya que son testigos vivos del desarrollo y crecimiento de la misma a través del tiempo.

Obras como el Puente de San Ignacio toman tanta relevancia en nuestro estado a partir del momento en el que el crecimiento exponencial de su población marca la necesidad de conectarse con vías de comunicación más eficientes, en un principio con poblaciones cercanas y hoy en día con fraccionamientos, al grado de requerir una vía alterna a las instalaciones del puente original para poder conservar la historia y el legado de esta construcción tan importante para los agascalentenses y poder sustentar los requerimientos de la población actual.

En ésta investigación, se abordan temas sobre técnicas no destructivas por sus siglas en inglés (NDT) con aplicaciones en geofísica, adaptados a la exploración de estructuras internas de mampostería de piedra en edificaciones en el estado de Aguascalientes, especialmente en una de las estructuras emblemáticas, el Puente de San Ignacio, basándonos en un modelo elaborado a partir de piezas de mampostería de roca ígnea de tipo riolítica. Se plantea el desarrollo de una metodología para la caracterización de las propiedades físicas y resistivas de los materiales presentes en el relleno debajo de la superficie de rodamiento, y cuya dificultad de medición radica en las altas densidades de los materiales de la carpeta que cubren dichos rellenos, para lo cual la aplicación y combinación de diferentes métodos es la mejor opción para poder explicar el comportamiento de dichos materiales. El estudio permitirá analizar bajo la misma metodología, los rellenos existentes

bajo la calzada del inmueble con el fin de verificar si existe alguna situación de riesgo latente en la edificación desde un punto de vista constructivo, como lo son humedades, oquedades o irregularidades en sus rellenos y conocer si se pueden llevar a cabo mejoras que puedan ayudar sustancialmente al lugar de estudio.

1.2 Objetivo General

Desarrollar una metodología de exploración, empleando el método de tomografía de resistividad eléctrica (ERT) en su modalidad no invasiva y el método de radar de penetración terrestre (GPR) para la determinación de propiedades físicas y eléctricas del relleno granular bajo la calzada de puentes de arco mampostería.

1.3 Objetivos Particulares

- I. Evaluar los métodos no destructivos por sus siglas en inglés (NDT), radar de penetración terrestre, Ground-penetrating radar (GPR) y la tomografía de resistividad eléctrica en inglés Electrical Resistivity Tomography (ERT) aplicadas para el análisis de rellenos granulares dentro de estructuras y puentes de mampostería consideradas patrimonio en el municipio de Aguascalientes, especialmente en el puente de San Ignacio.
- II. Utilizar diferentes tipos de rellenos granulares bajo la calzada de un modelo a escala de una estructura de mampostería bajo condiciones de laboratorio para el análisis de los diferentes métodos de inspección.
- III. Identificar los valores de resistividad pertenecientes a diferentes materiales y situaciones de los rellenos para contar con una base de datos comparativa para la identificación de humedades, oquedades o la existencia de alguna irregularidad.

- IV. Comparar los valores obtenidos de resistividad con constantes dieléctricas de los materiales, relacionar ambos valores identificando la existencia de condiciones especiales como humedad, o espacios vacíos en los rellenos granulares.
- V. Describir el contexto en que se realizó el Puente de San Ignacio, las diferentes etapas por las que pasó antes de ser terminado, los materiales utilizados y su procedencia de acuerdo a su historia, y mediante el análisis de los materiales presentes.

1.4 Alcances

En el presente trabajo se plantean los siguientes alcances:

- A. Revisar las fuentes de información referentes a la utilización de métodos geofísicos aplicados a estructuras patrimoniales en el mundo. Resaltando aquellas técnicas que tengan un enfoque no destructivo.
- B. Evaluar en específico el Método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TER) y del Radar de Penetración Terrestre (GPR), así como sus diferentes arreglos de trabajo.
- C. Construir un modelo de roca ígnea de tipo riolítica en el que se puedan aplicar las técnicas de inspección consideradas.
- D. Aplicar pruebas de resistividad, aplicadas a probetas de diferentes materiales, en las cuales se obtendrán como resultado, variables de comparación que caractericen el modelo de estudio.
- E. Realizar mediciones en el modelo de estudio con diferentes variaciones en su relleno, identificando la ubicación de los elementos y sus valores de resistividad y constantes dieléctricas.

- F. Emplear la metodología en el caso de estudio, logrando una comparación efectiva entre las pruebas de laboratorio y el modelo real y los diferentes métodos utilizados.
- G. Caracterizar de acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas el caso de estudio considerando sus etapas constructivas y materiales empleados en cada una.

1.5 Justificación

La geofísica es la ciencia dedicada al estudio de aquellos fenómenos que ocurren en la corteza terrestre, entonces puede establecerse que hace uso de la física y de la geología en conjunto para su desarrollo y aplicación en la inspección de los materiales presentes en el subsuelo (Reyes, Barías, & Pinilla, 2019), por lo que empleando el mismo principio planteado podemos aplicarlo a materiales que se encuentran confinados en edificaciones de mampostería en un sentido vertical y horizontal, sin embargo para llevarlo a cabo en edificaciones de índole patrimonial es necesaria la adecuación efectiva de los métodos convencionales para evitar un deterioro a la construcción.

Llevando este principio, es de vital importancia poner atención en los diferentes materiales en dónde la aplicación de estos métodos, es viable. Elementos de mampostería donde los componentes son principalmente rocas, riolitas, canteras, concretos etc. corresponden a las principales edificaciones en las que se pueden aplicar métodos como los mencionados en el presente trabajo.

La aplicación de métodos de prospección geofísica como el de GPR y de ERT es sumamente común en diferentes edificaciones antiguas y de acuerdo a Andrés Tejero Andrade es una nueva rama que puede denominarse como "arqueogeofísica".

En diferentes sitios arqueológicos alrededor del mundo se han aplicado estos métodos, en México se han llevado de la mano del investigador Tejero Andrade, quien ha realizado estudios en diferentes sitios arqueológicos.

La utilización de la metodología experimental para la inspección de propiedades físicas de diferentes tipos de rellenos posibles en las estructuras con métodos no invasivos, ayuda a identificar con mayor facilidad la composición interna de construcciones semejantes existentes en la zona de estudio tal como lo son puentes, templos, haciendas etcétera; es decir se plantea un método de aplicación generalizado.

El principal reto para la presente investigación, enfocándonos en el caso de estudio, es que el material de relleno a estudiarse se encuentra bajo una calzada, una capa de alta densidad y baja absorción de agua de piedra grasa producto de la fundidora de metales existente en Aguascalientes (Soto Zamora, 2017) por lo que la exploración del sitio debe tener un enfoque no invasivo para evitar la afectación de la estructura estudiada, y con ella obtener resultados efectivos.

Dado que la restauración patrimonial es un tema cada vez con mayor tendencia a investigarse como resultado de la apropiación del entorno a nuestra historia actual, cada día es más necesario que generaciones futuras puedan apreciarla conservada dentro de su contexto.

Es mediante la aplicación de esta metodología que se pretende caracterizar la composición interna de éste tipo de estructuras y así mismo, detectar riesgos potenciales en la misma, que puedan dañarla para que posteriormente, y en conjunto con instituciones dedicadas al mantenimiento de las mismas poder crear un plan de rescate adecuado a las necesidades solicitadas por el monumento en cuestión. Dando así un mejor panorama para la conservación del patrimonio edificado en la región.

No obstante, en la aplicación de los diferentes arreglos existentes se deben de tomar en cuenta diferentes variantes, entre ellas la humedad de los diferentes estratos a analizarse, la temperatura del mismo, el grado de compactación del material existente, la longitud de los elementos analizados, etc. La mayoría de las variantes pueden controlarse bajo las condiciones de

un experimento, sin embargo, es difícil controlarlos en un elemento de un edificio considerado patrimonio.

1.6 Hipótesis

“Al aplicar la combinación de dos métodos de prospección no invasivos en una estructura, se obtienen resultados óptimos que permiten definir las características físicas de los rellenos granulares presentes en la estructura interna de edificaciones patrimoniales, permitiendo de esta forma una caracterización eficiente de los mismos mediante la obtención de la resistividad de cada material existente”

1.7 Narrativa por capítulos

a) Capítulo I Introducción

El contenido dentro del primer capítulo trata la introducción a esta tesis, estableciendo los objetivos generales y particulares planteados, los alcances a los que se pretende llegar con la investigación, seguida de la justificación de la misma, posteriormente se hace mención de la hipótesis que rige la estructura de la tesis finalizando con la descripción de cada capítulo que conforma el documento.

b) Capítulo II Marco Teórico

En el segundo capítulo se presenta la información que sustenta el marco teórico y estado del arte del proyecto de investigación, además de considerar las principales fuentes de información que resulten relevantes y aplicables a los métodos a aplicarse en una estructura patrimonial, por lo que además se abordan las principales características del objeto de estudio su situación actual y algunas de las legislaciones existentes en cuestión del cuidado patrimonial.

c) Capítulo III Metodología de la Investigación

En el presente capítulo se establecen las variables identificadas en el experimento, además del diseño del mismo, la definición de sus etapas, procesamientos, definición de las pruebas piloto y un pequeño análisis de sus resultados, aplicación de los sondeos a utilizar en el modelo experimental, y la definición de las características a considerar en cada etapa de la experimentación, tanto en el modelo como en el objeto de estudio.

d) Capítulo IV Análisis de los Resultados

En este capítulo se presentan todos los resultados obtenidos a partir de la experimentación en el modelo creado, dedica segmentos definidos de cada uno de los métodos aplicados en él, reforzándolo con los diagramas correspondientes a los sondeos con el Radar de Penetración Terrestre y la Tomografía de Resistividad Eléctrica tanto en pseudo-secciones como en un modelo final en 3D a partir del tratamiento de las anteriores. De la misma forma explica los resultados obtenidos en la aplicación del método TER en el objeto de estudio.

e) Capítulo V Conclusiones

Es en este capítulo que se recapitulan los principales resultados de la investigación estableciendo una relación entre los métodos aplicados, reconociendo los nichos de investigación que puedan investigarse posteriormente.



CAPÍTULO

II

MARCO TEÓRICO

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del Arte

2.1.1 Aplicación de prospección eléctrica a edificaciones

Muchos son los autores que han investigado en el campo de la prospección geofísica especialmente orientada al estudio de edificaciones, con la aplicación de diferentes métodos y técnicas, algunos en construcciones patrimoniales y otros tantos en vestigios arqueológicos, sin embargo, todos dan un aporte sumamente importante en el ámbito de la investigación uno de ellos, investigador en el país es Tejero Andrade, quien a lo largo de su trayectoria ha realizado diferentes investigaciones partiendo del uso de la Tomografía de Resistividad Eléctrica en diferentes zonas arqueológicas, como el realizado en el basamento piramidal trunco principal de Pañhú, en donde tras la aplicación de ERT se identificó un material de relleno especial que provoca el deslizamiento del elemento analizado dando pie a medidas para la corrección del espacio y poder garantizar en un futuro a los visitantes de esta zona en Hidalgo. (INAH, 2012), en la siguiente Figura 1 se muestra el sitio arqueológico de Pañhú en Hidalgo y la aplicación del método, mediante un arreglo con electrodos clavados en la superficie del sitio.



FIGURA 1 Aplicación del método ERT en Pañhú y la zona arqueológica en Hidalgo (INAH, 2012)

Una de las importantes variables en la aplicación de métodos planteados en esta investigación es el arreglo debe de usarse para el análisis de la estructura

sugerida, tal como lo indican Tejero-Andrade en su estudio sobre la pirámide de Kukulkán en donde hicieron uso de un arreglo de dos "L" y cuatro esquinas, como los arreglos mostrados en la Figura 2 colocando los electrodos con una separación constante para poder emplear cualquier tipo de modalidad propuesta, desde un arreglo Wenner, Dipolo-Dipolo o cualquier combinación entre ellos. (Tejero-Andrade, y otros, 2017)

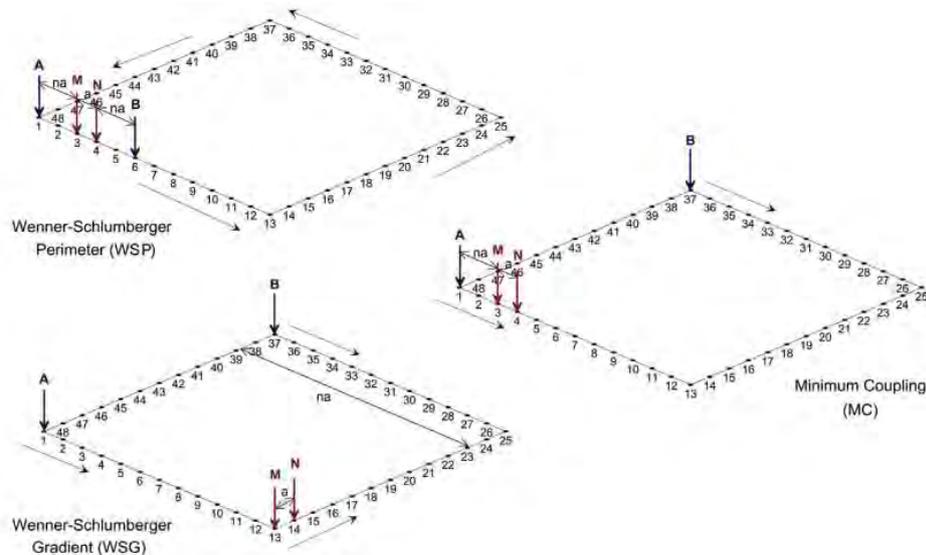


FIGURA 2 Diferentes arreglos para mediciones en el basamento piramidal trunco "El Castillo" (Tejero-Andrade, y otros, 2017)

Además del arreglo a utilizar en cada sondeo, es importante destacar que para no dañar una estructura es necesaria la modificación de los electrodos, que en un primer momento se tratan de varillas de acero que deben clavarse en la superficie a analizar, por lo que diversas han sido las opciones a utilizarse para la adaptación de los mismos y tener resultados adecuados, en la anterior investigación en Chichén Itzá se hizo uso de electrodos modificados para no dañar la superficie del sitio, en este caso se utilizaron electrodos planos en forma de placas en donde al centro de la misma se colocó una solapa útil para la conexión con el cable conector Figura 3 éste tipo de electrodos garantizó una buena superficie de contacto con la pirámide y gracias a ellos

se obtuvo un modelo en 3D que define las etapas en las que está construida la pirámide de Kukulcán.

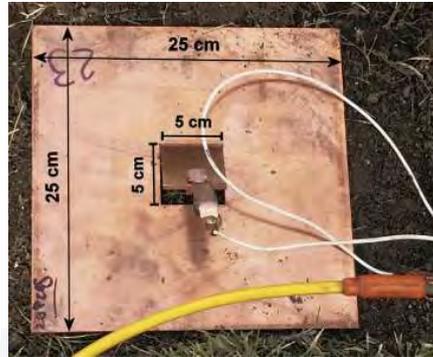


FIGURA 3 Electrodo plano utilizado en sondeos ERT en Chichén Itzá (Tejero-Andrade, y otros, 2017)

Otra adecuación a los electrodos no invasivos interesante es la que nos presenta Tsokas (2013), quien adecuó una serie de electrodos con lodo de bentonita, en sondeos dentro de la mezquita otomana Hamza Bey en Grecia realizando sondeos de GPR y ERT, en este estudio se obtuvo como resultado la ubicación de una discontinuidad atribuida a la presencia de un antiguo piso en la mezquita, confirmado tiempo después por una excavación en el atrio de la mezquita, además de estructuras artificiales bajo el monumento. Existen diferentes estudios donde el uso de placas de acero inoxidable y placas de cobre como electrodos es relevante y exitoso, como el caso del sondeo realizado en Casa di Diana en Italia, un edificio de mampostería donde se utilizó una combinación de ERT con información biológica para detectar afectaciones de humedad ascendente y grietas en pisos y muros dentro del recinto adaptando los electrodos identificando “el mortero interior y el componente exterior de ladrillo a partir de contrastes de resistividad y velocidad” (Cardarelli, De Donno, Oliveti, & Scatigno, 2018)

De la misma forma en que existen los arreglos de TER para la obtención de las pseudo-secciones, existe la TRE-3D que es “una técnica de prospección con fines geotécnicos, arqueológicos y de recursos naturales aplicada en la exploración del subsuelo” (Chávez, Tejero, Cifuentes, Hernández, & Aguilar, 2015) y “determina la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo

determinando que tan bueno es un material para conducir electricidad logrando una interpretación de datos posterior a la inversión matemática" (Cifuentes-Nava, Cabrer-Torres, & Tejero-Andrade, 2017)

2.1.2 Rellenos en edificaciones

La investigación de los diferentes rellenos existentes en una estructura puede arrojaros diferentes condiciones de la construcción como su salud estructural, ya sea en bóvedas, intradós o muros que la compongan, por lo cual es importante su clasificación para de esta forma identificar sus variaciones en el comportamiento estructural y patologías presentes en la estructura (Ramos, 2012) tabla 1.

Tabla 1 Caracterización morfológica de los rellenos. Adaptada de (Ramos, 2012)

Caracterización Morfológica de los rellenos

Tipos	Características
Rígidos o cementados	Ubicado en los arranques de las bóvedas, de diferentes granulometrías, unidos con material ligante.
Granular firme	Tamaños grandes de grano, pero sin ligante que los una. Especie de escollera, relleno de transición entre el rígido y el suelto.
Granular suelto	Arenas o arcillas sin ligante, carente de cohesión interna Situados sobre el relleno rígido hasta las capas de impermeabilización y cubierta de apoyo.
Aligerado	Constituido por vasijas de barro cocidas huecas y tapadas, rellenas con cal y trozos cerámicos, situados entre el relleno rígido y la cubierta de impermeabilización. Ligeros, para evitar cargas innecesarias.
Escombros	Restos no retirados de derrumbes anteriores

Nota: Adaptada de (Ramos, 2012)

Dentro de la prospección geofísica y los sondeos existentes con la Tomografía de Resistividad Eléctrica, se presentan algunos otros estudios que se realizan a la par de la TER, estos son los sondeos con Radar de Penetración Terrestre (GPR), esta técnica nos brinda un panorama más profundo del elemento estudiado como en el presentado en una pared de una torre correspondiente

a la fortaleza Heptapirgón en Salónica Grecia, donde la utilización de GPR ayudó a delinear fracturas y huecos de carácter estructural que no eran posibles determinar con ERT, sin embargo ambos métodos están sumamente correlacionados entre sí. (Angelis, y otros, 2018), además de resultar en imágenes precisas de los niveles de humedad de un sitio afectado, ya demostrado en diversos estudios relacionados como el aplicado por Tokas (Tsokas, y otros, 2015)

2.2 Geofísica y sus métodos de exploración.

Al hablar de geofísica nos referimos a la combinación de diferentes disciplinas que en conjunto permiten describir a gran escala una zona de estudio específica, en cuanto a las características físicas de los estratos que la componen de manera inalterada de manera eficiente y relativamente rápida. (Zainal Abidin, Ahmad, Saad, & Wijeyesekera, 2011). Se puede dividir en dos diferentes ramas, la externa y la interna, en esta última, se abarcan aquellas ciencias que estudian el interior de la tierra, entre ellas la Prospección Geofísica, y es dentro de esta ciencia que se pueden desarrollar diferentes métodos para el estudio del interior de la tierra.

Tales métodos, exploran “los potenciales eléctricos naturales y las propiedades eléctricas intrínsecas de los materiales como son la conductividad, la permeabilidad magnética y la permitividad” (Orellana, 1974) (1982) (Loke M. F., 1997)

De acuerdo a Klarica (2017) la prospección geofísica es útil para la definición de diferentes recursos naturales o artificiales como lo son acuíferos o zonas arqueológicas.

Al momento de elegir un adecuado método geofísico para el sondeo se debe tener en cuenta cuales son las principales características del medio, en específico las estructuras geológicas y sus condiciones “los materiales granulares son más accesibles para su estudio, debido a los procesos de transporte y estratificación” (Alvarez, 2003)

Partiendo del principio de las exploraciones terrestres mediante la prospección geofísica podemos elegir entre una amplia variedad de métodos existentes, como lo son los métodos eléctricos, los cuales consisten en el estudio de las “variaciones de las propiedades eléctricas de las rocas y minerales” (Klarica, 2017)

2.3 Modelos de representación

Para poder entender y representar los resultados obtenidos de los diferentes sondeos y sus medidas se hace uso de los modelos, creando una “estructura teórica”, que dependiendo de la cantidad de datos analizados podemos “afinarlo y mejorarlo”, y se caracteriza por la definición de una escala propia, además de la existencia de diversos modelos que explican cómo es la conducta de los datos. (Klarica, 2017)

En el tratamiento de datos, Sheriff (2001) declara que “la concordancia entre los mismos y un modelo no demuestra el que modelo es correcto, ya que pueden existir numerosos modelos que concuerden con un conjunto de datos dados”

El procesamiento de datos en los modelos parte de una homogeneización que los convierte en comparables entre sí, logrando que sean graficables para su correcta interpretación, ya sea en representaciones unidimensionales llamados perfiles de pozo, cortes o perfiles en 2D, mapas o volúmenes 3D. (Estudiantes de Geofísica , 2009)

2.4 Anomalías

Dentro de la representación de los datos analizados en un sondeo de prospección eléctrica se pueden encontrar aquellos que son diferentes al promedio de los valores paramétricos y teóricos del conjunto total obtenidos en los sondeos, a este conjunto de datos se les llama anomalías, además de que también se puede tratar de elementos existentes en el medio que son ajenos al entorno que los rodea (Klarica, 2017). Representación de anomalía figura 4.

Para identificarse dentro de un modelo puede ser mediante un método directo con la comparación de datos reales contra datos teóricos, o uno de inversión, con el cálculo de los datos teóricos y comparación con los datos reales.

Normalmente dado su procesamiento, las anomalías se ven incorporadas también en los modelos de representación final.

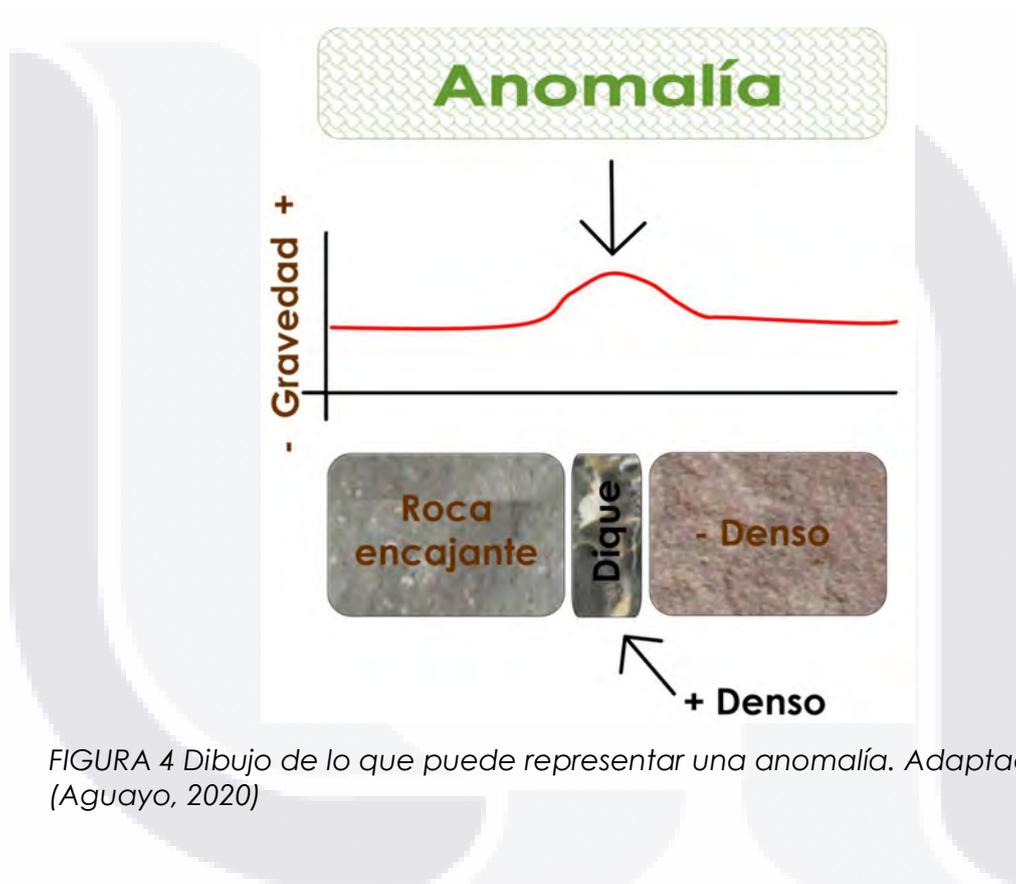


FIGURA 4 Dibujo de lo que puede representar una anomalía. Adaptación de (Aguayo, 2020)

2.5 Métodos electromagnéticos (EM)

Si hablamos de prospección electromagnética, nos referimos a aquellos “métodos encargados del estudio de la estructura del subsuelo a partir de la detección de campos electromagnéticos en superficie y nos dan una idea del comportamiento de la conductividad terrestre en el interior” (Macchioli Grande, 2015)

Basan su funcionamiento en la utilización de un elemento fuente controlador que genera una respuesta tras su aplicación en el subsuelo mediante corrientes electromagnéticas o de campo eléctrico, que son sus dos componentes vectoriales ortogonales. Dentro de sus ventajas se encuentran la facilidad para detectar anomalías o sensibilidad al ruido, así como su versatilidad en la utilización de diferentes frecuencias, además del uso de un sistema de grabación de datos inmediato a la recepción de los mismos, por lo que el análisis de los mismos resulta más práctico y rápido a comparación de otros métodos.

2.5.1 Georradar terrestre de penetración (GPR)

Otro de los métodos de prospección geofísica es el método del Georradar terrestre GPR ("Ground Penetrating Radar"), en él se emplean las "reflexiones electromagnéticas a partir de una antena emisora de pulsos electromagnéticos que son captadas por una antena receptora de señal, en un sistema móvil y ligero de uso muy sencillo" (Gata , 2012)

Básicamente el sistema funciona al momento de deslizar un mecanismo que contiene a la antena por la superficie del suelo y ésta a su paso, irá registrando las mediciones o reflexiones llamadas radargramas en una pantalla que va conectada a la antena, en este proceso, se transmiten "ondas electromagnéticas; una parte de ellas se reflejan al alcanzar el límite entre dos materiales con diferentes propiedades eléctricas" (GEOTEM, 2016) y es así como se detectan las variaciones entre materiales.

Las ondas electromagnéticas emitidas por la antena se encuentran en una banda de frecuencias de 10 a 1000 MHz. Las profundidades de exploración son generalmente cortas que van desde los 0.35 a los 60 m.

Este método tiene como principal ventaja el "detectar los cambios anómalos dentro de diferentes materiales geológicos, identificando sus propiedades dieléctricas, además de elementos en el subsuelo de carácter civil o humano en el subsuelo" (GEOTEM, 2016)

Incrementar la frecuencia de transmisión es fundamental en los radares, ya que se mejora la resolución del radargrama, lo que deriva en la existencia de

variedad de sistemas con diferentes antenas de diferentes frecuencias, y tamaños. En la siguiente tabla 2 podemos ver las diferencias entre frecuencias en equipos y sus principales características de penetración.

Tabla 2

Frecuencias usuales en GPR

Frecuencia de la antena	Profundidad de penetración	Resolución
MHz	metros	Cm
300 a 80	10 a 15	150 a 100
400 a 500	2 a 2.5	200 a 5
1000 a 500	0.5 a 5	0.5 a 5
1000 a 2000	0.5 a 0.10	> 0.5

Nota: Elaboración Propia

Para el uso del georradar existen algunos parámetros de calibración como lo son la constante dieléctrica relativa (ϵ), que “permite calcular la profundidad de una discontinuidad” y la atenuación “representa la reducción de intensidad de la señal transmitida en el subsuelo por unidad de espacio” (Arcaiza, 2012). En la siguiente figura 6 se pueden observar el comportamiento de las ondas electromagnéticas reflejadas al encontrar un material diferente dentro del subsuelo y la trayectoria que tienen en el mismo.



FIGURA 5 Diferentes tipos de antenas utilizadas como GPR. Tomada de (Unit, 2021) y (Geoelec, 2021)

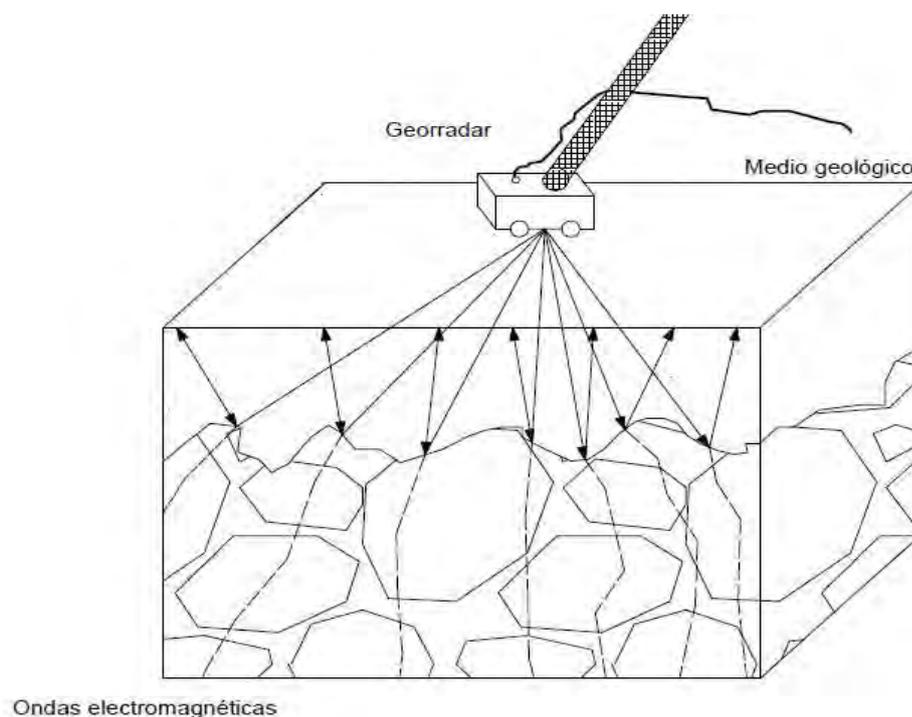


FIGURA 6 Reflexión de ondas electromagnéticas del georradar. Elaboración Propia.

2.5.2 Radargramas

“Las ondas electromagnéticas que son generadas por el georradar son influenciadas por la permitividad dieléctrica relativa y la conductividad de los materiales” (Georradar Discover, 2019)

Un radargrama es la representación gráfica de los pulsos o trazas transmitidos al suelo. “un georradar registra 512 valores de amplitud de onda durante un intervalo de tiempo de algunas decenas de nanosegundos” (Arcaiza, 2012).

Es decir que se genera un conjunto de ondas, que dependiendo de los pulsos registrados en el sondeo tendrán una amplitud, periodo y longitud diferente.

Una desventaja de la utilización del método GPR es la interpretación de datos, ya que al ser un conjunto de ondas es necesario el uso de filtros para poder eliminar ruido existente, el cual es la presencia de frecuencias no deseadas.

Los datos almacenados en el perfil del georradar se compone de dos ejes, el horizontal o X en el que se marca la dirección de movimiento del sistema y el eje vertical Y en el que se registra el tiempo en el que se recaban las señales

de reflexión durante el sondeo "El eje de tiempo se convierte en eje de profundidad tras conocer la velocidad de propagación de ondas electromagnéticas en el medio investigado" (Arcaiza, 2012)

2.5.3 Principio de Funcionamiento

El principal principio del funcionamiento de este método se basa en la velocidad de propagación de las ondas, que, al ser un dato conocido, puede convertirse en profundidades, de este modo, es posible encontrar las diferentes discontinuidades en relación a la superficie de estudio (Prego Martínez, Nieto Matarranz, & Solla Carraceras, 2017)

Dependiendo de la profundidad deseada del sondeo es la capacidad de la antena requerida; aquellas antenas de baja frecuencia (50 a 200 MHz) presenta baja resolución en las imágenes a grandes profundidades (10 a 20 m), en cambio una antena de mediana frecuencia (400 a 600 Mhz) otorga una relación óptima entre los valores de penetración y calidad de la imagen recibida, finalmente para sondear pequeñas profundidades de no más de un metro, existen antenas con frecuencias altas de (800MHz a 2.3 GHz) que son capaces de definir elementos con muy buena definición, dependiendo de sus dimensiones.

2.5.4 Procesamiento de datos (Filtrado)

Una vez obtenida cada traza, se procede a analizar la señal electromagnética recibida, mediante un proceso de eliminación de interferencias también llamado "ruido" mediante una serie de filtrados, que otorgan al producto final, un radargrama, una mejor definición en función del tiempo de medición y el elemento encontrado durante el sondeo. El objetivo en esta etapa es "amplificar partes del espectro electromagnético que pueda aportar información sobre cómo se comporta la onda en su viaje ida/vuelta por el interior del elemento estudiado". Es importante destacar que ante cualquier proceso de filtrado la información original puede eliminarse, quedando modificada dependiendo del orden de la aplicación del filtro o filtros utilizados en su análisis, eliminando ruido o incluso introduciendo

anomalías (Munuera Flores, 2016). Siendo los siguientes más importantes descritos a continuación:

a) Filtro de control de ganancia automática

Este filtro proporciona una variable de salida fija frente a las variaciones de entrada. Son usualmente usados para amplificar las señales recibidas por las antenas, sin embargo, también amplifica el ruido.

b) Filtro de ganancia variable en el tiempo

Es una compensación de señal debida a la pérdida de rango, logrando que los diferentes objetos en el medio produzcan ecos del mismo tamaño independientemente de su alcance. (Munuera Flores, 2016). No es recomendable el uso de este tipo de filtros solos, sino con algún otro que considere la eliminación de ruido.

c) Filtro de Eliminación

Su principal objetivo es el de eliminar señales repetitivas que son provocadas por el propio aparato e impiden la visualización de las reflexiones importantes en los radargramas.

d) Filtro de Pasabandas

Es el filtro encargado de modificar las frecuencias bajas y altas registradas en los sondeos utilizado en conjunto con filtros de eliminación de ruidos y rugosidades existentes en el medio. Básicamente elimina las altas y bajas frecuencias de los sondeos.

2.5.5 Parámetros del medio

Las reflexiones producidas por el par de antenas pueden registrar anomalías que dependen de las propiedades magnéticas de los materiales con las que hacen contacto, tales propiedades son las responsables de marcar las diferencias entre cada estrato ya que cada medio es diferente de acuerdo a ellas.

2.5.6 Conductividad

“Capacidad de un material para permitir el paso de una corriente eléctrica a través del medio” (Significados, 2013) regida por la Ley de Ohm
 Hablando de un medio rocoso la conductividad eléctrica depende básicamente del contenido de agua presente en el medio debido a la disolución de sales y minerales presentes. A mayor cantidad de agua y mayor cantidad de porosidad mayor será la conductividad.

2.5.7 Permitividad dieléctrica

“La permitividad describe la habilidad de un material a almacenar y liberar energía EM en forma de carga eléctrica” (Munuera Flores, 2016)
 Al reducir los valores de la permitividad eléctrica en el medio la velocidad de onda electromagnética generada es mayor, por lo tanto en medios con poco contenido de agua las conductividad del medio disminuye atenuando la energía. (Munuera Flores, 2016)

2.5.8 Permeabilidad magnética

“Es un parámetro que relaciona la inducción magnética con la intensidad de campo magnético” (Munuera Flores, 2016) Normalmente en un medio se establecen valores de permeabilidad cercanos a 1.

2.5.9 Interpretación de radargramas

De acuerdo al medio en donde se realiza el sondeo se puede definir en dos tipos dependido de la forma en la que transmiten las ondas.

a) Transparentes

Presentan poca atenuación de las señales debido a la poca mitigación de la energía.

b) Opacos

En ellos se presentan materiales altamente reflexivos como los metales (conductores).

Para el procesamiento adecuado de los datos en esta investigación se aborda el uso de diferentes filtros en combinación descritos en la siguiente tabla 3

Tabla 3

Combinación de filtros utilizados para representación en GPR.

Filtro	Siglas	Nombre
F1	DC	Removal
	TVG	Time Varying Gain
	AGC	Automatic Gain Control
	RA	Running Average
	BP	Band Pass
F2	TVG	Time Varying Gain
	DC	Removal
	AGC	Automatic Gain Control
	BP	Band Pass
F3	TVG	Time Varying Gain
	DC	Removal
	AGC	Automatic Gain Control
	BP	Band Pass
	RA	Running Average

Nota: Elaboración Propia

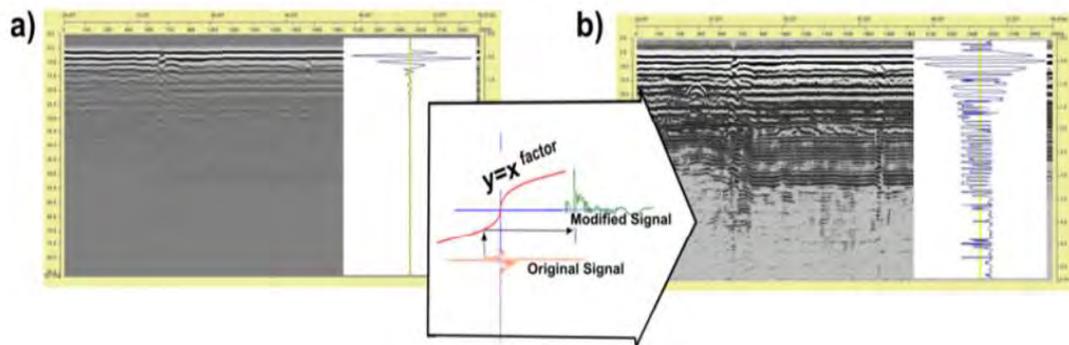


FIGURA 7 Ejemplo de procesamiento de datos con un filtro de ganancia de potencial, a) Antes del procesado. b) Después del procesado de acuerdo a (Prego Martínez, Nieto Matarranz, & Solla Carracelas, 2017)

2.6 Métodos eléctricos

Dentro de los métodos de inspección geofísica encontramos aquellos que basan sus principios en la conductividad de la Tierra y en cómo mediante la utilización de electrodos enterrados en el terreno a cierta distancia, pueden definir el comportamiento del medio como un conductor, y el “comportamiento de la corriente eléctrica al ser inyectada”. Sus principios se basan en las” variaciones de las propiedades eléctricas de rocas y minerales o en general de diferentes materiales, en específico su resistividad eléctrica” (Geología , 2018) (Zamora Martinez, 2011) tales fenómenos se descubrieron por primera vez en 1746 por Watson. (Alvarez, 2003).

“El uso comercial de los métodos eléctricos se debe a Marcel y Conrad Schlumberger en 1913. Durante la Primera Guerra Mundial lo aplicaron en la detección de minas y boyas marinas” (Alvarez, 2003)

2.6.1 Resistividad Eléctrica

Hablando propiamente de la resistividad eléctrica nos referimos a la propiedad inversa de la conductividad eléctrica, medida en ohms por unidad de longitud, generalmente metro ($\Omega\text{-m}$). Cuantifica la oposición del material al flujo de la corriente eléctrica, nos brinda una idea de que tan conductor puede llegar a ser un material. De acuerdo a Loke (2018) “su principal objetivo es determinar los valores de la resistividad del suelo indirectamente mediante su superficie” al obtener valores de resistividad altos nos encontramos con un mal conductor, en cambio, valores bajos de resistividad nos presenta materiales que son buenos conductores.

2.6.2 Factores que modifican los valores de la resistividad

Los valores de resistividad suelen variar dependiendo de diferentes factores geológicos, como por ejemplo el medio en donde es medida, si se trata de rocas suele arrojar valores elevados ya que, dependiendo de la cantidad de poros llenos de agua o minerales de la roca, esta puede actuar como un conductor o semiconductor, disminuyendo la resistividad. Otro de los factores que pueden modificar sus valores es la salinidad del medio, a mayor cantidad

de sales disueltas en el medio la resistividad será menor, la temperatura así mismo al incrementarse reduce los niveles de resistividad por otro lado, al analizar estratos más antiguos pueden obtenerse también valores altos de resistividad, inclusive, la granulometría del medio, modifica la resistividad medida, a mayor tamaño de la partícula mayor resistividad, haciendo una marcada diferencia entre arcillas y gravas. (Loke, 2018)

El estado higrométrico de un estrato puede ser uno de los factores de mayor relevancia al momento de la medición de la resistividad, ya que de esta variable dependen de directamente del "clima, época del año, profundidad y nivel freático". De la mano al contenido de agua se encuentra la temperatura del estrato, el cual a menor gradiente tiende a aumentar los valores resistivos. Finalmente, una variable más es el nivel de compactación del terreno, el cual al aumentarse arroja valores mayores. (Ruelas Gómez, 2011)

Orellana refiere en diferentes estudios diferentes rangos asignados a la resistividad de diferentes materiales, obtenidos a partir de pseudo-secciones de ERT, mostrada en la siguiente figura 8, donde podemos observar los diferentes valores asignados a materiales utilizados para la construcción de diferentes edificaciones en Aguascalientes como lo son las rocas ígneas, calizas, arenas y gravas, oscilando con valores de entre 10^2 a $10^5 \Omega.m$.

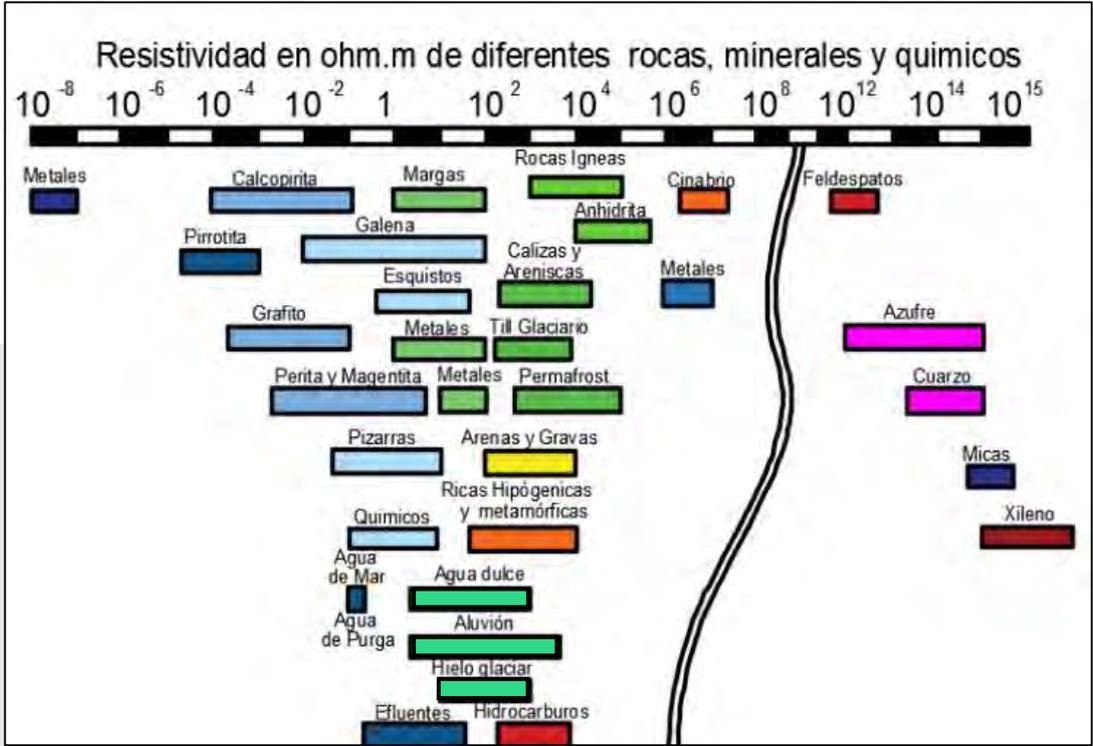


FIGURA 8 Grafica de valores de resistividad de diferentes rocas, minerales y químicos (Orellana, 1982)

Otros valores importantes al momento de considerar rellenos en estructuras de mampostería o elementos constructivos en contacto con estratos de materiales orgánicos son los valores asignados a rellenos sanitarios, con presencia de lixiviados, , de acuerdo a Ahmed y Sulaiman (2001), este tipo de resistividades se mantienen en una resistividad eléctrica media de entre 6.03 Ω .m y 7.16 Ω .m en condiciones saturadas y entre 9.30 Ω .m y 10.57 Ω .m en condiciones no saturadas

2.6.3 Tomografía De Resistividad Eléctrica

Dentro de los métodos más reconocidos dentro de la prospección geofísica es el método de Tomografía de resistividad eléctrica, el cual rige su comportamiento bajo la Ley de Ohm, que dicta: "La corriente de un circuito eléctrico es directamente proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional a la resistencia" (Seippel, 1977)

Básicamente, su procedimiento de aplicación se basa en la inyección de corriente eléctrica continua en un medio homogéneo isótropo, mediante un par de electrodos (A y B), puede definirse una diferencia de potencial captada con ayuda de otro par de electrodos (M y N) colocados a cierta distancia "a" de los primeros e ir variándola en aumento, como lo podemos ver en la figura 9

Como resultado final de la tomografía eléctrica se obtiene un perfil de resistividades aparentes, una representación en 2D- y dependiendo del arreglo definido serán los niveles de profundidad que se alcanzará.

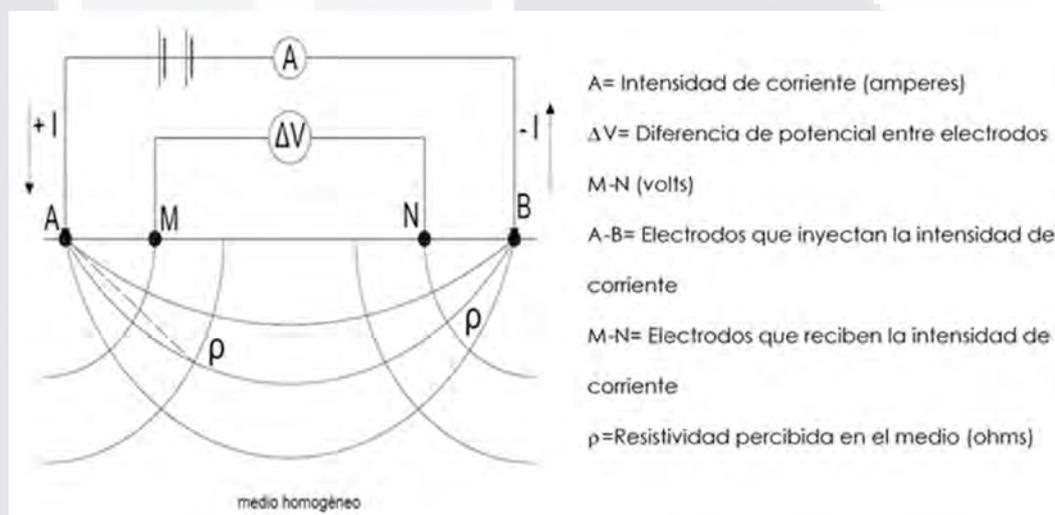


FIGURA 9 Esquema del método resistivo eléctrico. Modificado de (Rodrigo Molina, 2004).

Es mediante el método resistivo que es posible identificar diversos parámetros en los materiales como lo son los niveles de saturación de agua, porosidad de los materiales etcétera. "Para poder definir la distribución resistiva del subsuelo a cierta profundidad, se calcula la resistencia y se multiplica por un factor geométrico del dispositivo tetraelectrónico" (EGYES, 2019).

Como resultado final de la tomografía eléctrica se obtiene un perfil de resistividades aparentes, y dependiendo del arreglo definido serán los niveles de profundidad alcanzados con las mediciones.

Cuando hablamos de resistividad podemos establecer dos diferentes tipos; una resistividad real o específica, una propiedad intrínseca de los materiales,

y se define como el paso de una corriente eléctrica entre los lados opuestos de un cubo de material homogéneo de 1 metro por 1 metro y matemáticamente se expresa con la [ecuación 1] dentro de las particularidades de esta propiedad tenemos que depender de la sección transversal del material y su longitud.

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad [\text{Ec. 1}]$$

ρ = Resistividad eléctrica específica ($\Omega \cdot m$)

R = Resistencia (Ω)

S = sección transversal (m^2)

l = la longitud (m).

Ahora bien, "si tomamos en cuenta que el medio en el cual se registran los datos es un ambiente heterogéneo, y además consideramos un arreglo de 4 electrodos, aplicados con circuitos independientes de corriente y potencial, la resistividad es aparente y únicamente es representativa para un solo punto de la característica del suelo estratificado". (epm, 2008).

De acuerdo con Álvarez Manila (2003) "la profundidad de exploración no depende de la potencia de un equipo o de su sensibilidad; depende básicamente de un fuerte contraste en las propiedades eléctricas." Lo importante en un equipo transmisor son los amperios que se pueden inyectar al terreno y no los kilovatios." (Orellana, 1966)

Aplicando el método en una estructura geológica, podemos establecer que la resistividad eléctrica en rocas puede variar por diferentes factores como lo son la "porosidad, composición química del agua existente en los espacios porosos de la roca y la conductividad de los granos minerales" (Griem-Klee, 2016) como podemos observar en la siguiente tabla 4 la diversidad de la resistividad de acuerdo al tipo de material.

Tabla 4

Valores genéricos de resistividades de algunos materiales.

Tipo de material	Resistividad (Ohm-m)
Tierra vegetal	5-50
Arcillas	10-100
Arcillas -arena-grava	100-1000
Roca	200-10000

Nota: Adaptada de (SPTM CIMEMOR, 2007)

2.6.4 Arreglos entre electrodos

Al aumentar el espacio entre electrodos el número de mediciones disminuye, siendo este método el arreglo que arroja menor número de mediciones por sondeo.

a) Dipolo-Dipolo

Dentro del método de la tomografía eléctrica podemos encontrar diferentes arreglos de electrodos que nos proporcionan diferentes datos sobre la profundidad de exploración, entre los más reconocidos se encuentra la configuración Dipolo-Dipolo en donde se hace uso de dos pares de electrodos A-B y M-N, separados una distancia "a" entre cada par y una distancia "n" entre cada electrodo par. Con este arreglo se logran registrarán un total de 216 mediciones, creando un pseudo perfil de resistividades eléctricas, además de que "es bueno para encontrar estructuras verticales como diques o cavidades...sin embargo es mejor que la cobertura horizontal de datos de Wenner" (Arrubarrena, 2010). Una desventaja que presenta esta configuración es la pérdida de datos conforme se aumenta la profundidad del estrato estudiado.

b) Wenner-Schlumberger

Consiste en una combinación entre el método Wenner y el de Schlumberger y se utiliza con un espacio constante entre electrodos, es altamente sensible a estructuras geológicas verticales y horizontales, se caracteriza por tener una

buena resolución de señal y detecta datos a profundidades considerables, sin embargo "es pobre en la cobertura de sus extremos, por lo que no es recomendable en estudios tridimensionales" (Urbieta, 2009)

c) Wenner

Para contemplar un arreglo con profundidades de estudio moderadas y una muy buena señal, existe la configuración Wenner, desarrollada en 1915 por el Dr. Frank Wenner, siendo una mejor opción, conjuntamente "bueno para encontrar estructuras horizontales pero no para estructuras delgadas verticales" (Arrubarrena, 2010). (Loke, 2018). Mantiene intensidades de señal demasiado fuertes por lo que es útil en áreas con fuerte ruido ambiental, pero es pobre frente a coberturas horizontales dada la separación de los electrodos en su configuración. (Díaz, 2010). Al aumentar el espacio entre electrodos el número de mediciones disminuye, siendo este método el arreglo que arroja menor número de mediciones por sondeo 84 mediciones en total. (Loke, 2018)

d) Schlumberger

En las configuraciones de este tipo se puede acomodar los electrodos en movimiento laterales sin necesidad de mover los de corriente, sin embargo, no pueden existir variaciones muy marcadas en la distancia que las separa, en caso contrario deberá de aumentarse la intensidad de corriente para poder detectar un potencial en la exploración.

e) Polo - polo

Esta modalidad es útil en sondeos pequeños de menos de 10 metros comúnmente usados en arqueología, dada su pobre resolución. Tiene una extensa aplicación horizontal, así como un mayor estudio a profundidad de investigación comparada a otros arreglos". (Díaz, 2010)

f) Polo - Dipolo

Cuenta con buena cobertura horizontal, y resulta útil para "sistemas multi-electrodos de pocos nodos. Si comparamos con la modalidad Wenner y Wenner-Schlumberger tiene una baja intensidad de señal, pero elevada con respecto a un método dipolo-dipolo" (Díaz, 2010)

En la figura 10 podemos apreciar algunos de los principales arreglos más usuales utilizados en la prospección eléctrica.

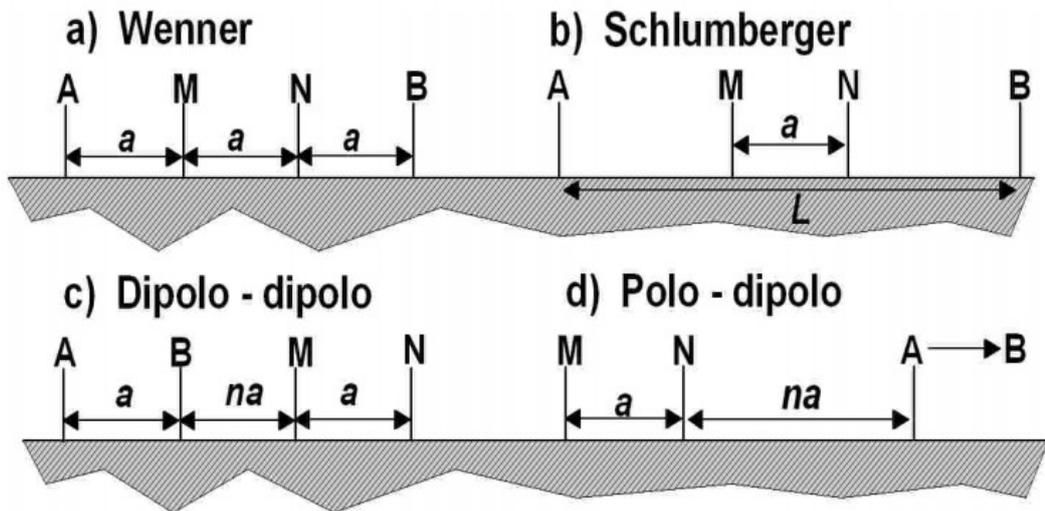


FIGURA 10 Diagrama de los principales arreglos para el método resistivo eléctrico. Obtenido de (Arrubarrena, 2010)

Resumiendo los principios de los arreglos anteriores y retomando los utilizados en la presente investigación, tenemos que el arreglo Wenner es una muy buena opción si el área a analizar se encuentra en una zona con mucho “ruido”, ya que la intensidad de señal que aplica es óptima para estos sondeos, además de contar con una buena resolución vertical, en cambio un arreglo dipolo-dipolo otorga una buena resolución horizontal además de una cobertura de datos siempre y cuando el contacto con la superficie sea adecuado y el resistímetro de alta sensibilidad.

2.6.5 Paleta de colores utilizadas en modelos resistivos

Al momento de la representación de los modelos en 2D es de vital importancia el mostrar correctamente los datos de resistividad, es en ese aspecto donde radica la importancia de la adecuación de una paleta de colores correcta para la escala de datos utilizada. La asociación de diferentes colores con las anomalías que puedan presentarse es clave para la representación gráfica de los modelos presentados, ya que zonas en colores

azules pueden asociarse directamente con zonas húmedas o de filtraciones, a su vez elementos sumamente resistivos pueden tener colores morados, colocados en la parte superior de la escala y representar visualmente una densidad de valor de los datos. Una de las partes más importantes a tomar en cuenta en este aspecto es la secuencia de la paleta de colores con una escala polícroma, con colores similares a los presentes en el arco iris. Principalmente al representar estas variaciones de color se pretende analizar la escala de datos presentada en cada uno de los modelos para de esta forma conjuntarlas y mostrar correctamente los datos presentados conjuntando todos los límites de los modelos 2D analizados.

2.6.6 Error Cuadrático Medio (RMS)

También conocido como Raíz de la Desviación Cuadrática Media por sus siglas en inglés root mean square error (RMSE), es una medida estadística que mide la cantidad de error entre dos series de datos, comparándolos ante ambos, un valor conocido con uno previamente establecido (ArcGeek, 2018). Es un criterio de evaluación ampliamente utilizado al momento de utilizar problemas de regresión.

El cálculo de esta medida conlleva la siguiente [ecuación 2] en un arreglo de regresión lineal, en donde existen datos externos a los planteados en la línea de regresión, definiendo de esta forma un error, calculado de la siguiente forma. (IArtificial.net, 2020)

$$\text{Error cuadrático} = (\text{real} - \text{estimado})^2 \quad [\text{Ec. 2}]$$

2.6.7 Resistencia de contacto

A la resistencia al flujo de corriente de un emisor a hacia una superficie planteada en una conexión eléctrica establecida se le llama resistencia de contacto, y es variable dependiendo que tan efectiva sea la conexión entre el emisor, conectores y superficies estudiadas. (SMC, 2019)

Una alta resistencia de contacto puede llegar a producir pérdidas de datos, y daños al equipo emisor y conectores, incluso quemaduras en los mismos, por

lo que llevar a cabo una detección temprana de las resistencias de contacto es recomendable previo a la realización de sondeos que hacen uso de inyección de corriente. Presentar valores bajos en la resistencia de contacto llega a mejorar la visualización de datos en sus diferentes etapas, una de las mejores formas de garantizarla es la revisión de los circuitos utilizados en las mediciones, especialmente conexiones seguras y fijas entre emisor-electrodos y electrodos-superficie, especialmente en éste último.

De acuerdo a la teoría de circulación de la corriente eléctrica en un conductor, con la utilización de conductores o electrodos, es posible la detección de resistencia óhmica de los cables de conexión desde el emisor a razón de los diferentes arreglos utilizados en sondeos, para eliminar la resistencia de los cables se hacen uso de circuitos conectados entre terminales establecidos en cada arreglo utilizado en esta tesis como lo muestra la figura 10 de este texto.

El contacto entre materiales conductores garantiza el flujo correcto de la corriente eléctrica, sin embargo, ante la presencia de materiales no conductores o semiconductores, este flujo de corriente se ve afectado, por lo que es esencial la aplicación de un electrolito o material puente que lo garantice. Un electrolito de bajo costo y fácil aplicación es la sal, que al ser disuelta en agua se disocia en su catión Na^+ y su anión Cl^- ambos con pequeñas cargas eléctricas que permiten el paso de la corriente a un elemento debido al flujo de las partículas cargadas. "Entre mayor sea el número de iones en disolución, más fácilmente se podrá conducir la corriente eléctrica." (Clickmica, 2021)

La utilización de sustancias como agua para garantizar el flujo de la corriente a través de un elemento es efectiva en ciertas pruebas, mejorando e incluso disminuyendo los valores de la resistencia de contacto entre elementos, ahora aunado a la utilización de un electrolito las condiciones se optimizan.

2.7 Caracterización de materiales

La caracterización de materiales comprende el estudio de propiedades físicas, químicas y estructurales bajo determinadas condiciones... generalmente mediante la perturbación del material por una señal... El estudio de la respuesta del material frente a esta, permite conocer las propiedades del mismo.

(Dalmau, Vega, Vara, & Díez, 2019)

“Toda caracterización implica realizar un análisis del material, sin embargo, no todo análisis implica realizar caracterización” (Skoog & Leary, 1996)

Existen diferentes técnicas de caracterización de los materiales descritas en la siguiente Figura 11 y dependen del enfoque que se le desea dar a la investigación que lo requiera.

De acuerdo a lo anteriormente descrito la presente investigación aborda directamente un tema de caracterización de materiales mediante una técnica analítica instrumental basada en la propiedad de resistividad de los materiales sondeados con TER, así como de la capacidad de reflexión de onda proyectada del material de acuerdo al uso del GRP.



FIGURA 11 Clasificación de la caracterización de materiales Elaboración Propia basada en . (Skoog & Leary, 1996)

2.8 Edificaciones Patrimoniales

Para definir una edificación patrimonial podemos tomar la concepción de la palabra patrimonio de acuerdo a la RAE (2021) como “el conjunto de bienes y derechos adquiridos por cualquier título”, de la misma forma al consultar la definición de patrimonio histórico tenemos que es el “conjunto de bienes de una nación acumulado a lo largo de los siglos que, por su significado artístico, arqueológico etc., son objeto de protección especial por la legislación” (Real Academia Española, 2021), ahora bien, conjugando ambas definiciones y tomando en cuenta la palabra edificación, definida por si sola como “aquello que se construye o infunde” (Real Academia Española, 2021) tenemos la concepción de que una edificación patrimonial es todo aquella construcción que constituye parte de una nación, forjada a lo largo de los años y que por su naturaleza adquiere un significado artístico, cultural o económico, siendo objeto de protección por el estado.

Por otra parte, tenemos la concepción de patrimonio definido por la UNESCO como el “legado cultural que recibimos del pasado, que vivimos en el presente y que transmitiremos a las generaciones futuras, sin limitarlo a monumentos o colecciones de objetos” (UNESCO, 2019), añadiendo esta definición tenemos ahora que además de la adquisición de un significado especial en el entorno de una sociedad, una edificación patrimonial parte de un punto pasado y trasciende a nuevas generaciones, heredando así no sólo una construcción sino un contexto integral de lo que fueron sus inicios, esplendor y que trasciende al futuro.

Una parte importante dentro del concepto de edificación patrimonial anteriormente definido considera a las generaciones futuras como guardianes de la historia plasmada en las construcciones existentes en sus ciudades o localidades, de ahí la importancia de su preservación ya que como lo define Azkarate (2003) todo el conjunto de bienes heredados que derivan en la identidad histórica que otorga valor cultural a una sociedad, que es dinámico y susceptible a modificaciones debe de protegerse y de la

misma manera adaptarse a los cambios propios que la situación actual le demanda y verlo como un “vehículo de integración social”.

Un ejemplo en México puede verse en los diferentes inmuebles catalogados por sí mismos como monumentos, y que han sido preservados a lo largo de los años, teniendo el cuidado de mantener su esencia original y al mismo tiempo adaptar la edificación a los cambios que las sociedades actuales requieren como lo es el Palacio de Bellas Artes que desde 1934 funge como recinto que refleja la cultura e historia del país a través de su multifacético uso como Museo Nacional de Arquitectura, Museo Palacio de Bellas Artes , sala de conciertos y sede de diferentes expresiones artísticas a nivel mundial. (INBAL , 2021) Figura 12.

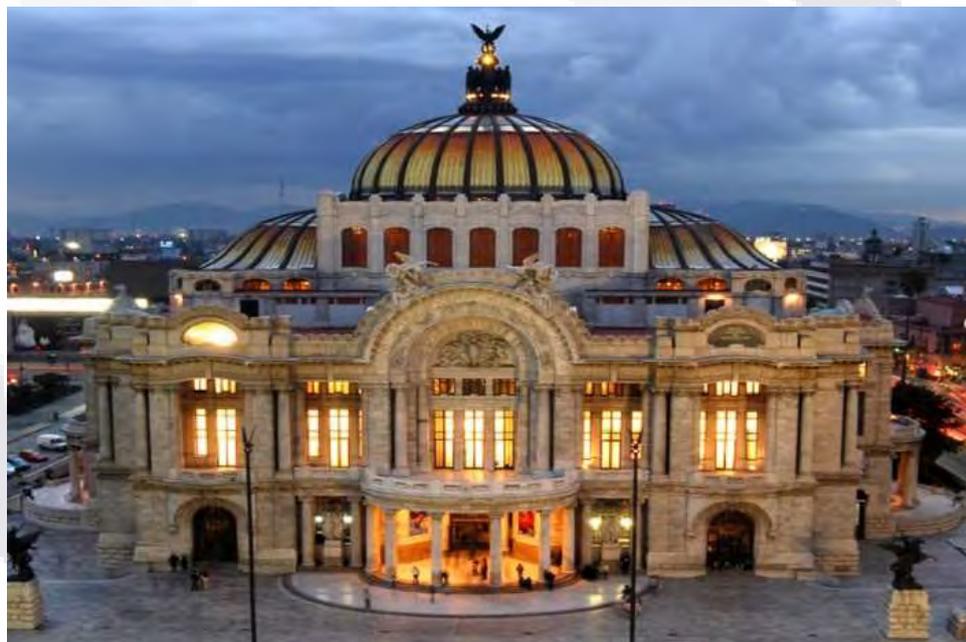


FIGURA 12 Palacio de Bellas Artes, Inmueble considerado Patrimonio Cultural y Edificado en México, Tomada de (INBAL , 2021)

En México al hablar de edificios patrimoniales se hace una división en momentos cronológicos basándose en la historia del país; El Paleontológico, que considera restos de flora y fauna previos a la aparición del hombre, el Arqueológico desde el periodo correspondido a la aparición del hombre

hasta la llegada de los españoles al territorio mexicano, el Histórico que abarca desde la conquista hasta 1900 y finalmente el periodo Artístico desde inicios de 1901 hasta la actualidad, de acuerdo a la (Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas, 2018)

2.9 Legislaciones sobre edificaciones patrimoniales

A lo largo de la historia la concepción de edificaciones patrimoniales ha tomado diferentes matices y definiciones, que dependiendo de las autoridades existentes en el momento social identificado tomaron relevancia para su legislación, por lo tanto, se derivan en variados documentos que atestiguan la presencia de un “Patrimonio Edificado o Patrimonio Construído” como un “elemento integrador de realidades diversas” y de suma importancia para la sociedad, es en 1975 en la Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico (Azkarate, Ruiz de Ael, & Santana, 2003).

En lo que respecta al territorio mexicano y sus legislaciones podemos hablar de la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas, en donde relata en su III capítulo la clasificación del patrimonio en México, además de consideraciones para su preservación, conservación y restauración. (Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas, 2018)

En la siguiente tabla 5 podemos observar algunos de los documentos de carácter internacional que albergan y rescatan el concepto de Edificación Patrimonial como parte importante de las sociedades y su desarrollo frente al paso del tiempo.

Tabla 5

Documentos internacionales en donde se hace mención al Patrimonio Edificado.

Año	Documento	Observación
1931	La carta de Atenas	Definición de "Monumentos artísticos e históricos"
1964	Carta de Venecia	Definición de "Monumentos y conjuntos histórico-artísticos"
1969	Conferencia derivada de Carta de Venecia	Definición de "Patrimonio Cultural Inmobiliario"
1972	UNESCO	Convenio para la protección del Patrimonio mundial Cultural y Natural
1975	Carta de Ámsterdam	Se le da mayor importancia a la restauración integral y la mínima intervención dando enfoque de la función y la reutilización del inmueble
1975	Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico	Definición e inclusión de Patrimonio Construido /Edificado "Build Heritage"
1976	Consejo de Europa	Resolución frente a los requisitos de la conservación del patrimonio arquitectónico.
1985	Convenio de Granada	Enfocado en la protección del patrimonio arquitectónico de Europa
1987	Carta internacional para la Conservación de las Poblaciones y Áreas Urbanas Históricas	Protección contra el deterioro o degradación frente al avance industrial social.
1999	Carta del Patrimonio Vernáculo Construido	"Protección y reivindicación del patrimonio ante la homogeneización de la cultura y la globalización socio-económica"
2000	Carta de Cracovia	Defiende los valores acumulados por el Patrimonio Arquitectónico a través del tiempo.

Nota: Elaboración Propia, adaptado de (Azkarate, Ruiz de Ael, & Santana, 2003)

2.10 Puente de San Ignacio y sus características

Dentro de la mancha urbana de la ciudad de Aguascalientes, se encuentra una construcción que data desde mediados del siglo XVIII, resultado de la necesidad de contener el afluente del Río San Pedro y de la comunicación de la población de la Villa de Aguascalientes con las diferentes haciendas que hoy día forman parte de la ruta del Camino Real de Tierra Adentro, siendo una estructura fundamental para el transporte de la producción generada en las haciendas ganaderas y agrícolas de la época, además de un paso necesario para los servicios eucarísticos de la sociedad sacerdotal de la época. Su nombre se debe a San Ignacio de Loyola, fundador de la compañía de los Jesuitas, quienes fueron parte activa en la colonización a mediados del siglo XVIII.

Diversas fuentes ubican el inicio de la construcción del puente en el año 1731, y su inauguración para 1759 conformado por completo por sus nueve arcos y calzada de piedra bola que comenzaron a escribir la historia de este puente, que a finales de ese mismo año sufrió el embate del Río San Pedro, provocando en años posteriores una serie de diversas restauraciones a cargo de las diferentes autoridades eclesiásticas y de gobierno de la Villa de Aguascalientes utilizando nuevas técnicas de construcción y en diferentes etapas. De acuerdo a (Esparza Jimenez, Reyes Rodriguez, & Rodriguez Herrera, 2020) fue en 1731 cuando se inició la construcción del puente con el principal motivo de mantener la sanidad entre el “ganado ovejuno” y fue apoyada por la autoridad de la época Matías de la Mora Padilla, alcalde mayor. “Para 1743 los trabajos que estaban inconclusos se reanudaron y fue hasta 1755 que se culminó el puente, sin embargo, no tenía pasamanos ni su característico empedrado”



FIGURA 13 Puente de San Ignacio previo a restauraciones 2019. Elaboración propia

Se constituye actualmente de nueve arcos de medio punto y la longitud de su calzada alcanza casi los 85 metros, con un ancho de 3.85 metros, sus tres arcos centrales tienen un claro de aproximadamente cinco metros, mientras que los otros seis arcos laterales son irregulares entre sí, oscilando entre los tres y tres metros y medio de claro. (Basañez Loyola, 2018)

2.10.1 Etapas de construcción

Construcción que data del año de 1743, y que hasta tiempos actuales se ha conservado en un muy buen estado, dadas las condiciones que predominan en él, todavía hasta principios del mes de agosto de 2019. "El puente de San Ignacio es una obra que ha perdurado por más de 200 años. Su edificación comprende por lo menos 4 diferentes etapas". (Soto Zamora, 2017)

a) Primera Etapa

La primera de las etapas constructivas abarca desde la mitad del siglo XVIII, de ella se mantienen cuatro arcos, que son los que actualmente tienen las dimensiones más pequeñas y se encuentran en mayor grado de deterioro, de acuerdo a Soto Zamora, "la construcción de esta etapa se realizó con toba blanquecina con incrustaciones probablemente extraída de la Ex - Hacienda la Canteras". (2017)

Las condiciones actuales de los materiales de esta parte del puente sufrieron un marcado interperismo como resultado de la "alta absorción de agua y la

reactividad con sales que provocan su daño." (Soto Zamora, El puente «San Ignacio»: testigo vivo del auge y caída de la Compañía de Jesús en la nueva España, 2017)

b) Segunda Etapa

Esta etapa se caracteriza por la reconstrucción del puente tras un incidente por la crecida del Rio San Pedro desde finales de la segunda mitad del siglo XVIII conservándose cinco arcos elaborados a partir de toba rosa a púrpura, por lo tanto, se observa claramente el cambio de materiales constructivos.

c) Tercera Etapa

De acuerdo a Soto Zamora (2017) La colocación de nuevos bloques sobre la superficie de rodamiento del puente es el hecho característico de esta etapa, ya que desde inicios del siglo XX a la fecha es el que se conserva, lamentablemente en mal estado debido a la fragilidad de dichos elementos, el material que estaba presente anteriormente en la superficie de rodamiento correspondía a una capa de piedra bola, siendo sustituido por "escoria de la fundición, subproducto de las actividades de refinación de materiales producto de la minería", útil también para otorgarle una pendiente adecuada a la calzada del centro al parapeto de la parte central del puente hacia aguas abajo.

La escoria caliente, se vertía en moldes y al enfriarse se convierte en un sólido muy denso y frágil.

d) Cuarta Etapa

La última etapa considerada consiste en la adaptación de la obra a una ciudad ya en constante crecimiento y la introducción de nuevas técnicas de construcción como el concreto armado aplicado en los parapetos del puente. (Soto Zamora, 2017)

De acuerdo a registros se menciona que la longitud del puente corresponde a los 80 metros aproximadamente y actualmente es "considerado como monumento histórico" por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) (Hermosillo H. , 2017)

2.10.2 Restauración del Puente de San Ignacio

A mediados del año 2020 gracias a la construcción de un puente alternativo al Puente de San Ignacio, comenzaron a registrarse pequeñas restauraciones por parte del gobierno del estado y el INAH en el mismo con el propósito de conservar su valor patrimonial y reservarlo como paso peatonal y para paso de bicicletas exclusivamente. (El Universal, 2020)

Para poder iniciar el proceso de restauración, la estructura se sometió a diferentes estudios dedicados al análisis de su salud estructural, y su situación actual para poder lograr una intervención exitosa que mezcle adecuadamente el pasado del antiguo puente con la actualidad de la ciudad.

En palabras del Arquitecto Jorge Guadalupe Villanueva Clavel uno de los principales encargados en la obra de restauración el proceso para la restauración partió de la "ubicación de vestigios de aplanados originales del puente, con el principal objetivo de "preservar y consolidarlos", además de

La aplicación de nuevos aplanados con la utilización de "cal apagada con acabado bruñido" en la zona de los tajamares que son las zonas donde se presentan los mayores niveles de "pilumeitino grueso a distintas alturas del monumento".

El proceso de restauración se siguió "implementando un sistema tradicional y ancestral de aplanados a través de apagar la cal en sitio y agregar un aglutinante (baba de nopal) y arena cernida", en la parte de la calzada del puente se optó por excavar hasta llegar al nivel de "rodamiento original de piedra bola" considerando "eliminar la sección central y rescatar el nivel original de la altura real del parapeto" (elementos de protección para una persona montada a caballo) y en los extremos de la calzada "respetar y complementar el piso colocado en el siglo XX (baldosas negras) con lo que se respetan las etapas del rodamiento"



FIGURA 14 Inicio de la restauración del puente de San Ignacio. Diciembre 2020. Elaboración propia.



FIGURA 15 Visita de obra al Puente de San Ignacio donde se muestran parte de las obras hidráulicas alternas. Elaboración Propia.

A lo largo de los meses se han concentrado en la restauración principalmente de su aplanado, abordando su mantenimiento con obras hidráulicas alternas al mismo, y el tratamiento de sus intradós, pilares y tajamares con una mezcla de cal apagada como pasta flexible, piedra alumbre como impermeabilizante y mucílago de baba de nopal como aglutinante, que de acuerdo con el Arquitecto José Luis García Ruvalcaba encargado de la obra

y el representante del INAH en Aguascalientes Jorge Guadalupe Villanueva Clavel son adecuados para la transpiración de la estructura, evitando erosión de sus elementos y retrasando el crecimiento de hongos y flora nociva dado que se encuentra en el cauce del río. (2020), así como también ayudarlo a combatir cambios por la humedad y la intemperie con un revestimiento que se asemeja al original desde su construcción.

Una parte importante de la restauración es la colocación de baldosas producto de la fundición en un arreglo horizontal, que garantice el acomodo estético de la calzada, dando un bombeo adecuado al drenaje de la calzada.



FIGURA 16 Tratamiento de cal y mucílago de nopal para recubrimientos. (García, 2021)

Como parte de la restauración de la calzada del puente se tiene el retiro de la primera capa que se mantenía, conformada de piedra producto de la fundición, con el objetivo de colocar gárgolas de desagüe en la parte aguas abajo del puente quedando la calzada original de piedra bola, esto de acuerdo a registros del mes de enero del 2021, el espesor de esta capa de material profundizaba alrededor de 17 centímetros.



FIGURA 17 Retiro de la primera capa de bloques de fundición a los costados de la calzada. (Villanueva Clavel, 2020)

Finalmente, el rescate al espacio correspondiente a esta estructura proyecta crear un lugar adecuado para el esparcimiento familiar de la población de Aguascalientes.



FIGURA 18 Restauración del puente de San Ignacio. Marzo 2021. (García, 2021)



CAPÍTULO

III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Metodología del Estudio

De acuerdo a las características planteadas en este trabajo, se establece lograr una investigación de carácter correlacional, debido a que se obtendrán datos que se someterán a una comparación constante entre resistividades y constantes dieléctricas de los diferentes materiales de relleno, explicado por las diferentes pruebas de prospección aplicadas al modelo de control y su relación con los diferentes rellenos a utilizar en él.

Las principales variables que se consideran en esta investigación son las siguientes:

- a) Tipo de relleno granular; arenas, tepetates y gravas.
- b) Elementos de contraste; madera, poli cloruro de vinilo (PVC), placas de metal.
- c) Materiales de construcción; Rocas ígneas de tipo riolítico, mortero de albañilería, acero.
- d) Metodología de exploración; tomografía de resistividad eléctrica y radar de penetración terrestre.
- e) Condiciones de medición, estado saturado y seco.

Se consideraron múltiples etapas para la elaboración de este proyecto de acuerdo a su metodología, consideradas a continuación:

- I. Revisión del estado del arte, para la identificación oportuna de tópicos referentes a la geofísica aplicada a modelos estructurales, ahondando en el método eléctrico y el georradar.
- II. Definición del marco teórico perteneciente al conocimiento existente sobre el método eléctrico y georradar con enfoques no destructivos en estructuras.
- III. Construcción de un modelo de mampostería a base de roca ígnea de tipo riolítica.

- IV. Materiales específicos para su elaboración, en este caso se consideró una piedra de tipo riolítico lo más similar posible al material con los que se construyeron diversas estructuras consideradas patrimoniales presentes en el estado.
- V. Dimensiones específicas para el análisis de acuerdo a los sondeos que se pueden realizar en el modelo.
- VI. Diferenciación de los diferentes arreglos entre electrodos, por lo que se requieren medidas especiales para su aplicación. Como principal característica se establecerá la presencia de una cavidad interior.
- VII. Obtención de diferentes sondeos con el material de relleno en diferentes estados de saturación.
- VIII. Elaboración de una base de datos comparativa y concluyente con los resultados obtenidos.
- IX. Experimentación en el objeto de estudio en el cual se realizarán la misma serie de experimentos que derivarán en la definición de los materiales existentes en la estructura interna bajo la calzada del puente de San Ignacio.



FIGURA 19 Rellenos granulares y de contraste considerados variables en el modelo. Elaboración Propia.

3.2 Definición de variables

En el experimento planteado intervienen diferentes variables que pueden modificar los resultados finales, desde la creación del modelo experimental hasta los elementos de contraste que se le pueden introducir al muro. A continuación, se explica en las siguientes tablas 6 y 7 las diferentes variables que intervienen en la investigación y como pueden llegar a influir en la misma.

Tabla 6

Definición de Variables en el experimento

Rellenos granulares	Características	Aporte al experimento
*Arena	Material natural y/o mineral no consolidado, producto de la fragmentación de las rocas que varían desde 1/16 a 2 mm en tamaño. Resistividades 50-500 Ω . M	Uno de los principales materiales presentes en rellenos de estructuras patrimoniales, además de ocuparse en la construcción desde tiempos antiguos.
*Tepetate	Material granular con alto contenido de arcillas, con tendencia a la consolidación	Relleno ampliamente usado en la construcción debido a sus características de consolidación bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad.
*Grava	Material granular de mayor tamaño a las arenas con resistividades mayores a las de la arena debido al tamaño de su partícula del orden de los 300 a 500 Ω . M	Otro de los rellenos comunes en edificaciones patrimoniales, existentes tanto en los rellenos como en la construcción de la estructura.
Elementos de contraste	Características	Aporte al experimento
*Policloruro de vinilo (PVC)	Plástico impermeable aislante con bajos valores de resistividad (10^{17} Ω . Cm)	Representa el espacio vacío, muchas veces existente en edificaciones debido a la descomposición de la materia. O a una tubería existente en uso.
*Madera	Elemento de origen orgánico y natural compuesto principalmente de fibras de celulosa	Debido a su origen natural, contiene carbono en un 50%, elemento semiconductor y de resistividades de 3.5×10^{-5} Ω . m en condiciones puras.

*Placas de acero	Aleación de hierro y carbono, considerado conductor con una resistividad del orden de $20 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	Representa elementos de este tipo presentes en las estructuras. Arroja altos valores de festividad en los modelos, especialmente a altas temperaturas.
------------------	--	--

Materiales de construcción	Características	Aporte al experimento
*Roca ígnea de tipo riolítica	Roca de origen volcánico (extrusiva), con alto contenido de cuarzos, biotitas y feldespatos, de textura afanítica con resistividades desde los 10^3 a $10^5 \Omega \cdot m$	Material sumamente común en la construcción de edificaciones, debido al costo y accesibilidad.
*Concreto	Material compuesto de cemento gravas, arena y agua con resistividades variantes dependiendo de la humedad presente, en estado seco $10^4 \Omega \cdot m$	Material que se utilizó en algunas construcciones antiguas, pero que hoy día nos da una idea de los valores de resistividad que pueden obtenerse en estructuras actuales.
*Mortero	Combinación de aglomerante y agregados finos, útil para lograr la unión de elementos de mampostería, dependiendo del aglutinante utilizado puede variar sus valores de resistividad.	Útil para la unión de las riolitas de mamposteo y el enrase de la superficie del murete
*Castillos de acero (armex)	Refuerzo utilizado en estructuras en un orden de 4 varillas unidas por estribos intermedios	Utilizado como refuerzo en el modelo para poder contener los rellenos a utilizar.

Condición	Características	Aporte al experimento
*Seca	Estado nulo de presencia de agua	Condición que modifica los valores de resistividad en los materiales, especialmente en los rellenos granulares y de contraste

*Húmeda	Estado definido por la abundante presencia de agua.	Condición que modifica los valores de resistividad en los rellenos granulares y de contraste, especialmente aquellos porosos, en los que sus poros se llenan de agua.
Tipo de Sondeo	Características	Aporte al experimento
*Tomografía de resistividad eléctrica (TER)	Método no destructivo que inyecta corriente al material y se genera un voltaje de regreso	Definición de materiales existentes dependiendo sus valores de resistividad y profundidad
-Dipolo-Dipolo	Modalidad efectiva para definir las estructuras horizontales (estratos)	
-Wenner	Modalidad efectivo para detectar los cambios verticales	
*Radar de Penetración Terrestre	Método no destructivo que hace uso de una antena capaz de detectar las reflexiones electromagnéticas en un medio	Define los materiales existentes dependiendo del tipo de respuesta y la fuerza de las señales emitidas a cada material presente. Muy útil en la definición de suelos con arenas y gravas.

Nota: Elaboración Propia

3.3 Diseño del experimento

Para poder definir la idea total del experimento se ha dividido en diferentes etapas, y consta de siete diferentes para su consolidación descritas en la siguiente lista, en donde se incluyen los principales puntos a considerar y pensadas en cubrir los objetivos planteados al inicio de la investigación, además de mostrarse un diagrama en la figura 20 de las principales actividades planteadas en la metodología y sus principales características para su elaboración, a lo largo del capítulo se explican a detalle cada una de las mismas etapas más a fondo, describiendo materiales técnicas y normas aplicables en cada una:

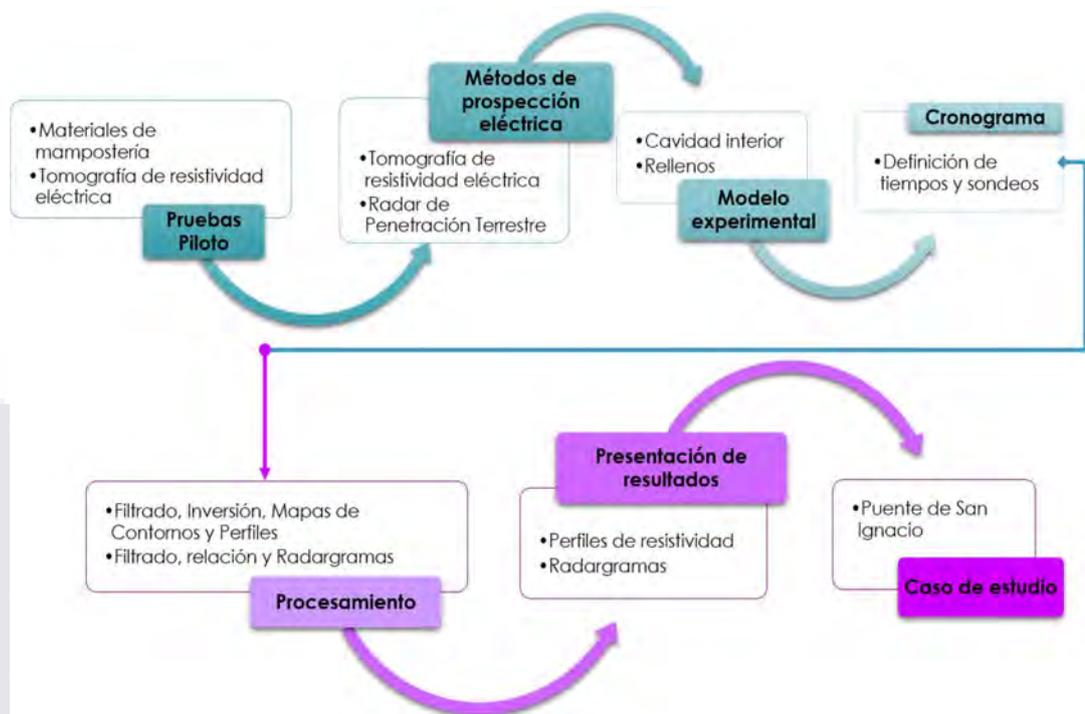


FIGURA 20 Diagrama de metodología planteada. Elaboración propia

- i. Realización de pruebas piloto para obtener datos preliminares para la conformación de tablas de datos comparativas de diferentes materiales analizados con resistividad.
- ii. Definición de los métodos de prospección eléctrica a utilizarse, estableciendo arreglos, y localización de los sondeos en el modelo.
- iii. Preparación del modelo experimental para la aplicación de los estudios correspondientes, contemplando los tipos de rellenos y elementos contrastantes.
- iv. Aplicación de los estudios geofísicos seleccionados en el modelo de acuerdo a los cronogramas establecidos
- v. Obtención y procesamiento de datos y presentación de los mismos.
- vi. Presentación de resultados finales.
- vii. Aplicación de la metodología anterior en el caso de estudio.

3.3.1 Etapa 1

La primera etapa es la aplicación de pruebas piloto en diferentes materiales que conformarán un catálogo de resistividades base, utilizando el método de tomografía de resistividad eléctrica. Se obtienen algunas probetas de materiales de la región, en especial muestras de materiales típicos de la construcción de mamposterías de edificaciones como puentes, iglesias y caminos y basándonos en la norma mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2018 se someten las probetas al procedimiento descrito más adelante.

3.3.2 Etapa 2

a) Sondeos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

La serie de experimentos con este método se realiza con un equipo de resistivímetro marca Syscal R1 Plus de 24 electrodos y dos canales, con un voltaje de hasta 600 volts, un juego de cables con conexión a 24 electrodos, (12 en cada cable), un juego de electrodos modificados para evitar dañar la estructura y juego de varillas para la aplicación del método en zonas de difícil acceso. Figura 21.

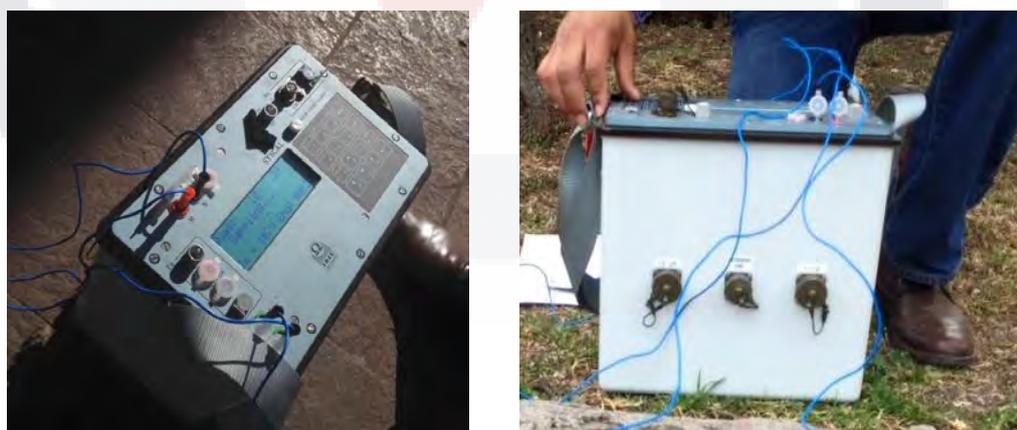


FIGURA 21 Resistivímetro aplicado en las pruebas de todo el experimento. Elaboración Propia

La aplicación consiste en dos diferentes arreglos principalmente, el Dipolo-Dipolo y Wenner y la separación entre electrodos es de 10 centímetros entre cada uno.

Finalizando los sondeos se plantea una medición con un mallado más cerrado para obtener un modelo en 3D del muro haciendo uso de el mejor de los métodos aplicados en la metodología.

b) Sondeos con el Radar de Penetración Terrestre GPR

Para la aplicación del radar de penetración terrestre se hace uso de una antena de 1600 Hz con una profundización de 1.19 m y una antena de 1200 Hz con una profundización de 0.52 m, mediante un equipo de sondeo Georradar GPR marca MALA Ground Explorer. Figura 22.

Debido a la naturaleza de este sondeo se aplica únicamente el modelo experimental en todas sus caras definiendo la antena dependiendo de las profundidades del muro aplicadas.



FIGURA 22 Antena de GPR y pantalla del equipo utilizado Elaboración Propia

3.3.3 Etapa 3

La tercera etapa del experimento toma en cuenta la construcción de un modelo experimental de mampostería de roca ígnea de tipo riolítico, dicho modelo se construye con materiales de la región y con las medidas adaptadas para la eficiente aplicación de los métodos de exploración

geofísica de resistividad y de georradar. La particularidad del diseño de este modelo como se puede ver en la figura 23 es la cavidad interna del mismo que permitirá la introducción e intercambio de rellenos granulares y de contraste definidos en la tabla 1 de variables.

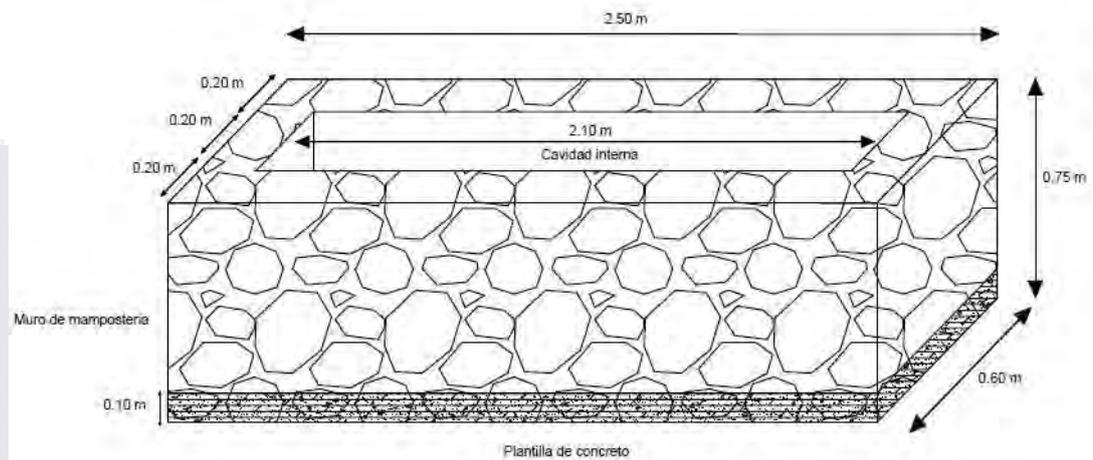


FIGURA 23 Diseño del modelo experimental. Elaboración Propia

3.3.4 Etapa 4

Como parte de la aplicación de los métodos se planteó una calendarización para el orden de aplicación de los sondeos, se dividen en pruebas de ERT y en pruebas de GPR con el principal motivo de tener una planeación en las pruebas. Cada prueba de ERT se conforma de dos sondeos, en cambio la prueba de GPR es más rápida en su realización. Para llevar un orden en la realización de cada sondeo se considera un formato especial mostrando un ejemplo en la siguiente figura 24 el formato es actualizado en cada sondeo dependiendo del material y equipo a utilizar.

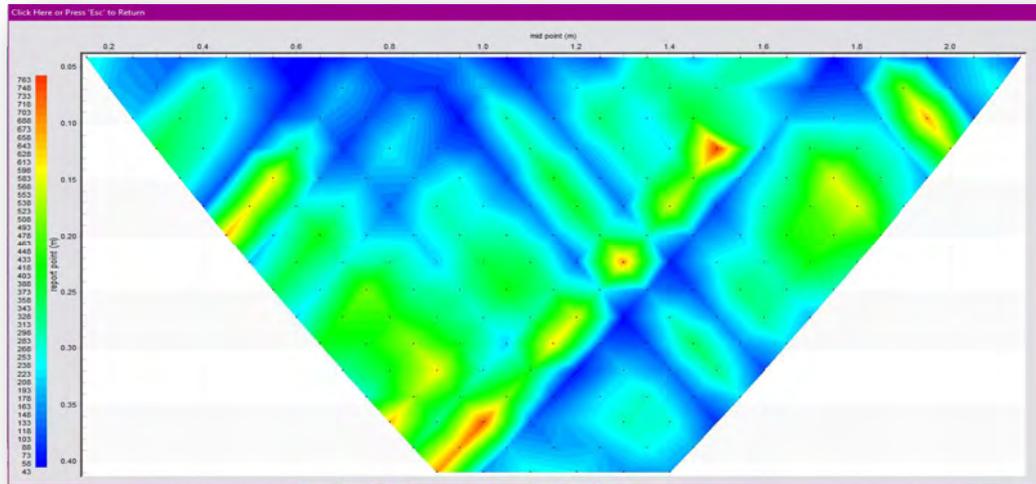
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES					
SEMANA DEL 17 AL 21 DE FEBRERO DE 2020					
HORARIO	LUGAR :				
	Laboratorio de materiales (34)				
	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES	VIERNES
1:00-2:00	x	x	x		2.-
2:00-3:00	x	x	x	1.-Medición Wenner	2 Procesamiento de datos medición 2
3:00-3:30	x	x	x		
Descripción de las actividades					
1	Se llevará a cabo la medición con la modalidad Wenner en el muro relleno con tepetate, el tubo de PVC y la tabla de madera. De ser posible se realizarán ambas caras del muro, en caso contrario se programará para la siguiente sesión de trabajo.				
Recursos:	Se ocupará el equipo de resistividad y el conjunto de electrodos modificados para llevar a cabo la medición. Equipo de protección para el trabajo en campo (Gorra y bloqueador solar)				
2	Posterior a la medición Wenner se procesarán los datos para la obtención e interpretación de perfiles de resistividad en este caso será de la medición última que se realizó.				
Recursos:	Programas (Prosys II, Res2d, ZondRes2D, Surfer) instalados y listos para ejecutar Computadora				

FIGURA 24 Formato de cronogramas para realización de sondeos
Elaboración propia

3.3.5 Etapa 5

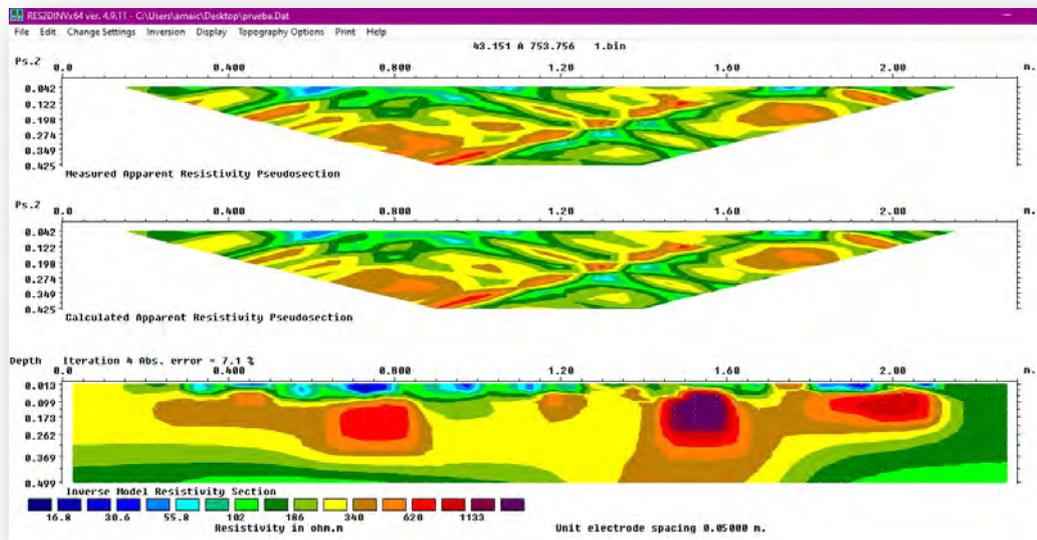
En cuanto a la obtención de datos y su procesamiento correspondiente, cabe resaltar que tras cada uno de los sondeos se realiza un pre-procesamiento de datos, garantizando que se obtienen buenos resultados y en caso de no presentarse una buena medición, repetirla para evitar errores en la presentación de datos.

Para el procesamiento de datos procedentes de los sondeos de tomografía de resistividad eléctrica se hace uso de diferentes softwares, llevando a cabo los siguientes procesos mostrados en los siguientes diagramas (figura 25 A-D)



A) Filtrado de resistividades aparentes:

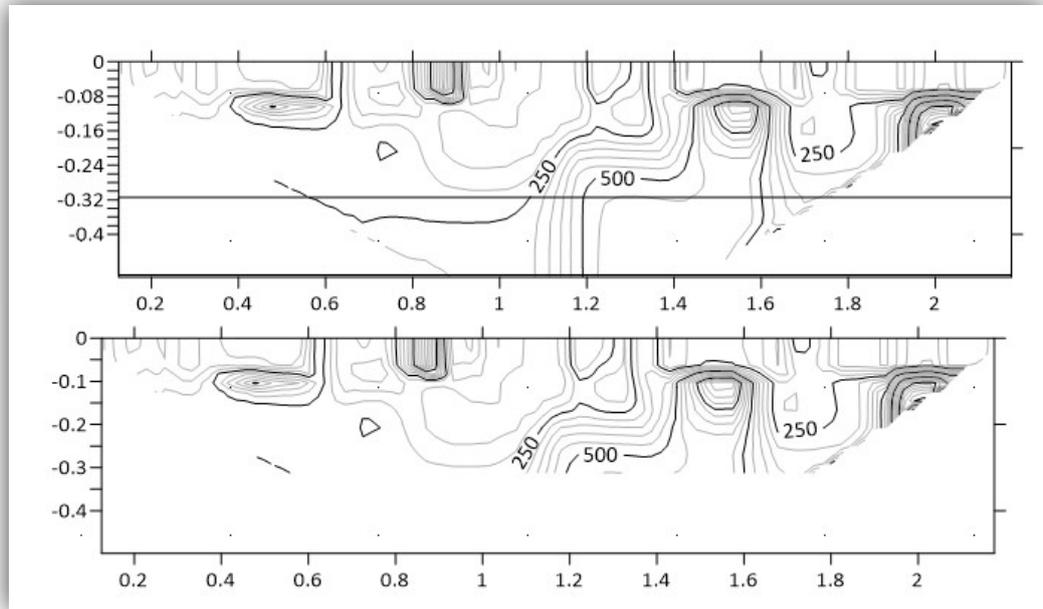
Tratamiento inicial de datos y distribución de datos en la nube de puntos, identificando valores negativos y valores ceros.



B) Inversión de datos

Inversión de datos con el método Gauss-Newton que produce un modelo en 2D (pseudo-sección) a partir de resistividad eléctrica en un proceso continuo.

- Identificación de RMSE de acuerdo a porcentajes de error menores al 10%.



C) Mapas de contornos

Creación de mapas de contornos identificando zonas de resistividades de diferentes valores, en un primer momento se deben de evaluar los rangos resistivos más representativos para las pseudo-secciones seleccionadas. A partir de este punto se aplican las paletas de colores adecuadas a los rangos de resistividad.

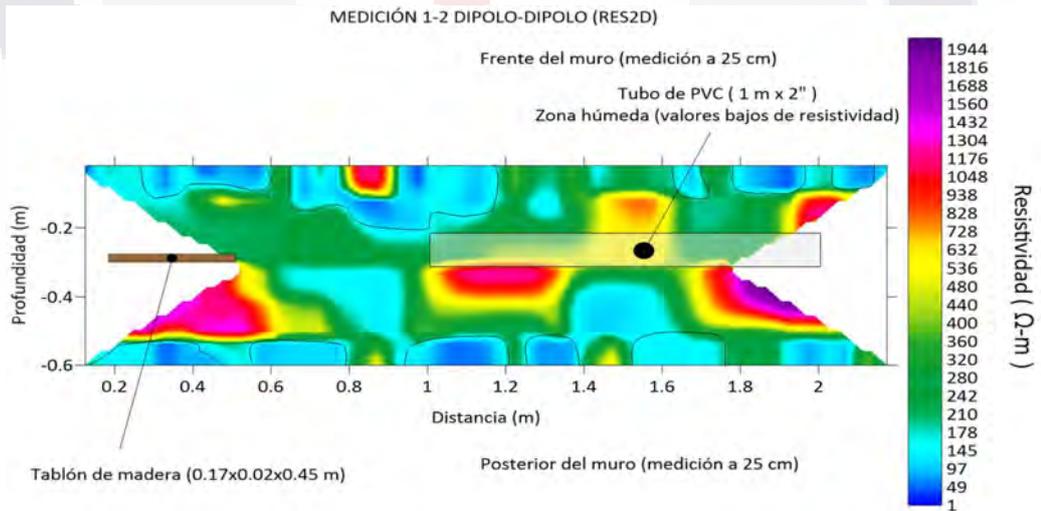


FIGURA 25 Diagrama de proceso de obtención de pseudo perfiles de ERT parte A-D. Elaboración Propia

D) Pseudo-secciones con identificación.

Definición de perfiles de resistividades aparentes con una paleta de colores adecuada, abarcando todos los valores mostrados en todos los diferentes sondeos, identificando oquedades, tipos de materiales, y humedades dentro de cada modelo, así como los elementos representativos.

En cambio, en el procesamiento de los datos del Radar de penetración terrestre el procesamiento de los datos corresponde a una interpretación visual de ondas, que son las transmitidas por la antena y la aplicación de una serie de filtros encargados de la eliminación de ruidos y énfasis de las ondas generadas en el sondeo.

3.3.6 Etapa 6

EL proceso de esta etapa es el más elaborado de todas las planteadas anteriormente dado que es en ella en donde se hacen las comparaciones necesarias entre cada método aplicado y sus arreglos correspondientes, así como su análisis y presentación.

Cabe resaltar que en cada etapa es importante la obtención de los resultados preliminares mediante el procesamiento de datos de cada estudio aplicado, tanto a probetas, modelos experimentales u objetos de estudio.

3.3.7 Etapa 7

Continuando con la séptima y última etapa del experimento se toma en cuenta la aplicación de los sondeos en diferentes puntos del objeto de estudio, en este caso, el Puente de San Ignacio, figura 26, especialmente sobre la calzada del mismo, espacio indicado para la aplicación del método debido a la cercanía de la superficie con los rellenos presentes bajo la calzada, en un arreglo longitudinal y paralelo a los parapetos del puente en los extremos.

Para finalizar la fase experimental se concluye con la demostración de los modelos obtenidos mediante la presentación de datos en la arquitectura de la estructura y relacionándolos mutuamente.



FIGURA 26 Puente de San Ignacio, caso de estudio. Elaboración Propia

3.4 Pruebas Piloto

La prueba piloto planteada para esta investigación se basa en una prueba básica de resistividad en un elemento aislado, basada en la Norma Mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2018, en la que se establece la obtención mediante el método directo de la resistividad real y aparente de un espécimen, que para efecto del proyecto se consideraron probetas de materiales pétreos y canteras, además de cilindros de concreto y mortero. Las características a considerar en las probetas fueron dimensiones similares para tener una uniformidad de las mismas. Como se ve en la siguiente tabla 8.

Tabla 7

Dimensiones de probetas para resistividad

DESCRIPCIÓN	ESTADO NORMAL				ESTADO SATURADO			
	LADO (M)	LADO (M)	AREA (M2)	LONGITUD (M)	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)
Cantera amarilla	0.06656	0.06785	0.0045	0.0679	11,401.11	758.86	6519.17	433.92
Cantera porosa	0.06656	0.06785	0.0045	0.0679	60,401.43	4,020.32	7083.85	471.50
Escoria	0.06656	0.06785	0.0045	0.0679	69,265.83	4,610.33	32945.00	2192.82
Piedra riolita 1	0.06656	0.06785	0.0045	0.0679	13,352.00	888.71	5690.00	378.73
Piedra riolita 2	0.06656	0.06785	0.0045	0.0679	13,252.00	882.05	7784.80	518.16
Piedra riolita 3	0.06656	0.06785	0.0045	0.0679	52,228.00	3,476.30	19854.00	1321.48
PRISMAS CUADRANGULARES								
DESCRIPCIÓN	ESTADO NORMAL				ESTADO SATURADO			
	ANCHO 1 (M)	ANCHO 2 (M)	AREA (M2)	LONGITUD (M)	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)
Cantera y mortero de cal	0.10023	0.10039	0.0101	0.2000	25855.91	1,300.82		
Bloques Cantera y mortero de cal	0.10096	0.10111	0.0102	0.2000	269223.18	13,741.24		
Piedra porosa	0.07134	0.07132	0.0051	0.0227	40988.67	9,183.14	6674.55	1495.37
CILINDROS								
DESCRIPCIÓN	ESTADO NORMAL				ESTADO SATURADO			
	ALTO (M)	DIÁMETRO (M)	AREA TOTAL(M2)	LONGITUD (M)	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)
Concreto Impermeable	0.2000	0.10019	0.00788386	0.2000	38099.41	1,501.85	25379.09	1000.43
Mortero de Albañilería	0.1980	0.09939	0.00775846	0.1980	913966.79	35,812.98		
Mortero de Cal	0.1828	0.09357	0.00687643	0.1828	-	-		
Concreto pilares 1	0.2001	0.09927	0.00773973	0.2001	27326.00	1,056.95	10773.33	416.71
Concreto pilares 2	0.1520	0.07506	0.00442494	0.1520	19365.33	563.75	7514.00	218.74
Mortero 1	0.1986	0.07506	0.00442494	0.1986	20225.33	450.63	8869.60	197.62
Mortero 2	0.1483	0.07468	0.00438025	0.1483	14245.33	420.76	8500.87	251.08

Nota: Elaboración propia.

El ensayo se practicó con los materiales en dos diferentes estados, estado saturado, después de 24 horas de saturación y en estado seco tras un proceso de sacado en horno eléctrico por 24 horas. Partiendo de esta premisa y de la mano con la norma, definimos que la resistividad eléctrica aparente hace referencia a la obtenida en condiciones no saturadas, por su parte la resistividad eléctrica real es aquella medida sobre un elemento saturado con agua.

Para la obtención de la resistividad real y aparente de cada probeta se tomó en cuenta la geometría de cada una y se aplicó la corriente eléctrica a la misma, procedimiento que se muestran en la siguiente figura 27

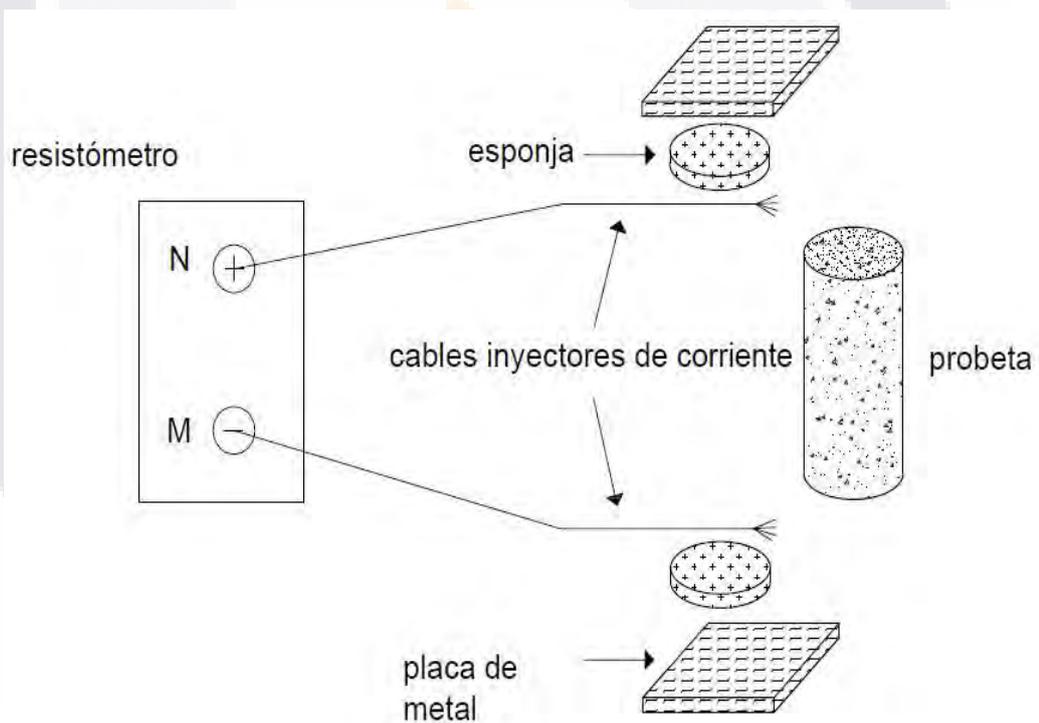


FIGURA 27 Elementos necesarios para obtención de resistividades de probetas. Elaboración Propia



FIGURA 28 Ensayos de algunas probetas Elaboración Propia.

3.4.1 Procedimiento

Para la obtención de las resistividades, se colocaron en las bases de las probetas esponjas de carbono humedecidas previamente en agua corriente y sal, posteriormente se cubrieron con placas de acero, teniendo cuidado de cubrir el área transversal de la probeta, posteriormente se agregaron las terminales de los cables conectores directamente desde el resistivímetro en cada una de las caras y finalmente se colocaron entre placas de acero sujetadas con pinzas para garantizar el contacto de los elementos. En la figura 27 puede verificarse el orden de los elementos analizados.

Una vez colocadas se procedió a la medición de resistencias obtenidas y su tabulación para posterior análisis.

Las mediciones se repitieron en todas y cada una de las probetas descritas en la tabla 3 en estado seco y saturado.

3.5 Análisis y discusión de los resultados de la prueba piloto

Los resultados de estas mediciones se expresan en la siguiente tabla 9, se pueden concluir que no todos los materiales son buenos conductores, por lo tanto, no tienen un registro de resistividades, como lo son los morteros de cal, conjuntamente con elementos muy densos únicamente, sólo se obtuvo un registro de resistividades en estado saturado.

Además, como parte de los resultados de las pruebas piloto, se obtuvo la siguiente gráfica (figura 29), que muestra los valores de resistividad real para diferentes materiales muestra, en donde se expresa en rangos dicha variable. El gráfico muestra una aplicación práctica de acuerdo a los materiales dado que es una regionalización de los mismos.

Tabla 8

Resultados de probetas en estado saturado y normal.

CUBOS	ESTADO NORMAL		ESTADO SATURADO	
DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)
Cantera amarilla	11,401.11	758.86	6519.17	433.92
Cantera porosa	60,401.43	4,020.32	7083.85	471.50
Escoria	69,265.83	4,610.33	32945.00	2192.82
Piedra riolita 1	13,352.00	888.71	5690.00	378.73
Piedra riolita 2	13,252.00	882.05	7784.80	518.16
Piedra riolita 3	52,228.00	3,476.30	19854.00	1321.48
PRISMAS CUADRANGULARES	ESTADO NORMAL		ESTADO SATURADO	
DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)
Cantera y mortero de cal (desordenado)	25855.91	1,300.82	-	0.00
Bloques Cantera y mortero de cal	269223.18	13,741.24	-	0.00
				1495.37
Piedra porosa	40988.67	9,183.14	6674.55	-

CILINDROS	ESTADO NORMAL		ESTADO SATURADO	
	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)	RESISTENCIA ELECTRICA (OHMIOS)	RESISTIVIDAD ρ (OHMIOS-METRO)
Concreto Impermeable	38099.41	1,501.85	25379.09	1501.85
Mortero de Albañilería	913966.79	35,812.98		
Mortero de Cal	-	-		
Concreto pilares 1	27326.00	1,056.95	10773.33	416.71
Concreto pilares 2	19365.33	563.75	7514.00	218.74
Mortero 1	20225.33	450.63	8869.60	197.62
Mortero 2	14245.33	420.76	8500.87	251.08

Nota: Elaboración Propia

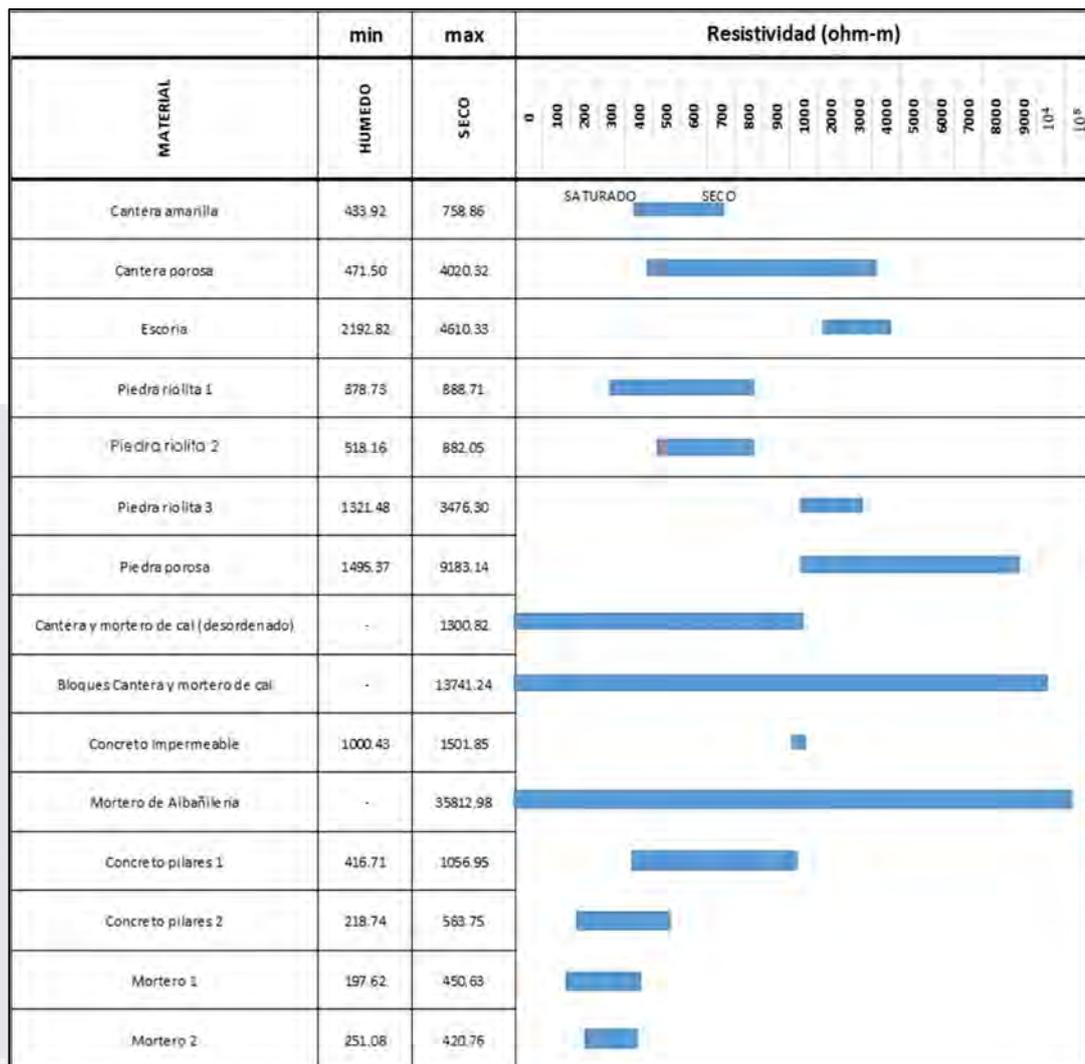


FIGURA 29 Gráfico resumen de valores de resistividad con materiales analizados. Elaboración Propia

3.6 Modelo experimental

El modelo experimental planteado se trata de un muro elaborado a base de una roca ígnea de tipo riolítica; con elementos de mamposteado juntado con mortero en una relación 1:3, las dimensiones se muestran en la figura 30. Las medidas planteadas son basadas en la obtención de resultados con los equipos de tomografía eléctrica y de georadar, en específico, una profundidad de análisis que permitan la generación de perfiles de resistividad y radargramas en un cuerpo entero.

Finalmente, las medidas definitivas del modelo experimental permiten la visualización de los resultados en una profundización que permite explorar ambos lados del murete, con una longitud total de 2.50 metros, con un ancho de 0.60 metros, la cavidad interior corresponde a 2.10 metros por 0.20 metros, que aprueban la inserción de diferentes elementos como relleno.

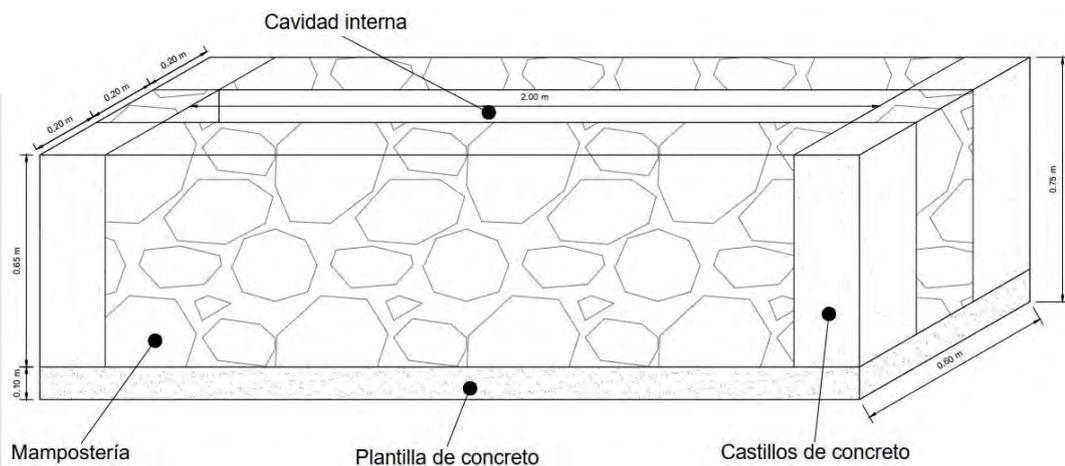


FIGURA 30 Modelo de mampostería para experimentos. Elaboración Propia

Una de las características primordiales del modelo experimental es su proceso de construcción, ya que la colocación del mamposteo de piedra riolita se encuentra en un orden de dos hojas partiendo desde la plantilla de concreto. Otra de las características es la su plantilla de concreto, construida primordialmente para evitar humedad por capilaridad en el muro experimental, ya que cuenta con una barrera de polietileno.

Finalmente, para poder contener la mampostería colocada, cuenta con cuatro castillos armados con armex, y se encuentran recubiertos de concreto colado y enrasados al mismo nivel que la mampostería con el mismo mortero de las juntas. El proceso constructivo puede verificarse en las siguientes figuras 31 Y 32.



FIGURA 31 Proceso constructivo del modelo experimental. Elaboración Propia



3.1.1 Aplicación de los métodos de estudio en el modelo experimental.

Las dimensiones del murete obedecen principalmente a la aplicación de los métodos geofísicos a emplear, ya que, para lograr la profundización adecuada de cada método, en específico de la tomografía de resistividad eléctrica, se tiene que tomar en cuenta la potencia del equipo y su configuración.

En un primer arreglo dentro de la tomografía de resistividad eléctrica, se establece la separación de electrodos de 10 centímetros, considerando un conjunto de 24 electrodos, se pretende realizar una profundización en el modelo de entre el 20 o el 25%, ese porcentaje representa aproximadamente 46 cm de profundización entre las paredes del modelo, y a lo largo desarrolla una longitud de 2.50 m que permitan la aplicación de los 24 electrodos con la separación adecuada de los mismos.

3.1.2 Redícula

Para facilitar las mediciones de resistividad se trazó una redícula en la superficie del muro de 5 centímetros por lado para cada cuadro y a cada lado del mismo como se puede apreciar en la figura 33. Se decidió un mallado que partiera de la parte central del modelo para la correcta ubicación de los electrodos en ambos arreglos; Wenner y Dipolo-Dipolo.



FIGURA 33 Redícula en el modelo experimental parte posterior. Elaboración Propia.

3.7 Sondeos de Tomografía de Resistividad Eléctrica

Para clasificar los sondeos a llevarse a cabo se dividieron en dos partes, en una primera etapa se realizaron las mediciones de tomografía de resistividad eléctrica, integradas por un Front y un Back y que juntos forman un primer sondeo completo.

El primero de ellos en la modalidad Dipolo-dipolo en condiciones secas, de este modelo se obtuvo un buen resultado, profundizando en el en los resultados.

Continuando con los sondeos el segundo par de mediciones se realizó en condiciones saturadas y con un arreglo Wenner.

En tercer lugar, de los sondeos realizados, fue un arreglo automático, por lo que se obtuvieron resultados muy diferentes a los esperados.

Como parte de un control testigo de las mediciones se realizó una prueba sin rellenos, sin embargo, la principal observación de este par de sondeos fue la falta de un medio que comunicara ambas paredes del muro. Por lo cual solamente los primeros 20 cm del registro son útiles para la determinación de la mampostería existente en el muro.

Para finalizar con las mediciones regulares con TER se planteó un nuevo relleno, considerando nuevos elementos de contraste como placas de metal y gravas.

Una de las principales características esenciales para la obtención de los sondeos exitosos es mojar la superficie a analizar, para ello se utiliza una solución de agua y sal de mesa, con el principal objetivo de mejorar la superficie de contacto con un electrolito convirtiéndolo en un medio de mayor conductividad entre los electrodos utilizados y la superficie del modelo experimental. Se humedece el espacio donde se colocan los electrodos antes y durante los sondeos teniendo cuidado de no tocar la solución ni la parte conductiva del electrodo.

Estas observaciones pueden consultarse en la siguiente tabla 10 y en los resultados descritos en el siguiente capítulo.

Tabla 9

Mediciones Tomografía de Resistividad Eléctrica en el modelo

No. Medición	Cara modelo	Relleno	Especificación	Altura relleno	Arreglo	Clave	Modalidad	Altura de la medición	Fecha en que se realizó	Condición	Estado
1	Front	Tepetate	de madera (-45mx.02mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Dipolo Dipolo	AMA1FD	Manual	a 25 cm de la base	8 de Noviembre de 2019	Seco	Concluso y presente en resultados
2	Back	Tepetate	de madera (-45mx.02mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Dipolo Dipolo	AMA2BD	Manual	a 25 cm de la base	20 de noviembre de 2019	Seco	Concluso y presente en resultados
3	Front	Tepetate	de madera (-45mx.02mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Wenner	AMA3FW	Manual	a 25 cm de la base	20 de febrero de 2020	Húmedo	Concluso y presente en resultados
4	Back	Tepetate	de madera (-45mx.02mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Wenner	AMA4BW	Manual	a 25 cm de la base	13 de marzo de 2020	Húmedo	Concluso y presente en resultados
5	Front	Tepetate	de madera (-45mx.02mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Wenner	AMA5FWA	Automático	a 25 cm de la base	27 de febrero de 2020	Seco	Inconcluso
6	Back	Tepetate	de madera (-45mx.02mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Wenner	AMA6BWA	Automático	a 25 cm de la base	14 de marzo de 2020	Seco	Inconcluso
7	Front	Sin relleno			Dipolo Dipolo	Testigo 1	Manual	a 25 cm de la base	4 de agosto de 2020	Sin relleno	Concluso sin presencia en los resultados
8	Back	Sin relleno			Dipolo Dipolo	testigo 2	Manual	a 25 cm de la base	5 de agosto de 2020	Sin relleno	Concluso sin presencia en los resultados
9	Front	Arena y grava	placa de metal 1x0.22mx0.20m y tubo PVC (1mx4')	a 30 cm de la base se colocaron los elementos sobre la cama de arena	Dipolo Dipolo	AMA9FD	Manual	a 25 cm de la base	7 de agosto de 2020	Seco	Concluso y presente en resultados
10	Back	Arena y grava	placa de metal 1x0.22mx0.20m y tubo PVC (1mx4')	a 30 cm de la base se colocaron los elementos sobre la cama de arena	Dipolo Dipolo	AMA10FD	Manual	a 25 cm de la base	7 agosto de 2020	Seco	Concluso y presente en resultados

Nota: Elaboración Propia

3.8 Características del modelo experimental

3.8.1 Primera etapa de sondeos

La primera serie de sondeos realizados en el modelo se llevaron a cabo con un primer relleno de tepetate extraído de la UAA, distribuido en dos capas pobremente compactadas y entre capa y capa se colocaron dos diferentes elementos de contraste, un tubo de PVC de un metro de largo y una tabla de madera como se muestra en la siguiente figura 34 colocados en la parte central del muro.

Las mediciones correspondientes a la primera etapa son aquellas contempladas a partir de la primera medición hasta la sexta en la anterior tabla 5, todas de ellas con diferentes características entre ellas.

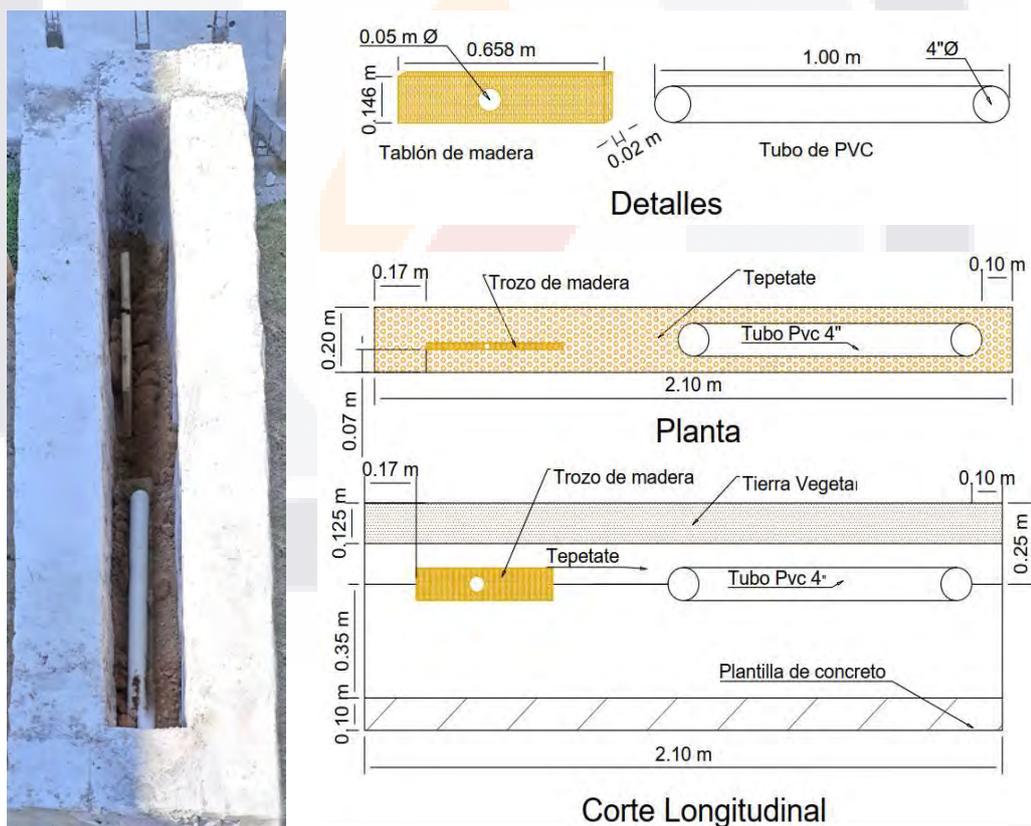


FIGURA 34 Diagrama y fotografía de la primera etapa de las mediciones en el muro experimental. Elaboración Propia.

3.8.2 Segunda etapa de sondeos

La segunda etapa de las mediciones pertenece a los sondeos Testigo correspondientes a la séptima y octava medición, estas mediciones se realizan con el objetivo de verificar los valores de resistividad de la mampostería de piedra de origen riolítico y las juntas de mortero sin ningún elemento de contraste dentro del muro experimental como en la figura 35, se opta por la medición sin ningún tipo de relleno y un arreglo dipolo-dipolo de manera manual.



FIGURA 35 Fotografía de la segunda etapa de las mediciones en el muro experimental. Elaboración Propia.

3.8.3 Tercera etapa de sondeos

Finalmente, la última etapa de mediciones corresponde a un nuevo tipo de relleno y elementos de contraste, en las mediciones 9 y 10 explicadas en la tabla 5 se hace uso de dos diferentes tipos de rellenos, arena y gravas y los elementos de contraste son un conjunto de placas de metal y un tubo de PVC de un metro de largo como se puede ver en la siguiente figura 36.

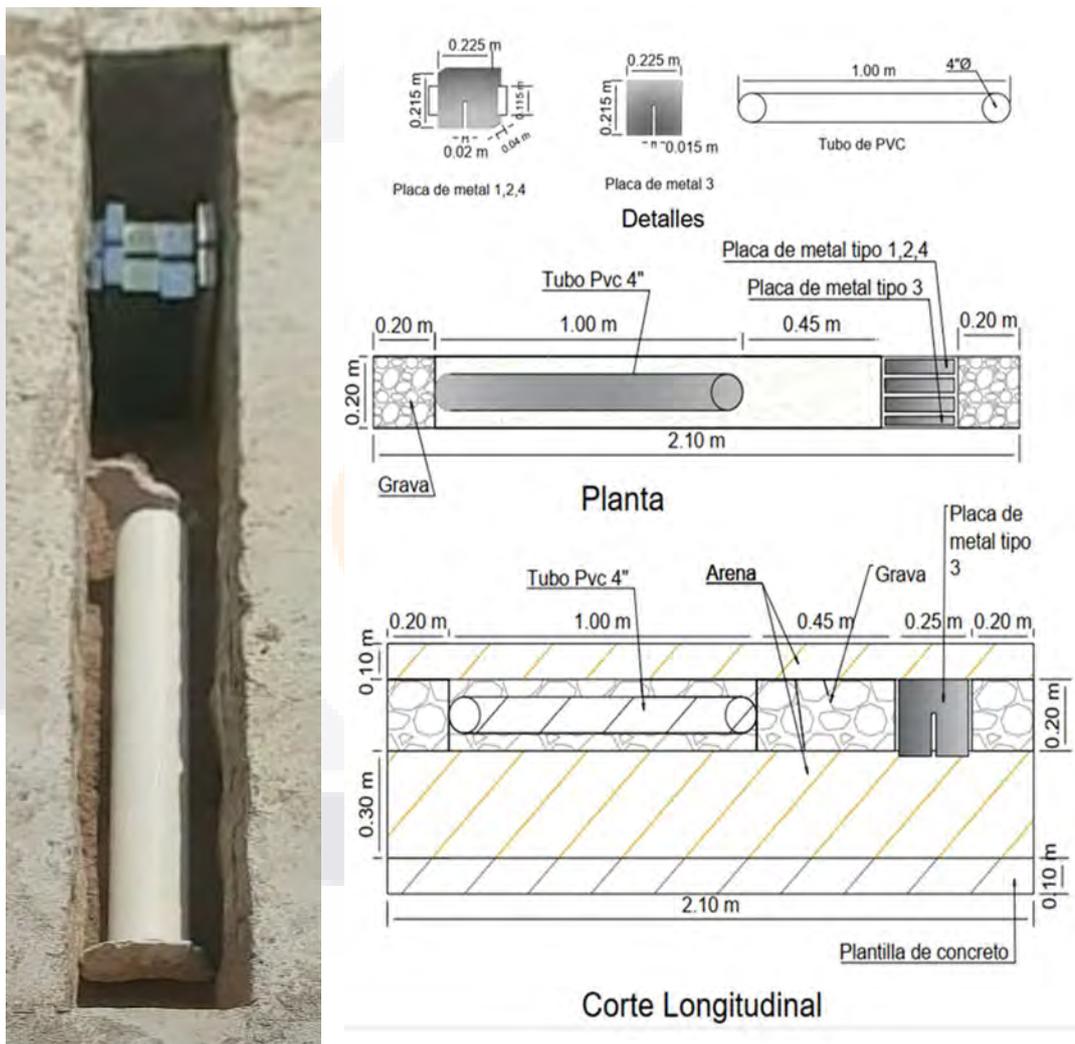


FIGURA 36 Diagrama y fotografía de la tercera etapa de las mediciones en el muro experimental. Elaboración Propia.

3.9 Rellenos y elementos

3.9.1 Elementos de contraste

En la antigüedad la construcción de estructuras se regía principalmente a la disponibilidad de materiales presentes en la región y a las técnicas constructivas de la época, es por ello que la presencia de vacíos o inclusive residuos orgánicos era usual en la conformación de las estructuras. La elección de diferentes materiales para su sondeo se basó en estos registros y son descritos a continuación.

a) *Tubo de PVC*

El poli cloruro de vinilo es un material derivado del plástico caracterizado por su ductilidad y resistencia, de naturaleza impermeable utilizado usualmente para conducir flujos de agua en los sistemas hidráulicos, se optó por el uso de este material para poder analizar la presencia de espacios vacíos en condiciones secas o zonas húmedas en caso de saturación al momento de analizar el modelo.

b) *Tabla de madera*

La madera es una fibra orgánica por lo cual en su composición se encuentran elementos de carbono, además de que al momento de tener un modelo saturado se puede interpretar como una zona húmeda, por lo que se pueden visualizar zonas de humedad determinadas.

c) *Piedra riolita*

La riolita es una piedra ígnea extrusiva, que es común en las construcciones presentes en el estado, siendo parte de puentes, iglesias y otras estructuras, dentro de sus características está que presenta altos valores de resistividad en contraste con el medio en el que se encuentra.

d) *Tepetate*

Material pétreo utilizado normalmente como material de relleno para cimentaciones o amplias áreas, se deriva de una arcilla, por lo que su comportamiento puede variar de acuerdo al grado de saturación del medio, al momento de estar saturado las arcillas se expanden, y en caso contrario se

contraen, una de sus características es la porosidad, por lo que su capacidad de absorción de agua es amplia, la capacidad resistiva de éste suelo lo coloca a bajos niveles de resistividad dependiendo de los niveles de humedad presentes.

3.10 Modalidades entre arreglos

El desarrollo de los sondeos consideró diversas variables, una de ellas fue la modalidad de las mediciones, de acuerdo a la forma en cómo se acomodaron los electrodos, para este estudio se tomaron en cuenta las modalidades automáticas y manuales. Un arreglo manual hace uso de solamente dos pares de electrodos divididos en la parte A-B (par1) y M-N (par 2) en donde el primer par inyecta corriente y en el par dos se recibe voltaje, en esta modalidad los electrodos se colocan a cierta distancia uno de otro y se van recorriendo por toda la longitud del perfil a sondear hasta cubrirla.

Una medición automática se basa en la colocación completa de la configuración ETR de 24 electrodos que inyectan corriente y reciben voltaje de acuerdo a la configuración que se establezca desde el resistivímetro, colocados en una estructura que ajusta los electrodos a una misma línea de sondeo y los presiona gracias a una serie de resortes que ejercen presión entre la superficie de contacto y los electrodos.

De acuerdo a la experiencia en esta primera etapa de sondeos una medición manual arroja mejores resultados que una medición automática.

En esta primera etapa de mediciones se realizaron las mediciones a la misma altura en la que se colocaron los elementos a observar, es decir sobre los muros laterales a 25 cm de la orilla superior del muro.

3.11 Aplicación del método ERT basado en pseudo secciones en 2D para la obtención de un modelo 3D

Una vez culminada la etapa experimental con ERT y GPR se plantea la elaboración de un modelo en 3D con el objetivo de obtener una visualización clara de los elementos de contraste y rellenos dentro de la cavidad del modelo.

El procedimiento de elaboración del modelo 3D parte de creación de una serie de pseudo-secciones en 2D y el procesamiento de los mismos como parte de un conjunto en volumen del modelo experimental. Para lograr la profundización necesaria en las capas de experimentación se realizan mediciones a diferentes alturas dentro del mallado del modelo experimental y a ambos lados del mismo.

Al momento de realizar las mediciones en 2D se observa que el arreglo óptimo para lograr un modelo en 3D más definido corresponde a un arreglo dipolo-dipolo debido a que es efectivo al definir estructuras horizontales y estratos como los planteados en los rellenos de la tercera etapa del modelo experimental en donde se plantean capas de diferentes materiales, arena y grava y los elementos de contraste de mayor escala y densidad. En cambio, con un arreglo Wenner la detección de los cambios verticales es más efectiva. Además de la utilización de nuevos electrodos normalmente usados en la electro-estimulación médica, los cuales son más eficaces al momento de verificar la superficie de contacto con el elemento en cuestión.

3.11.1 Profundización del modelo 3D

Aprovechando el mallado existente en el modelo experimental se opta por la colocación de los electrodos a cinco centímetros de separación entre cada uno, y realizando el cálculo de profundización del sondeo se obtiene que hay una profundización promedio de entre el 20% y el 25% del ancho modelo de acuerdo a la siguiente ecuación relacionando las medidas del modelo [ecuación 3].

$$Ee \times (El - 1) \times \%Prof. = Pm \quad [Ec. 3]$$

Donde:

Ee: Espaciamiento sugerido entre electrodos (metros)

El: Número de electrodos del sondeo (24 electrodos)

%Prof.: Porcentaje de profundización en sondeo (20% o 25%)

Pm: Longitud aproximada que profundiza en la medición

Aplicando la fórmula [1] y utilizando los datos del modelo queda una profundización promedio de 0.2587 metros, representado en la fórmula [2] y [3] y [4], y considerando el ancho total del muro de 60 centímetros se hacen mediciones a ambos lados del muro, en front y en el back para abarcar el relleno planteado

$$0.05 \text{ m} \times (24 - 1) \times 20\% = 0.23 \text{ m} \quad [2]$$

$$0.05 \text{ m} \times (24 - 1) \times 25\% = 0.2875 \text{ m} \quad [3]$$

Promedio

$$0.23 \text{ m} + 0.2875 \text{ m} = 0.5175 / 2 = 0.2587 \text{ m} \quad [4]$$

3.9.2 Resultados obtenidos con pseudo-secciones

Para la obtención de un modelo 3D es necesario el tratamiento de diferentes pseudo-secciones en2D del modelo por lo que para lograrlo se hacen sondeos con ambos arreglos de tomografía de resistividad eléctrica. En ambos tipos de sondeos se realizan dos modalidades manual y automática, en donde el sondeo manual requiere la utilización de dos pares de electrodos, en cambio en una modalidad automática se colocan todos los electrodos en el modelo experimental. En la siguiente tabla 12 se muestran las alturas de las mediciones y que modalidad se utilizó en cada una para la obtención del modelo 3D.

Tabla 10

Sondeos para el modelo 3D

Ubicación	Sondeo	Altura sondeo (cm)		
		Arreglo Manual	Arreglo Automático	
Posterior (Back)	Wenner	40	25	
		50	35	
		55	40	
		65	45	
			50	
	Dipolo-Dipolo		55	65
			25	35
			40	45
			50	55
			65	
Ubicación	Sondeo	Altura sondeo (cm)		
Frontal (Front)	Dipolo-Dipolo		Arreglo Manual	Arreglo Automático
		5	25	
		15	35	
		20	40	
		25	45	
		30	50	
		35	55	
		45	67	

Nota: Elaboración Propia

3.12 Electrodo utilizados. Ventajas y desventajas.

A lo largo de las mediciones realizadas se hizo uso del conjunto de electrodos adaptados por el doctor Padilla Ceniceros fabricados a partir de un cuerpo de CPVC y puntas de cobre y esponja de carbono, y a pesar de que se consideran óptimos para su aplicación en el muro, la realización de los sondeos en forma manual es tardada y en forma automática la superficie de contacto puede verse afectada y disminuida.

Para garantizar una adecuada superficie de contacto es necesario ampliarla y teniendo como objetivo la buena adherencia del electrodo a la superficie se elige una serie de electrodos médicos especializados pre-gelados (figura 37 y tabla 11) diseñados en un principio para la electro-estimulación en terapias físicas conformados de una tela y un soporte base plástico y una conexión clavija de 2 mm, con una capa de gel auto-adherible, en una presentación de 5 centímetros por 5 centímetros.



FIGURA 37 Electrodo médicos utilizados en sondeos. Elaboración Propia

Su aplicación, garantiza una buena superficie de contacto con el elemento constructivo gracias al gel adherente de su superficie.

Este tipo de electrodos llevan una conexión tipo clavija más pequeña, comparada a la conexión de los electrodos de PVC, sin embargo, a semejanza de un arreglo convencional, lleva una conexión directa a los cables y estos a su vez al resistivímetro. Uno de los inconvenientes que

presentan estos electrodos es su vida útil, ya que pueden quemarse fácilmente perder el pegamento de su superficie al ser cambiados de lugar, especialmente en la superficie del muro experimental como se ve en la figura 38.



FIGURA 38 Muro experimental con electrodos médicos colocados para sondeo

Tabla 11

Características de los diferentes electrodos utilizados.

EJEMPLO	ELECTRODO	MATERIALES DE ELABORACIÓN	TAMAÑO	PARTICULARIDAD	CONEXIÓN A CABLE CONDUCTOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	Electrodos de CPVC CPVC DE 1/2"		23 cm de largo	Extremo plano de cobre cubierto por esponjas de carbono	Tipo plug banana	Económicos, y de fácil elaboración Buena superficie de contacto En caso de averiarse puede arreglarse fácilmente, teniendo los elementos necesarios Buena adaptación a modelos en el arreglo manual Útil solamente para sondeos horizontales Para un arreglo automático requiere de un módulo soporte que no colapsar, modificando el sondeo	Es necesario un soporte para su aplicación en automático y recurso humano en el modo manual. Sondeos más tardados Requiere amplio espacio de almacenamiento por su estructura Requiere una mayor aplicación de solución con sal para tener una buena superficie de contacto
	Electro estimuladores	Cubierta de tela y película de carbón con una capa de gel	5 x 5 cm	Lado cubierto con una capa de gel autoadhesible	Tipo plug clavija banana mini 2 mm	Aplicación mas sencilla y rápida Máxima flexibilidad y adaptación en contornos Rapidez y efectividad en mediciones Obtención de buenas superficies de contacto al momento del sondeo, obteniendo mejores perfiles Requiere poco almacenamiento Pueden realizarse sondeos a cualquier altura, en horizontal y en vertical, haciéndolo más versátil Fácil acomodo de electrodos, garantizando que se quedan en un mismo lugar en el sondeo	En caso de que no se cuide la aplicación puede perder fácilmente el gel que los cubre Requiere constante aplicación de solución con sal para evitar que se quemen Su almacenamiento debe de conservarse herméticamente cerrados para evitar que se sequen

Nota: Elaboración Propia.

3.13 Sondeos Radar de Penetración Terrestre.

Otra de las fases de la campaña experimental es la obtención de sondeos mediante el método de radar de penetración terrestre. La particularidad de aplicación de este método consiste en la existencia de una superficie de rodamiento lo suficientemente plana para deslizar correctamente la antena del GPR y de este modo poder generar radargramas concisos y de la misma longitud analizada con la antena. Teniendo este principio en mente los sondeos se aplican en los laterales del modelo experimental y en la parte superior, especialmente en la parte central. Figura 39.



FIGURA 39 Sondeos con GPR en el muro experimental. Superior y lateral. Elaboración Propia.

Para el análisis de esta fase se hace uso de un GPR, equipado con una antena con dos diferentes capacidades de frecuencia, la primera de 1600 Hz y que proyecta una profundidad de sondeo de hasta 1.19 metros y la segunda de 1200 Hz que profundiza 0.52 metros, por lo que dadas las magnitudes del modelo experimental se opta por la configuración correspondiente a la antena de 1600 Hz, útil para cubrir el total del ancho considerado en el murete.

A semejanza de la calendarización para los sondeos ERT se calendarizaron los sondeos destinados al GPR descritos a continuación en la siguiente tabla 13.

Tabla 12

Calendarización y pruebas de mediciones GPR

Nº Medición	Cara Modelo	Relleno	Especificación	Altura de relleno	Estado	Clave	Modalidad	Fecha de Sondeo	Observaciones
1	Fronte	Tepetate	de madera (45mx0.2mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Seco	Dato 114	GPR	12 de Junio de 2020	1200 Hz 0.52 m profundidad
2	Back	Tepetate	de madera (45mx0.2mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Seco	Dato 115	GPR	12 de Junio de 2020	1200 Hz 0.52 m profundidad
3	Fronte	Tepetate	de madera (45mx0.2mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Seco	Dato 116	GPR	12 de Junio de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad
4	Back	Tepetate	de madera (45mx0.2mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Seco	Dato 117	GPR	12 de Junio de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad
5	Superior	Tepetate	de madera (45mx0.2mx1") y tubo de PVC (1mx2')	central	Seco	Dato 118	GPR	12 de Junio de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad
6	Front	Tepetate	de madera (45mx0.2mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Humedo	Dato 119	GPR	12 de Junio de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad
7	Back	Tepetate	de madera (45mx0.2mx1") y tubo de PVC (1mx2')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Humedo	Dato 120	GPR	12 de Junio de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad
8	Superior	Tepetate	de madera (45mx0.2mx1") y tubo de PVC (1mx2')	central	Humedo	Dato 121	GPR	12 de Junio de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad
9	Front	Arena y grava	de metal 3x0.22mx0.20m y tubo PVC (1mx4')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Seco	Dato 132	GPR	14 de Septiembre de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad
10	Back	Arena y grava	de metal 3x0.22mx0.20m y tubo PVC (1mx4')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Seco	Dato 136	GPR	14 de Septiembre de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad
9	Superior	Arena y grava	de metal 3x0.22mx0.20m y tubo PVC (1mx4')	central	Seco	Dato 133	GPR	14 de Septiembre de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad
10	Front extra	Arena y grava	de metal 3x0.22mx0.20m y tubo PVC (1mx4')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Seco	Dato 134	GPR	14 de Septiembre de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad
11	Front extra	Arena y grava	de metal 3x0.22mx0.20m y tubo PVC (1mx4')	a 25 cm de la base se colocaron los elementos	Seco	Dato 135	GPR	14 de Septiembre de 2020	1600 Hz 1.20 profundidad



CAPÍTULO

IV

RESULTADOS

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 Resultados con GPR

Posterior a la aplicación del radar de penetración en el muro se obtuvieron una serie de radargramas a los cuales se sometieron a diferentes filtros para mejorar la visualización de las anomalías presentes, los resultados obtenidos se presentan a continuación, destacando el filtro 1 como el que otorga la mejor resolución de datos.

4.1.1 Utilización de filtros para el procesamiento de datos

Para mejorar la visualización de los datos mostrados en los radargramas se jugaron con varias combinaciones entre filtros, siendo el filtro 1 (F1) aquel que generó mejores resultados de visualización.

El filtro 1 se compone por los mostrados en la tabla 4 de este documento, en donde muestra que la relación de filtros presentes otorga al radargrama mediante un control de ganancia automática una ampliación de las señales recibidas por el medio, y siendo que también amplifica el ruido, es necesario un filtro de eliminación de señales repetitivas que evitan la visualización de las anomalías presentes, aplicando el filtro de ganancia variable en el tiempo se pueden definir mejor los elementos contenidos en el muro compensando la señal que emiten dichos objetos de acuerdo a su tamaño Para poder definir dentro de los rangos analizados se aplica un filtro de Pasabandas que de la mano del filtro de eliminación regula las señales eliminando picos en las frecuencias registradas.

A continuación, en la tabla 14, se muestran los datos de los radargramas que tienen una representación en el estudio, se trataron con el Filtro 1, denotando las anomalías presentes en las diferentes etapas de los sondeos. Además, en la tabla se muestran las condiciones y localizaciones de cada sondeo realizado.

Tabla 13

Radargramas y filtrado de datos con GPR.

Medición: 1 Relleno: 1 (tepetate, tabla de madera y tubo de PVC)						
Dato	Filtrado utilizado	Longitud Sondeo (m)	Profundidad (m)	Antena	Altura Sondeo (m)	Localización
116		2.4			0.25	Frente
119	F1	2.4	1.19	1,600 Hz	0.25	Frente
120		2.5			0.25	Posterior
121		2.4			central	Superior
Medición: 2 Relleno: 2 (arena y placas de metal)						
Dato	Filtrado utilizado	Longitud Sondeo (m)	Profundidad (m)	Antena	Altura Sondeo (m)	Localización
132		2.4			0.25	Frente
133		2.3			central	Superior
134	F1	2.4	1.19	1,600 Hz	0.25	Frente
135		2.45			0.30	Frente
136		2.5			0.30	Posterior

Nota: Elaboración Propia

4.1.2 Radargramas primera etapa: Relleno de tepetate, tubo de PVC y tablón de madera.

Durante los sondeos en esta etapa se consiguió realizar un total de 4 mediciones exitosas, de las cuales se presentan en este apartado las tres más representativas, que corresponden a la vista frontal, posterior y superior del modelo.

Analizando los modelos podemos identificar la presencia de anomalías en los tres modelos, que se relacionan directamente con los elementos de contraste colocados en esta etapa. El primer componente de contraste planteado es un tablón de madera representando un elemento orgánico, colocado aproximadamente a 17 centímetros de la lateral izquierda del muro experimental y a 25 centímetros de la superficie hacia la base, con una longitud de 45 centímetros por 2 centímetros de ancho. El segundo elemento se trata de un tubo de PVC, de 1 metro de longitud y 4" de ancho, colocado a 25 centímetros de la superficie hacia la base y a 10 centímetros de la lateral derecha del modelo experimental. Estos modelos se encuentran enterrados en un relleno homogéneo de tepetate dispuesto en 2 capas pobremente compactadas.

I. Frontal

En el primero de los modelos se muestra el sondeo realizado en la parte frontal del modelo experimental en estado seco a 25 centímetros de la parte superior hasta la base, se pueden visualizar un conjunto de tres zonas de anomalía sumamente marcadas e identificadas con los colores azul, amarillo y verde. En la primera zona de anomalía en azul se puede identificar la presencia del tablón de la madera, con un conjunto de inclinaciones en la onda de aproximadamente la longitud del elemento mencionado. Así mismo en la parte derecha del modelo en verde podemos observar la anomalía correspondiente a la presencia del tubo de PVC, con un conjunto de ondas con mayores inclinaciones y mayor longitud de onda entre crestas. También,

en la parte central del modelo en amarillo, tenemos algunas anomalías marcadas, especialmente a la marca de 1.15 metros, longitud aproximada en la que finaliza el tubo de PVC y es detenido por un elemento pétreo lo anterior puede visualizarse en la figura 40.

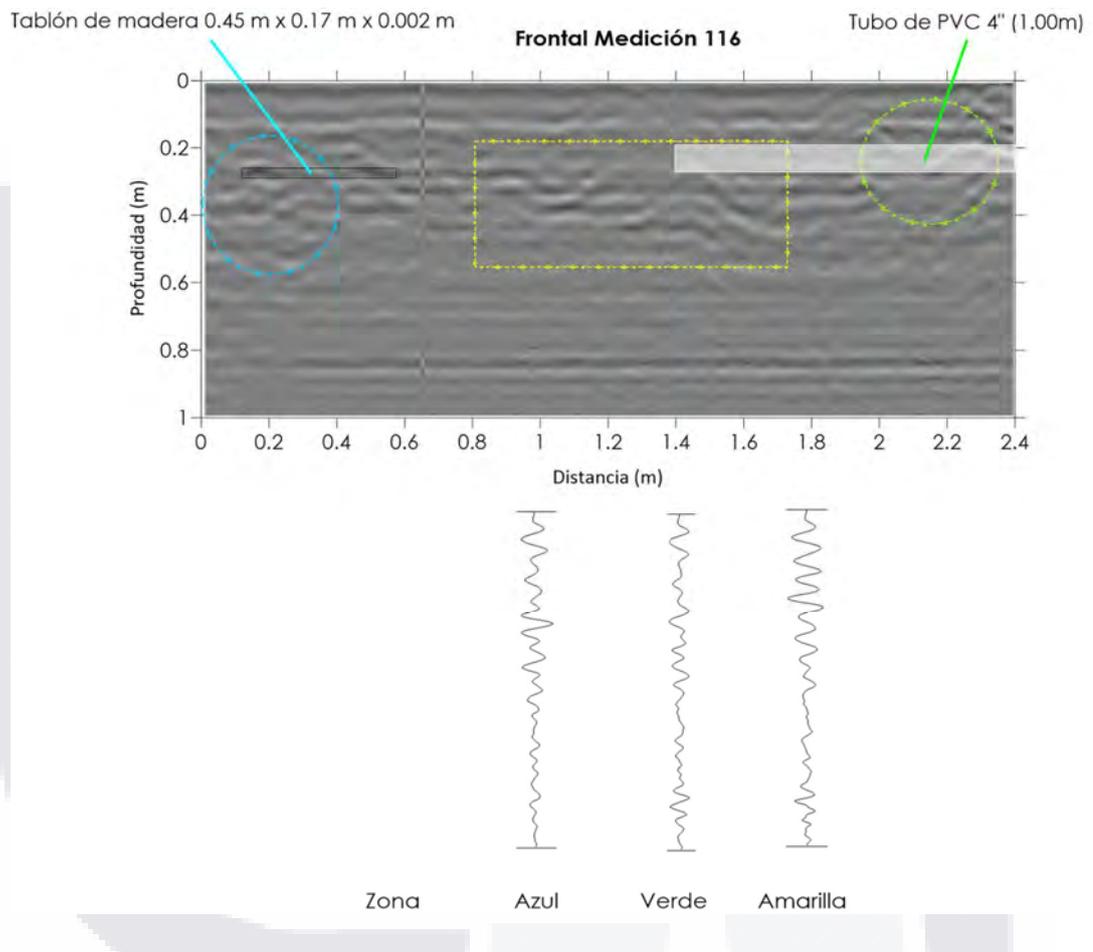


FIGURA 40 Sondeo 116. Primera etapa. Elaboración Propia.

II. Posterior

A la par del modelo anterior se sondeó la parte trasera del modelo, confirmando la presencia de los elementos de contraste en tres diferentes zonas, en verde (tablón de madera), azul (zona media) y amarillo (zona del tubo de PVC, cabe resaltar que el tratamiento de los datos se realizó de acuerdo al orden de medición con las inversiones de datos necesarias. Figura

41

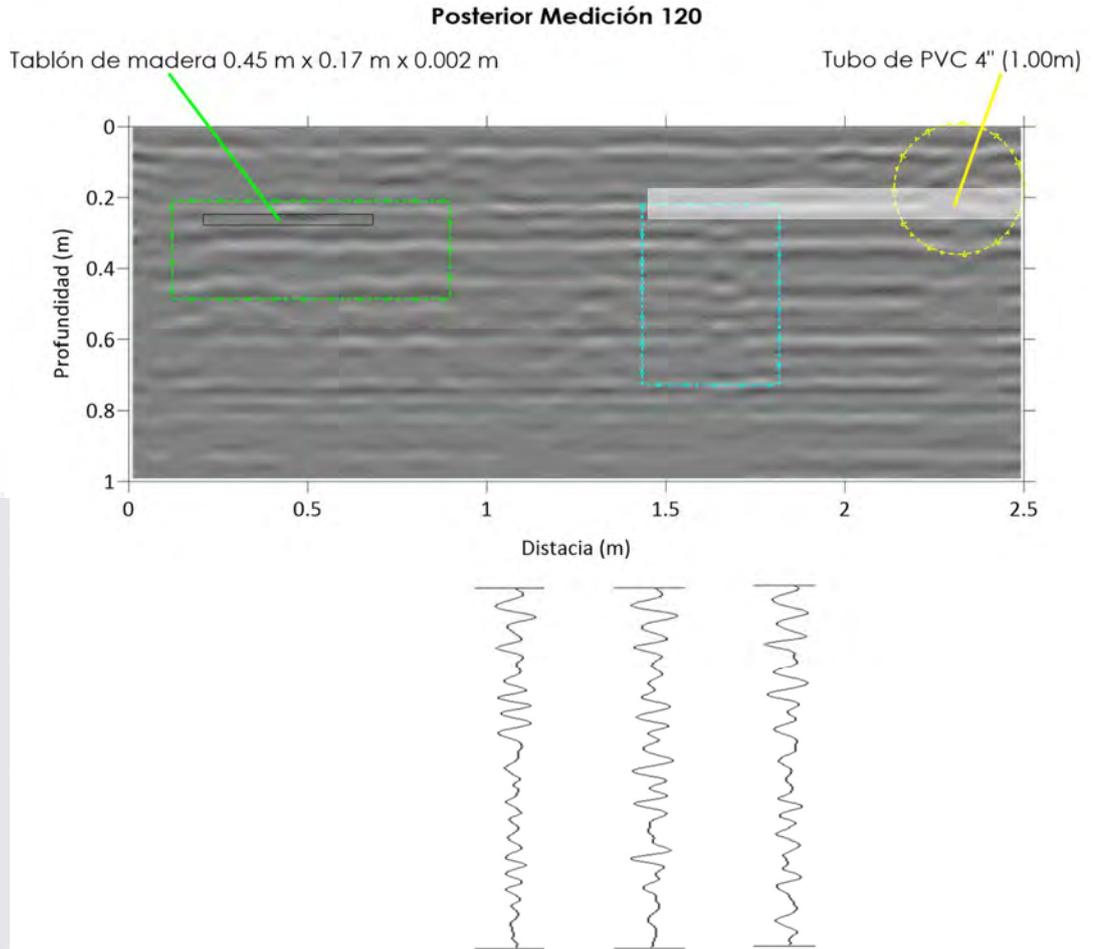


FIGURA 41 Sondeo 120. Primera Etapa. Elaboración Propia.

III. Superior

Finalmente, se tiene el tercer sondeo contemplado en esta etapa que corresponde a uno realizado en la parte superior del muro por la parte central, en donde también podemos visualizar los elementos de contraste, sin embargo, en una menor escala, visualizando solamente dos zonas de anomalía representadas en la figura 42

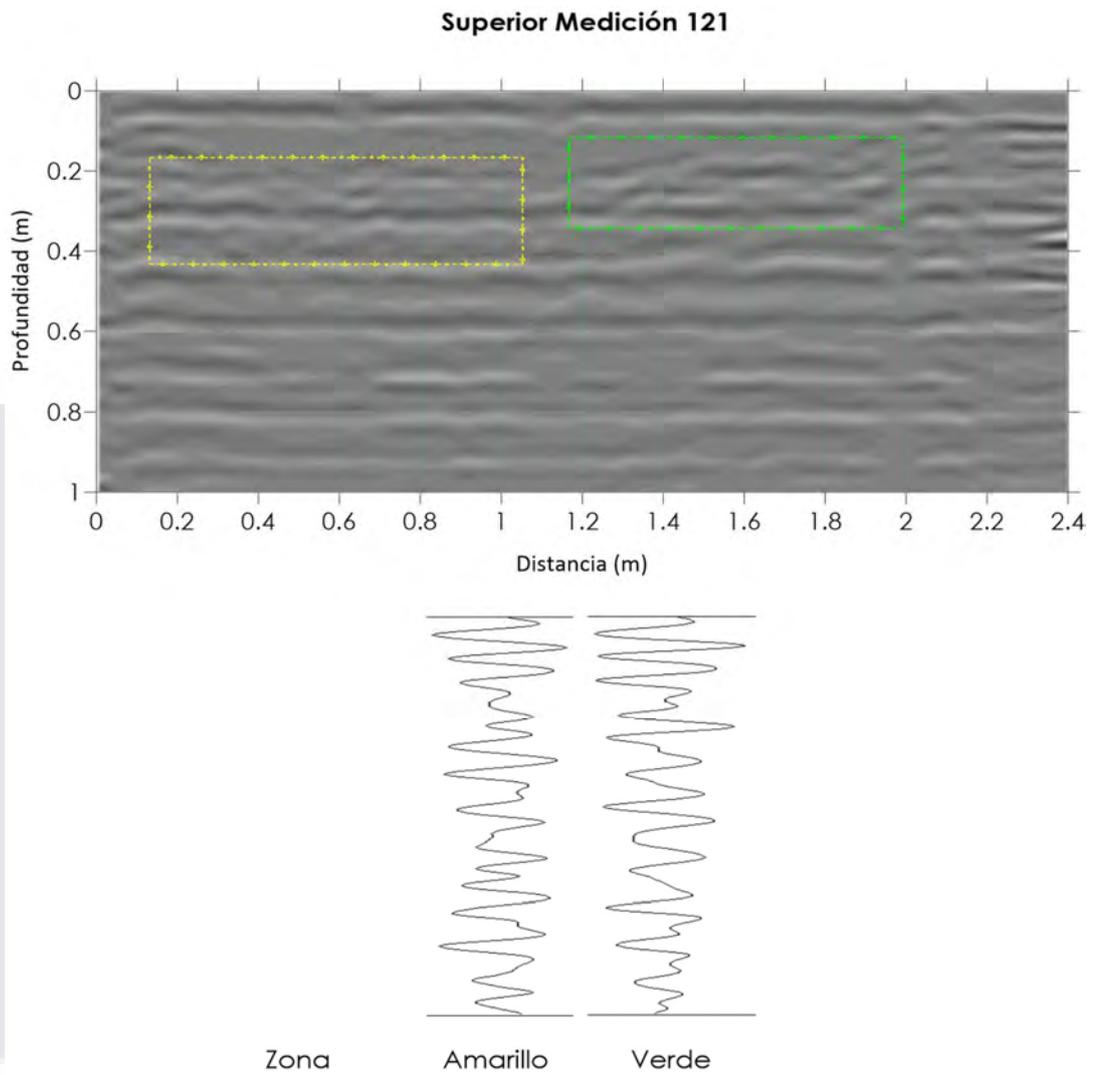


FIGURA 42 Sondeo 121. Primera Etapa. Elaboración Propia.

Para esta etapa de mediciones se hizo uso de una antena de 1600 Hz, que profundizó un aproximado de 1.19 m cubriendo totalmente el estrato correspondiente a lo alto del muro experimental.

4.1.3 Radargramas segunda etapa: Sin relleno

Recordando las etapas de los rellenos planteados en capítulos anteriores, tenemos la existencia de una segunda etapa, en la que no se considera un relleno dentro de la cavidad, por lo tanto, no es posible realizar un sondeo con GPR en esta etapa a falta de un medio de propagación de la onda.

4.1.4 Radargramas tercera etapa: Relleno de grava, tubo de PVC de 6" y placas de metal.

Recordando las características presentes en esta última etapa de rellenos tenemos elementos de contraste más masivos a comparación de la primera etapa, destacando un conjunto de placas de acero ya descritas en capítulos anteriores y un tubo de PVC de mayor tamaño al planteado anteriormente dispuestos en dos diferentes capas de material, la primera de ellas una cama de arena pobremente compactada llegando hasta la mitad de la altura del muro y continuando con una capa de grava semi-suelta que rodea a los elementos de contraste.

En esta tercera etapa también se presentan los tres sondeos más representativos del conjunto total de mediciones, se realizaron cinco diferentes sondeos en todas las caras del muro, destacando un frente, posterior y superior a continuación mostrados en las siguientes figuras.

Cabe destacar que los modelos no incluidos correspondientes a esta etapa se encuentran en el anexo B de este trabajo, siendo el sondeo 132 un sondeo realizado al frente del muro experimental y el sondeo 134, realizado también al frente del modelo.

I. Frente

Como primer sondeo tenemos la parte frontal que corresponde a la medición 135 en donde los elementos de contraste destacan por su amplia reflexión detectada en el modelo, especialmente en la parte derecha, lugar en donde se ubicaron las placas de metal. La anomalía que le corresponde se presenta en un color azul con una serie de ondas ligeramente inclinadas hacia el centro del modelo y presentes a la altura de la colocación de los elementos. De la misma forma se puede visualizar la existencia del tubo de PVC con pequeñas ondas que se desarrollan en la longitud donde se colocó el elemento como lo podemos ver en la siguiente figura 43 y en la parte central tenemos una marcada anomalía en amarillo que podrá relacionarse a la unión de la grava con la cama de arena en casi la parte central del modelo a los 1.60 metros.

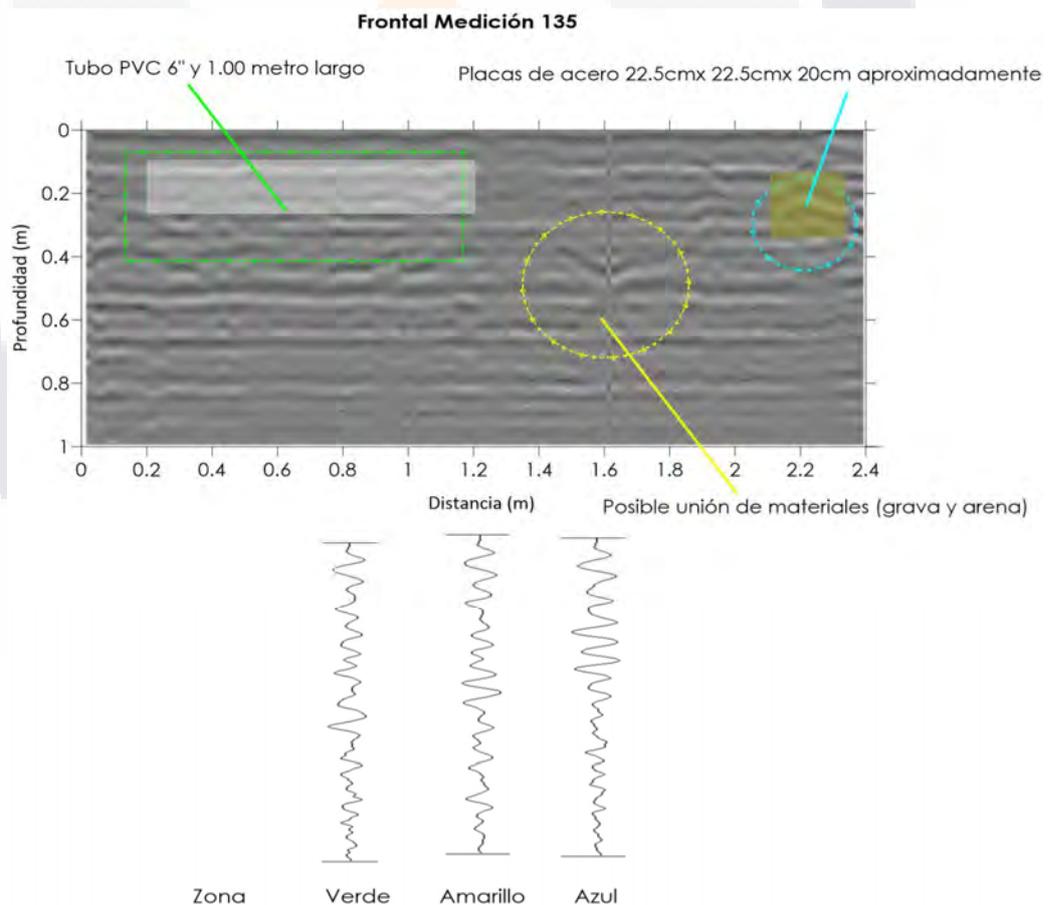


FIGURA 43 Sondeo 135. Tercera etapa. Elaboración Propia.

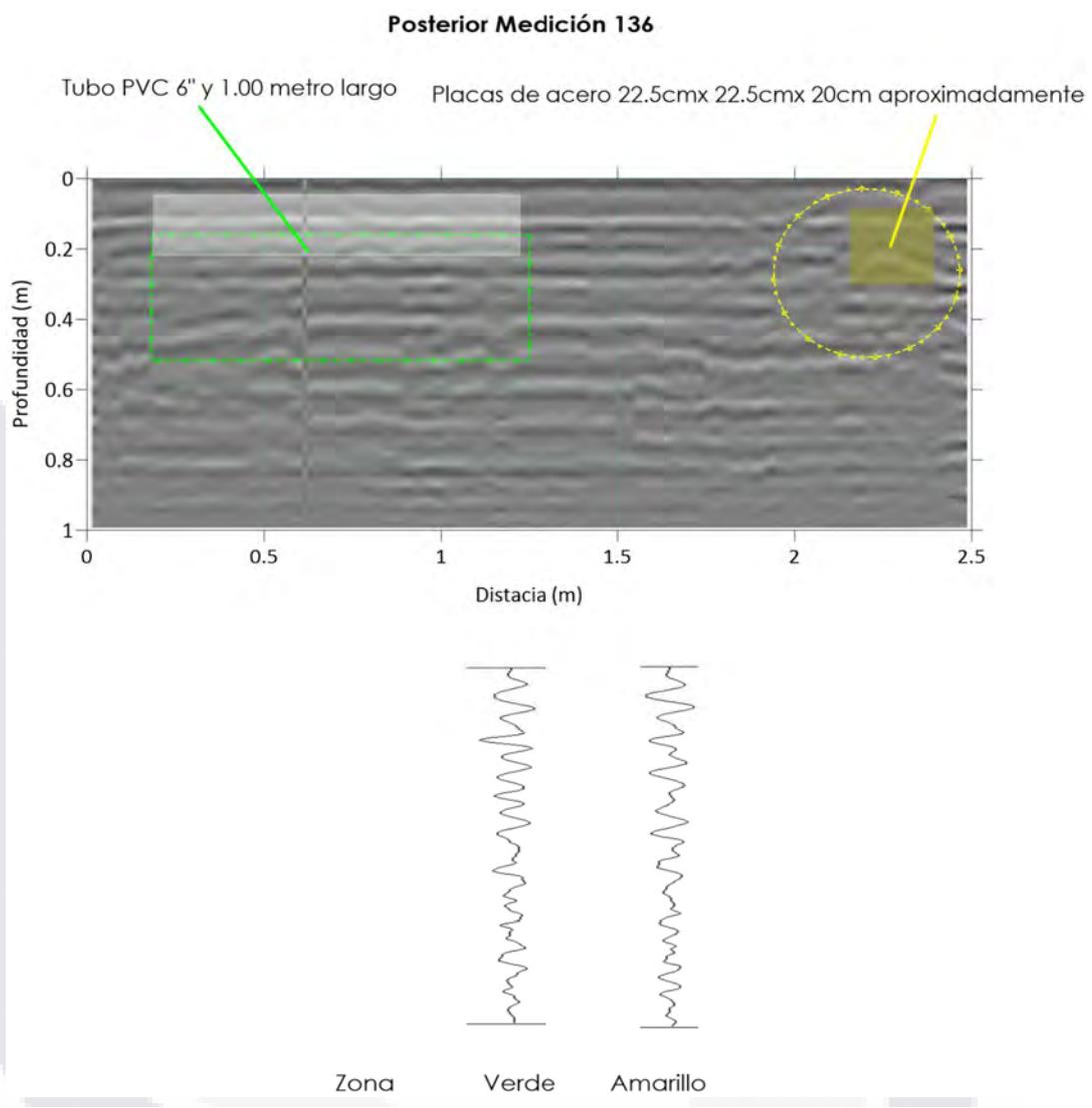


FIGURA 44 Sondeo 136. Tercera etapa. Elaboración Propia.

II. Posterior

Continuando con la parte trasera del modelo se presenta el sondeo 136 que de la misma forma tiene las mismas irregularidades presentes en el frente del modelo, considerando sus respectivos giros ubicando correctamente los elementos, en este caso en amarillo para las placas de acero y en verde para el tubo de PVC como lo observamos en la figura 44.

III. Superior

A diferencia de la primera etapa en el sondeo superior de la tercera etapa los elementos de contraste se hacen sumamente visibles en el modelo de representación, mostrados en azul las correspondientes al tubo de PVC, verde para las placas de acero, que son las anomalías más marcadas en esta serie de sondeos, delimitando su posición con una onda más cerrada y por último en amarillo el relleno de grava utilizado en la parte final del modelo representado en la figura 45

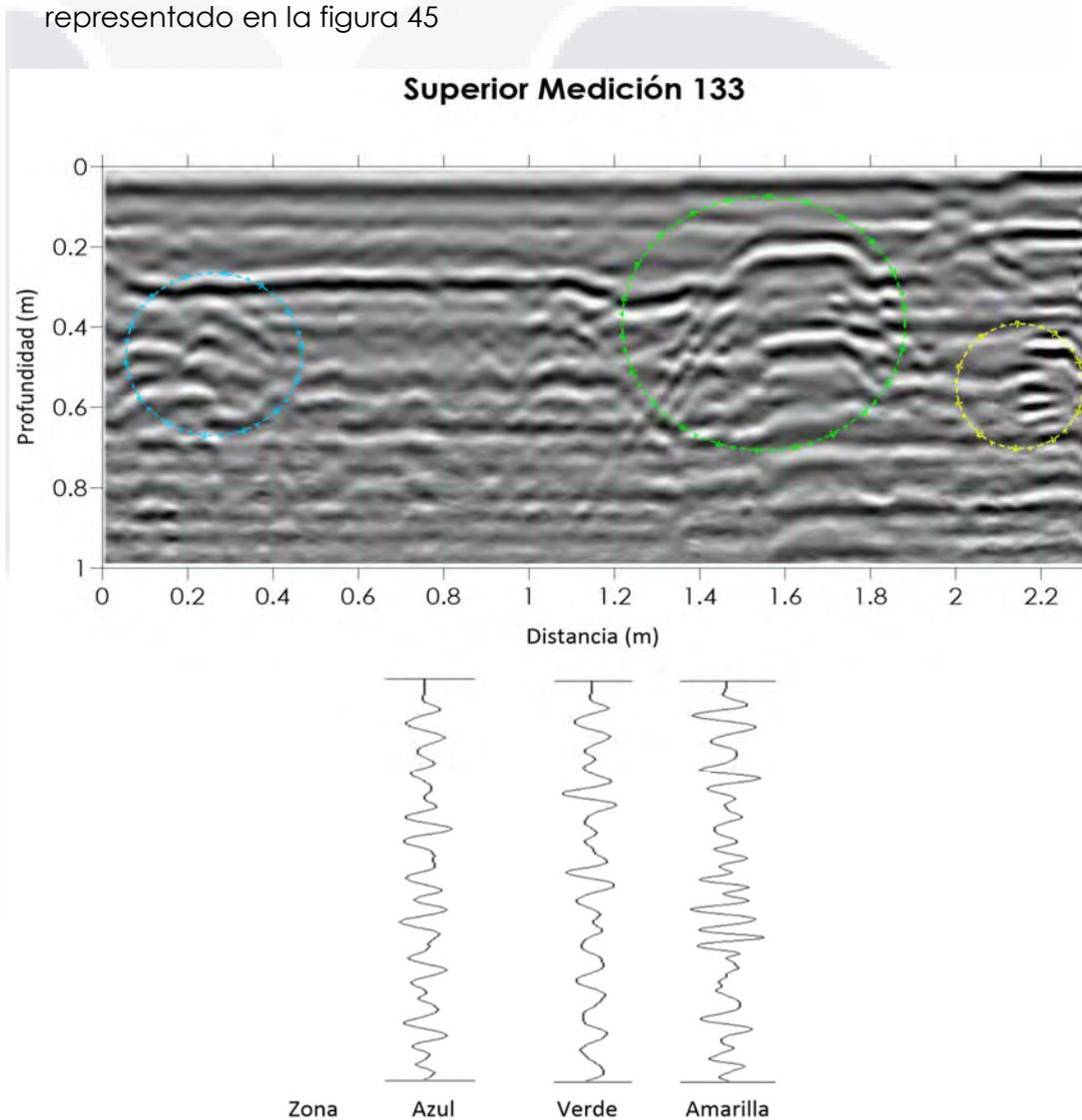


FIGURA 45 Sondeo 133. Tercera etapa. Elaboración Propia.

4.2 Resultados con ERT

Una vez concluidas las series de sondeos en el modelo de experimentación se procesaron los datos obteniendo los siguientes resultados. El relleno utilizado en esta etapa corresponde a tepetate.



FIGURA 46 Aplicación de un sondeo manual con electrodos de CPVC.
Elaboración Propia

4.2.1 Primer Modelo

El primer modelo obtenido se realizó bajo un arreglo Dipolo-Dipolo manual, debido a esto se esperaba un registro más definido de las estructuras verticales encontradas en el relleno. Las condiciones bajo las que se sondeó fueron secas. El modelo obtenido fue un perfil de resistividades que coincidieron con los valores establecidos en la literatura. Se pueden observar en los extremos del perfil las juntas y piedras que conforman el muro, así como también pueden definirse valores más altos en la parte central respecto a los extremos del perfil, definiendo contornos para el tubo de PVC y el tablón de madera, con valores de resistividad que van desde los 400 a los 100 Ω -m. Se puede observar el perfil en la siguiente figura 47.

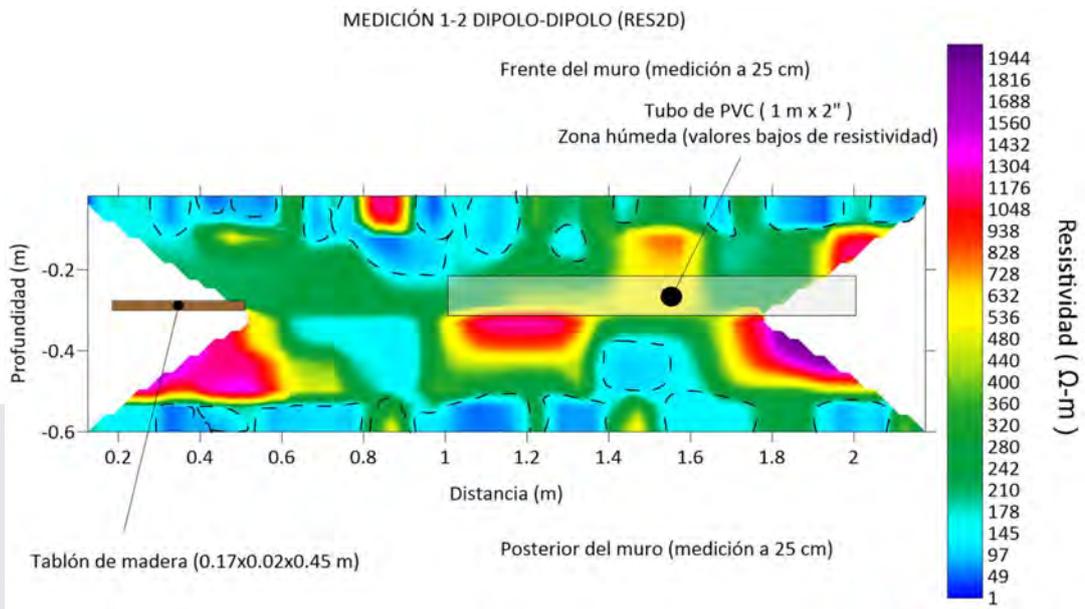


FIGURA 47 Primer modelo de unión en el modelo experimental. Elaboración Propia.

4.2.2 Segundo Modelo

El segundo modelo corresponde a un arreglo Wenner manual realizado bajo condiciones húmedas del muro, tal como en el modelo anterior se obtuvo un buen sondeo sin embargo los valores de resistividad fueron menores comparados al primero modelo, debido a los altos contenidos de agua que se transmiten en bajos valores de resistividad. En una modalidad Wenner se espera definición en las estructuras horizontales.

En ambos modelos podemos observar que se realizó bajo una modalidad manual, es decir que los electrodos fueron colocados por pares y cada medición fue individual.

Los resultados fueron satisfactorios ya que en ambos se definieron los contornos de las piedras superficiales del perfil del sondeo, así como los elementos interiores (tabla y tubo de PVC). Figura 48

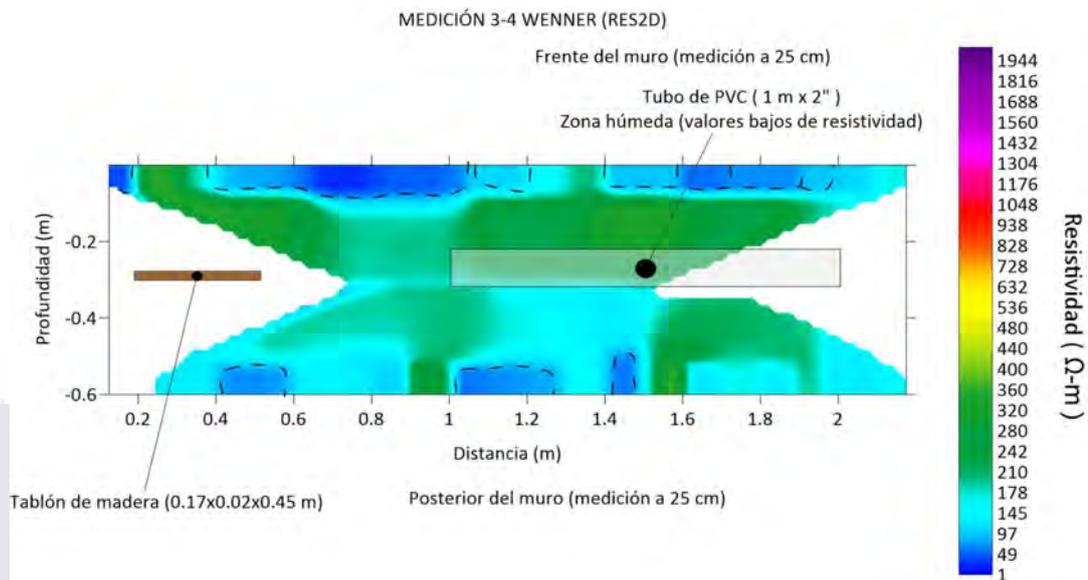


FIGURA 48 Segundo modelo en unión en el muro experimental. Elaboración Propia.

4.2.3 Tercer Modelo

En el último modelo de ETR de esta etapa se realizó una medición automática que lamentablemente no pudo definir un perfil como los anteriores, en cambio solamente se obtuvieron modelos separados con valores de resistividad variadas, sin embargo, denotaron la presencia de elementos diferentes en la parte central del perfil ya que los rangos de resistividades presentan mayor variabilidad respecto a los modelos anteriores. No fue posible la unión entre ambas caras del muro. Los detalles se pueden observar en la figura 52 del anexo A.



FIGURA 49 Sondeo manual sobre el muro experimental. Elaboración Propia.

4.2.4 Aplicación de las pseudo-secciones para el modelo en 3D. Cuarto Modelo.

Como resultado de la aplicación del método de las pseudo-secciones a diferentes alturas del muro, se obtuvo un modelo que muestra diversas anomalías presentes en el muro durante la tercera etapa de las mediciones, correspondientes a un relleno de arena y grava con elementos de contraste de placas de metal y un tubo de PVC. Se elaboró a partir de un arreglo dipolo dipolo, descrito en la metodología de este trabajo.

Para la conformación del modelo final, se hizo uso de diferentes pseudo-secciones a diferentes alturas, que corresponden a los diferentes sondeos realizados, a continuación, se muestran algunas de las pseudo-secciones aplicadas a diferentes alturas, con lo que se muestra también la evolución en los procesamientos hasta llegar al modelo en 3D.

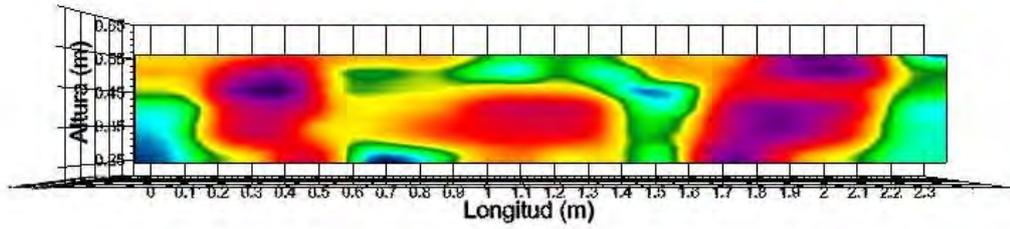


FIGURA 50 Pseudo-sección a una altura de 30 centímetros desde la base.

En la figura 50 podemos observar la pseudo-sección a una altura de 30 centímetros, así mismo a esa altura podemos visualizar los elementos claramente, ya que éstos se colocaron al centro de la altura del muro, logrando la visualización de sus contornos de acuerdo a los colores mostrados.

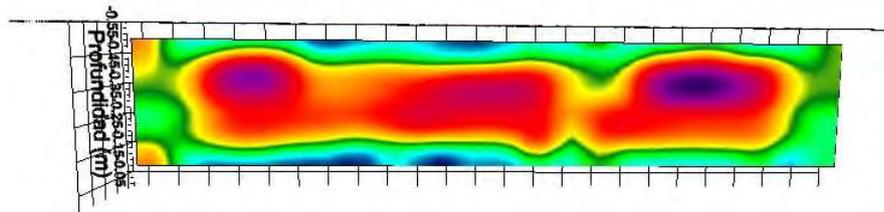


FIGURA 51 Pseudo-sección a una altura de 40 centímetros desde la base.

Diez centímetros arriba de la sección anterior, se encuentra la anterior pseudo-sección, en donde se visualiza en su mayoría el elemento alargado correspondiente al tubo de PVC.

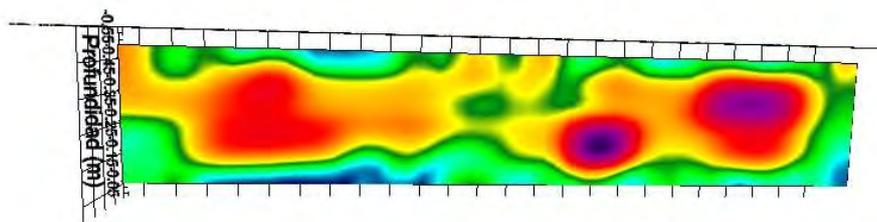


FIGURA 52 Pseudo-sección a una altura de 48 centímetros desde la base.

Finalmente, como parte ilustrativa del proceso de creación de las pseudo-secciones podemos apreciar una sección correspondiente a los 48 centímetros en donde se aprecia el relleno correspondiente a las gravas que rodean los elementos

Tras una serie de aplicación de diferentes filtros para la correcta visualización de los elementos presentes en el muro se obtuvo un modelado descrito a continuación con la figura 50. Durante el modelado para mejorar la visualización de los elementos se optó por la introducción de datos con las dimensiones de los elementos.

Modelo 3D a partir de pseudosecciones

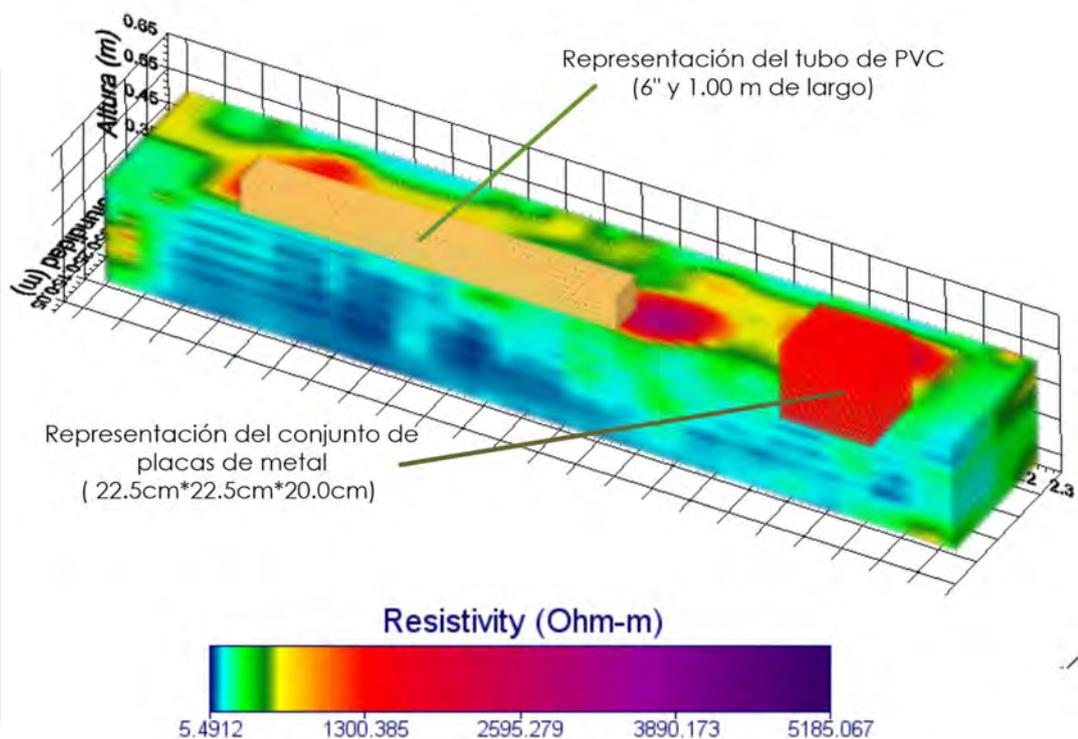


FIGURA 53 Modelo elaborado a partir de pseudo-secciones

En el modelo presentado se puede observar la presencia de las anomalías correspondientes a la tercera etapa de las mediciones, claramente, se aprecia la presencia de las placas de metal en una coloración roja en la escala de resistividades con valores entre los 2000 ohms -metro y a un costado, la presencia de una anomalía que podemos asociar al tubo de PVC en amarillo. Sin embargo, si recordamos el arreglo que se estableció en esta etapa tenemos diferentes capas de material, lo cual resulta en una anomalía mayor al interpretar la existencia de las placas de metal que se extienden

hasta la parte baja del modelo, recordando los valores de resistividad definidos para gravas.

4.3 Aplicación en el puente de San Ignacio

La aplicación final del método de TER se realizó en el puente de San Ignacio durante una de las etapas de su restauración, se realizó mediante un arreglo Dipolo-Dipolo automático dispuesto a lo largo de su calzada en ambos sentidos, aproximadamente a cincuenta centímetros de los parapetos laterales con el hincado de pequeñas varillas y clavos como electrodos colocados en las juntas de la piedra grasa para su aplicación, procurando colocarlos firmemente y reforzándolos con una mezcla de lodo común y separados entre sí cincuenta centímetros. Y traslapando en cada sondeo los últimos seis electrodos de cada medición, una distancia total de 2.50 metros con el principal objetivo de visualizar posteriormente en el procesamiento datos que pudieran llegar a ser faltantes.

El proceso mediante el cual se realizó cada sondeo fue el descrito en el siguiente diagrama. Figura 49.

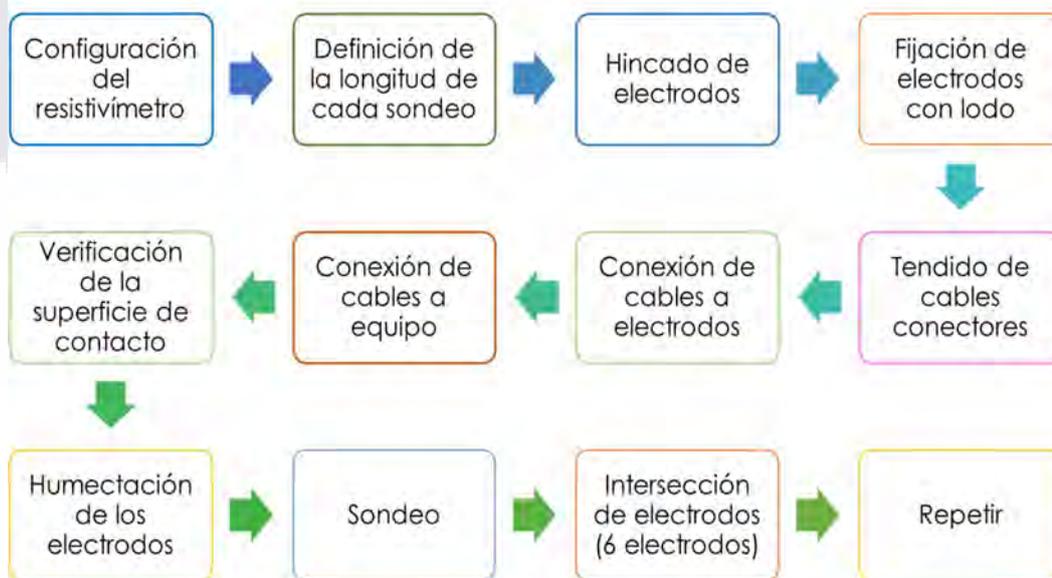


FIGURA 49 Proceso de realización de sondeos en el Puente de San Ignacio. Elaboración Propia.

En total se realizaron veintidós mediciones, que se distribuyeron en once sondeos correspondientes al lado aguas abajo del puente y complementando con otras once en el lado de aguas arriba.

Como lo podemos observar en la figura 53 Llegando a profundizar entre el 20% y 25% de su longitud, un promedio de 2.58 metros y abarcando una longitud de desarrollo de alrededor de 100 metros sobre la calzada con sondeos de 11.50 metros cada uno.

Estos datos pueden corroborarse con la aplicación de la ecuación 3

Longitud de desarrollo del sondeo

$$0.50 \text{ m} * (24 - 1) = 11.50 \text{ m}$$

Profundización de cada sondeo

$$11.50 \text{ m} * 20 \% = 2.3 \text{ m}$$

$$11.50 \text{ m} * 25 \% = 2.875 \text{ m}$$

Promedio

$$\frac{(2.3 \text{ m} + 2.875 \text{ m})}{2} = 2.58 \text{ m de profundización promedio} \quad [Ec. 3]$$

Los principales problemas que se presentaron al momento de la aplicación en el objeto de estudio fueron el hincado de las varillas en la calzada, además de las múltiples irregularidades cercanas como orificios destinados para el drenaje a un costado de la calzada o los parches de material diferente a la piedra grasa presentes en la misma descritas en la siguiente figura 51.

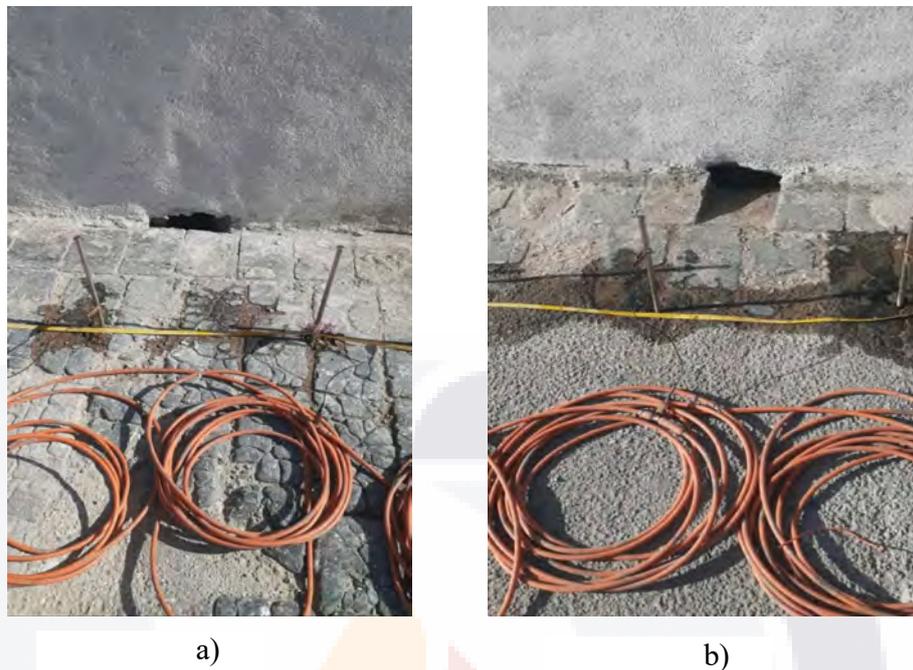


FIGURA 54 Irregularidades presentes en la calzada de San Ignacio. a) 7mo sondeo entre los electrodos 11 y 12. b) 6to sondeo al frente del electrodo 9. Elaboración Propia.

En cada uno de los sondeos realizados se tomó especial cuidado en la dirección del hincado de los electrodos, tratando de conservar una línea paralela entre los electrodos y el parapeto, además del orden de los cables conectores.

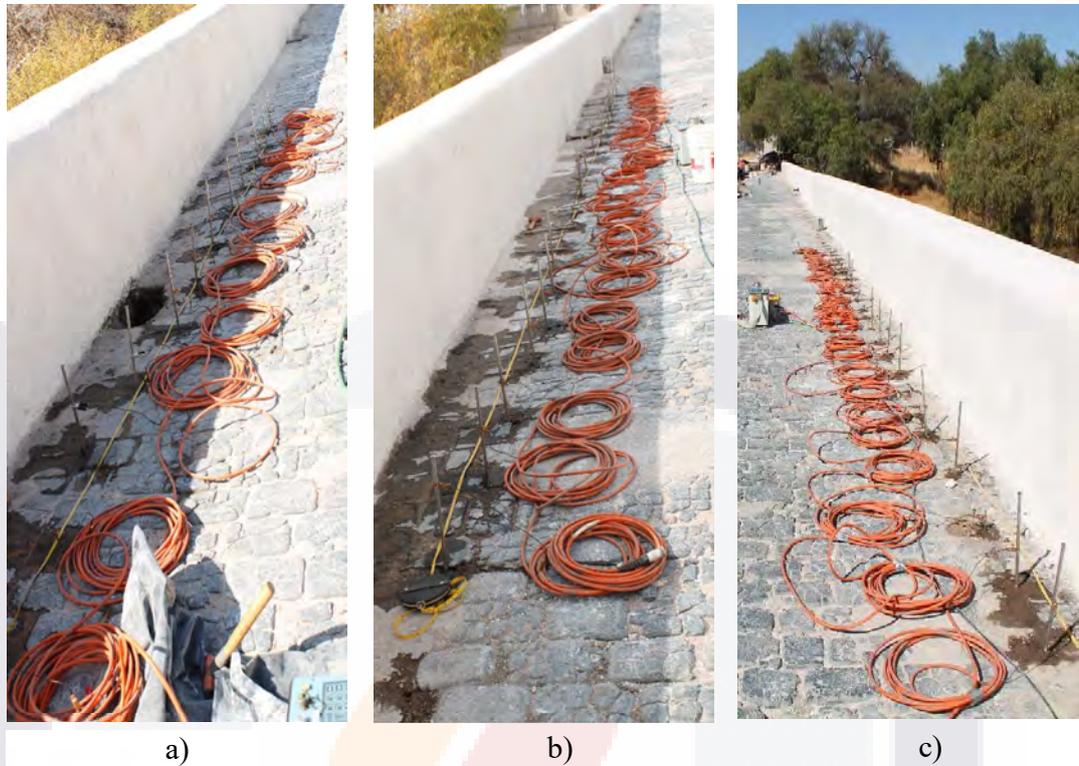


FIGURA 55 Sondeos en San Ignacio a) Sondeo 2 b) Sondeo 3 c) Sondeo 19. Elaboración Propia

Los resultados obtenidos en la aplicación de este método en el Puente de San Ignacio nos dan una idea de la presencia de diferentes humedades en la calzada del puente y se relacionan directamente con la presencia de los drenajes presentes en el lado aguas arriba de la calzada, y en las reparaciones realizadas en años anteriores. Se pueden identificar fácilmente con la siguiente representación en la figura 53.

A continuación, se muestra una tabla 15 con la localización de las principales irregularidades en cuanto a drenajes sobre la calzada del Puente de San Ignacio, y en la tabla 16 se muestran las mediciones tanto aguas arriba y abajo, y la ubicación de los sondeos.

Tabla 14

Recopilación de irregularidades (drenajes) y sondeos en el Puento de San Ignacio.

SONDEO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	OBSERVACIONES	
ELECTRODOS UTILIZADOS	DRENAJE																									
C= CLAVO V= VARILLA																										
AGUAS ABAJO																										
1v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	entre electrodo 18 y 19
2v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	entre electrodo 17 y 18
3v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	entre electrodo 17 y 16 y antes del primer electrodo
4v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	entre electrodo 10 y 11
5v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
6v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	al frente de electrodo 9
7v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	entre electrodo 11 y 12
8v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
9v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	entre electrodos 10 y 11 - 20 y 21
10v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	al frente de electrodo 2
AGUAS ARRIBA																										
11v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
12v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	entre electrodo 21 y 23
13v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
14v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
15v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
16v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
17v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
18c	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	entre electrodo 6 y 7
19c	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
20v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
21c	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-
22v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	-

Nota: Elaboración Propia.

Tabla 15

Localización de los sondeos sobre la calzada

AGUAS ARRIBA			AGUAS ABAJO		
12	inicio	97.23	1	inicio	4.73
	término	85.73		término	16.23
13	inicio	88.23	2	inicio	13.73
	término	76.73		término	25.23
14	inicio	79.23	3	inicio	22.73
	término	67.73		término	34.23
15	inicio	70.23	4	inicio	31.73
	término	58.73		término	43.23
16	inicio	61.23	5	inicio	40.73
	término	49.73		término	52.23
17	inicio	52.23	6	inicio	49.73
	término	40.73		término	61.23
18	inicio	43.23	7	inicio	58.73
	término	31.73		término	70.23
19	inicio	34.23	8	inicio	67.73
	término	22.73		término	79.23
20	inicio	25.23	9	inicio	76.73
	término	13.73		término	88.23
21	inicio	16.23	10	inicio	85.73
	término	4.73		término	97.23
22	inicio	106.23	11	inicio	94.73
	término	94.73		término	106.23

Nota: Elaboración Propia

4.4 Aplicación de la metodología en sitio. Casa Terán

Como parte integral de la aplicación de la metodología establecida en esta tesis, se lograron hacer sondeos en un inmueble de Aguascalientes, Casa Terán, una finca antigua ubicada en el centro de la ciudad, que se ha visto afectada principalmente por humedades dentro de sus principales habitaciones. Se realizaron una serie de mediciones con el principal objetivo de detectar el origen de las diferentes humedades presentes en la parte de la cocina y en un muro exterior correspondiente al segundo patio del lugar. Se aplicaron el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica y el de Radar de Penetración Terrestre en conjunto para detectar anomalías, en específico de humedades y sus trayectorias en paredes y piso de la construcción. En total se realizaron las mediciones plasmadas en la siguiente tabla 16 y 17. Mostrando además un resumen global en la tabla 18.



FIGURA 57 Aplicación de la metodología en Casa Terán

Tabla 16

Resultados de tomografía de resistividad eléctrica en Casa Terán

N°	Ubicación	Sentido	Longitud m	Modalidad sondeo	Altura de medición m	Anomalías
1	Muro interior	horizontal	3.6		4.00	Se localizó una fuente de humedad en la zona central y derecha del muro, proveniente del pozo de agua ubicado en la zona del escenario, ubicado en el primer patio de Casa Terán, que mantiene una marcada trayectoria y se refleja en los cuartos subsecuentes, dañando la pintura y la estructura de los mismos.
2	Muro interior	horizontal	3.6		3.80	
3	Muro interior	horizontal	3.6		3.70	
4	Muro interior	horizontal	3.6	dipolo- dipolo	3.50	
5	Muro interior	horizontal	3.6		3.16	
6	Muro interior	horizontal	3.6		1.50	
7	Muro interior	horizontal	3.6		0.32	
8	Muro interior	vertical cercano a muro	3.6		0.10	Las humedades localizadas provienen de una fuente externa, ya que ese muro se reconstruyó, gracias a una explosión y no hay existencia de tuberías que puedan tener fugas. Es de vital importancia mantener un adecuado mantenimiento para evitar mayores daños.
9	Muro interior	vertical central lámpara	3.6	dipolo- dipolo	0.10	
10	Muro interior	vertical lateral puerta	3.6		0.5	
11	Piso interior	Piso fondo muro	4.09	dipolo- dipolo	0.38	
12	Piso interior	Piso lateral muro	6.1		0.3	No se visualizan humedades o anomalías que afecten a esta zona.

Nota: Elaboración Propia

Tabla 17

Resultados de tomografía de resistividad eléctrica en Casa Terán

N°	Ubicación	Sentido	Zona	Separación electrodos m	Profundiza m	Modalidad sondeo	Altura de medición m	Longitud de medición m	Anomalías
1	Muro exterior	horizontal	lateral derecha	0.15	0.7	dipolo-dipolo	1.40	3.45	
2	Muro exterior	horizontal	central	0.15	0.7	dipolo-dipolo	1.40	3.45	
3	Muro exterior	horizontal	lateral izquierda	0.15	0.7	dipolo-dipolo	1.40	3.45	
4	Muro exterior	horizontal	lateral derecha	0.15	0.7	dipolo-dipolo		3.45	En la zona exterior se localizó una humedad proveniente de la parte superior del muro, específicamente de una fuga de un finaco ubicado en el techo de la finca continua a Casa Terán. La humedad localizada mantiene una trayectoria hacia el centro del muro exterior y es visible en los daños que ha causado en el muro. Gracias al trazado de las líneas de sondeo se pudo ubicar correctamente la ubicación de la zona húmeda más afectada y su trayectoria. Para poder eliminarla es necesario la remoción de la fuga proveniente del finaco y la reparación del muro dañado.
5	Muro exterior	horizontal	central	0.15	0.7	dipolo-dipolo		3.45	
6	Muro exterior	horizontal	lateral izquierda	0.15	0.7	dipolo-dipolo		3.45	
7	Muro exterior	horizontal	lateral derecha	0.15	0.7	dipolo-dipolo		3.45	
8	Muro exterior	horizontal	central	0.15	0.7	dipolo-dipolo		3.45	
9	Muro exterior	horizontal	lateral izquierda	0.15	0.7	dipolo-dipolo		3.45	
10	Muro exterior	horizontal	lateral derecha	0.15	0.7	dipolo-dipolo		3.45	
11	Muro exterior	horizontal	central	0.15	0.7	dipolo-dipolo		3.45	
12	Muro exterior	horizontal	lateral izquierda	0.15	0.7	dipolo-dipolo		3.45	
13	Muro exterior	vertical	lateral faro	0.15	3.6	dipolo-dipolo		3.45	
14	Muro exterior	vertical	lateral faro	0.15	3.6	dipolo-dipolo		3.45	

Nota: Elaboración Propia

Tabla 18

Resultados de radargramas en Casa Terán

N°	Dato	Ubicación	Sentido	Longitud m	Antena utilizada MHz	Profundidad sondeo cm	Altura de medición	Anomalías
1	151	Muro interior	horizontal	2.8	1600	70	3.8	<ul style="list-style-type: none"> * A 20 cm de profundidad marcada anomalía * Desde el 1.10 m hasta los 2.00 m mayor énfasis de la protuberancia a la altura del 1.70 m. * A 20 cm de profundidad marcada anomalía
2	153	Muro interior	horizontal	2.4	1600	70	3.7	<ul style="list-style-type: none"> * Desarrolla irregularidades desde los 25 cm hasta los 75 cm del muro hacia la puerta. * A 20 cm de profundidad marcada anomalía
4	158	Muro interior	horizontal	2.78	1600	70	3.5	<ul style="list-style-type: none"> * Desarrolla irregularidades desde los 25 cm hasta los 75 cm del muro hacia la puerta. * A 20 cm de profundidad marcada anomalía a lo largo de todo el sondeo especialmente antes de los 50 cm y posterior al 1.30 m hasta los 2.80 m.
5	160	Muro interior	horizontal	2.8	1600	70	1.5	<ul style="list-style-type: none"> * Desarrolla irregularidades a todo lo largo de la línea del sondeo dentro de los primeros 20 cm de profundidad.
6	165	Muro interior	horizontal	2.9	1600	70	32.5	<ul style="list-style-type: none"> * Presenta irregularidad a lo largo del sondeo especialmente posteriormente a partir de los 2.5 m de altura.
7	169	Muro interior	vertical-lateral puerta	3.25	1600	70	0.63	<ul style="list-style-type: none"> * Presenta irregularidad posterior a los 2.00 m de altura
8	161	Muro interior	vertical-lateral puerta	3.6	1600	70	0.7	<ul style="list-style-type: none"> * Presenta irregularidad posterior a los 2.00 m de altura
9	167	Piso del Interior muro de fondo		3.8	1600	70	0.38	<ul style="list-style-type: none"> * Presenta anomalías en los extremos cercanos a los muros laterales
10	172	Muro exterior II Patio	horizontal	4.85	1600	70	1.42	<ul style="list-style-type: none"> * Presenta irregularidades especialmente en la parte izquierda del muro

Nota: Elaboración Propia



CAPÍTULO

V

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Tabla 19

Resumen de resultados obtenidos con el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica

No. Medición	Cara modelo	Relleno	Arreglo	Clave	Modalidad	Resistencias de contacto promedio	Rangos del modelo		RMSE	Estado
							menor	mayor		
						kw	W	%		
1	Front	Tepetate	Dipolo Dipolo	AMA1FD	Manual	4.1	24.961	637.781	6.97	Concluso y presente en resultados
2	Back	Tepetate	Dipolo Dipolo	AMA2BD	Manual	3.2	33.607	734.211	7.6	Concluso y presente en resultados
3	Front	Tepetate	Wenner	AMA3FW	Manual	3.8	43.212	212.83	7.4	Concluso y presente en resultados
4	Back	Tepetate	Wenner	AMA4BW	Manual	3.6	56.572	230.374	6.4	Concluso y presente en resultados
5	Front	Tepetate	Wenner	AMA5FWA	Automático	4.5	49.295	634.481	7.2	Inconcluso
6	Back	Tepetate	Wenner	AMA6BWA	Automático	5.7	59.99	1682.9	6.4	Inconcluso
7	Front		Dipolo Dipolo	Testigo 1	Manual	5.7	42.607	1741.033	8.40%	Concluso sin presencia en los resultados
8	Back		Dipolo Dipolo	testigo 2	Manual	6.6	26.443	2811.53	11.80%	Concluso sin presencia en los resultados
9	Front	Arena y grava	Dipolo Dipolo	AMA9FD	Manual	2.8	31.98	1085.46	6.7	Concluso y presente en resultados
10	Back	Arena y grava	Dipolo Dipolo	AMA10FD	Manual	2.6	43.151	753.756	7	Concluso y presente en resultados

Nota: Elaboración Propia

Tabla 20

Resumen de mediciones utilizando el método de GPR

No. Medición	Cara modelo	Relleno	Estado	Clave	Modalidad	Estado
1	Frente	Tepetate	Seco	Dato 114	GPR	Concluso
2	Back	Tepetate	Seco	Dato 115	GPR	Concluso
3	Frente	Tepetate	Seco	Dato 116	GPR	Concluso y presente en los resultados
4	Back	Tepetate	Seco	Dato 117	GPR	Concluso
5	Sobre modelo	Tepetate	Seco	Dato 118	GPR	Concluso
6	Front	Tepetate	Húmedo	Dato 119	GPR	Concluso
7	Back	Tepetate	Húmedo	Dato 120	GPR	Concluso y presente en los resultados
8	Sobre modelo	Tepetate	Húmedo	Dato 121	GPR	Concluso y presente en los resultados
9	Front	Arena y grava	Seco	Dato 135	GPR	Concluso y presente en los resultados
10	Back	Arena y grava	Seco	Dato 136	GPR	Concluso y presente en los resultados
11	Sobre modelo	Arena y grava	Húmedo	Dato 133	GPR	Concluso y presente en los resultados

Nota: Elaboración Propia

5.1 Resultados de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Radar de Penetración Terrestre en muro experimental.

Dentro de esta etapa de sondeos se pueden apreciar los múltiples resultados obtenidos de los cuales divididos por etapas se obtuvieron en general tres modelos a partir de pseudo-secciones, posteriormente la creación de un modelo en 3D con la utilización de electrodos médicos generando una

aplicación más eficiente que con el uso de los electrodos de CPVC, existiendo por lo tanto una evolución en la aplicación del método, apreciable en la representación de los modelos.

Por su parte, la utilización del método de Radar de Penetración Terrestre se relaciona con el método TER al momento de presentar crestas prolongadas, amplitudes cortas y amplias longitudes de onda entre nodos de los radargramas al existir valores altos de resistividad con valores >5000 ohms-m presentando coloraciones moradas en los modelos presentados, especialmente en el modelo 3D, relacionándolo a materiales metálicos, en este caso placas de metal, como se ve en la figura 53.

Con valores relacionados a materiales granulares sueltos como las gravas se presentan ondas constantes en amplitudes y tamaños de cresta, sin embargo, hay valores entre los 1300 y 1700 ohms-m definiendo las trayectorias de este material que rodea a los elementos de contraste (placas de metal y tubo de PVC), esta trayectoria se aprecia muy bien en la figura 53 donde alrededor de la placa de metal se puede observar las coloraciones rojas que rodean al punto morado correspondiente al metal. Hablando de los elementos de contraste como lo fueron los tubos de PVC en el experimento, la mayoría presentó valores de resistividad cercanos a los 600 ohms-m en coloraciones amarillas y en los radargramas se ven representados con grandes amplitudes de onda, periodos y longitudes de onda cortos además de nodos que se cruzan entre las series de ondas y crestas constantes que se pueden visualizar. Finalmente, al presentarse humedades en todos los perfiles analizados se pueden apreciar resistividades >50 ohms-m relacionados en los radargramas con periodos y longitudes de onda cortos y constantes además de amplitudes largas, y la definición de elementos de riolita y morteros hasta valores <180 , además de la presencia de valles pronunciados al momento del choque entre dos diferentes materiales granulares como la grava y la arena.

5.2 Resultados de Tomografía de Resistividad Eléctrica en Puente de San Ignacio.

En la aplicación del método en el Puente de San Ignacio se pudieron definir hilos de humedad relacionados a los parches de mortero y las obras de drenaje existentes antes de la restauración, esto se puede corroborar en la siguiente figura 59 en donde se aprecia una posible fractura de la capa de calzada que proyecta en el relleno un fino rastro de humedad que deriva en el drenaje del mismo puente, pero que parte de una zona alejada al punto correspondiente a las gárgolas del puente. Derivado de los trabajos de excavación y remodelación del puente, estas humedades y oquedades se pudieron tratar, logrando así un mejor mantenimiento a la estructura. En el anexo D se adjunta un plano de la calzada del puente de San Ignacio en donde se aprecian las múltiples irregularidades (baches, rellenos de mortero, fracturas) y su relación con las zonas húmedas y oquedades. En la siguiente figura se puede apreciar el tramo comprendido entre los ejes A y B de la calzada del puente de San Ignacio en donde se muestra uno de los múltiples hilos de humedad presentes en la calzada, y con la aplicación del método TER se lograron identificar una zona de humedad crítica por debajo del nivel de calzada, que si se relaciona con las irregularidades que la calzada presenta se puede relacionar con fracturas entre los bloques procedentes de fundición y cuarteaduras entre la unión de los mismos., representado en la siguientes figuras 58 y 59.



FIGURA 58 Irregularidades sobre la calzada del puente de San Ignacio

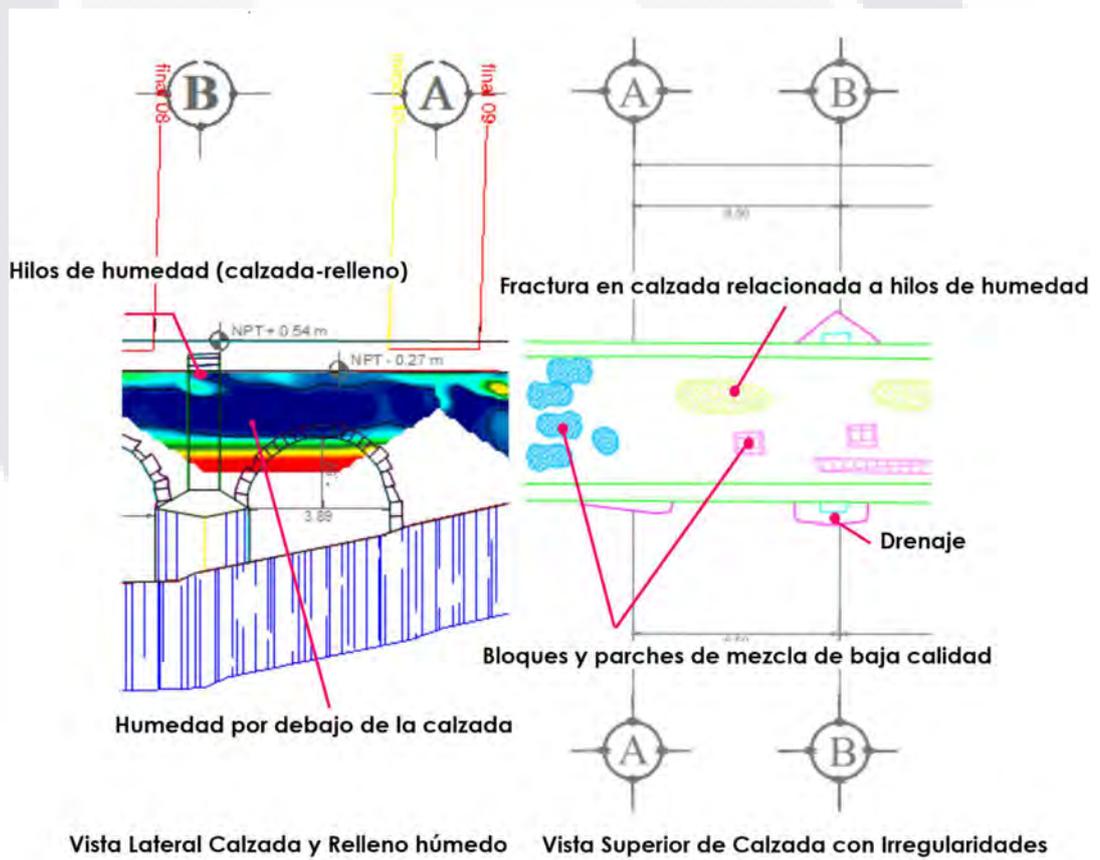
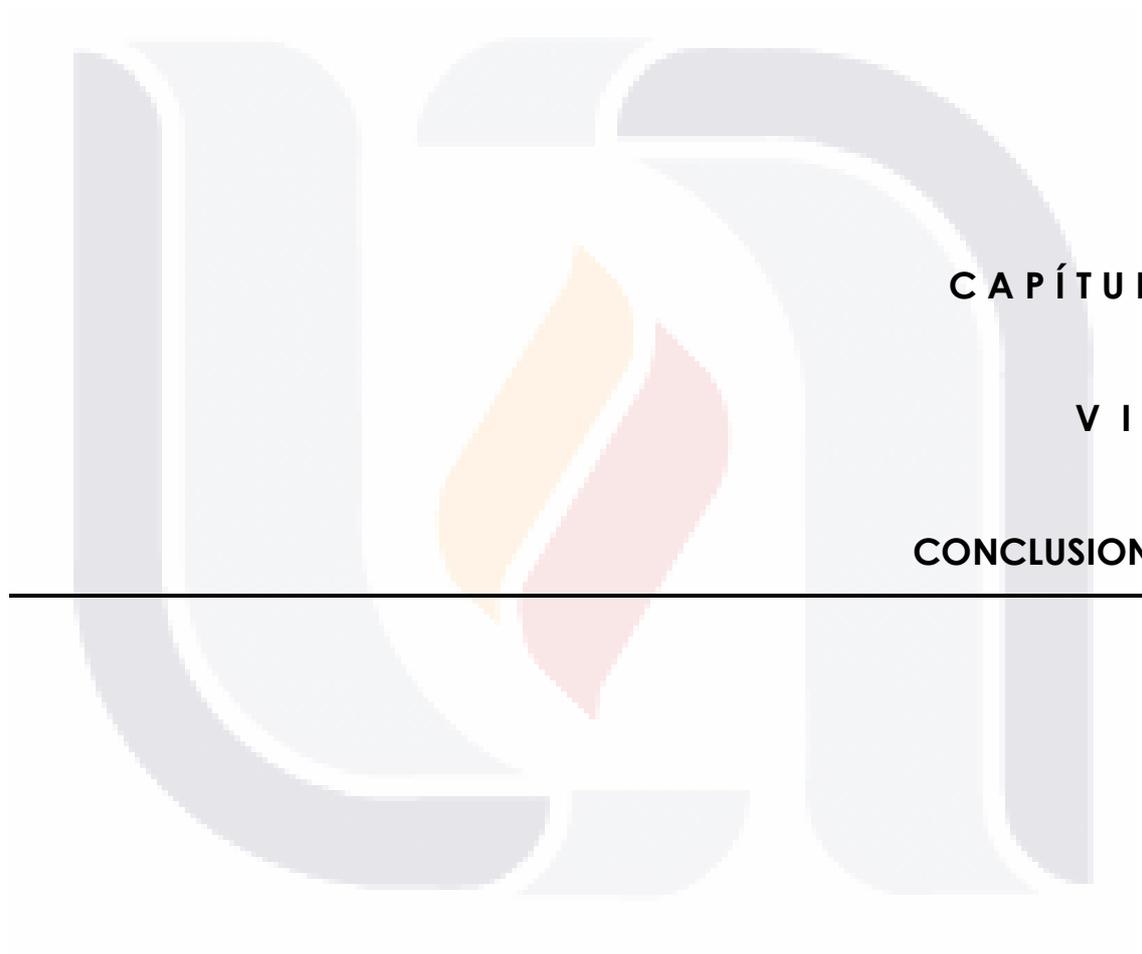


FIGURA 59 Cortes del Puente de San Ignacio tramo entre ejes A y B Zona húmeda

5.3 Resultados de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Radar de Penetración Terrestre en Casa Terán.

Derivado de la aplicación de la metodología en este inmueble se obtuvieron diversas irregularidades, principalmente atribuidas a humedades definidas en las tablas 16, 17 y 18 de este documento.





CAPÍTULO

V I

CONCLUSIONES

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones Generales

El cuidado y protección al patrimonio construido cada día es más relevante para los gobiernos actuales, y el desarrollo y adecuación de los diferentes métodos de prospección que puedan determinar el estado de una estructura como lo son el método de resistividad eléctrica y el método de radar de penetración terrestre va tomando paso en nuevos ámbitos de estudio, como muestra la arqueofísica que puede conjuntar estos métodos mencionados para poder adaptarlos en diferentes edificios históricos, resultando en sondeos exitosos dada su alta efectividad demostrada en otros diferentes investigaciones en inmuebles, especialmente aquellos en los que su composición de mampostería permiten un análisis profundo de los rellenos que lo conforman determinando sus características físicas mecánicas y geométricas.

La aplicación de la combinación del método de tomografía de resistividad eléctrica y el método de radar de penetración terrestre es una efectiva alternativa al momento del estudio de una estructura, debido a que pueden complementarse el uno con el otro. Mientras el método TER nos ofrece definición en las estructuras horizontales y verticales presentes en un relleno, el método de GPR nos es de ayuda al momento de la delimitación de fracturas y huecos, relacionando ambos métodos en la retroalimentación de sus deficiencias individuales, dando como resultado modelos más completos, precisos y que nos da un panorama de la presencia de anomalías como oquedades o humedades e inclusive sus trayectorias.

A decir por el Arq. Jorge Villanueva del INAH/AGS, estas intervenciones son necesarias e indispensable su aplicación en edificios patrimoniales, ya que parte de la conservación de monumentos, está la fase de investigación por medios NO invasivos y con ello permite tener certeza en el diagnóstico y eficiencia en los recursos económicos para su intervención.

Un aspecto importante en la aplicación del método TER es la versatilidad de las mediciones con electrodos útiles para electro-estimulación, ya que nos permite el análisis en sentido vertical u horizontal de la estructura, otorgando resultados prometedores y de potencial aplicación en otras diversas estructuras. Sin embargo, continúan siendo deficientes debido a que su vida útil es poca y pueden llegar a ser costosos.

Partiendo del punto del mejoramiento de los electrodos, queda a considerar la adaptación de los mismos y reforzar su utilización con elementos externos, como lo es la aplicación de una solución salada o geles para mejorar las resistencias de contacto registradas por el equipo del resistímetro, que derivarán en una disminución en los valores de los errores que los modelos puedan llegar a presentar. Al mejorar las resistencias de contacto se obtienen mejores datos por lo tanto mejores modelos.

La metodología presentada nos da un panorama de lo que podría llegar a ser el desarrollo de la mencionada arqueofísica en Aguascalientes, analizando las estructuras desde su punto constructivo hasta la situación actual de la misma, debido a los resultados que pueden obtenerse, como lo son la definición de las mamposterías y rellenos empleados en su construcción dadas las características propias de los materiales.

Una deficiencia al momento de la aplicación de la metodología fue la falta de control en las variables que pueden intervenir en su análisis, las cuales pueden ser tan sencillas como la temperatura a la que se encuentra expuesta la estructura, por lo que llevar un control de las mismas es una tarea de mayor control.

Gracias a esta investigación fue posible caracterizar mediante los valores resistivos de los materiales a algunos de los principales elementos con los que se puede llegar a construir en la región, como lo es una piedra ígnea de tipo riolítica, además de confirmar sus valores dentro de la literatura consultada.

Al momento de la aplicación del método TER en las construcciones analizadas se pudieron definir las estructuras de mampostería internas de las mismas y

dependiendo del arreglo y condiciones aplicadas pudieron dar una mejor definición de sus elementos.

Un acierto que se destaca dentro de la investigación fue la confirmación de los materiales presentes en el Puente de San Ignacio, objeto de estudio de esta investigación, que gracias a la restauración activa se pudo definir tanto en el estudio realizado gracias a los valores de resistividad como en la evidencia física la presencia de una calzada de piedra bola, que antiguamente era la superficie original que cubría de extremo a extremo la calzada del puente. La calzada presentaba una capa de alta resistividad aproximadamente una capa de 17 centímetros de espesor, lo cual corresponde directamente a la capa de piedra grasa, producto de la fundición que dada su naturalidad con alta concentración de metales nos arroja altos valores resistivos sin embargo pasada esta capa se presentan altos valores de humedad presentes en la calzada con valores menos resistivos en un aproximado de 10 centímetros de espesor, atribuidos a la capa de piedra bola, original calzada, posterior a esta capa tenemos valores resistivos correspondientes a rellenos granulares que van desde los 50 centímetros por debajo de la capa analizada hasta llegar a los arcos que comprenden valores correspondientes a rellenos granulares como lo son tepetates, confirmándolo con los valores resultantes de la primera etapa de esta investigación.

El reforzamiento del conocimiento sobre una estructura mediante la aplicación de esta metodología, arrojan las variables necesarias para llevar a cabo un proceso de evaluación que puede terminar en un exitoso plan de restauración, debido a que nos guía en la detección de posibles anomalías que puedan llegar a dañar parte o una totalidad del patrimonio edificado.

6.2 Conclusiones Particulares

Al momento de utilizar las variables de diferentes rellenos granulares se permitió identificar la variedad que puede existir en los rellenos pertenecientes a diferentes construcciones, inclusive, pasando por aquellos rellenos en paredes o muros cortos. Una ventaja fue el control de los mismos rellenos dentro del muro experimental.

La construcción del muro experimental, además de permitir la aplicación de los métodos permitió la identificación de los métodos constructivos al momento de los sondeos, debido a los resultados obtenidos en los sondeos, especialmente en los testigos. Diferenciando además entre una situación con un relleno homogéneo con alguna variable como la humedad, y con aquellos rellenos granulares gruesos en donde el comportamiento de los sondeos describió la presencia de ese tipo de material o los elementos de contraste.

Aplicando la metodología desarrollada tanto en el caso de estudio del puente de San Ignacio como en Casa Terán se pudieron identificar anomalías relacionadas a humedad y oquedades, por su parte en Puente de San Ignacio se lograron identificar hilos de humedad existentes relacionadas directamente a las obras del drenaje y parches de morteros sobre la calzada, demostrando múltiples hilos de humedad y oquedades en la calzada, que afortunadamente hoy en día ya se ha restaurado. Por otro lado, en Casa Terán también se lograron identificar anomalías relacionadas a trayectorias de humedad presentes provocadas por una fuente externa de humedad que afectaron en menor medida los muros pertenecientes a esta construcción.

Hablando nuevamente sobre la situación anterior a la restauración del puente de San Ignacio, podemos afirmar que gracias a las múltiples etapas por las que pasó en su construcción y mantenimiento, es que se generaron ciertas oquedades y humedades por debajo de la calzada, ya que la utilización de parches de mortero y bloques de baja calidad sobre los baches e irregularidades de la calzada provocaron algunas humedades en las zonas más cercanas a los drenajes del puente, además de la falta de

mantenimiento y el alto tráfico que se mantenía hasta los meses pasados previos a la restauración. Con el inicio de los trabajos de restauración y el retiro de la capa de bloques de la calzada se pudo comprobar el nivel original de la calzada y la existencia de los hilos de humedad que afectaron en un pequeño grado a la estructura del puente.

6.3 Nichos de Investigación

En este trabajo a pesar de los esfuerzos que se llevaron a cabo para su realización existen algunos campos en donde pueden desarrollarse a mayor detalle algunos puntos a continuación descritos:

- I. Una de las principales deficiencias en la presente fue la falta de control en la compactación de los rellenos analizados, dado que esta es una de las variables que pueden llegar a modificar los valores de resistividad en una estructura, además del control de la humedad presente en los rellenos analizados, a pesar de que se realizaron experimentos con la aplicación de agua, ésta no fue medida, por lo que se pueden mejorar las condiciones del sondeo.
- II. Lograr la aplicación del método en diferentes estructuras en especial puentes nos abre el panorama a los diferentes comportamientos de los sondeos frente a diferentes escenarios como lo son los materiales de construcción, la zona de ubicación y las condiciones del inmueble. Por lo que se recomienda continuar la aplicación de la metodología en diferentes lugares para ir nutriendo el catálogo de posibilidades a encontrarse, además de incrementar la variabilidad en los rellenos utilizados en el modelo experimental, con el propósito de identificar valores propios de cada uno, ampliando el catálogo de materiales caracterizados.
- III. Contar con una mayor asesoría al momento de la utilización del GPR puede llegar a otorgar un mejor conocimiento del mismo, así como la utilización de los diferentes filtros incorporados en el sistema del equipo.

Aunar en la aplicación de los filtros utilizados en el procesamiento e interpretación de las ondas resultantes en los radargramas.

La utilización de la tecnología como los métodos TER y GPR para la elaboración de diagnósticos del patrimonio cultural edificado, abre las puertas para unir esfuerzos entre la academia y las instituciones encargadas del resguardo, protección, conservación y restauración de monumentos en el estado, siendo esta investigación un parteaguas a nuevos estudiantes en las investigaciones en este ramo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguayo, R. (27 de marzo de 2020). *Twitter*. Obtenido de <https://twitter.com/RSpitfire/status/1243520037635395585/photo/1>
- Ahmed, A., & Saulaiman, W. (2001). Evaluation of groundwater and soil pollution in a landfill area using electrical resistivity imaging survey. *Environmental Managment*, 5, 28, 655-663.
- Alvarez, A. (2003). *Geofísica Aplicadas en los proyectos básicos de ingeniería civil*. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Angelis, D., Tsourlos, P., Tsokas, G., Vargemezis, G., Zacharopoulou, G., & Power, C. (2018). Combined application of GPR and ERT for the assessment of a wall structure at the Heptapyrgion fortress (Thessaloniki, Greece). *Journal of Applied Geophysics*, 47.
- Arcaiza, D. (2012). *Prospección Geofísica con Metodología Georradar*.
- ArcGeek. (22 de mayo de 2018). ¿Qué es el error cuadrático medio RMSE? Ecuador.
- Arrubarrena, M. (2010). *Caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos usando tomografía de resistividad eléctrica*. (Tesis de pregrado), Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Azkarate, A., Ruiz de Ael, M. J., & Santana, A. (2003). *El Patrimonio Arquitectónico*. Obtenido de <https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/7097/7128/7129/83491.pdf>

- Basañez Loyola, A. (12 de octubre de 2018). *La historia del puente de San Ignacio*. Obtenido de <https://www.liderempresarial.com/el-puente-de-san-ignacio/>
- Cardarelli, E., De Donno, G., Oliveti, I., & Scatigno, C. (2018). Three-dimensional reconstruction of a masonry building through electrical and seismic tomography validated by biological analyses. *Near Surface Geophysics*, 12.
- Chávez, R. E., Tejero, G., Cifuentes, E., Hernández, D., & Aguilar. (2015). Imaging Fractures beneath a Residential Complex Using Novel 3-D Electrical Resistivity Arrays. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 219-233.
- Cifuentes-Nava, G., Cabrer-Torres, R., & Tejero-Andrade, A. (2017). Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D en la catedral de Morelia, México. *Arqueología Iberoamericana*, 31.
- Clickmica. (2 de abril de 2021). *Electrólisis*. Obtenido de <https://clickmica.fundaciondescubre.es/conoce/descubrimientos/electrolisis-del-agua/>
- Dalmau, A., Vega, J. M., Vara, G., & Díez, J. A. (2019). Caracterización de materiales y recubrimientos. Barcelona, Molins de Rei, España.
- Díaz, E. P. (2010). *Implementación del código ZONDRES2D para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2D*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

EGYES. (2019). *Exploración geofísica y estudios del subsuelo del centro S.A.*

de C.V. Obtenido de *Prospección Geofísica - Método Eléctrico:*

Recuperado de : <https://www.egyes.mx/blog/>

El Universal. (15 de julio de 2020). *Rescata gobierno de Aguascalientes el*

Antiguo Puente de San Ignacio. Obtenido de

<https://www.eluniversal.com.mx/estados/rescata-gobierno-de-aguascalientes-el-antiguo-puente-de-san-ignacio>

ePM. (Mayo de 2008). *Medida de resistividad eléctrica del suelo.* Obtenido

de

https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/proveedores_y_contratistas/normas_y_especificaciones/normas_aereas/grupo_6_Normas_de_montajes_complementarios/RA6-014MEDIDADERESISTIVIDAD_V3.pdf

Esparza Jimenez, V. A., Reyes Rodriguez, A., & Rodriguez Herrera, I. M. (2020).

Diez años de Patrimonio Mundial.El camino Real de Tierra Adentro en Aguascalientes. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Estudiantes de Geofísica . (2009). *Anomalía Geofísica.* Obtenido de

<http://estugeofisica.scienceontheweb.net/about-geophysics/anomalia-geofisica.html>

Fowler, R. J. (1994). *Electricity: Principles and Applications.* Barcelona:

Reverté.S.A.

Galvez F.J.; Llopis A.; Rubio C. (1998). *Curso teórico práctico de fundamentos*

de la ingeniería. Madrid: Tebar Flores.

García, J. (25 de enero de 2021). Facebook. Obtenido de

<https://www.facebook.com/photo?fbid=2692076051102701&set=gm.3088749831226061>

Gata , C. (2012). *Gama Geofísica Georadar GPR*. Obtenido de Georadar

GPR: <http://www.gama-geofisica.com/version16/code/htmldocs/es/metodosgeofisicos/4-georadar-gpr.html>

Geoelec. (22 de marzo de 2021). *Servicios relacionados*. Obtenido de

<https://www.geoelec.com.mx/georadar-de-penetracion-GPR.html>

Geología . (2018). *Prospección Geofísica* . Obtenido de

<https://post.geoxnet.com/glossary/prospeccion-geofisica/>

Georadar Discover. (2019). *Que es un Georadar GPR?* Obtenido de

<https://georadardiscover.com/2016/08/24/uso-del-georadar-en-cenotes/>

GEOTEM. (2016). *INGENIERÍA S.A. de C.V. Georadar de penetración Terrestre*.

Obtenido de <http://www.geotem.com.mx/electromg7.php>

Gobierno del estado de Aguascalientes. (2019). *Viva Aguascalientes*.

Obtenido de Viva Aguascalientes:

<http://vivaaguascalientes.com/fundacion-de-aguascalientes/>

Griem-Klee, S. (2016). *Apuntes Exploraciones Mineras Métodos eléctricos* .

Obtenido de Apuntes Geología :

<https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/070elect.htm>

Hermosillo, H. (22 de Noviembre de 2015). En latente riesgo de colapsar

puente de san ignacio: UAA La Jornada Aguascalientes. *La Jornada*

Aguascalientes. Obtenido de <https://www.lja.mx/2015/11/en-latente-riesgo-de-colapsar-puente-de-san-ignacio-uaa/>

Hermosillo, H. (27 de Diciembre de 2017). Proyectan puente alternativo al del antiguo camino a San Ignacio . *La jornada Aguascalientes*.

IArtificial.net. (10 de octubre de 2020). Error Cuadrático Medio para Regresión. España.

INAH. (12 de Abril de 2012). <https://inah.gob.mx/>. Obtenido de Aplican novedoso método de exploración arqueológica: <https://inah.gob.mx/boletines/1757-aplican-novedoso-metodo-de-exploracion-arqueologica>

INSTITUTO NACIONAL DE BELLAS ARTES Y LITERATURA. (2021). *INBAL* . Obtenido de INMUEBLE: <https://inba.gob.mx/transparencia/inmuebles>

Klarica, S. (22 de Marzo de 2017). *Introducción a la Prospección Geofísica* . Obtenido de Servicio Geológico Mexicano :

<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Geofisica/Introduccion-geofisica.html>

Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas. (16 de febrero de 2018). Sección III. (Art. 28). Ciudad de México, México.

Loke. (2018). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Loke, M. F. (1997). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Malaysia.

- Macchioli Grande, F. S. (26 de marzo de 2015). *Prospección electromagnética por fuentes controladas. (Tesis para obtener el grado en Pregrado)*, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Munuera Flores, N. (2016). *Análisis de clutter en imágenes de radar para detectar cambios geológicos superficiales que puedan afectar a la estructuras y edificaciones*. Barcelona: UPC.
- Orellana, E. (1966). *Sondeos Eléctricos Verticales sobre terrenos estratificados*. Madrid: Interciencia.
- Orellana, E. (1974). *Prospección Geolétrica por Campos Variables*. Paraninfo Ltd 570 pp.: Madrid.
- Orellana, E. (1982). *Prospección Geolétrica por Campos Variables* . Paraninfo Ltd, 578 pp.: Madrid.
- Padilla, R. (2017). *Desarrollo y adaptación de técnicas de caracterización física de sistemas constructivos en edificios patrimoniales con métodos no destructivos para la conservación del patrimonio histórico* . (Tesis para obtener el grado de doctor), Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.
- Prego Martínez, F. J., Nieto Matarranz, L. A., & Solla Carracelas, M. (2017). VII Congreso ACHE. *Técnicas de inspección GPR en construcción: Aplicación Android para el procesado de señal*, (pág. 11). Coruña.
- Prego Martínez, F. J., Nieto Matarranz, L. A., & Solla Carraceras, M. (2017). *Técnicas de inspección GPR en construcción. Aplicación Android para el procesado de señal*. VII CONGRESO DE ACHE (pág. 11). Coruña: ACHE.

Ramos, A. (2012). Clasificación morfológica de los rellenos en el trasdós de bóvedas de fábrica. *Informes de la construcción*, 480.

Real Academia Española. (22 de marzo de 2021). *Edificar*. Obtenido de <https://dle.rae.es/edificar#6FrBP4Q>

Real Academia Española. (22 de Marzo de 2021). *Patrimonio*. Obtenido de <https://dle.rae.es/patrimonio>

Reyes, J. A., Barías, J. L., & Pinilla, G. (2019). *Introducción a la prospección geofísica*. Obtenido de *Introducción a la prospección geofísica*: <http://www.geofisica.cl/>

Rodrigo Molina, G. A. (2004). *Sistema Automático para Tomografía Geoeléctrica*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Ruelas Gómez, R. (5 de septiembre de 2011). *Sistemas de puesta a Tierra. Teoría, diseño medición y mantenimiento*. Obtenido de <https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html>

Seippel, R. (1977). *Fundamentos de Electricidad*. Barcelona: Reverté S.A.

Sheriff, R. E. (2001). Seismic Resolution: a key element. *Search and Discovery*.

Significados. (2013). *Conductividad Eléctrica*. Obtenido de <https://www.significados.com/conductividad-electrica/>

Skoog, D., & Leary, J. (1996). *Introducción a las técnicas de caracterización de materiales*. Obtenido de *Análisis Instrumental*: http://ocw.uc3m.es/cursos-archivados/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Apuntes_Introduccion_a_las_Tecnicas_de_Caracterizacion.pdf

SMC. (2019). *Soluciones para Pruebas de Resistencia de Contacto*. Obtenido de <https://smcint.com/es/prueba-de-resistencia-de-contacto/>

Soto Zamora, M. Á. (2017). El puente «San Ignacio»: testigo vivo del auge y caída de la Compañía de Jesús en la nueva España. *El puente «San Ignacio»: testigo vivo del auge y caída de la Compañía de Jesús en la nueva España*, (pág. 7). Donostia San Sebastian España.

Soto Zamora, M. Á. (2017). Integración de las obras de infraestructura patrimonial al tejido urbano de las ciudades modernas. (Tesis de Doctorado), Universidad Autónoma de Aguascalientes , México .

SPTM CIMEMOR. (Febrero de 2007). *Resistividad del terreno* . Obtenido de <http://www.totalground.com/archivos/Capacitacion/Conceptos%20Generales/Info%20Adicional/RESISTENCIA-RESISTIVIDAD.pdf>

Tejero-Andrade, A., Argote-Espino, D. L., Cifuentes-NAva, G., Hernandez-Quintero, E., Chávez, R. E., & García-Serrano, A. (2017). Illuminating the interior of Kukulcan's Pyramid, Chichén Itzá, Mexico, by means of a non-conventional ERT geophysical survey. *Journal of Archeological Science*, 11.

Tsokas, G. N., Diamanti, N. D., Vargemezis, G., Tsourlos, P. I., Stampolidis, A., & Raptis, K. T. (2013). Geophysical Prospection at the Hamza Bey (Alkazar) Monument Thessaloniki, Grecia. *Mediterranean Archeology and Archaometry*, 12.

Tsokas, G., Kim, J., Tsourlos, P., Angistalis, G., Vargemezis, G., Stampolidis, A., & Diamanti, N. (2015). Investigating Behind the Lining of the Tunnel of

Eupalinus in Samos (Greece) using ERT and GPR. *Near Surface Geophysics*, 13, 571-583.

UNESCO. (2019). *Patrimonio cultural*. Obtenido de

<https://es.unesco.org/fieldoffice/santiago/cultura/patrimonio#:~:text=Con%20la%20Convenci%C3%B3n%20de%201972,pir%C3%A1mides%20de%20Egipto%2C%20la%20Gran>

Unit, H.-G. a. (22 de marzo de 2021). *Georrádar*. Obtenido de

<https://www.hydrogeophysicsndt.com/georradar/>

Urbieta, J. (2009). Evaluación de las técnicas de adquisición de datos 2D y

3D con tomografía de. (Tesis de maestría), Universidad Nacional Autónoma de México , México .

Victoria, A. (4 de diciembre de 2020). *Así es como se restaurará el Antiguo*

Puente de San Ignacio. Obtenido de Lider Empresarial :

<https://www.liderempresarial.com/asi-es-como-se-restaurara-el-antiguo-puente-de-san-ignacio/>

Villanueva Clavel, J. (diciembre de 2020).

Zainal Abidin, M. H., Ahmad, F., Saad, R., & Wijeyesekera, D. (2011).

Application of Geophysical Methods in Civil Engineering. *Application of Geophysical Methods in Civil* (pág. 13). Malaysia: Malaysian

Technical Universities International Conference on Engineering and

Technology. Obtenido de

https://www.researchgate.net/profile/Mohd_Hazreek_Zainal_Abidin/publication/216175351_Application_of_Geophysical_Methods_in_Civil_Engineering/links/0912f513f272e9a6f4000000.pdf

Zamora Martinez, R. A. (marzo de 2011). Estudio geológico de la parte central del acuífero actopan -Santiago de Anaya, Hidalgo. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México .



ANEXOS

Anexo A Mediciones correspondientes al sondeo automático.

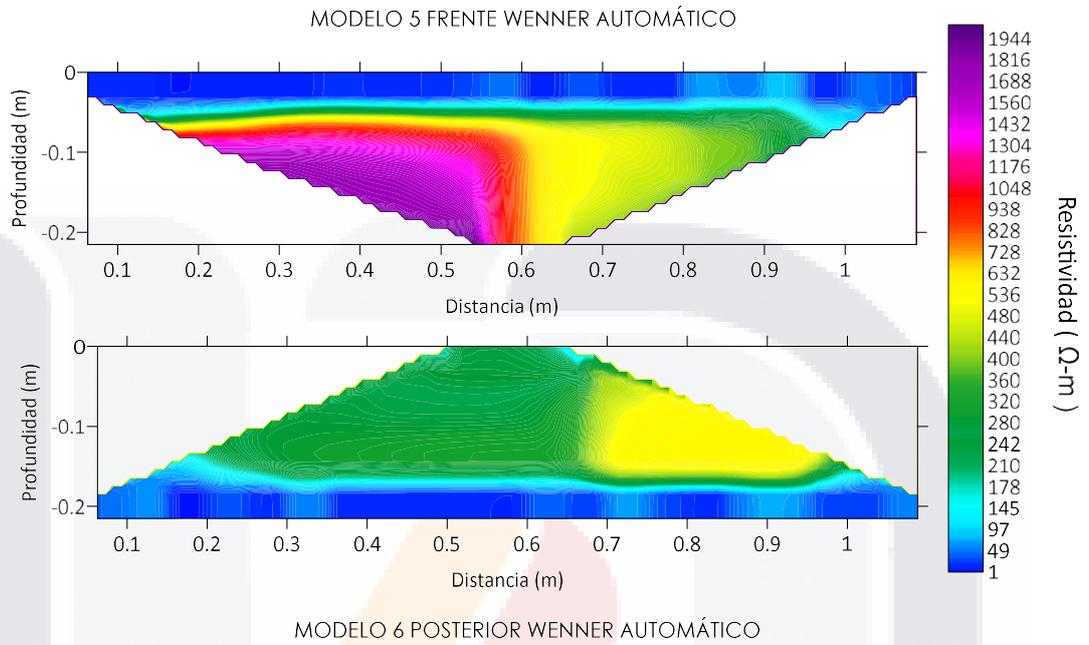


FIGURA 60 Modelo 5 y 6 realizados en el muro experimental.

Anexo B Sondeos de GPR realizados en muro experimental.

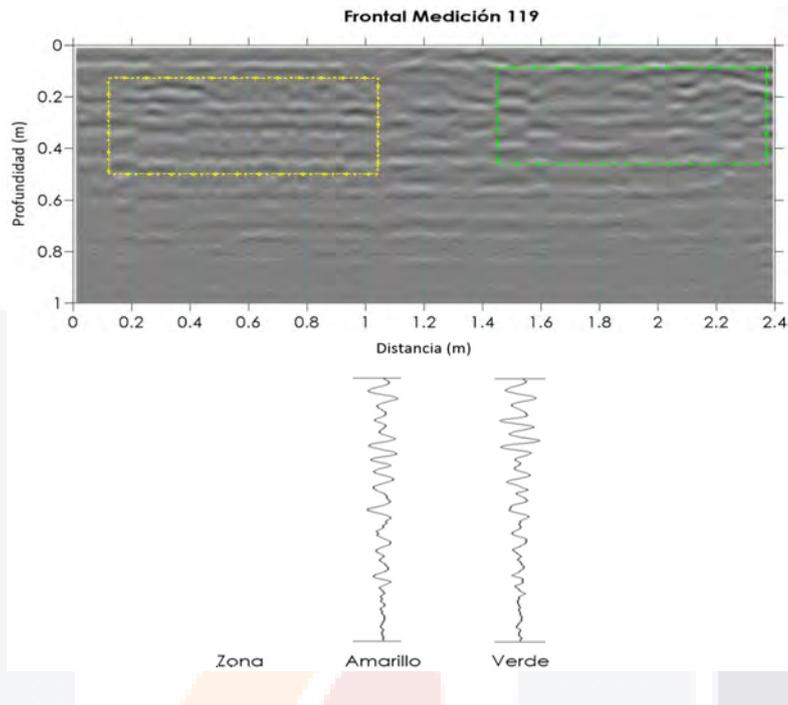


FIGURA 61 Sondeo 119. Primera etapa. Elaboración Propia

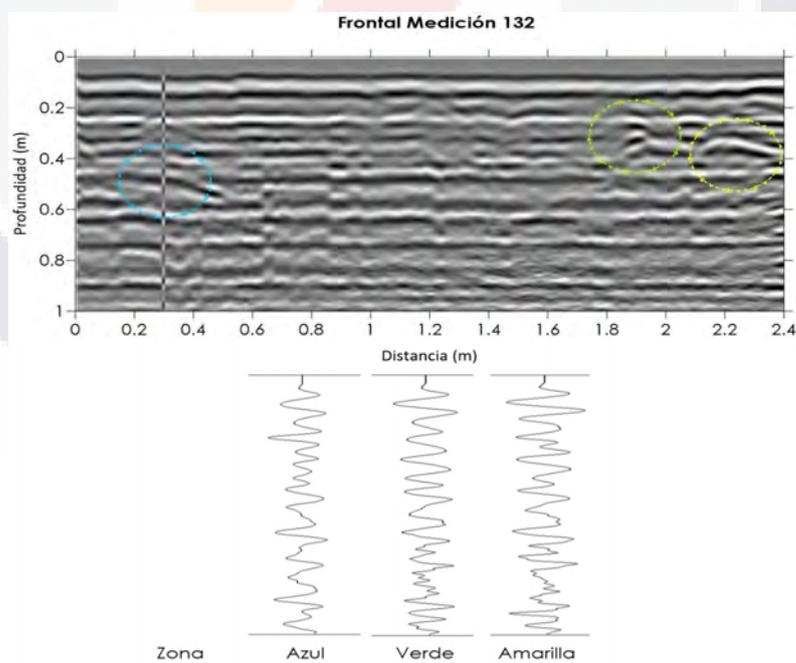
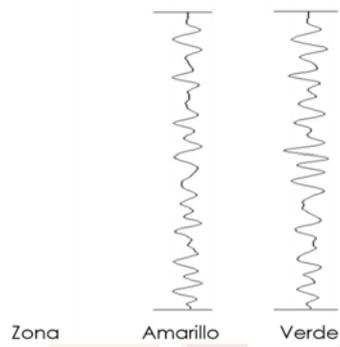
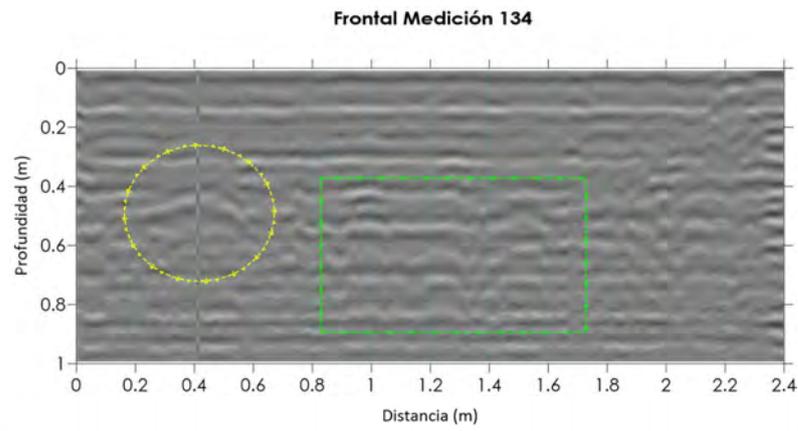


FIGURA 62 Sondeo 132. Tercera etapa. Elaboración Propia.



Anexo C Radargramas correspondientes a sondeos en Casa Terán

MURO INTERIOR- DAT 0151

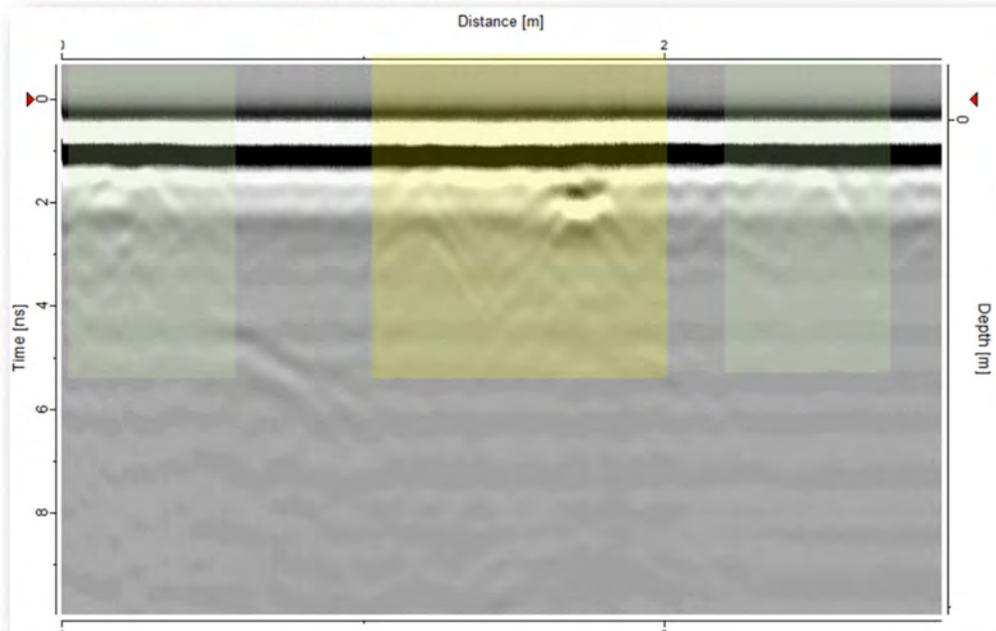


FIGURA 64 Radargrama Casa Terán - Dato 151

MURO INTERIOR- DAT 0153

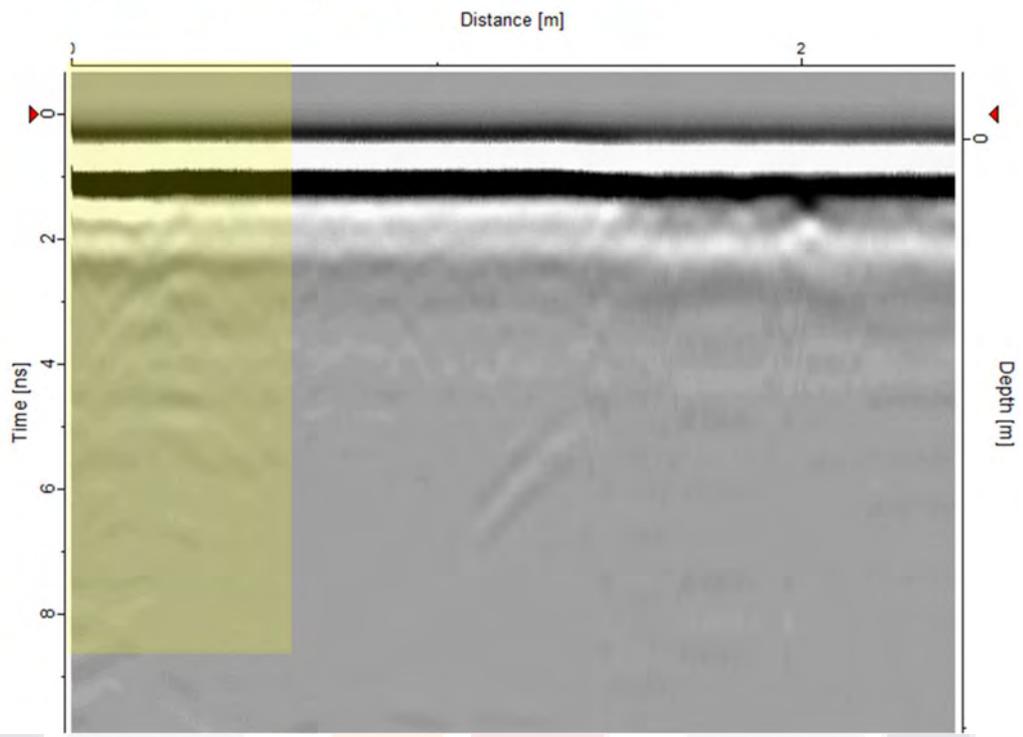


FIGURA 66 Radargrama Casa Terán - Dato 153

MURO INTERIOR- DAT 0158

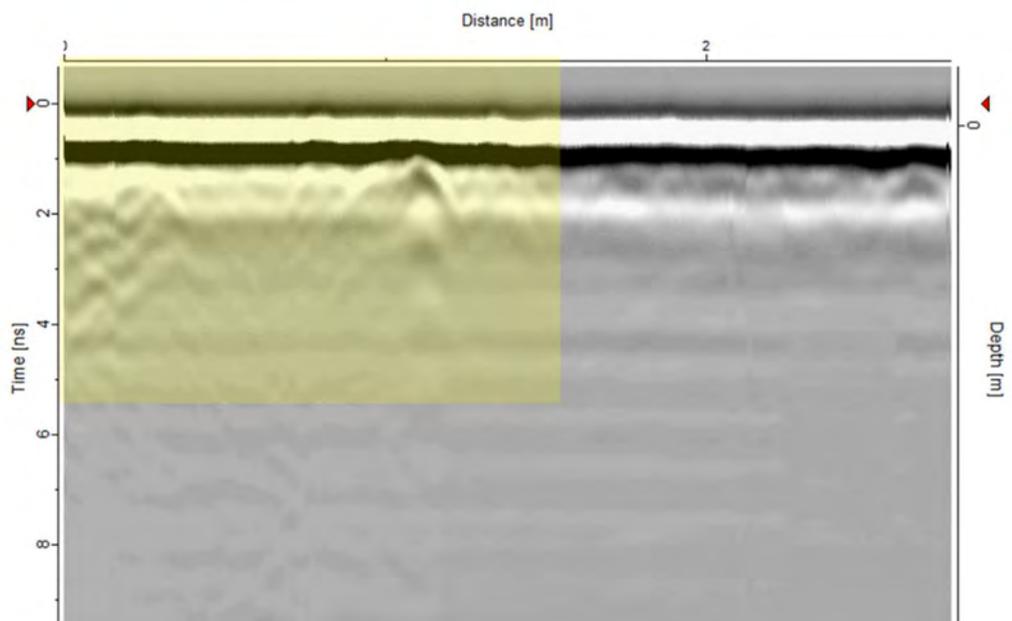


FIGURA 65 Radargrama Casa Terán - Dato 158

MURO INTERIOR- DAT 0160

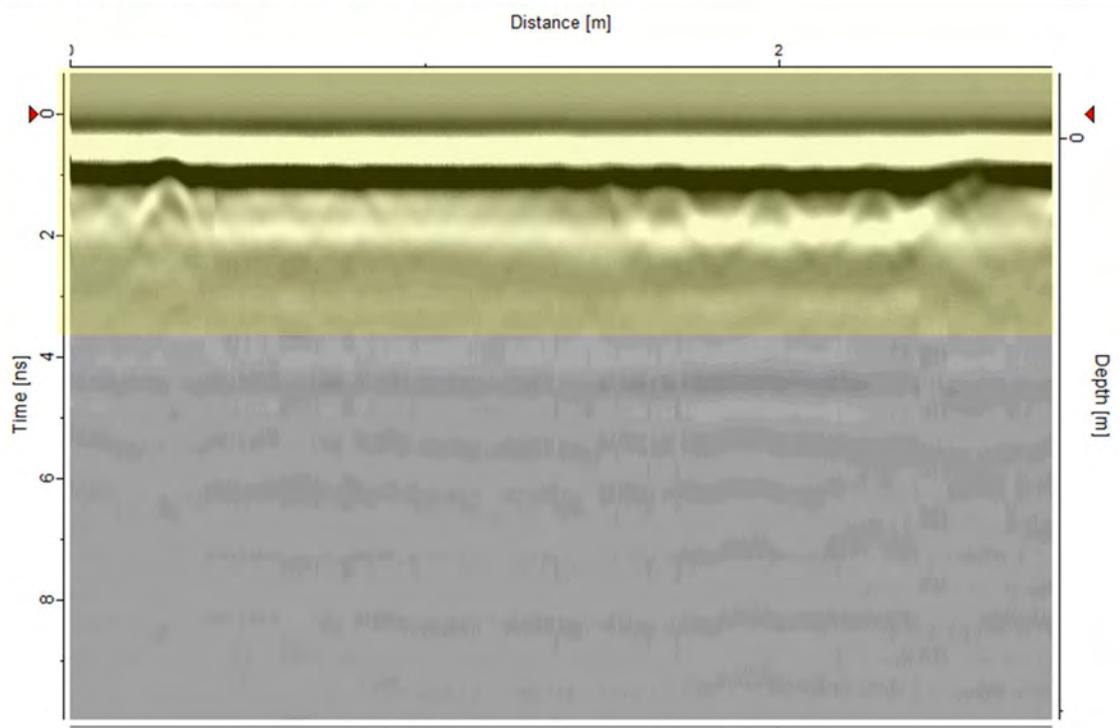


FIGURA 68 Radargrama Casa Terán - Dato 160

MURO INTERIOR- DAT 0165

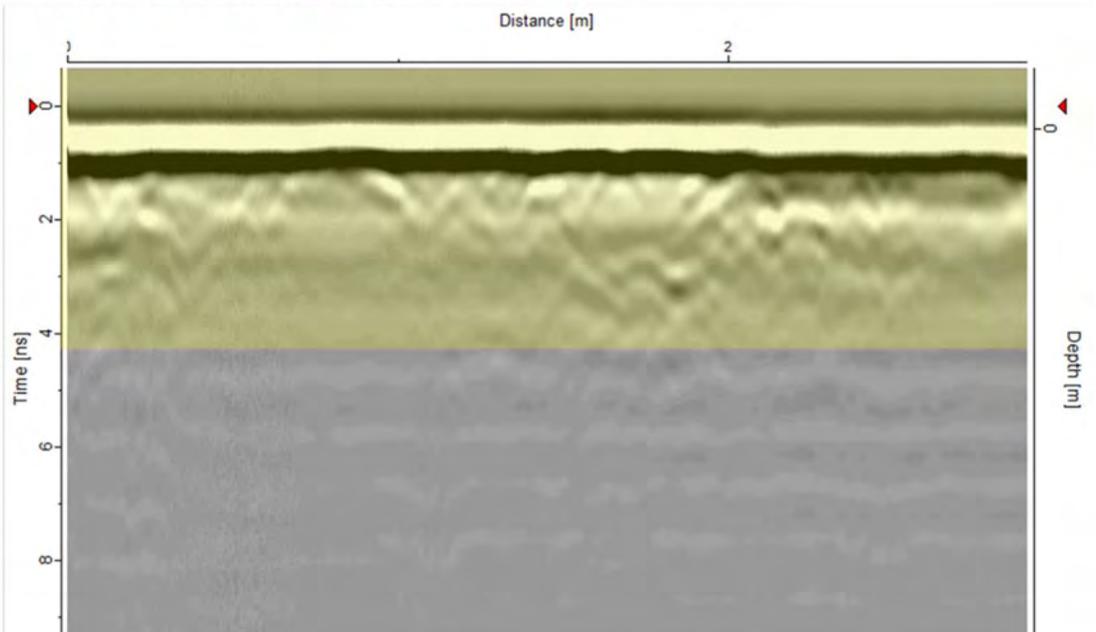


FIGURA 67 Radargrama Casa Terán - Dato 165

MURO INTERIOR- DAT 0169

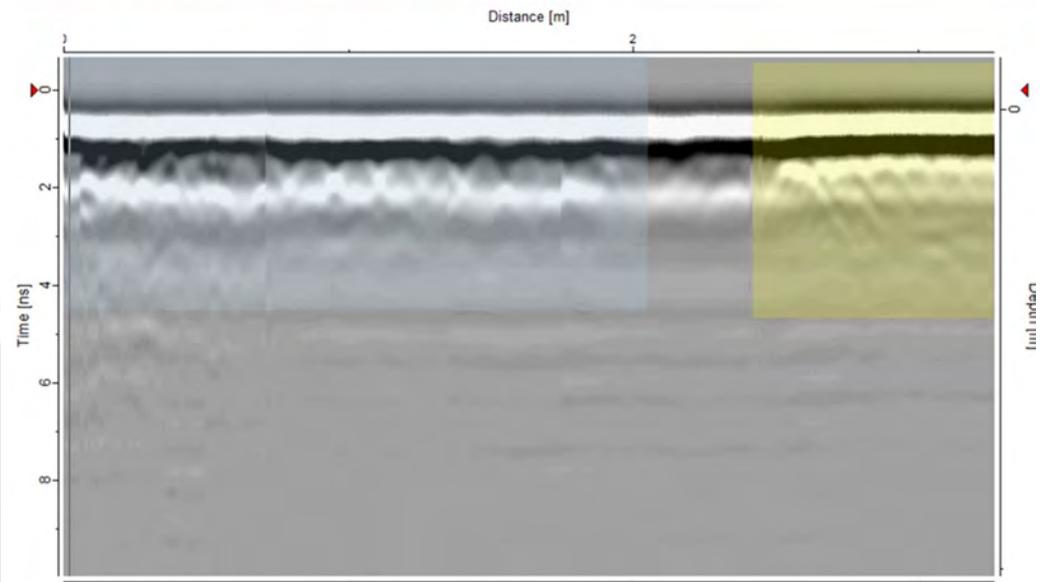


FIGURA 70 Radargrama Casa Terán - Dato 169

MURO INTERIOR- DAT 0161

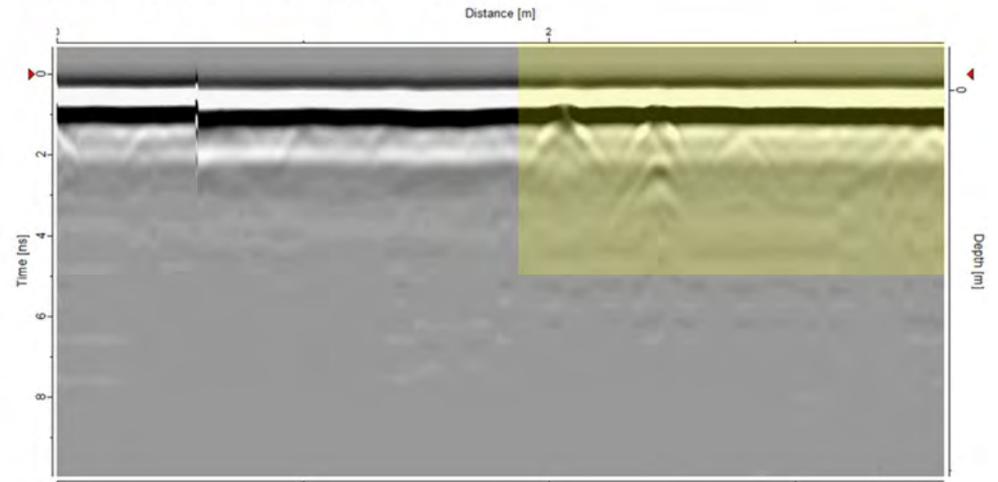


FIGURA 69 Radargrama Casa Terán - Dato 161

CUARTO COCINA PISO -DAT 0167

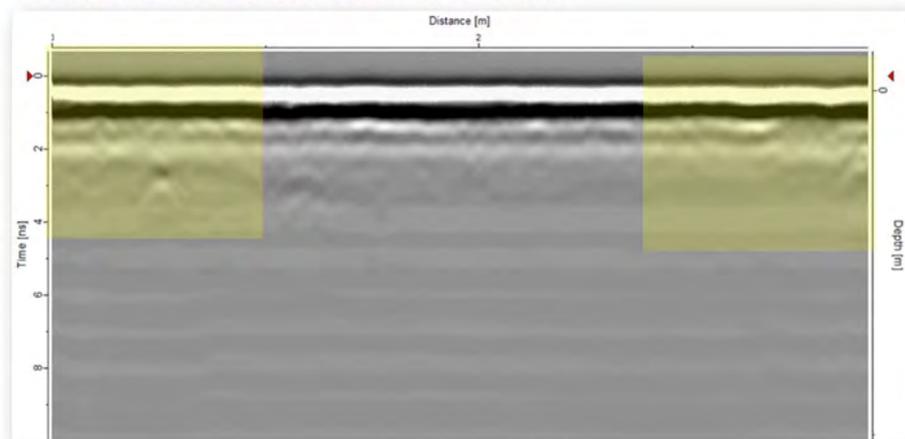


FIGURA 71 Radargrama Casa Terán - Dato 167

MURO EXTERIOR II PATIO -DAT 0172

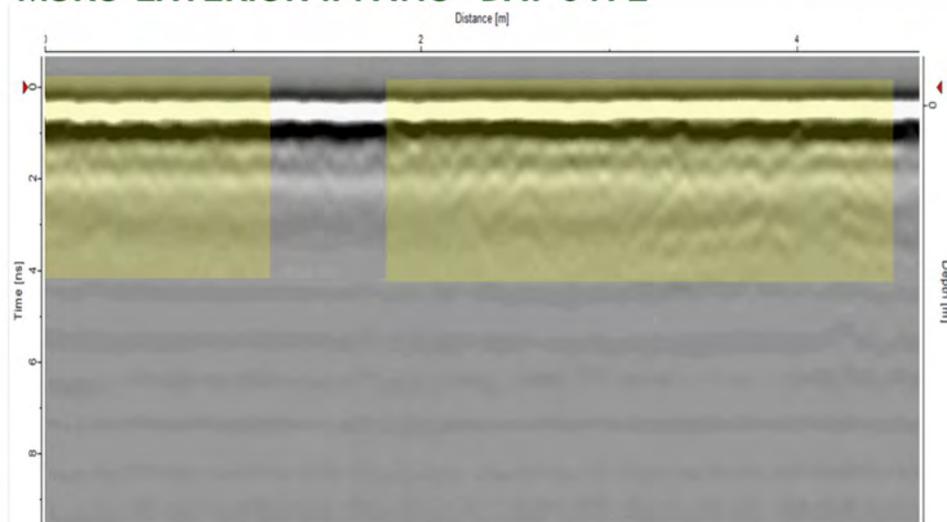
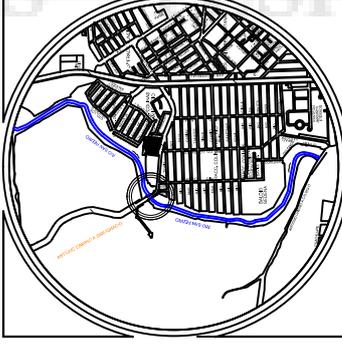


FIGURA 72 Radargrama Casa Terán - Dato 172

LOCALIZACIÓN

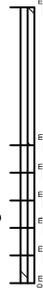


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
AGUASCALIENTES

DATOS DE PROYECTO

Nomenclatura:

Escala gráfica:



PROPIETARIO :
UBICACIÓN :
FRACC. :

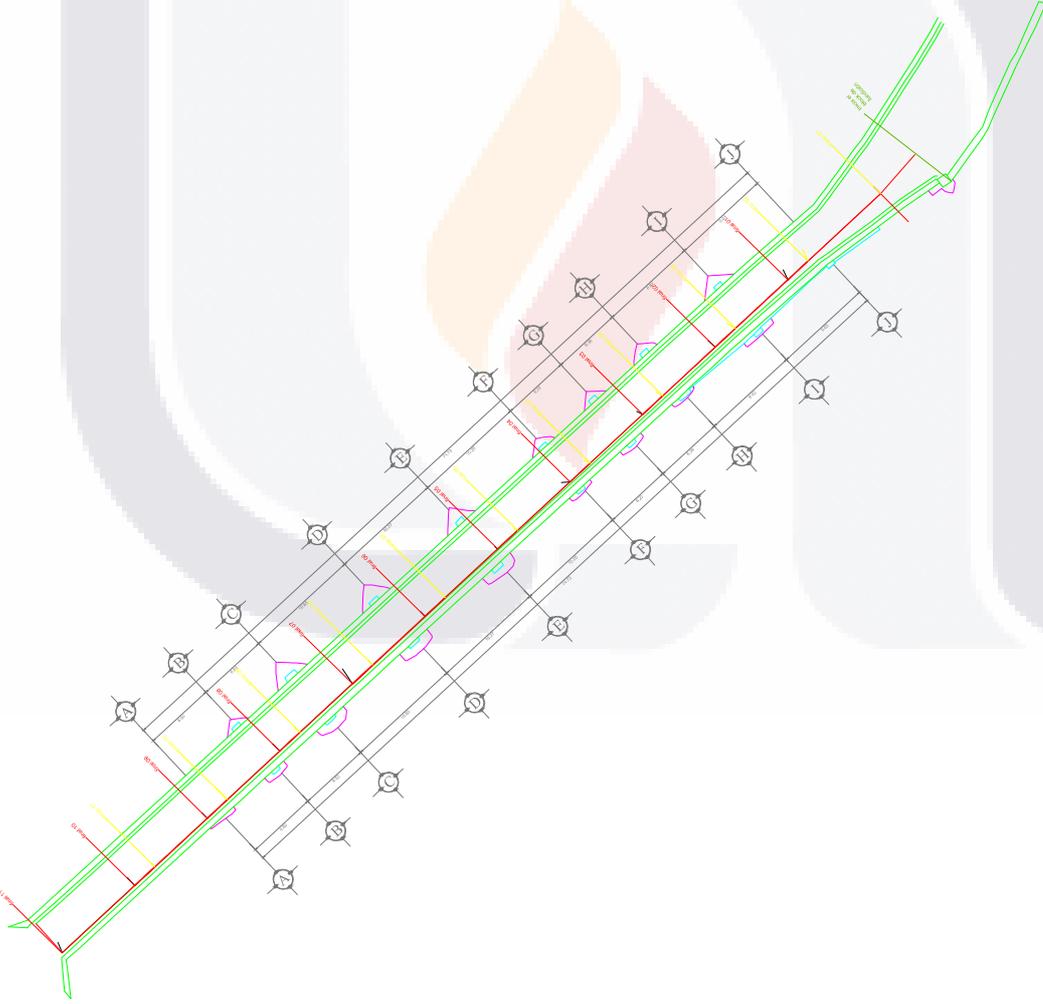
PROYECTO:
PUENTE SAN IGNACIO,

PROYECTO:
PUENTE SAN IGNACIO,

ESCALA: 1:200

FECHA: AGOSTO 2014 ACOTACIÓN EN MTS.

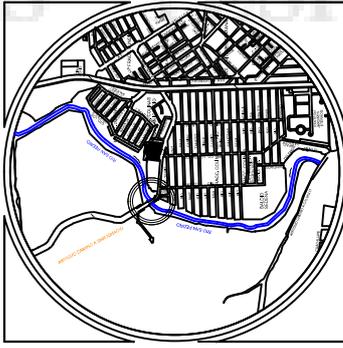
Nº DE PLANO



VISTA EN PLANTA AGUAS ABAJO MEDICIONES

ESCALA HORIZONTAL 1:200
ESCALA VERTICAL 1:200

LOCALIZACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES

DATOS DE PROYECTO

Nomenclatura:

Escala gráfica:



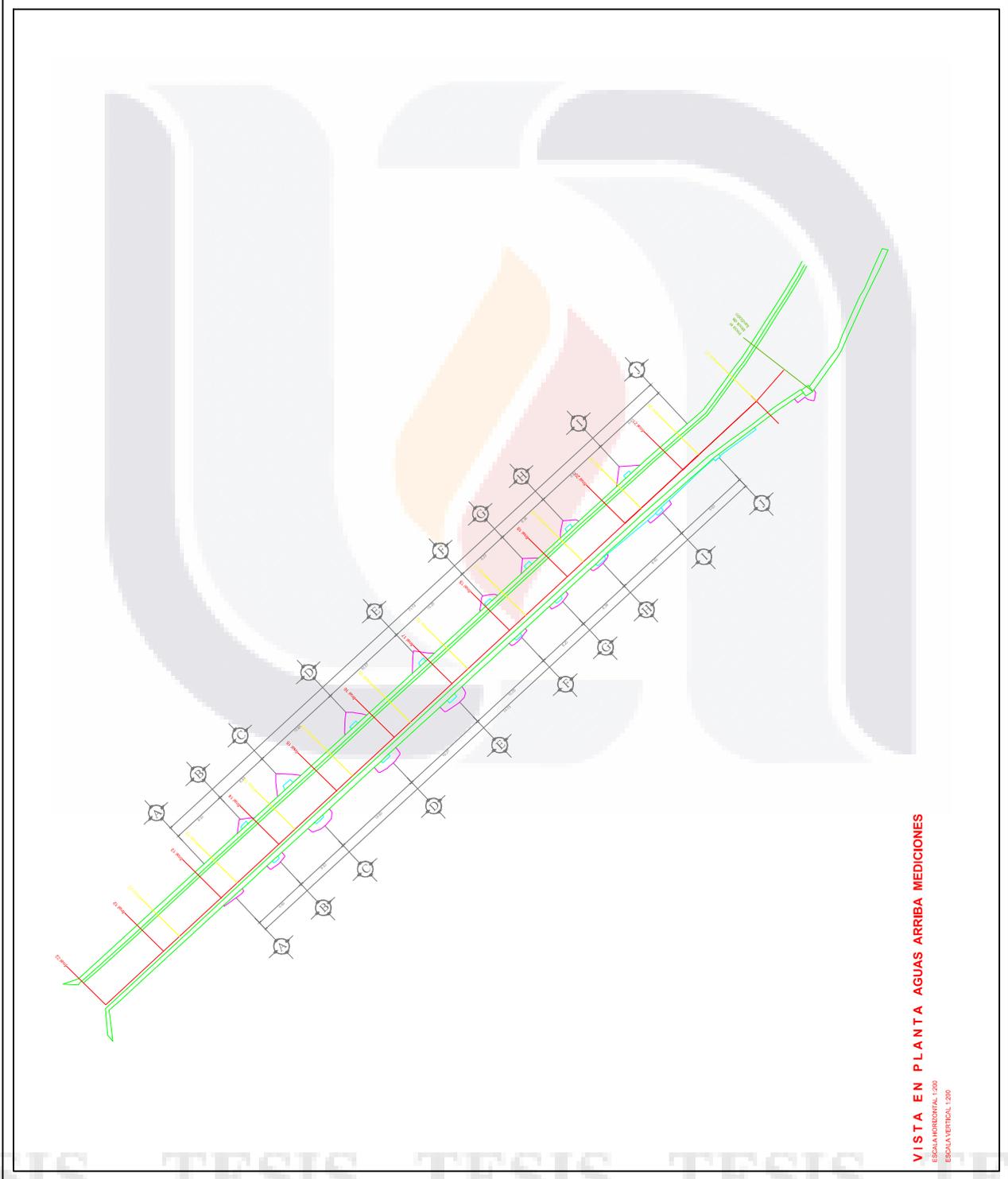
PROPIETARIO :
UBICACIÓN :
FRACC. :

Nº DE PLANO

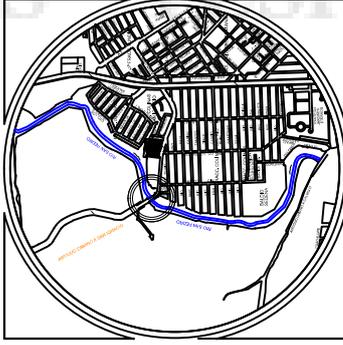
PROYECTO:
PUENTE SAN IGNACIO,

ESCALA: 1:200

FECHA: AGOSTO 2014 ACOTACIÓN EN MTS.



LOCALIZACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES

DATOS DE PROYECTO

Nomenclatura:

Bloques y Mezcla



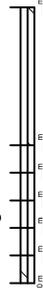
Cuarteaduras y piezas faltates



Manchones de mezcla



Escala gráfica:



PROPIETARIO :
UBICACIÓN :
FRACC. :

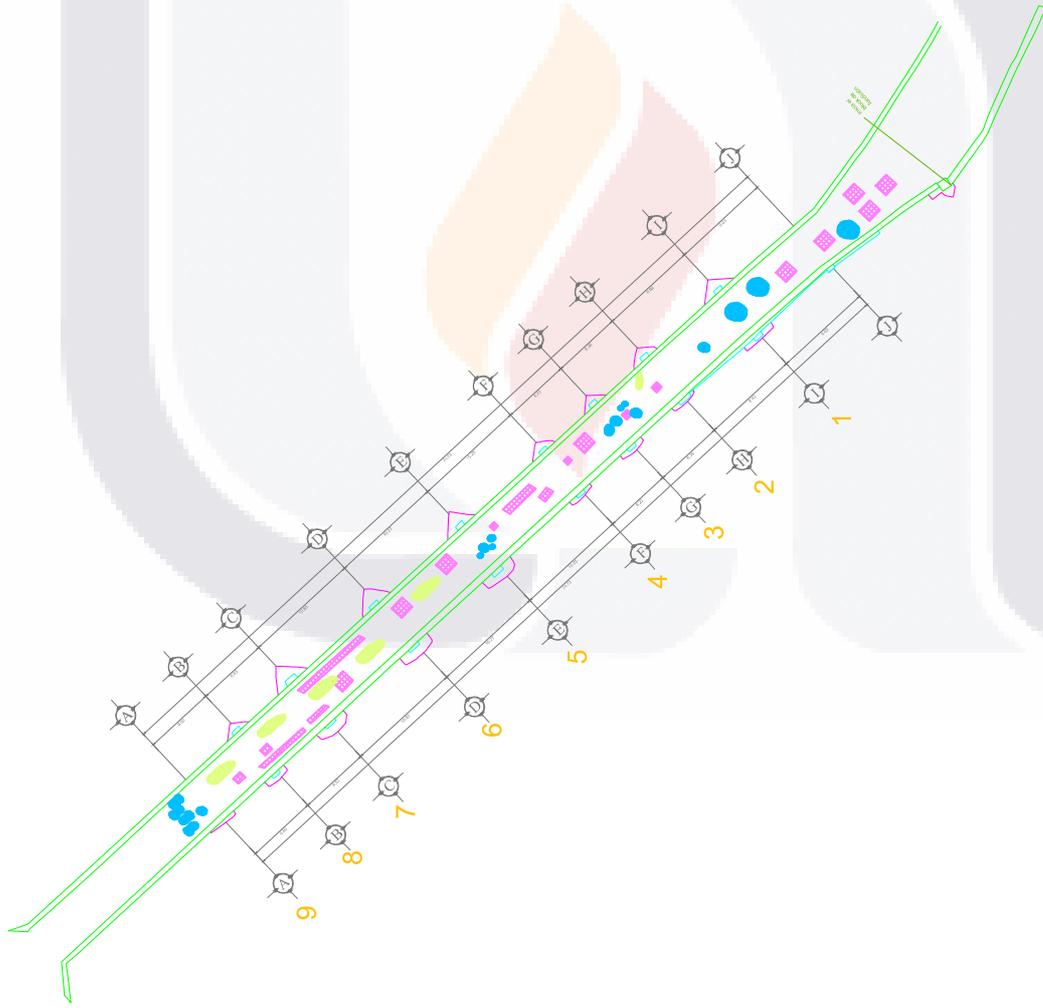
PROYECTO:
PUENTE SAN IGNACIO,

ESCALA: 1:200

FECHA: AGOSTO 2014 ACOTACIÓN EN MTS.

Nº DE PLANO

PROYECTO:
ANEXO D



VISTA EN PLANTA UBICACIÓN DE PARCHES

ESCALA HORIZONTAL: 1:200
ESCALA VERTICAL: 1:200