



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Radar de penetración terrestre
(GPR) en la identificación de una
cavidad del sistema kárstico de
Yucatán**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Litza Xaya Vences Juárez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Iris Neri Flores



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026

Dedicatorias

A mis padres, Marco y Marcela, quienes, han dedicado su vida a mi formación y educación. Para ustedes, que en cada momento de duda me dieron certeza y, ante cada caída, me transformaron en impulso. Gracias por creer en este sueño, por guiarme con amor y acompañarme hasta que se hiciera realidad.

A mi hermano Antonio, por ser un gran acompañante de vida y por su apoyo incondicional.

A mis abuelitos, Eva, Catalina, León y Átalo†, quienes, me han enseñado a disfrutar la vida, a ser resiliente y valorar cada paso del proceso.

A mi querida familia, porque ustedes siempre han sido una red de apoyo impresionante.

A Gabriel, por apoyarme en cada etapa de este proyecto, por tus palabras de ánimo y tus aplausos para cada paso cumplido, muchas gracias por impulsarme a continuar.

A Fer, por haber compartido conmigo grandes momentos de mi vida universitaria, gracias por todos los buenos momentos y porque, sin tú llegada, nunca habrían existido tantas risas.

A mis asesores, Iris y José Luis, por brindarme su apoyo incondicional, por ser una guía fundamental para la conclusión de este documento y por su invaluable labor como mentores.

Gracias equipo.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por la formación académica y profesional que me ha sido brindada.

A la ENES Mérida, por permitirme expandir mi área de conocimiento, prestándome sus recursos y espacios para formarme como profesionista.

A mis directores de tesis, la Dra. Iris Neri Flores y al M.C. José Luis Salas Corrales, quienes con mucho compromiso fueron parte fundamental del desarrollo de este documento, muchas gracias por tanta paciencia y empeño para que esto saliera bien.

A mis sinodales, la Dra. Selene Olea Olea, el Ing. Gabriel Salinas Calleros y el Dr. Jorge López Alvis por su grata participación y su aportación a este documento.

A Isabel, Laura, Francisco, Santiago, Luis Eduardo y demás profesores de esta casa de estudios, quienes dedican su vida a la formación de sus estudiantes, transmitiendo su conocimiento con integridad, amabilidad y empatía.

A los Ingenieros Zamarripa y Simbrón, quienes fueron grandes maestros compartiéndome sus conocimientos en los inicios de mi carrera profesional y que hasta ahora mantenemos una gran amistad.

Financiamiento:

Este trabajo ha recibido el apoyo del Programa UNAM-PAPIIT IA104722-Límites ambientales hidrogeológicos en cuencas kársticas" y CONAHCYT-PRONACE 319070 "Construyendo puentes hacia la búsqueda de soluciones a los problemas socioecológicos de la Península de Yucatán".

Índice

RESUMEN	7
I. Introducción	8
I.1. Introducción	8
I.2. Antecedentes	10
I.3. Pregunta de investigación	12
I.4. Hipótesis	13
I.5. Objetivo General	13
I.6. Objetivos Específicos	13
I.7. Justificación	14
II. Marco Teórico	15
II.1. Karst	15
II.1.1. Karstificación	18
II.1.2. Acuíferos kársticos	19
II.1.3. Partes de un acuífero kárstico	20
II.1.4. Morfología kárstica	22
II.1.5. Métodos de caracterización del karst	24
II.1.6. Métodos geofísicos utilizados para la caracterización del karst	26
II.2. Radar de Penetración Terrestre (GPR)	28
II.2.1. Fundamentos Teóricos del método de GPR	29
II.2.1.1. Principios físicos fundamentales del campo electromagnético	29
II.2.1.2. Ecuaciones de Maxwell	35
II.2.1.3. Propagación de las ondas electromagnéticas en materiales dieléctricos disipativos	37
II.2.1.4. Velocidad	39
II.2.1.5. Longitud de onda	40
II.2.1.6. Profundidad de penetración o Skin Depth	40
II.2.1.7. Impedancia electromagnética	41
II.2.2. Funcionamiento del equipo	42
II.2.2.1. Componentes	43
II.2.2.2. Selección de Antenas	44
II.2.2.3. Arreglos monoestáticos y biestáticos	46
II.2.2.4. Ancho de pulso, frecuencia central, ventana de tiempo y muestreo	50
II.2.2.5. Secciones y apilamiento	51
II.2.2.6. Resolución	51
II.2.3. Procesamiento de Datos	54
II.2.3.1. Edición	54
II.2.3.2. Corrección de Deriva del Tiempo Cero o Primer Arribo	55
II.2.3.3. Filtros digitales	55
II.2.3.4. Función de ganancia y escala de color	56
II.2.3.5. Deconvolución	58
II.2.3.6. Migración	59
II.2.3.7. Radargramas Sintéticos	60

III. Área de estudio	61
III.1. Localización	61
III.2. Marco Físico Regional	65
III.2.1. Fisiografía	65
III.2.2. Geomorfología	67
III.2.3. Geología	68
III.2.3.1. Estratigrafía	71
III.2.4. Clima	76
III.2.5. Edafología	76
III.2.6. Hidrografía	77
III.2.7. Marco hidrogeológico del sitio de estudio	79
III.2.8. Red piezométrica	80
III.2.9. El acuífero kárstico de la península de Yucatán	82
IV. Metodología	83
IV.1. Diseño del levantamiento y procesamiento de datos	83
IV.2. Adquisición de perfiles	84
IV.3. Procesamiento de Datos	86
V. Resultados y Discusión	110
V.1. Descripción de las secciones de GPR	110
V.2. Integración de Resultados	110
V.3. Discusión de Resultados	126
VI. Conclusiones	131
Referencias	134

Índice de Figuras

FIGURA NO. 1. FASES EVOLUTIVAS DEL KARST	17
FIGURA NO. 2. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN ACUÍFERO KÁRSTICO	21
FIGURA NO. 3. CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA CARGA Q.	30
FIGURA NO. 4. CAMPO MAGNÉTICO GENERADO POR EL MOVIMIENTO DE CARGAS Q.	32
FIGURA NO. 5. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL FUNCIONAMIENTO DE GPR.	42
FIGURA NO. 6. DIAGRAMA DE LOS COMPONENTES ELEMENTALES DE UN EQUIPO DE GPR.	44
FIGURA NO. 7. FUNCIONAMIENTO DEL PRINCIPIO DE LAS ANTENAS.	45
FIGURA NO. 8. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA CONFIGURACIÓN DE DIPOLOS.	46
FIGURA NO. 9. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN ARREGLO DE REFLEXIÓN O COMÚN OFFSET	47
FIGURA NO. 10. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS ARREGLOS CMP Y CDP	48
FIGURA NO. 11. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS ANTENAS EN EL ARREGLO WARR	49
FIGURA NO. 12. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA RESOLUCIÓN DE LA ANTENA	52
FIGURA NO. 13: MAPA DE LOCALIZACIÓN REGIONAL DEL SITIO DE ESTUDIO	63
FIGURA NO. 14. MAPA MUNICIPAL Y ESTATAL DEL SITIO DE ESTUDIO	64
FIGURA NO. 15. MAPA DE LAS PROVINCIAS FISIográficas DE LA REPÚBLICA MEXICANA.	66
FIGURA NO. 16. GEOLOGÍA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN	70

FIGURA NO. 17. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN.	71
FIGURA NO. 18. MAPA DE UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO SOBRE CUENCAS HIDROLÓGICAS.	78
FIGURA NO. 19. MAPA DE LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS REGIONALES.	80
FIGURA NO. 20. CROQUIS DE DISTRIBUCIÓN DE LAS SECCIONES DE GPR	85
FIGURA NO. 21. RADARGRAMA CRUDO DE LA L-05 DE GPR	87
FIGURA NO. 22. APLICACIÓN DEL FILTRO DE DESPLAZAMIENTO CONTINUO	88
FIGURA NO. 23. SELECCIÓN DE TRAZAS RUIDOSAS	89
FIGURA NO. 24. SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LAS CORRECCIONES ESTÁTICAS.	91
FIGURA NO. 25. APLICACIÓN DE GANANCIA.	93
FIGURA NO. 26. SELECCIÓN DEL FILTRO PASO BANDA	95
FIGURA NO. 27. APLICACIÓN DE LA DECONVOLUCIÓN	97
FIGURA NO. 28. APLICACIÓN DE LA MIGRACIÓN	99
FIGURA NO. 29-A. MODELO SINTÉTICO DE UNA CAVIDAD TOTALMENTE VACÍA.	101
FIGURA NO. 30-A. MODELO SINTÉTICO DE UNA CAVIDAD PARCIALMENTE LLENA DE AGUA.	103
FIGURA NO. 31-A. MODELO SINTÉTICO DE UNA CAVIDAD TOTALMENTE SATURADA DE AGUA	105
FIGURA NO. 32-A. MODELO SINTÉTICO DE DOS CAVIDADES DE PROFUNDIDAD VARIABLE	107
FIGURA NO. 33. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 05.	109
FIGURA NO. 34. CROQUIS DE LOCALIZACIÓN DE SECCIONES PROCESADAS DE GPR	111
FIGURA NO. 35. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 07.	113
FIGURA NO. 36. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 09.	114
FIGURA NO. 37. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 10.	115
FIGURA NO. 38. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 12.	116
FIGURA NO. 39. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 16.	118
FIGURA NO. 40. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 21.	119
FIGURA NO. 41. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 24.	121
FIGURA NO. 42. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 25.	121
FIGURA NO. 43. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 33.	123
FIGURA NO. 44. COMPARACIÓN DE TRAZAS SECCIÓN DE GPR 39.	125
FIGURA NO. 45. CROQUIS DE ANOMALÍAS DE GPR	129
FIGURA NO. 46. CROQUIS DE SITIOS PROPUESTOS DE VERIFICACIÓN	130

Índice de Tablas

TABLA NO. 1 TIPOS DE DEPRESIONES	23
TABLA NO. 2 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL KARST	25
TABLA NO. 3 PRINCIPIOS FÍSICOS DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS	27

Radar de Penetración Terrestre (GPR) en la identificación de una cavidad del sistema kárstico de Yucatán.

RESUMEN

La Península de Yucatán constituye una extensa plataforma marina compuesta de potentes estratos de rocas carbonatadas y un relieve prácticamente plano. Estas condiciones limitan la presencia de escurrimientos superficiales y una red fluvial desarrollada, de modo que la mayor parte del flujo hídrico ocurre de manera subterránea. Ello ha favorecido la evolución de un sistema acuífero de tipo kárstico costero, complejo y característico de la región, que funciona como la única fuente de agua potable.

El presente trabajo tiene como principal objetivo el mapeo de las características kársticas superficiales, utilizando la técnica de Radar de Penetración Terrestre en un inmueble localizado en la zona urbana del municipio de Kinchil en donde por efectos de la disolución se generó una cavidad y los habitantes de la localidad la utilizan como fuente de abastecimiento de agua, sin embargo, se requiere identificar su extensión e interconexión en el subsuelo.

La adquisición de datos consistió en 39 secciones de GPR con una antena monoestática de frecuencia central de 450 MHz a lo largo del patio principal y trasero de la casa, así como en el frente y periferia del inmueble como parte de las actividades del proyecto Pronaii.

Con la información obtenida del procesamiento de datos y el análisis de los resultados de la presente investigación fue posible caracterizar y delimitar la extensión de la karstificación en el sitio de estudio, además de proponerse tres zonas en la porción norte, centro y sur de la casa para su futura verificación.

I. Introducción

I.1. Introducción

En los últimos años los estudios del agua han adquirido mayor relevancia, ya que en el pasado se consideraba al agua como un recurso renovable e ilimitado y que su uso era de manera inagotable para los seres humanos y sus diversas actividades. No obstante, con el crecimiento de la población, el uso desmedido a un ritmo insostenible y la escasez que esto provoca, solo han puesto en evidencia la necesidad de gestionar este recurso vital de manera sustentable (Konikow y Bredehoeft, 2020). En este contexto, resulta indispensable conocer y comprender las limitaciones de los acuíferos.

Se define “acuífero” a todo sistema de agua constituido “por una o varias formaciones geológicas a través de las cuales el agua del subsuelo puede circular o almacenarse” (LAN, 2023, PP.1). Kuniansky *et al.* (2024) exponen que estas formaciones deben presentar condiciones suficientes de permeabilidad y saturación, que permitan tanto la infiltración como la producción natural de una cantidad considerable de agua subterránea. Bajo estas características, dichas unidades constituyen fuentes de abastecimiento relevantes para pozos y manantiales.

Existen diferentes clasificaciones para los acuíferos. Rodríguez y Escalante (2008) propusieron agruparlos en tres categorías: la primera se basa en el tipo de material que los conforma; la segunda considera las características de los espacios donde se almacena el agua, distinguiendo entre medios porosos, no porosos y kársticos; y la tercera toma en cuenta la presión con la que se encuentra el agua al estar contenida en las formaciones geológicas, diferenciando entre acuíferos libres, confinados y semiconfinados.

De los diferentes sistemas acuíferos, los kársticos se encuentran entre los más complejos en lo que respecta al estudio de agua subterránea, debido a las características geológicas, hidrológicas, biológicas e inclusive económicas que presentan.

Es por este motivo que las zonas kársticas han sido objeto de un gran número de estudios e investigaciones profundas encaminadas a tener un mayor entendimiento sobre sus propiedades, su origen y su evolución (Kuniansky *et al.*, 2024).

La principal problemática proviene de entender la dinámica del agua subterránea en estos sistemas hídricos, ya que, a diferencia de los acuíferos porosos y no porosos, en los kársticos el agua fluye por medio de conductos de gran tamaño que están condicionados por la disolución de la roca, lo que genera un tipo de flujo turbulento, no lineal y variable (Derek *et al.*, 2007). Por ello, para entender su comportamiento es necesario estudiar con mayor detalle sus procesos de formación y evolución.

Actualmente para la caracterización de los sistemas kársticos existen diferentes métodos de investigación y exploración, en donde destacan las técnicas geofísicas ya que son considerados una herramienta básica para la comprensión de los sistemas hidrogeológicos (Pulido, 2001).

La información obtenida de estas metodologías puede registrar la posición y la profundidad estimada para cada elemento del subsuelo, consiguiendo un esquema visual de la disposición de estratos geológicos, además de recabar información de otras estructuras que sean contrastantes con el medio, un ejemplo son las cavidades.

La aplicación del Radar de Penetración Terrestre es una técnica de geofísica somera que ha demostrado ser significativa para el estudio de hundimientos, discontinuidades en el suelo y cavidades (Chalikakis *et al.*, 2011).

Debido a las condiciones de la karstificación, los suelos carbonatados son un medio con gran potencial para lograr resultados favorables en la respuesta de la señal electromagnética con lo que se busca aportar información indirecta relevante para el mapeo de una cavidad en el municipio de Kinchil, estado de Yucatán.

I.2. Antecedentes

Los primeros descubrimientos realizados y sustentados con la técnica geofísica de Radar de Penetración Terrestre (*Ground Penetrating Radar*) se realizaron desde la década de 1960; sin embargo, se tienen registros bien documentados de ellos hasta la década de 1990.

En un inicio se habían aplicado para la investigación y evaluación de problemas geotécnicos relacionados con la identificación de huecos, sumideros o cavernas. Eventualmente, gracias a los avances tecnológicos, las mejoras de los aparatos geofísicos, la simplificación de los procedimientos de campo y la inversión e interpretación de los datos, las investigaciones geofísicas se extendieron a las regiones kársticas despertando un gran interés en el ámbito de la hidrogeología.

Chalikakis *et al.* (2011) realizaron un resumen de las diferentes contribuciones hechas por diversos investigadores a los métodos geofísicos y los sistemas kársticos; a continuación, se abordará específicamente del GPR y su evolución.

Entre los primeros registros se tiene a Grandjean y Gourry quienes, en 1996 realizaron con éxito un mapa tridimensional con datos de GPR con lo que obtuvieron las características de una cantera de Mármol.

En 1997 Benderitter fue uno de los primeros en contribuir a los estudios de exploración intentando evaluar las posibilidades del uso de los métodos geofísicos en el mapeo de sistemas kársticos.

Doolittle y Collins (1998) llevaron a cabo una comparación de los métodos eléctricos contra las técnicas de Radar de Penetración Terrestre (GPR). En ese mismo año, Carpenter *et al.* (1998) combinaron datos de diferentes técnicas geofísicas, entre ellas el Radar de Penetración Terrestre para el apoyo de la búsqueda de sumideros en Oak Ridge, Tennessee, EE. UU.

Por su parte Thomas y Roth (1999) presentaron un estudio comparativo en donde incluyeron cuatro técnicas geofísicas para la detección de dolinas y vacíos en el este de Pensilvania, así como en el norte de Nueva Jersey, EE. UU.

Más tarde, Batayneh *et al.* (2002) emplearon la técnica para la delimitación de sumideros enterrados en la cuenca del mar Muerto en Jordania, gracias a este estudio se probó la eficacia del GPR para identificar y localizar sumideros hidráulicos subterráneos. En el mismo año, Hutchinson *et al.* (2002) proporcionaron una útil comparación de diversos enfoques geofísicos para la detección de vacíos.

Fauchard y Pothérat (2004) establecieron una guía para la detección de cuevas llenas de aire mediante métodos geofísicos.

Posteriormente, Elawadi *et al.* (2006) realizaron estudios con diferentes metodologías geofísicas de tomografía eléctrica, métodos electromagnéticos y GPR en el sur del Cairo en Egipto. Con la integración de los datos logró delimitar contactos litológicos como zonas de riesgo, los cuales presentaban múltiples fallas y posibles zonas de fracturas. También en ese mismo año, Ezersky *et al.* (2006) combinaron datos de eléctrica, sísmica, GPR y magnéticos para estudiar el desarrollo de sumideros en el área del mar Muerto (Oriente Medio). Por su parte, Kruse *et al.* (2006) utilizó con éxito las técnicas de eléctrica y GPR para el mapeo de un sumidero en desarrollo en un terreno kárstico en Florida. La última contribución de este año fue Kofman *et al.* (2006), quienes demostraron el valor de los fenómenos de reverberación en registros de GPR para detectar cavidades llenas de aire cerca de la superficie.

Para el año 2007, Bechtel *et al.* describieron los métodos geofísicos adaptados al estudio del *karst* en un libro general de ese mismo tema. En ese mismo año, Piscitelli *et al.* (2007) utilizaron una combinación de GPR y tomografía de microondas para detectar cavidades poco profundas en un sitio arqueológico en Italia.

Un año después, Mochales *et al.* (2008) realizaron estudios gravimétricos, magnéticos y GPR que condujeron a la detección exitosa de cavidades kársticas en el área de Zaragoza, al noroeste de España.

Posteriormente, Pueyo-Anchuela *et al.* (2009) caracterizaron con datos de GPR, los procesos involucrados en los peligros kársticos y propusieron secciones geomorfológicas asociadas al área de estudio.

Durante los últimos años, en México se han realizado diversos estudios de Radar de Penetración Terrestre aplicado a la búsqueda de sitios arqueológicos, contactos litológicos, mapeo de tuberías y objetos emplazados; sin embargo, solo una pequeña cantidad corresponden a la exploración de los sistemas kársticos, centrados principalmente en el acuífero de la Península de Yucatán, a continuación, se mencionan los que presentan datos de GPR:

En 1997, Callaghan *et al.* realizaron, en conjunto con arqueólogos, un estudio con GPR para detectar cavidades y objetos enterrados en la Gran Plaza de Chichén Itzá.

Mucho más tarde, en 2003, Schmidt *et al.* emplearon métodos como el Radar de Penetración Terrestre en Uxmal y Dzibilchaltún, para identificar edificios enterrados y antiguos sistemas de drenaje.

Perry *et al.* (2009) han realizado estudios con métodos geofísicos como el GPR y de resistividad eléctrica para mapear la red de cenotes y flujos de agua subterránea en la península de Yucatán.

Un año después, Estrada *et al.* (2010) publicaron un artículo en donde pusieron a prueba la capacidad de las antenas de GPR para la detección de diferentes capas de roca caliza y oquedades, concluyendo que la técnica puede ayudar a determinar las propiedades de la caliza y sus características de disolución.

Uno de los estudios más recientes, desempeñado en el recinto de Chichén Itzá, fue desarrollado por el INAH y la UNAM, quienes emplearon GPR y magnetometría para localizar estructuras ocultas bajo la Gran Plaza y el Templo de Kukulcán (Gómez *et al.*, 2021).

I.3. Pregunta de investigación

¿Es el Radar de Penetración Terrestre una técnica eficiente para la búsqueda de cavidades en los sistemas kársticos? ¿Cuáles son las limitaciones de la técnica en este contexto geológico con particularidades específicas?

I.4. Hipótesis

El Radar de Penetración Terrestre, ha demostrado ser uno de los métodos de geofísica somera con mayor resolución y efectividad en la búsqueda de cavidades. Debido a las condiciones de los terrenos kársticos, la velocidad de propagación y la constante dieléctrica de los suelos poco conductivos, los hace un medio con gran potencial para que la señal de GPR tenga poca atenuación, logrando incrementar la profundidad de penetración y su resolución.

El mapeo de las cavidades permitirá generar un gran contraste en las propiedades electromagnéticas ya que muchas de ellas, a consecuencia de la karstificación se suponen rellenas de agua, aire o material de disolución, logrando identificar un contraste fuerte entre la estructura y el medio, o bien, un cambio lateral notable en el medio.

I.5. Objetivo General

El objetivo de este estudio es evaluar la respuesta del método de Radar de Penetración Terrestre en la identificación de cavidades o posibles indicadores de estas, realizando modelos y comparándolos con los valores reales obtenidos de un sitio en donde se tiene localizada una fuente natural de abastecimiento de agua desarrollada por los efectos de la disolución de la roca en la zona urbana del municipio de Kinchil.

I.6. Objetivos Específicos

- Realizar el procesamiento, interpretación y análisis de los diferentes perfiles con el objetivo de encontrar algún indicio de cavidades en el subsuelo.
- Caracterizar y delimitar la extensión de la karstificación en el sitio de estudio.
- Identificar las limitaciones y el alcance del método para establecer criterios que permitan mejorar la interpretación de los resultados de Radar de Penetración Terrestre en suelos carbonatados.

I.7. Justificación

Uno de los problemas más importantes que presentan los terrenos kársticos es la interconexión que existe entre el agua superficial y subterránea. A nivel mundial, los acuíferos kársticos proporcionan la décima parte de los recursos disponibles de agua potable, lo que demuestra que son componentes importantes de los sistemas hidrológicos e hidrogeológicos locales y regionales. Sin contar que numerosos factores geológicos, topográficos, climatológicos e hidrológicos influyen en el desarrollo y las manifestaciones físicas de la karstificación.

Conocer la forma en la que interactúa el agua subterránea en estos sistemas complejos es de suma importancia para garantizar la disponibilidad del acuífero, mitigar la contaminación, disminuir los riesgos de vulnerabilidad y promover la protección de la biodiversidad de la flora y fauna que allí se desarrolla.

Por este motivo, las investigaciones se deben centrar en la identificación de los límites hidrológicos y el mapeo de las trayectorias de los flujos subterráneos. Para lograrlo es necesario de un enfoque multidisciplinario que integre la combinación de métodos convencionales de cartografía hidrogeológica como métodos de investigación más especializados, que en conjunto obtengan información mínima indispensable que nos permita dimensionar y gestionar de manera sustentable este recurso.

La aportación de este estudio pretende generar un conocimiento sobre el funcionamiento del Radar de Penetración Terrestre y su contribución al mapeo de las cavidades de los sistemas kársticos, abordando las diferentes limitaciones del método, además de promover su uso para la comprensión de estos sistemas acuíferos y la identificación de modelos hidrogeológicos conceptuales a detalle.

II. Marco Teórico

II.1. Karst

De acuerdo con lo señalado por Kuniansky *et al.* (2024), el origen de la palabra *karst* proviene de varias evoluciones lingüísticas en países preindoeuropeos. En un inicio, la palabra germana *karra* o *gara* que significa “piedra”, se modificó hasta convertirse de *kras*, *carsus* o *carso*, y finalmente en *karst*, que se traduce como “terreno pedregoso y estéril”.

Asimismo, mencionan que los primeros registros del uso técnico se remontan en la meseta de la región de Kras, en Eslovenia, lugar donde fue realizada la primera investigación científica intensiva dirigida por Jovan Cvijic, quien, debido a las características inusuales y específicas del lugar, llevó a cabo una descripción detallada del paisaje que encontró en los altos de Kras a final del siglo XIX, actualmente conocido como *karst* Dinárico, localizado al suroeste de Eslovenia y al noroeste de Italia.

Años más tarde, se encontraron grandes similitudes con las rocas que existían en diferentes partes del mundo; de tal manera que la palabra *karst* fue introducida por la escuela geográfica y geológica de Viena como un término científico internacional.

Las investigaciones llevadas a cabo por Derek *et al.* (2013) indican que, en la actualidad, el término *karst* se utiliza para describir al estilo de paisaje que propicia cavernas y extensos sistemas de agua subterránea desarrollados sobre rocas especialmente solubles, como las calizas, el mármol o el yeso.

Dentro de los paisajes característicos que son derivados de dicho proceso de disolución se encuentran las dolinas, las cuevas o cavernas, las depresiones cerradas, los afloramientos rocosos estriados, las cavidades, los cenotes e incluso el desarrollo de grandes manantiales.

Estrada *et al.* (2019), Veress (2020) y Kuniansky *et al.* (2024) coinciden en que, en el desarrollo del *karst*, se pueden distinguir cinco fases evolutivas. Dichas etapas se presentan de manera esquemática en la **Figura No. 1**:

La primera etapa se conoce como *karst* juvenil, en la cual la caliza queda expuesta y se destacan pequeñas cavernas y hundimientos que apenas son perceptibles en superficie.

La siguiente fase se conoce como *karst* joven, donde comienza el desarrollo del sistema de cavidades y los pozos que recargan al acuífero profundo (Veress, 2020); el drenaje superficial comienza a desvanecerse y aparece el drenaje subterráneo (Estrada *et al.*, 2007).

Posteriormente, el sistema se convierte a *karst* maduro, caracterizado por el desarrollo e interconexión del sistema de cavidades en una red subterránea compleja. Además, el nivel de disolución ya es considerable, mostrando la aparición de cenotes y planicies sobre el terreno que se convierten en poljes y uvalas. En este punto, puede ser normal la aparición de colapsos superficiales debido a la disolución.

Finalmente, en etapas avanzadas, los escurrimientos superficiales reaparecen y el *karst* suele presentar geoformas como los *karrens*, estructuras características y únicas de la karstificación.

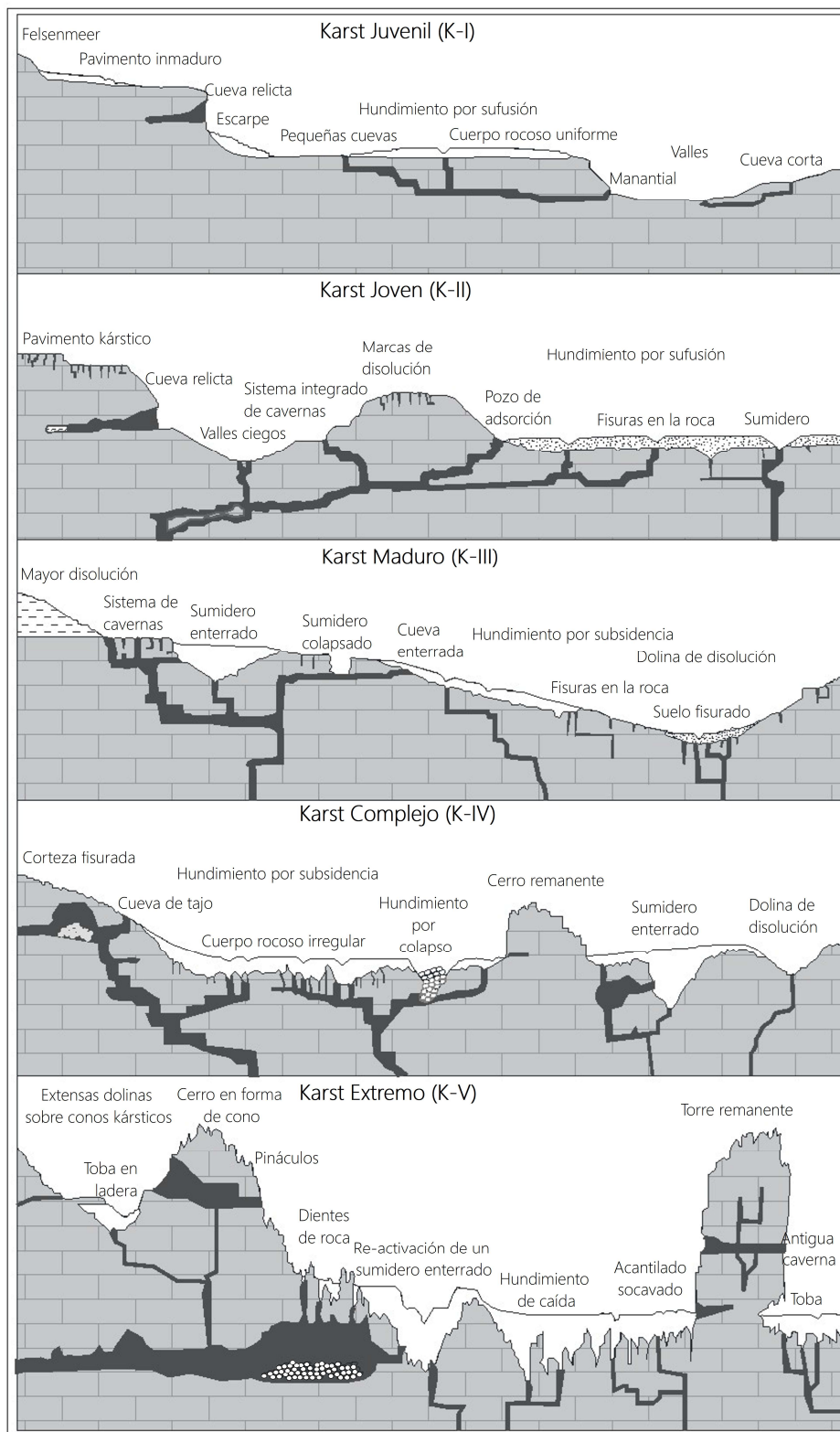


Figura No. 1. Fases evolutivas del Karst
 La imagen muestra los tipos de karst según la evolución del paisaje.
 Elaboración propia redibujado a partir de Veress (2020).

II.1.1. Karstificación

Se le llama karstificación al proceso químico que afecta y disuelve a las rocas carbonatadas debido a la circulación del agua y da como resultado los paisajes característicos del *karst* (García y Fernández, 2008).

Un terreno kárstico es aquel en el que la hidrología superficial y la subterránea están influenciadas en gran medida por la acción del flujo de agua natural (Sharp *et al.*, 2023).

Muchos factores geológicos, topográficos, climatológicos e hidrológicos influyen simultáneamente en la formación y las manifestaciones físicas del *karst*; por ello, no todo sistema kárstico se desarrolla de la misma manera ni exhibe las mismas características superficiales y subterráneas.

Sin embargo, donde se presenta, su desarrollo y manifestación física se encuentran influenciados principalmente por una combinación del flujo de agua subterránea, las características hidrogeológicas de la formación y la evolución geoquímica de las rocas solubles (Kuniansky *et al.*, 2021).

García y Fernández (2008) consideran que, dentro de los elementos más importantes que influyen en el *karst*, se destacan los siguientes:

- a) Factores geológicos: la composición litológica de la roca influye en la solubilidad y el ambiente estructural o tectónico condicionará la existencia de los conductos a planos preferentes de disolución.
- b) Factores climáticos: determinan las características termo-pluviométricas dominantes.
- c) Los hidrodinámicos: según el tipo de flujo, condicionarán la disolución de las rocas.
- d) Los fisicoquímicos: determinan el proceso de disolución como tal.
- e) Bioquímicos: dependen de la acción de los diversos microorganismos; en relación con el medio se producirán nuevas reacciones químicas.

II.1.2. Acuíferos kársticos

Un acuífero kárstico es una formación geológica constituida por rocas sedimentarias consolidadas, cuyos poros o fisuras han sido agrandados por la acción disolvente del agua subterránea hasta formar grandes conductos o cuevas.

García y Fernández. (2008) mencionan que el movimiento del agua en los acuíferos puede tener un comportamiento muy variable, dependiendo del grado de karstificación que exhiba la formación, ya que algunos obedecerán a la Ley de Darcy, tal como los medios porosos, y en otros, se asemeja a un medio fisurado o no poroso, debido a que el agua fluye por medio de una red de conductos.

Por su parte, Goldscheider *et al.* (2007) indican que un acuífero kárstico es un sistema de flujo de agua subterránea en el que el almacenamiento y el movimiento del agua se dará a través de los espacios vacíos, tal como en los medios porosos y no porosos. Sin embargo, su característica principal es que la mayor parte de agua no se quedará contenida, sino que fluirá a través de las aberturas subterráneas que son creadas o modificadas por efectos de la disolución química de la roca. Se define entonces como un medio atípico con porosidad terciaria, anisótropo y heterogéneo.

Puntualizan que la geometría, la orientación y la extensión del sistema de flujo dependen del desarrollo de la karstificación conforme el tiempo. Esto implica que, a medida que el agua disuelve la roca, los conductos que antes solo existían pueden agrandarse, conectarse, llenarse de sedimentos o colapsar. Incluso, los conductos que ahora se encuentran saturados (freáticos) pueden transformarse en conductos vadosos (no saturados) y viceversa; aun así, ambos casos siguen formando parte del mismo sistema.

Explican que uno de los problemas principales que se presenta en el estudio de la hidrogeología kárstica es la facilidad de crear nuevas trayectorias y puntos de salida de drenaje inesperados, que no pueden predecirse o asociarse al entorno topográfico o hidrológico actual, por lo tanto, se considera que su sistema de flujo siempre es único.

Kuniansky *et al.* (2021) menciona que, en algunos casos, se ha disuelto tanta roca que las aberturas forman conductos grandes e interconectados. En estos casos, el agua se mueve a gran velocidad no solo a través de grietas y poros, sino también a través de conductos de gran apertura (superior a 0.1 m), donde el flujo subterráneo es similar al flujo de los ríos o arroyos superficiales, incluso más rápidos y turbulentos.

Las complejidades que presentan los acuíferos kársticos llevan a los investigadores a complementar los métodos de investigación, como el análisis morfoestructural, con estudios geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, indicadores de la calidad del agua y monitoreo de pozos, entre otros (Pulido, 2001). Sin embargo, estos solo proporcionan información de carácter parcial sobre el grado de desarrollo de la karstificación, pero no pueden determinar la estructura interna del sistema kárstico. Está es la razón más importante de llevar a cabo los métodos de exploración.

Para las técnicas geofísicas, es un desafío la caracterización adecuada de las heterogeneidades de los entornos kársticos, ya que dependen de condiciones específicas como el clima, el tipo de drenaje, la saturación e, incluso las condiciones físicas o geoquímicas del sistema.

II.1.3. Partes de un acuífero kárstico

Dentro de las particularidades de los acuíferos kársticos, Aguilar *et al.* (2011) explica que se pueden encontrar cuatro zonas específicas (**Figura No. 2**):

1. La **zona de absorción o recarga** es aquella que representan un ingreso de agua al acuífero, y una parte puede llegar a ser almacenada. Es la zona superficial o externa que incluye al suelo y al relieve, por lo que existen puntos de recarga directa e indirecta. Un ejemplo de recarga directa son los sumideros. Las dolinas, uvalas y poljes se denominan de recarga indirecta, ya que concentran dicha recarga.

2. La **zona de circulación vadosa no saturada o de transferencia vertical**: se refiere a un medio de drenaje que se localiza en la zona no saturada y se conecta con la zona freática por medio de fisuras verticales y conductos que hacen descender el agua en forma de un cauce torrencial y cascadas que erosionan las paredes.
3. La **zona de fluctuación o epifreática** se localiza entre la zona no saturada y la saturada; cuenta con un funcionamiento mixto, ya que en ocasiones puede encontrarse saturada y, en otras, no presentar saturación.
4. Por último, se encuentra la **zona saturada o freática** la cual está compuesta por una red de conductos que presentan alta permeabilidad y una gran capacidad de almacenamiento.

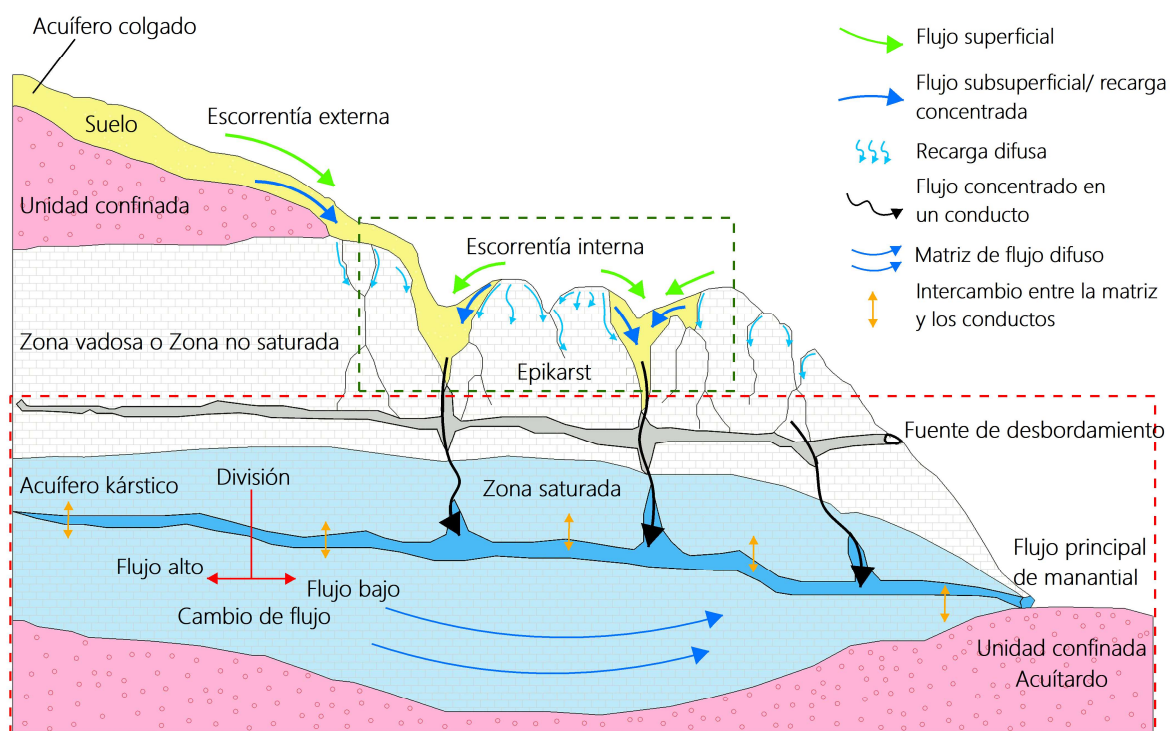


Figura No. 2. Diagrama esquemático de un acuífero kárstico
Diagrama de bloques geológicos que ilustra la diferencia entre la recarga alógena y autógena al epikarst y los conductos. (Redibujado de Goldscheider y Drew, 2007)

II.1.4. Morfología kárstica

Julivert, (1957) menciona que la morfología kárstica es el estudio de los fenómenos resultantes, tanto superficiales como subterráneos, de la acción dinámica de los agentes erosivos, principalmente del agua. Define a la morfología superficial como el estudio de las formas del relieve kárstico, mientras que, la morfología subterránea corresponde al estudio de las diversas formas de las cavernas creadas a consecuencia del *karst*.

Por su parte Stevanović *et al.* (2024) explica las diferentes clasificaciones para las formaciones kársticas superficiales y subterráneas que encontró en los diferentes paisajes kársticos. El autor describe que existen tres grupos principales de formas kársticas superficiales llamados *karrens* (*Lapies* en francés), valles cortados por ríos superficiales (alogénicos, ciegos y semiciegos, secos y de bolsillo) y depresiones cerradas (dolinas y poljes).

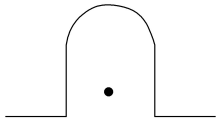
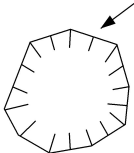
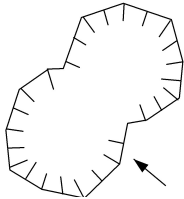
En cuanto al relieve subterráneo, Stevanović *et al.* (2024) considera que las cuevas kársticas¹ son originadas principalmente por dos entornos:

- A. El **entorno epigénico** se refiere a las cavernas que se desarrollan junto con la superficie terrestre y se modifican, o modificaron, por medio de los conductos que transportaban aportaciones hídricas, por lo que también pertenecen al sistema de agua subterránea.
- B. Por otro lado, el **entorno hipogénico** considera un tipo de cuevas, junto con los vacíos y conductos asociados, que fueron formados a profundidad sin ningún vínculo directo con la superficie terrestre suprayacente o inmediatamente adyacente. Los fluidos que disuelven la roca pueden provenir de fuentes distantes, confinados por rocas menos permeables, o de fuentes profundas (hasta varios kilómetros), en cuyo caso suelen ser de tipo termal.

¹ Una cueva es un vacío formado naturalmente en un material terrestre, lo suficientemente grande como para permitir la entrada humana. (Stevanović *et al.*, 2024)

En la **Tabla 1** se presentan los tipos de depresiones en los acuíferos kársticos, las cuales representan zonas de recarga hídrica directa o indirecta para el acuífero profundo con base en Aguilar Duarte (2013).

Tabla 1. Depresiones geomórficas que constituyen a los acuíferos kársticos y también fungen como zonas de recarga hídrica (Redibujado con base en Aguilar Duarte, 2013)

TIPO DE DEPRESIÓN	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA
Tubo de Disolución	Tubo circular o elíptico inclinado formado por la disolución.	
Cueva	Cavidades en las rocas comunicadas con la superficie a través de pequeños orificios.	
Sumidero	Es una depresión, donde el agua desaparece subterráneamente en una región caliza.	
Dolina	Se forman por la disolución o colapso de la roca y por la existencia de fracturas que se entrecruzan en el interior, generando un punto de absorción para captar agua.	
Uvala	Depresión de planta irregular, formada por la unión de dos o más dolinas; representa un estado avanzado del karst.	
Polje	Depresiones de gran tamaño (más de 1 km ²), parecen valles o cuencas debido a su gran anchura y longitud. las circunferencias de estas llanuras generalmente son empinadas, su fondo es plano con sedimentos y tierra fértil, su drenaje es subterráneo, pero cuando se presenta alguna corriente superficial se hunde a través de hoyos	

II.1.5. Métodos de caracterización del karst

Uno de los primeros pasos que se utilizan para comprender la geometría de un acuífero kárstico es el mapeo de las características kársticas superficiales y subterráneas, también conocido como marco hidrogeológico, el cual consiste en la recopilación de información de todo tipo de datos del subsuelo que conduzcan a la creación de un modelo conceptual que permita una comprensión básica del mismo; es de importancia para las investigaciones y el análisis de acuíferos.

Los entornos kársticos requieren de un conjunto de información del subsuelo para lograr conceptualizar adecuadamente los componentes de recarga, almacenamiento y flujo. Es por este motivo que se necesita la combinación de varios métodos de investigación, que en complemento obtengan una visión más amplia del sistema. Es decir, con los métodos de investigación se busca identificar los límites físicos de los sistemas acuíferos y sus características hidrológicas e hidráulicas. Por lo tanto, las investigaciones deben centrarse en el mapeo de las propiedades de almacenamiento y transmisividad que presentan las diferentes rocas.

Se han desarrollado múltiples métodos de investigación: hidráulicos, hidrológicos y geofísicos; sin embargo, muchas de estas técnicas no se han podido generalizar debido a las especificaciones que se requieren para llevarse a cabo, tales como: las dificultades técnicas que surgen en los trabajos de campo, los costos elevados y los requisitos específicos de mano de obra.

Dentro de la información del subsuelo que se requiere se incluye: la construcción de pozos de agua y monitoreo del nivel freático, información sobre la extracción de agua subterránea; información de pruebas de acuíferos en el área de estudio, estudios geofísicos superficiales o de pozos, entre otros (Kuniansky *et al.*, 2022).

Los autores mencionan que es recomendable tomar en cuenta la aplicabilidad de los diferentes métodos de caracterización con base en dos puntos específicos:

1. El volumen del acuífero a muestrear.
2. La proporción de flujo dominado por conductos en el volumen del acuífero analizado.

Además, hacen especial énfasis en que se debe tener una buena comprensión de la problemática que se quiere resolver para así elegir el método más adecuado para cada caso.

La **Tabla 2** muestra algunas de las técnicas hidráulicas, hidrológicas y geofísicas que más se utilizan en la caracterización del *karst*, tomando en cuenta el volumen de agua a muestrear.

Tabla 2. Métodos de investigación utilizados para la caracterización de acuíferos kársticos con base al volumen que se va a muestrear. (Modificado de Kuniansky *et al.*, 2022)

ESCALA	DIMENSIÓN	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN
Local	Áreas menores a 1 km ²	❖ Pozos individuales ❖ Pruebas de sondeo en pozos ❖ Estudios de métodos geofísicos ❖ Datos de pozo (corte litológico)
Cuenca	Áreas entre -20 a 3,000 km ²	❖ Pruebas de rastreo de agua ❖ Hidrogramas de manantial ❖ Análisis químico-gráfico ❖ Pruebas trazadoras cuantitativas
Regional	Áreas mayores a 25,000 km ²	❖ Mapeo del nivel estático ❖ Pruebas de rastreo con trazadores naturales o artificiales ❖ Muestreo de calidad del agua ❖ Mapeo de fallas y diaclasas ❖ Métodos geofísicos (de pozo y superficie)

II.1.6. Métodos geofísicos utilizados para la caracterización del karst

Por su parte, los estudios geofísicos buscan caracterizar al subsuelo mediante las variaciones de sus parámetros físicos, midiendo un conjunto de datos.

Esto puede realizarse mediante métodos pasivos, que registran las señales naturales de los campos terrestres, como los cambios en la gravedad, el campo electromagnético o la radiación natural; o con métodos activos, que requieren de generar artificialmente las perturbaciones, como la medición de la respuesta de la tierra a fuentes mecánicas, electromagnéticas, radiactivas o sonoras.

Estos métodos proporcionan una gran cantidad de información útil, necesaria para los estudios ambientales y de agua subterránea, entre otras áreas de interés (Kuniansky *et al.*, 2022).

Los autores mencionan que existen métodos geofísicos de superficie, los cuales operan generando perturbaciones desde la superficie terrestre o utilizando al aire como medio; y los métodos de pozo, que registran las mediciones dentro de perforaciones en el subsuelo.

Para obtener los resultados esperados y una aplicación exitosa de los diferentes métodos, es necesario comprender el principio físico que rige a cada uno de ellos y sus limitaciones, así como conocer la herramienta de medición, la propiedad geofísica que se está prospectando y la interpretación física de lo que se está haciendo.

Para el caso del mapeo hidrogeológico, se recomienda realizar una combinación de mediciones de pozos con exploración geofísica de superficie; en conjunto, permite proporcionar la cobertura del área necesaria para caracterizar mejor el subsuelo.

En la **Tabla 3** se resume esta información y se presentan las técnicas geofísicas, exponiendo los alcances de cada una, así como las limitaciones respecto a lo que se busca prospectar.

Tabla 3. Principios físicos de los métodos Geofísicos. (Modificado de Kuniansky *et al.*, 2022)

MÉTODO	PROPIEDAD FÍSICA MEDIDA	¿CÓMO FUNCIONA?	¿QUÉ DETECTA?
Gravimétrico	Densidad	Detecta variaciones en el campo gravitacional de la Tierra causadas por variaciones de masa.	❖ Profundidad ❖ Geometría y densidad de características subsuperficiales locales ❖ Detección de cavidades
Magnéticos	Propiedades magnéticas	Detecta variaciones en el campo magnético terrestre causadas por variaciones locales.	❖ Profundidad ❖ Geometría ❖ Susceptibilidad magnética de características subsuperficiales localizadas
Sísmicos	Ondas compresionales, de corte y superficiales; velocidades sísmicas; y módulos elásticos	Envía ondas elásticas a través del subsuelo y analiza los cambios en velocidades y reflexiones o refracciones a medida que las ondas atraviesan las diferentes capas del suelo.	❖ Profundidad de interfaces ❖ Velocidades de capas ❖ Geometría o estructura ❖ Módulos elásticos ❖ Porosidad
Eléctricos	Resistividad eléctrica	Detecta el flujo de corriente eléctrica natural o inducida a través de los materiales del subsuelo; las propiedades eléctricas están controladas por las propiedades del material del subsuelo junto con porosidad y composición de fluidos en poros.	❖ Profundidad ❖ Espesor ❖ Resistividad eléctrica ❖ Porosidad ❖ Química de fluidos inferida ❖ Ubicación de la interfaz agua salada/agua dulce
Radar de Penetración Terrestre	Permitividad dieléctrica y susceptibilidad magnética	Envía ondas de radio de alta frecuencia a través del subsuelo; el análisis es similar al sísmico, la reflexión y refracción dependen de las propiedades electromagnéticas de los materiales del suelo.	❖ Velocidad de las ondas electromagnéticas ❖ Profundidad ❖ Espesor ❖ Geometría de las estructuras

II.2. Radar de Penetración Terrestre (GPR)

El método de Radar de Penetración Terrestre o *Ground Penetrating Radar* (GPR) es una técnica de alta resolución que emplea campos electromagnéticos para identificar cambios en las propiedades de los materiales y detectar estructuras (Annan, 1992). Su funcionamiento consiste en la transmisión de ondas electromagnéticas y el registro de las reflexiones producidas por las interfaces entre materiales con diferentes propiedades eléctricas. La propagación de este tipo de ondas es un fenómeno complejo que involucra campos vectoriales eléctricos y magnéticos acoplados, cuyo comportamiento depende de la conductividad eléctrica y la constante dieléctrica del medio (Goldscheider y Drew, 2007).

La Sísmica de reflexión y la técnica de GPR son análogas, pues la propagación de la energía y la teoría de física de ondas es la misma para ambas, la diferencia radica en el método de propagación, unas son ondas acústicas mientras que otras son electromagnéticas por esta razón los avances tecnológicos del procesamiento de datos sísmicos impulsaron el crecimiento, la comprensión y aplicación de la técnica de GPR a múltiples campos de investigación (Caceido *et al.*, 2003).

En el área de hidrogeología su uso a menudo se ve limitado por restricciones importantes, como la atenuación de la señal en terrenos altamente conductivos, aun así, cuando las condiciones son favorables los resultados han sido más que beneficiosos, algunos ejemplos son Davis y Annan (1989); Van Overmeeren (1994); Wyatt y Temples (1996) y Tronicke *et al.* (1999) en Kirsch (2006).

Dentro de las aportaciones más importantes que ha hecho el GPR para la hidrogeología kárstica se encuentra el mapeo de rasgos kársticos subsuperficiales como: cavidades, conductos y fracturas, así como la caracterización del Epikarst y zonas de infiltración a detalle (Chalikakis *et al.*, 2011).

II.2.1. Fundamentos Teóricos del método de GPR

II.2.1.1. Principios físicos fundamentales del campo electromagnético

El fenómeno electromagnético, su origen, comportamiento y relación, es descrito por medio de las Ecuaciones de Maxwell y son necesarias para el entendimiento de la física detrás de la propagación de las ondas electromagnéticas (Gómez y González, 2012).

La forma más sencilla de abordar la teoría básica del Radar de Penetración Terrestre es a través de estudiar el comportamiento de la onda plana y uniforme.

Las variables involucradas y sus respectivas magnitudes son:

El vector intensidad de campo eléctrico $\vec{E} \left[\frac{V}{m} \right]$

El vector densidad de desplazamiento eléctrico $\vec{D} \left[\frac{C}{m^2} \right]$

El vector intensidad de campo magnético $\vec{H} \left[\frac{A}{m} \right]$

El vector de inducción magnética $B \left[T = \frac{Wb}{m^2} \right]$

El vector densidad de corriente $\vec{J} \left[\frac{A}{m^2} \right]$

La densidad de carga $\rho \left[\frac{C}{m^3} \right]$

Asimismo, es conveniente establecer las siguientes variables, que resultan ser características de los diferentes medios y que más adelante se explicaran una a una:

La permeabilidad magnética $\mu \left[\frac{H}{m} \right]$

La permitividad eléctrica $\epsilon \left[\frac{F}{m} \right]$

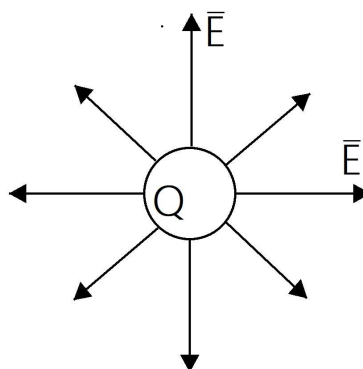
La conductividad eléctrica $\sigma \left[\frac{S}{m} \right]$

II.2.1.1.1. Vector intensidad de campo eléctrico $\vec{E}$

Si se tiene una carga Q que se encuentra estacionaria en el espacio, está tiene la propiedad de crear una cantidad eléctrica alrededor de ella, que se llama intensidad de campo eléctrico E y es una cantidad vectorial, su magnitud representa la fuerza por unidad de carga situada en el punto donde está estacionaria, su dirección es radial y saliente de la carga positiva como lo muestra la **Figura No. 3** (Jordan y Keith, 1973).

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \hat{r} \dots (2.1)$$

El valor de esta magnitud física nos da una idea de la intensidad de la fuerza eléctrica que sufrirá una carga situada en un lugar determinado.



**Figura No. 3. Campo eléctrico generado por una carga Q .
Modificado de Ida (1992).**

II.2.1.1.2. El vector densidad de desplazamiento eléctrico D

Existe un punto particular en donde, la Intensidad de campo eléctrico E depende no solo de la magnitud y posición de dicha carga, sino también de la constante dieléctrica del medio en la que se mide dicho campo. Por tanto, es deseable asociar con la carga Q , una segunda cantidad eléctrica que sea independiente del medio, a esta cantidad le llamamos vector de desplazamiento o densidad de flujo eléctrico (Jordan y Keith, 1973).

Para el caso de una carga puntual y aislada que se encuentra alejada de otros cuerpos, se supone está rodeada por otra esfera de radio infinito. Por lo tanto, el desplazamiento eléctrico en un punto de la superficie esférica de radio r centrada en la carga aislada Q será:

$$D = \frac{q}{4\pi r^2} \dots (2.2)$$

Jordan y Keith (1973) mencionan que el desplazamiento por unidad de área en cualquier punto depende de la dirección del área, por lo tanto, es una cantidad vectorial, su dirección es la normal al elemento de superficie que haga el máximo desplazamiento del área.

Para el caso de la carga aislada, esta dirección es radial desde la carga y es igual que la Intensidad de campo eléctrico $\vec{E}$.

$$\vec{D} = \frac{q}{4\pi r^2} \hat{r} \dots (2.3)$$

Podemos entonces decir que $\vec{D}$ y $\vec{E}$ se encuentran relacionados por la siguiente ecuación vectorial que además resulta ser la primera de las tres denominadas ecuaciones constitutivas:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \dots (2.4)$$

En general esta es cierta para todo medio isótropo, por tanto, su valor se mantiene constante. Para materiales anisótropos $\vec{D}$ y $\vec{E}$ tendrán direcciones diferentes.

II.2.1.1.3. Permittividad eléctrica ϵ

En este punto se define a ϵ como la permitividad eléctrica de un material y expresa la capacidad intrínseca de los materiales para almacenar o liberar energía electromagnética en forma de carga eléctrica, también se relaciona con el grado de polarización que muestra un material bajo la influencia de un campo eléctrico. Por lo tanto, la permitividad de un material se expresa en términos de la permitividad relativa (ϵ_r) por la permitividad del vacío ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$) y es adimensional (Jordan y Keith, 1973).

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \dots (2.5)$$

II.2.1.1.4. Vector intensidad de campo magnético $\vec{H}$

Ahora se supone que la carga Q ya no se encuentra estacionaria, más bien se mantienen en movimiento en el espacio a una velocidad determinada, el movimiento de dichas corrientes eléctricas producirá una intensidad de campo magnético $\vec{H}$ (Jordan y Keith, 1973).

No obstante, si el movimiento de cargas ocurre en un alambre conductor (**Figura No. 4**), la intensidad del campo eléctrico es prácticamente despreciable, esto debido a que los electrones se mueven entre posiciones vacantes en los átomos del material conductor y la red de cargas es en esencia cero.

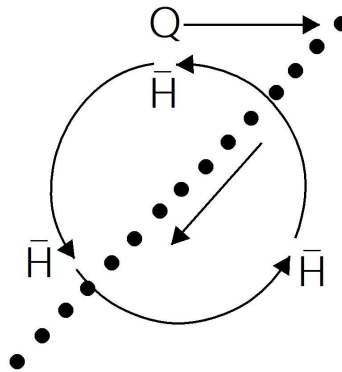


Figura No. 4. Campo magnético generado por el movimiento de cargas Q .
Modificado de Ida (1992).

II.2.1.1.5. Vector densidad de flujo magnético $\vec{B}$

El flujo magnético por unidad de área a través de un bucle de área pequeña se denomina Densidad de flujo magnético B en dicho punto, dependerá de su orientación y de su área.

El flujo magnético B a través de una superficie es:

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} \dots (2.6)$$

En un medio homogéneo, la densidad de flujo magnético y la corriente obedecen esta relación de proporción:

$$B \propto \frac{\mu I}{r} \dots (2.7)$$

Donde r es la distancia desde el conductor y μ es una constante que depende del medio. Por tanto, la intensidad del campo magnético se define así por la relación en función de la corriente que la produce y de la forma geométrica del sistema (Jordan y Keith, 1973).

Se puede decir que $\vec{B}$ y $\vec{H}$ son cantidades vectoriales que tienen igual dirección y sentido (en medios isotrópicos), por lo que la siguiente relación se cumple. Dando como resultado la segunda de las tres denominadas ecuaciones constitutivas, la cual describe como los momentos magnéticos intrínsecos (atómicos y moleculares) responden a un campo magnético (Annan, 1992):

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \dots (2.8)$$

II.2.1.1.6. Permeabilidad magnética μ

Al igual que la permitividad, μ se define como la permeabilidad de un material y está de manera análoga es una constante que depende del medio, expresando la capacidad intrínseca de los materiales a ser susceptibles al paso de un flujo magnético.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \dots (2.9)$$

Esta se expresa en términos de la permeabilidad relativa (μ_r) por la permeabilidad del vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$) (Jordan y Keith, 1973).

II.2.1.1.7. Vector de densidad de corriente eléctrica $\vec{J}$

La densidad de corriente $\vec{J}$ es un vector que representa las corrientes eléctricas (cargas en movimiento) que circulan sobre el interior de un volumen (Jordan y Keith, 1973).

Entonces la relación que existe entre la corriente y su densidad se define como:

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{a} \dots (2.10)$$

II.2.1.1.8. La densidad de carga ρ

Como la corriente es una carga en movimiento, la corriente total saliente de un volumen debe ser igual a la velocidad de decrecimiento de la carga dentro del volumen.

En términos matemáticos, este concepto de conservación de la carga se establece como:

$$\oint J \cdot da = -\frac{d}{dt} \int \rho dV \dots (2.11)$$

II.2.1.1.9. Conductividad Eléctrica σ

La conductividad σ está expresada por medio de la Ley de Ohm, la cual describe como las cargas libres fluyen para formar una corriente cuando existe un campo eléctrico (Annan, 1992).

$$J = \sigma E \dots (2.12)$$

Salas (2007) menciona que de manera general cuando se analizan problemas del campo eléctrico, se pueden distinguir entre dos tipos de materiales: dieléctricos o conductores.

Los materiales dieléctricos son caracterizados por su permitividad eléctrica ϵ .

Los materiales conductores son aquellos que permiten el paso de corriente y se caracterizan por su conductividad eléctrica σ (Blancas, 2000).

II.2.1.2. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell, nombradas en honor al matemático James Clerk Maxwell son un grupo de ecuaciones diferenciales parciales, lineales en espacio y en tiempo, que en conjunto con las condiciones de frontera y la ecuación de continuidad describen la física detrás de los campos eléctrico y magnético. Consisten en cuatro expresiones que representan leyes físicas y derivan de la Ley de Ampere (2.8), la Ley de Faraday (2.9) y dos más desarrolladas de la Ley de Gauss (2.10 y 2.11) (Gómez y González, 2012).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots (2.8)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots (2.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \dots (2.10)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \dots (2.11)$$

Cuando los campos interactúan con los diferentes materiales existentes en la Tierra, las ecuaciones pueden asumir formas no lineales, dando paso a la obtención de las relaciones constitutivas, las cuales son el medio para describir la respuesta física del campo electromagnético a dicho material. El conjunto de ambas, son la base para la descripción cuantitativa de las señales de GPR (Jol. *et al.*, 2009).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \dots (2.12)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \dots (2.13)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \dots (2.14)$$

Considerando el caso más simple, en el que: existe un dieléctrico perfecto exento de cargas y corrientes de conducción, resulta que las ecuaciones (2.8) y (2.10) se reducen a:

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots (2.15)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \dots (2.16)$$

Al diferenciar la ecuación (2.15) respecto al tiempo y aplicando el rotacional, se obtiene:

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial(\nabla \times \vec{H})}{\partial t} \dots (2.17)$$

También ε y μ son independientes del tiempo, por lo que al reescribirse las ecuaciones (2.12) y (2.13):

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \dots (2.18)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \dots (2.19)$$

De igual manera se reescribió (2.17) y al utilizar (2.18) se obtuvo:

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial^2 t} \dots (2.20)$$

Al aplicar rotacionales a ambos miembros de (2.9) y empleando (2.19).

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \nabla \times \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \dots (2.21)$$

Sustituyendo (2.20) en (2.21):

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial^2 t} \dots (2.22)$$

Se utilizaron identidades y después se desarrolló:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla \nabla \cdot \vec{E} - \nabla^2 \vec{E} \dots (2.23)$$

Se combino (2.22) y (2.23):

$$\nabla \nabla \cdot \vec{E} - \nabla^2 \vec{E} = -\mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial^2 t} \dots (2.24)$$

Al reducir términos, se obtuvo la ecuación de onda, que de igual forma es válida para $\vec{H}$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial^2 t} \dots (2.25)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial^2 t} \dots (2.26)$$

II.2.1.3. Propagación de las ondas electromagnéticas en materiales dieléctricos disipativos

Para comprender la física detrás del GPR, es necesario estudiar el fenómeno de la propagación de ondas en un material dieléctrico disipativo.

Daniels *et al.* (1988) explican que en general los estudios de esta técnica se limitan a la propagación de ondas planas y uniformes. Los frentes de ondas más complejos siempre pueden escribirse como una combinación de ondas planas. Los materiales terrestres y en particular, los suelos se consideran un medio dieléctrico conductor (con pérdidas). Por lo tanto, las ecuaciones de Maxwell que describen la propagación de ondas en un dieléctrico conductor escritas en un régimen armónico son:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -j\omega\mu\vec{H} \dots (2.27)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} \dots (2.28)$$

Tomando en cuenta que:

$\sigma = \sigma' - j\sigma''$ es la conductividad compleja del medio y describe su capacidad para conducir la corriente eléctrica. En frecuencias altas, el tiempo de respuesta puede ser significativo lo que resulta en una componente σ'' desfasada que suele ser pequeña en la mayoría de las frecuencias de GPR.

$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ es la permitividad compleja del medio; la parte real ϵ' es una medida de la capacidad del medio para polarizarse bajo un campo eléctrico. La parte imaginaria se relaciona con el componente de la polarización desfasada y no puede despreciarse en la mayoría de las frecuencias de radar.

μ es la permeabilidad del medio. A menos que el material no sea ferroso, la siguiente aproximación es válida $\mu \approx \mu_0$

De la ecuación (2.28), se descompone su parte real e imaginaria y se renombra:

$$\sigma + j\omega\epsilon = (\sigma' + \omega\epsilon'') + j\omega\left(\epsilon' - \frac{\sigma''}{\omega}\right) = \sigma_e + j\omega\epsilon_e \dots (2.29)$$

Donde:

σ_e se define como la conductividad efectiva real

ε_e se define como la permitividad efectiva real

Se puede concluir entonces que σ_e determina una corriente en fase con el campo eléctrico y ε_e está relacionada con una corriente desfasada con respecto a dicho campo. (Daniels *et al.*, 1988).

Se define entonces a la permitividad aparente compleja ε^* como:

$$j\omega\varepsilon^* = \sigma_e + j\omega\varepsilon_e \dots (2.30)$$

La tangente de pérdida representa la razón que existe entre las corrientes de conducción y las de desplazamiento. Este parámetro es usado para determinar qué tipo de corrientes predominan en un medio y se define como:

$$\tan d = \frac{\sigma_e}{\omega\varepsilon_e} \dots (2.31)$$

Ahora bien, se considera un material dieléctrico disipativo cuando la tangente de pérdida es menor a 1. Al sustituir (2.31) en (2.30), es posible notar que la permitividad aparente compleja se puede expresar como una función de la tangente de pérdida:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_e(1 - j \tan d) \dots (2.32)$$

Retomando la ecuación (2.28) podemos entonces escribir:

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\varepsilon^*\vec{E} \dots (2.33)$$

Finalmente, sustituyendo (2.27) en (2.33), se obtiene la ecuación de onda que describe la propagación de la onda electromagnética en un medio dieléctrico con pérdidas.

$$\nabla^2 \vec{E} + \varepsilon^*\mu\omega^2\vec{E} = 0 \dots (2.34)$$

La solución de la ecuación de onda (2.34) representa una onda plana y armónica que se propaga en la dirección de $\vec{k}$ dada por:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-j\vec{k}\vec{r}} \dots (2.35)$$

Donde el número de onda es $k = |\vec{k}|$ definido por:

$$k = \omega\sqrt{\epsilon^*\mu} \dots (2.36)$$

k es un número complejo llamado constante de propagación (Annan, 1992), por lo que puede separarse en una parte real y otra imaginaria.

$$k = a + jb \dots (2.37)$$

Entonces la solución de la onda plana (2.34) puede reescribirse como:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-\vec{a}\vec{r}} e^{-j\vec{b}\vec{r}} \dots (2.38)$$

El primer término exponencial representa la atenuación de la onda plana en un medio con pérdidas. La magnitud de esta atenuación está determinada por el valor de la constante de atenuación a en la ecuación (2.39).

El segundo término exponencial representa la fase, y está controlada por la constante b en la ecuación (2.40) (Daniels *et al.*, 1988).

$$a = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon_e}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} - 1 \right)} \dots (2.39)$$

$$b = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon_e}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} + 1 \right)} \dots (2.40)$$

II.2.1.4. Velocidad

La velocidad de propagación de la onda se relaciona con la constante de fase mediante la siguiente ecuación Daniels *et al.* (1988):

$$v = \frac{\omega}{b} \dots (2.41)$$

Debido a que los materiales terrestres son considerados dieléctricos de baja pérdida, se cumple la siguiente aproximación:

$$(\tan d)^2 \ll 1 \dots (2.42)$$

Estos materiales tienen una tangente de pérdida menor a 1 y esto suele ocurrir cuando el contenido de humedad del suelo no es excesivo. Entonces la velocidad de las ondas electromagnéticas en el suelo puede expresarse como:

$$v \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots (2.43)$$

Donde c es la velocidad de propagación del vacío y ϵ_r es la parte real de la permitividad relativa. La expresión anterior es generalmente aceptada y precisa, incluso con suelos de mayores pérdidas (Medios saturados).

II.2.1.5. Longitud de onda

La longitud de onda λ se define como la distancia que ocupa una onda sinusoidal en recorrer un ciclo completo de $2\pi r$, Jordan & Keith (1973) explican que por definición se tiene:

$$b\lambda = 2\pi \dots (2.41)$$

Si utilizamos la relación (2.40) y despejamos a b :

$$b = \frac{\omega}{v} \dots (2.45)$$

Despejando a λ de la ecuación (2.44), sustituyendo a b por la ecuación (2.45) y $\omega = 2\pi f$ se obtendrá que la longitud de onda es igual al cociente de la velocidad entre la frecuencia de la onda.

$$\lambda = \frac{2\pi}{b} = \frac{2\pi v}{\omega} = \frac{v}{f} \dots (2.46)$$

II.2.1.6. Profundidad de penetración o Skin Depth

Cuando una onda incide en un medio que tenga conductividad, está se atenuará al atravesar sobre él debido a las pérdidas que este tiene. En un buen conductor la rapidez de atenuación es muy grande y la onda solo podrá penetrar un poco antes de ser reducida a un porcentaje despreciable de su intensidad original (Jordan y Keith, 1973).

Por lo tanto, se define como profundidad de penetración δ , a aquella en que la onda se atenúa a una razón de $1/e$ de su valor original. Por definición esta distancia será:

$$\delta = \frac{1}{a} = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1 \right)}} \dots (2.47)$$

$$\delta = \frac{1}{b} \cong \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} + 1 \right)}} \dots (2.48)$$

Para un material conductor la profundidad de penetración está dada por:

$$\delta = \frac{1}{a} \cong \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \dots (2.49)$$

Para un material dieléctrico disipativo la profundidad de penetración se define como:

$$\delta = \frac{1}{b} \cong \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \dots (2.50)$$

II.2.1.7. Impedancia electromagnética

En los apartados anteriores se demostró que las soluciones de las ecuaciones de Maxwell corresponden a campos eléctricos y magnéticos acoplados.

Estos campos son perpendiculares entre sí y se propagan en una dirección perpendicular a ambos. Como se demostró ambos campos satisfacen la misma ecuación de una onda plana transversal, por lo que, al resolver para un campo, se obtiene de inmediato la solución para el otro (Annan, 1992).

Debido al acoplamiento entre ambos campos, se puede introducir el término de impedancia electromagnética que está definida como:

$$Z = \frac{E}{H} = \mu v = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \dots (2.51)$$

Para simplificar los cálculos al trabajar con señales sinusoidales se puede utilizar:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon + i \frac{\sigma}{\omega}}} \dots (2.52)$$

II.2.2. Funcionamiento del equipo

Las ondas de radio son diseñadas y emitidas (Transmitidas) por una fuente (en este caso por medio de antenas), que detectan a los objetos a una distancia determinada mediante el retorno (reflexión) de una parte de la energía que incide sobre él. La **Figura No. 5** muestra el funcionamiento básico del equipo de Radar de Penetración Terrestre, el cual utiliza dichas ondas para mapear la estructura interna de los materiales (Annan, 1992).

Para que dicho retorno de energía exista es necesario que las propiedades electromagnéticas entre el objeto de interés y el material circundante sean diferentes, los cambios en la permitividad dieléctrica y la conductividad eléctrica causan la dispersión de las ondas de radio (energía electromagnética). Las antenas al detectar esta energía dispersa pueden ubicar las fuentes generadoras.

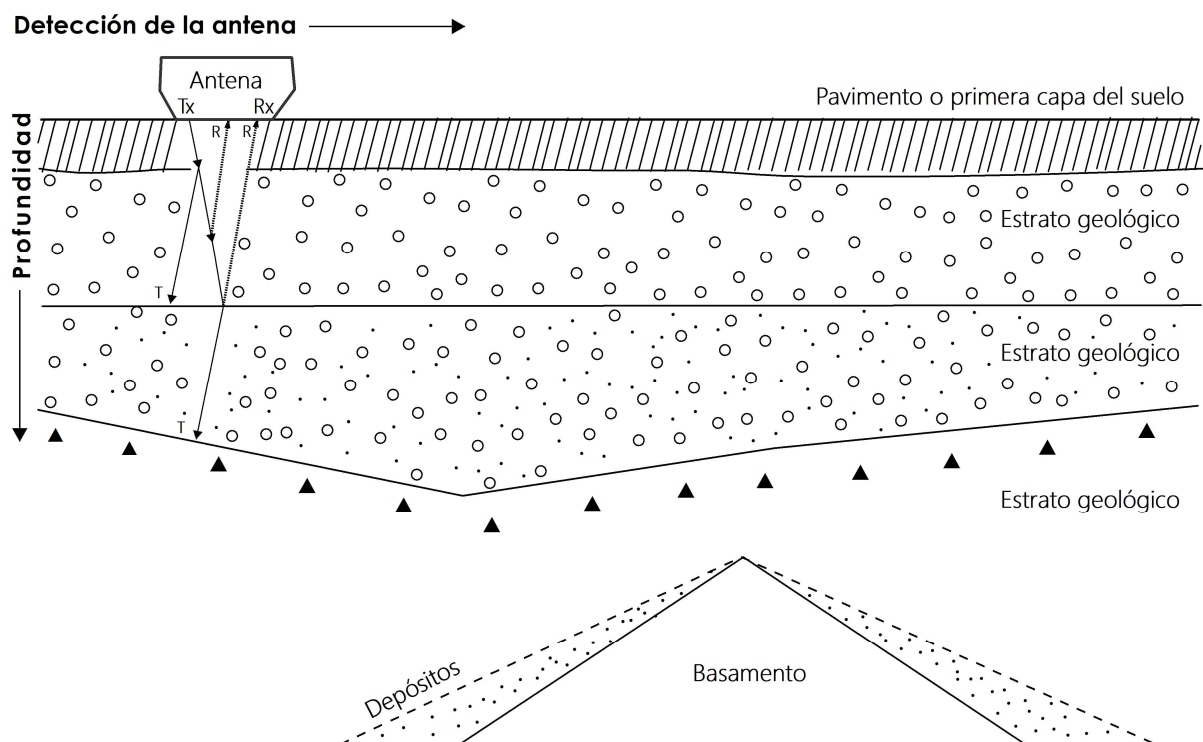


Figura No. 5. Representación esquemática del funcionamiento de GPR.
Redibujado a partir de Blancas (2000).

II.2.2.1. Componentes

Persico (2014) indica que todo sistema de Radar de Penetración Terrestre está compuesto por cuatro elementos básicos y cada uno cumple una parte específica dentro del sistema (**Figura No. 6**).

El sistema se conforma por: una unidad de control, un dispositivo de transmisión, un dispositivo de recepción y finalmente uno de exhibición-almacenamiento. A continuación, se detalla la función de cada uno:

1. **Unidad de control:** Es la parte del equipo que genera la señal electromagnética y se encarga de sincronizar los pulsos en la unidad de transmisión y recepción, así como también controlar los parámetros de diseño de pulso como son: el tiempo de medición, el muestreo, las trazas enviadas por segundo, el posicionamiento de la ondícula en el tiempo cero, en algunos equipos recientes se puede realizar la aplicación de filtros como el ajuste de la ganancia y la remoción del ruido de fondo.
2. **Unidad de Transmisión:** La antena transmisora es el dispositivo del equipo que irradia la señal previamente diseñada al subsuelo.
3. **Unidad de Recepción:** Se refiere a la antena receptora que detecta las ondas que se reflejan cuando se encuentran una discontinuidad enterrada o una interfaz entre dos estratos en los que cambian las propiedades electromagnéticas de los materiales.
4. **Unidad de Exhibición:** comprende al monitor en donde se muestra la señal captada de la sección final en tiempo real del levantamiento llamado “radargrama” mostrándose como un perfil continuo de trazas individuales o como una interpolación de los datos en escala de grises o de colores, que se queda grabada y almacenada en la memoria del equipo para su posterior descarga y análisis.

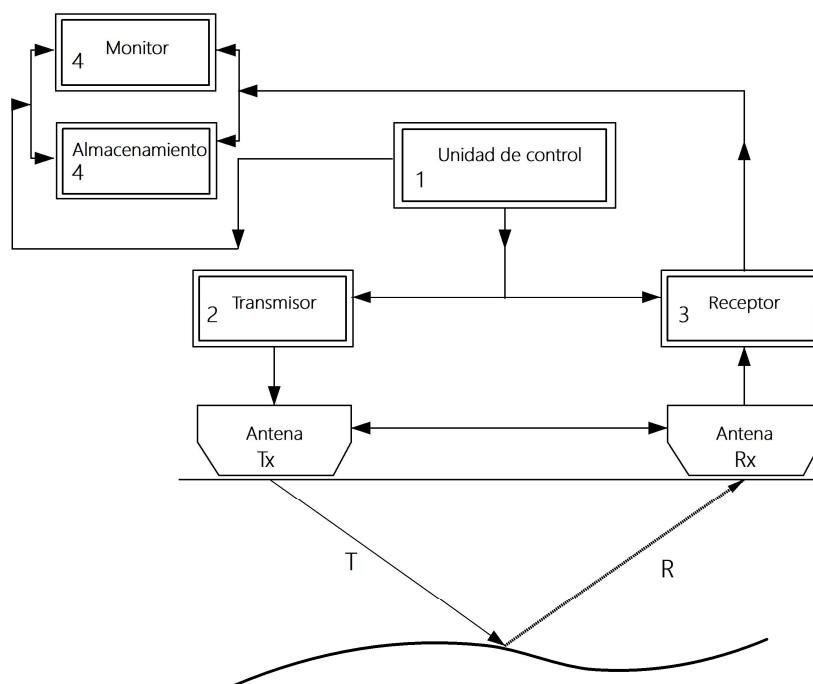


Figura No. 6. Diagrama de los componentes elementales de un equipo de GPR.
Elaboración propia, redibujado con base en Annan (1992).

II.2.2.2. Selección de Antenas

Las antenas son elementos indispensables de la técnica de Radar de Penetración Terrestre ya que son las encargadas de recibir la información del subsuelo en forma de reflexiones mediante la transmisión de pulsos electromagnéticos de corta duración que son diseñados desde la unidad de control y que en algunos equipos pueden ser modificados a conveniencia del objetivo de estudio.

Usualmente, las antenas empleadas son dipolos eléctricos que pueden cumplir funciones tanto de transmisión como de recepción de señales (**Figura No. 7**) (Jol *et al.*, 2009).

La Norma ASTM D6432-19 menciona que cuando un solo dispositivo realiza ambas funciones simultáneamente, se denomina antena monoestática. En cambio, si la transmisión y la recepción se llevan a cabo mediante dipolos distintos, se habla de un sistema biestático.

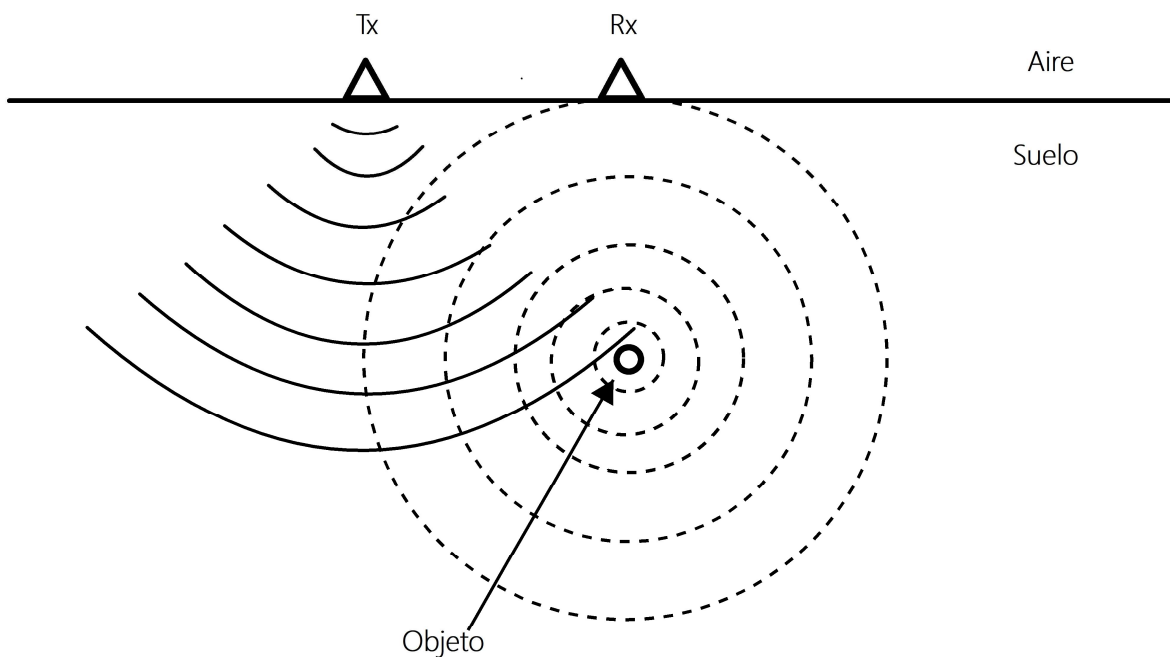
Jol *et al.* (2009), enfatizan que estos dispositivos funcionan ya que acoplan la energía de una fuente de radiofrecuencia a un medio de transmisión que, en el caso del GPR, normalmente

es el suelo y esto afecta considerablemente sus características de radiación, especialmente si se encuentra eléctricamente cerca del suelo.

El autor también explica que las antenas se pueden clasificar en dos tipos:

1. **Omnidireccionales:** aquellas que irradian energía en todas direcciones de manera simultánea.
2. **Direccionales:** irradian energía en patrones que se extienden desde la antena en una dirección para una posición determinada.

Por su parte Parasnis (1996) menciona que la longitud de onda de la antena dependerá del carácter de transmisión del pulso, en específico de su duración, comúnmente se conoce como longitud de pulso y entre más grande sea la longitud se necesitará de una antena de mayor tamaño.



**Figura No. 7. Funcionamiento del principio de las antenas.
Redibujado a partir de Persico (2014).**

II.2.2.3. Arreglos monoestáticos y biestáticos

Cuando se utilizan antenas monoestáticas el Transmisor (T_x) y el Receptor (R_x) se encuentran dentro de un solo dispositivo, por lo que la separación entre (T_x) y (R_x) es fijada una distancia (x) que dependerá de las especificaciones del fabricante para los diferentes equipos de GPR, una de sus ventajas principales es que son de fácil manejo, portabilidad y velocidad en la adquisición, sin embargo, una clara desventaja es que no se puede variar la distancia entre dipolos y se debe considerar que se puede introducir un tipo de ruido de baja frecuencia debido a la cercanía entre ambos dipolos. Por otro lado, las antenas biestáticas son aquellas en las que el Transmisor y Receptor se encuentran en diferentes dispositivos, por lo que la distancia entre dipolos puede ser variada y este hecho ofrece muchas más ventajas.

Además, la configuración de los dipolos puede ser “cross-line” o “in-line” como se muestra en la **Figura No. 8**, en ambos casos la dirección del radargrama es a lo largo de la línea que une a los centros de las antenas.

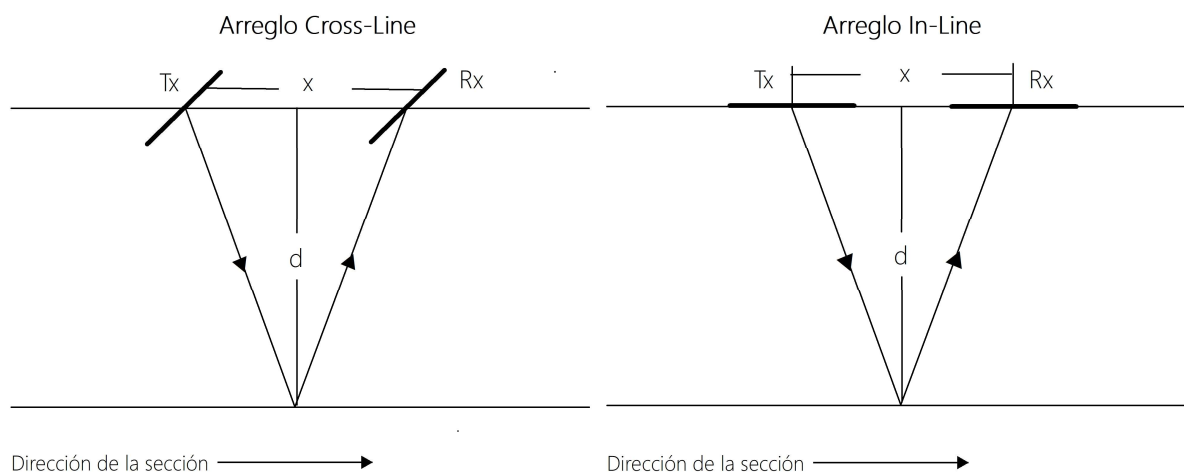


Figura No. 8. Representación esquemática de la configuración de dipolos.
Redibujado a partir de Salas, (2007).

Para los sistemas biestáticos existen muchos más arreglos que para los sistemas monoestáticos Jol *et al.* (2009) nos hablan de las diferencias entre todos ellos a continuación:

A. Desplazamiento Común Offset, Común simple o Reflexión

El sondeo de Reflexión consiste en mover al mismo tiempo las antenas transmisora y receptora (T_x y R_x) a con una distancia fija (x) a través de la superficie terrestre como se observa en la **Figura No. 9**, este tipo de sondeo es similar al que se realiza en sismica de reflexión.

La energía de la antena es radiada y transmitida por el medio terrestre con una polarización específica para el campo generado y detectado, la geometría del levantamiento es fija, es decir, la separación y orientación entre dispositivos no cambia, las mediciones se realizan con intervalos regulares, lo que resulta bastante útil para la aplicación de técnicas avanzadas de procesamiento.

Los parámetros que definen a un estudio de reflexión son: la ventana del tiempo de registro, el intervalo de muestreo, la separación entre antenas, la separación entre líneas u la orientación de la antena.

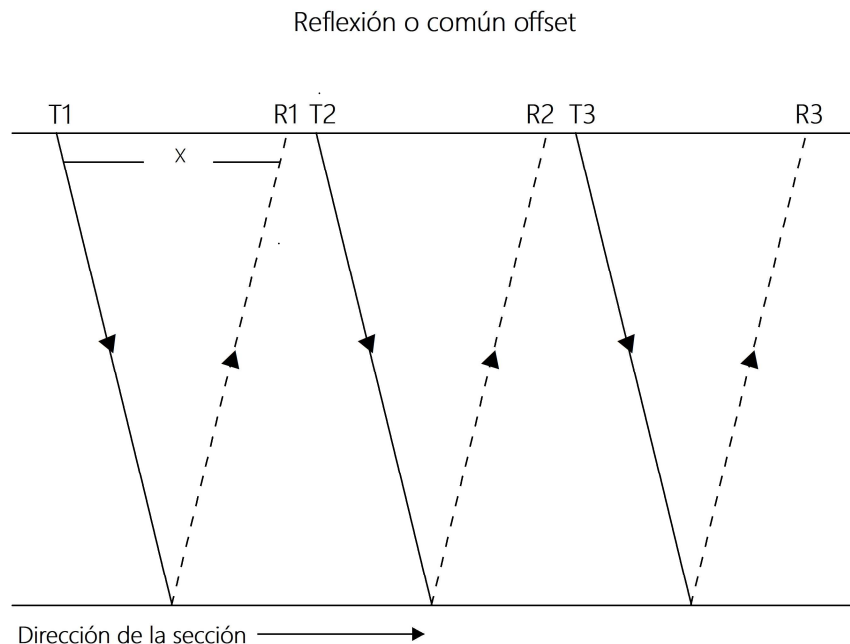


Figura No. 9. Representación esquemática de un arreglo de reflexión o Común Offset Redibujado a partir de Lapazaran, (2004).

B. Arreglos Common Mid-Point y Common Deep Point

En los sondeos *Common Mid-Point* o Punto Medio Común (CMP) y *Common Deep-Point* o Punto de Profundidad Común (CDP) se varía el espaciamiento entre receptor y transmisor desplazándose en intervalos fijos a partir de un punto central y en direcciones opuestas.

La diferencia del CMP y CDP, radica en esencia al método para la obtención de la velocidad del medio, ya que la adquisición se realiza de la misma manera.

Estos sondeos se utilizan principalmente para obtener la estimación de la velocidad de la señal del GPR en función de la profundidad del suelo, variando la separación entre las antenas y midiendo el cambio en el tiempo de viaje bidireccional como se muestra en la **Figura No. 10**.

Además, se pueden hacer mediciones de desplazamiento múltiple en cada estación que resulta al equivalente electromagnético de la refracción sísmica.

En cuanto a los beneficios de este sondeo, es que el apilamiento puede mejorar la relación ruido-síñal y se puede obtener una sección transversal de velocidad completa.

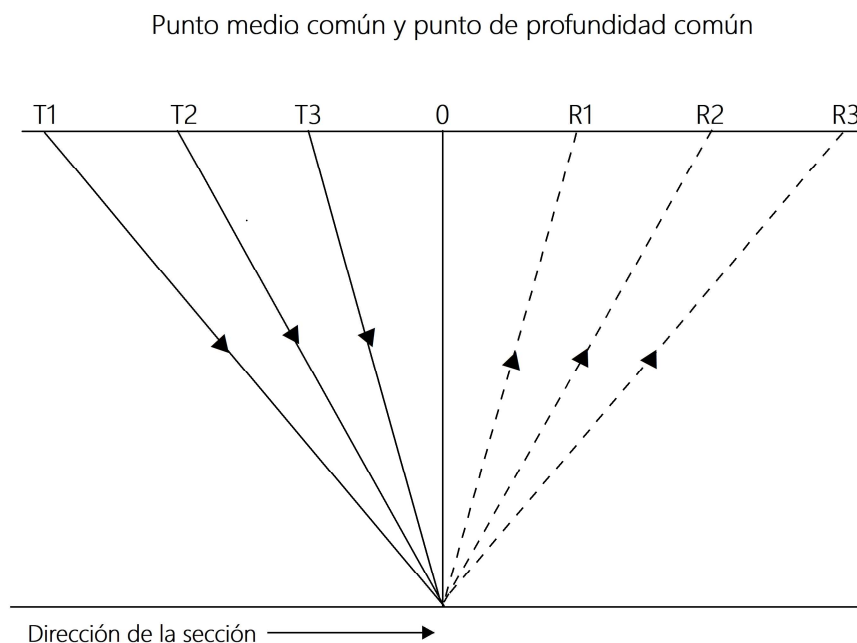


Figura No. 10. Representación esquemática de los arreglos CMP y CDP
Redibujado a partir de Lapazaran, (2004).

C. Wide Angle Reflection and Refraction (WARR)

El sondeo *Wide Angle Reflection and Refraction* o Reflexión y Refracción de ángulo amplio consiste en dejar fija la antena transmisora (T_x) mientras que la antena receptora (R_x) se desplaza a intervalos de distancia fija tal como se muestra en el esquema de la **Figura No. 11**.

La ventaja de este arreglo es que solo se moverá una sola antena de manera continua o discreta.

Persico *et al.* (2014), comentan que este arreglo es utilizado no solo para medir las características del suelo, sino que, también se puede mejorar la calidad de la imagen obtenida. En contraparte, en un estudio a gran escala no es muy práctico, además de que la mejora en la imagen suele ser mínima.

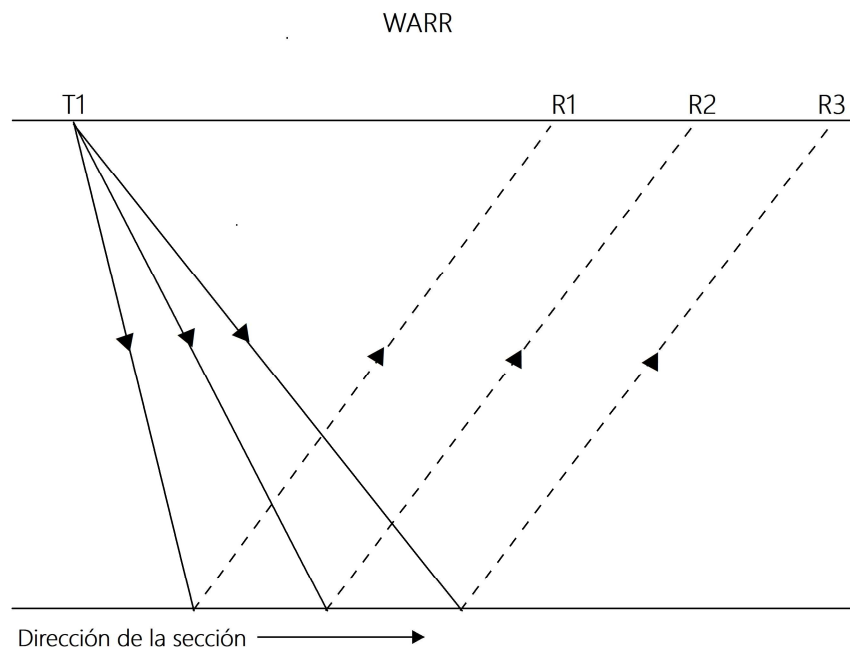


Figura No. 11. Representación esquemática de las antenas en el arreglo WARR
Redibujado a partir de Lapazaran, (2004).

II.2.2.4. Ancho de pulso, frecuencia central, ventana de tiempo y muestreo

El objetivo de los estudios de GPR es obtener información indirecta del subsuelo mediante las ondas de radio por lo tanto el campo electromagnético en función del espacio y el tiempo debe muestrearse y registrarse (Jol *et al.*, 2009). El diseño del estudio debe apegarse entonces a los principios fundamentales de muestreo, es decir, las frecuencias, los intervalos de muestreo temporal y espacial, deben cumplir con los criterios de muestreo Nyquist.

Al desplazar una antena de GPR por el suelo, ésta emite una sucesión de pulsos diseñados con la misma forma y duración en un intervalo de tiempo definido. Al mismo tiempo cada pulso puede ser descompuesto como un conjunto de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, amplitudes y fases variables en el tiempo. (Persico *et al.*, 2014).

Cada pulso que es enviado al subsuelo se encuentra definido por un rango de frecuencias, comúnmente llamado ancho de banda y la frecuencia central de la antena dictará la frecuencia a la cual la mayor parte de la energía del pulso será concentrada, esto es de suma importancia ya que con esto se determinara la resolución y la profundidad de penetración.

Se conoce como ventana de tiempo al intervalo temporal entre dos pulsos transmisores en el cual son leídas y grabadas las reflexiones, este parámetro se puede modificar en la mayoría de los equipos de GPR. Para estimarlo, se necesita tener una idea de la profundidad máxima de investigación que se requiere alcanzar y la constante dieléctrica o la velocidad del medio del sitio en donde se realizará el estudio. Si recordamos que el tiempo de viaje de una reflexión será aquel que tarda en viajar al reflector y regresar, entonces una ventana de tiempo (τ_w) será equivalente a la máxima profundidad que se alcanzó con el sondeo, si v es la velocidad promedio del recorrido (Daniels, 2004).

$$\frac{v\tau_w}{2} = Prof_{m\acute{a}x...} \quad (2.53)$$

El intervalo de muestreo indica el tiempo en que la señal entrante es leída (muestreada) y, obedece a la teoría del muestreo de Nyquist, la cual explica que para reconstruir la señal y evitar perder información o generar efectos, se debe muestrear al menos dos veces la

frecuencia máxima. Por lo tanto, la mitad de la frecuencia de muestreo (f_s) se conoce como Frecuencia de Nyquist (f_n) y es igual a:

$$f_n = \frac{f_s}{2} = \frac{1}{2T_s} \dots (2.54)$$

Por lo que el intervalo de muestreo queda definido de la siguiente forma:

$$T_s \leq \frac{1}{2f_{max}} \dots (2.55)$$

El intervalo de muestreo normalmente se define por las especificaciones del equipo o por la frecuencia de muestreo, sin embargo, Jol *et al.* (2009) recomiendan un mínimo de seis veces la frecuencia central.

II.2.2.5. Secciones y apilamiento

En la mayoría de los casos, las secciones se adquieren de forma continua, desplazando las antenas a lo largo del perfil. Obteniéndose una serie temporal que posteriormente será digitalizada y almacenada en la memoria del equipo.

Una traza es el conjunto de valores de amplitud que registra el equipo como respuesta del pulso emitido. El apilamiento (*stacking*) se define como la suma o el promedio de múltiples trazas que se recolectan en un mismo punto, mientras que, el radargrama será el resultado de la secuencia de trazas apiladas a lo largo de la sección.

II.2.2.6. Resolución

Kirsch (2006) nos menciona que la resolución es la capacidad que tiene el sistema de Radar de Penetración Terrestre para diferenciar elementos discretos y distinguir señales muy cercanas en tiempo o frecuencia. Este parámetro dependerá de la frecuencia central de la antena y del ancho de banda (rango de frecuencias), así como de la polarización de la onda electromagnética, el contraste de los parámetros electromagnéticos (conductividad y permitividad relativa) y la geometría del objetivo (tamaño, forma y orientación). Asimismo,

Menciona que es necesario considerar el acoplamiento de la antena con el suelo, los diagramas de radiación de las antenas (la zona de Fresnel) y las condiciones de ruido antropogénico.

Jol *et al.* (2009) explica que la resolución del GPR consta de dos componentes (**Figura No.12**): la Resolución horizontal (Desplazamiento angular o lateral) y la Resolución vertical (Alcance o profundidad), se mencionan a continuación.

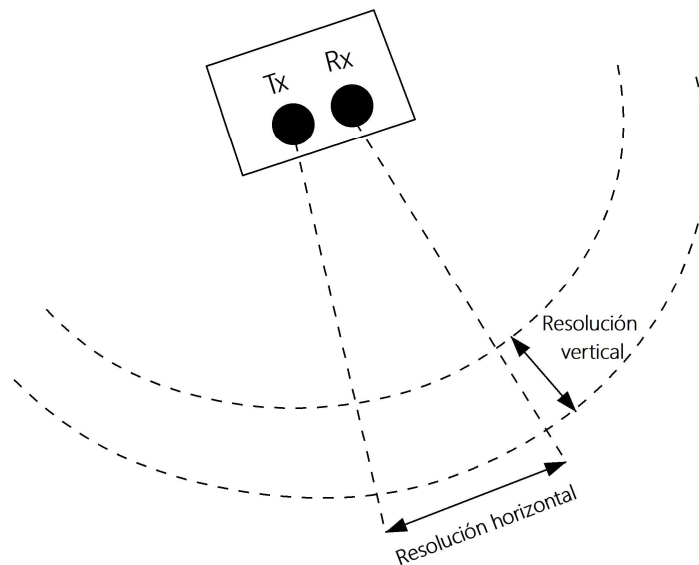


Figura No. 12. Representación esquemática de la resolución de la antena
Elaboración propia, modificado a partir de Jol *et al.*, (2009).

II.2.2.6.1. Resolución Horizontal

La resolución horizontal se refiere a la capacidad que tiene el sistema para detectar un objeto considerando sus dimensiones laterales y su geometría respecto al arrastre de las antenas en la superficie del terreno. Blancas (2000) explica que la energía reflejada que detecta la antena no proviene de un mismo punto, sino de un área finita en forma de cono, donde la parte más importante proviene del área central, llamada primera zona de Fresnel.

Por su parte Jol *et al.*, (2009) define teóricamente la resolución horizontal tomando en cuenta la velocidad, el ancho de pulso y la distancia al sistema. A mayor distancia, mayor longitud de la resolución:

$$R_H = \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \dots (2.56)$$

Los factores más importantes que considerar según Blancas (2000) son: el número de trazas por segundo, la profundidad y el tamaño a la que se encuentra el objetivo de interés y la velocidad de desplazamiento de la antena.

II.2.2.6.2. Resolución vertical

La resolución vertical se refiere a la separación mínima detectable en profundidad entre dos interfases reflectoras, está dependerá del ancho del pulso (Salas, 2007). Es la capacidad que tiene el sistema para diferenciar elementos independientes y distinguir las señales que se encuentran cercanas en tiempo o frecuencia (Blancas, 2000).

Se define teóricamente la resolución vertical del sistema tomando en cuenta a c como la velocidad de la luz, B el ancho de banda y ϵ_r la permitividad relativa (Jol et al, 2009):

$$R_v = \frac{c}{2B\sqrt{\epsilon_r}} \dots (2.57)$$

Los sistemas de GPR están diseñados para detectar objetos en un rango de frecuencias (ancho de banda (B)) que obedece a la frecuencia central, por lo que el ancho del pulso (Δt) es inversamente proporcional a la frecuencia central (Δf) (Blancas, 2000).

$$\Delta t = \frac{1}{B} \approx \frac{1}{f_c} \dots (2.58)$$

De la relación anterior podemos concluir que la frecuencia central determina la profundidad de penetración, ya que son inversamente proporcionales. Si la frecuencia disminuye la profundidad de investigación aumenta y si la frecuencia aumenta la profundidad disminuye. Sin embargo, a mayor profundidad de investigación menor será la resolución, por lo que siempre es recomendable tener un punto medio entre resolución y profundidad de penetración.

II.2.3. Procesamiento de Datos

Con el procesamiento de datos se busca suprimir las señales no deseadas y mejorar la calidad y visualización de las anomalías. Consiste en una serie de pasos que ayudan a incrementar la profundidad de investigación, la resolución, corregir factores geométricos para realizar una interpretación espacial adecuada y destacar eventos que a simple vista no son claros.

II.2.3.1. Edición

La edición en los datos de GPR es uno de los pasos iniciales para obtener un buen procesamiento, especialmente en proyectos con grandes volúmenes de información ya que está implícito el ordenar, reorganizar y ubicar correctamente las trazas, además de conservar desde el inicio los mejores datos (Kirsch,2006). Los errores inevitables durante la adquisición de campo, como parámetros o registro incorrectos del levantamiento, intervalos de muestreo erróneos o una posición inicial inadecuada, pueden afectar el análisis y obligar a aplicar algún otro tipo de tratamiento o manipulación de las secciones. Es común editar o filtrar las trazas vacías, incoherentes o ruidosas, causadas por fallas internas del equipo, ruido antropogénico o una velocidad irregular del arrastre de las antenas. Cuando es menor el número de trazas corrompidas debido a una mala adquisición, la edición puede hacerse de forma manual; no obstante, en condiciones difíciles puede requerir un esfuerzo mayor, afectando de manera negativa a la campaña de adquisición ya que puede distorsionar la estructura de los datos y las características del subsuelo.

Para algunos procesos avanzados, disponer de datos equidistantes y regulares es indispensable como en el caso de la migración, sin embargo, en la práctica es demasiado complejo obtener dicho resultado por que se emplean diferentes interpolaciones para corregir las variaciones de velocidad y obtener trazas equidistantes.

II.2.3.2. Corrección de Deriva del Tiempo Cero o Primer Arribo

La corrección de deriva del tiempo cero se refiere al ajuste de las trazas a una posición de inicio común antes de poder aplicar los métodos de procesamiento. Esto se suele identificar siguiendo criterios específicos (p. ej., el primer punto de ruptura de la onda aérea o el primer pico negativo de la traza), este paso a menudo, los softwares de procesamiento lo realizan de manera automática.

Múltiples factores pueden causar este tipo de saltos en el tiempo inicial de llegada de las ondículas aire a tierra, como por ejemplo las diferencias de topografía o la inestabilidad electrónica del equipo, por lo tanto, es necesario corregir el tiempo cero en cada radargrama, en circunstancias normales, las ondículas que presentan desfases pronunciados suelen ser pocas, sin embargo, en algunos casos, en las secciones extremadamente ruidosas se pueden presentar problemas para definir el tiempo de arribo ya que no existe un inicio o pico definitivo en la parte inicial de la ondícula aire-tierra.

Por lo tanto, se debe tener cuidado para garantizar que la corrección del tiempo cero produzca resultados consistentes en todas las trazas, es recomendable intentar correlacionar las reflexiones en secciones individuales.

No definir el tiempo cero de manera correcta en la sección, afecta directamente a la posición de los objetos, a la profundidad de las interfaces en la sección y la secuencia temporal de eventos posteriores.

II.2.3.3. Filtros digitales

Jol *et al.* (2009) explica que la aplicación y el diseño de filtros se utiliza para remover señales no deseadas que pueden ser provocadas por reflexiones coherentes y/o ruido de carácter antropogénico (coherente y aleatorio) Sin embargo, también son útiles para extraer aspectos específicos de los datos y por lo tanto facilitar su interpretación.

Estos filtros se aplican de forma vertical y horizontal a los datos, con el objetivo de limpiar las secciones y aumentar la relación señal-ruido.

Para elegir los límites en el diseño de filtros horizontales, se deben observar los posibles reflectores y elegir el que mejor se pueda visualizar en el radargrama, este será tomado como referencia, el más pequeño será el límite inferior y el más grande será el límite superior.

En cambio, para seleccionar los límites de los filtros verticales se debe hacer un análisis en frecuencia, revisando el espectro de frecuencias y observando en qué intervalo es donde existe la mayor cantidad de información, además de considerar el ancho de banda que rige a cada antenna utilizada en la adquisición de cada perfil.

II.2.3.4. Función de ganancia y escala de color

El uso de funciones de ganancias temporales se realiza para mejorar la apariencia de los datos ya que debido al efecto de la atenuación a profundidad y las pérdidas por propagación geométrica o por algún error en la aplicación de ganancia en la campaña de exploración se requiere resaltar eventos tardíos en los registros de GPR, es necesario entender que la aplicación de estos procesos alteran la estructura de los datos (de alguna manera se modifican las amplitudes relativas y/o las relaciones de fase). Por lo tanto, las señales son amplificadas indiscriminadamente, es decir, sin distinguir o separar señales coherentes de señales aleatorias por este motivo es recomendable tratar los datos con cuidado durante su interpretación (Jol *et al.*, 2009).

Las funciones de ganancia se pueden aplicar fácilmente, modificando parámetros como la longitud de la ventana (en nanosegundos), la función de ganancia (lineal, exponencial, definida por el usuario, etc.) y la ganancia máxima permitida.

Existen diferentes tipos, pero todas operan de manera similar, aplican un factor multiplicador a regiones sucesivas de la traza en el tiempo (denominadas ventana temporal). Las funciones de ganancia más comunes según Jol *et al.* (2009), son las siguientes:

1. SEC o decaimiento de energía: corrige automáticamente la amplitud de la señal asociada a la pérdida de energía debida al efecto de dispersión geométrica del frente de ondas que se propaga (aproximadamente una relación $1/r^2$).
2. Las ganancias definidas por el usuario, constantes, lineales o exponenciales son funciones de ganancia que se aplican sistemáticamente y que cuentan con un operador matemático o de multiplicación específico definido por el usuario o por el sistema automáticamente. En general, conservan cierta información de la amplitud relativa, pero la cantidad de esta depende del tipo y el modo de la función aplicada.
3. AGC: Función de ganancia automática se aplica a cada traza, basada en la diferencia entre la amplitud media de la señal en una ventana de tiempo específica y la amplitud máxima de la traza en su conjunto. Esta función sirve para mostrar eventos débiles y profundos, pero amplifica todas las señales del radargrama (tanto el ruido como las señales coherentes). También es importante configurar la longitud correcta de la ventana, considerar una ventana de tiempo muy pequeña (normalmente inferior al 3 % de la longitud total de la muestra o al 25 % de la longitud de la ondícula de propagación) provoca una gran cantidad de amplitud en la señal, lo que genera una sección confusa. Por el contrario, si la ventana es demasiado larga (normalmente superior al 10 % de la longitud total de la muestra o el doble de la longitud de la ondícula), se generan zonas de sombra de amplitud reducida en la parte posterior de las reflexiones y la sección tiende a presentar un aspecto deslavado. Para evitar estos efectos, se requiere una selección prudente de la ventana de muestra o se debe escalar la ganancia máxima de la función AGC para que coincida con la amplitud decreciente de los datos.

II.2.3.5. Deconvolución

La deconvolución es una técnica de filtrado que se utiliza de manera rutinaria en el procesamiento de datos sísmicos.

De manera general, se utiliza para incrementar la resolución temporal y eliminar cierto tipo de ruido (reflejos repetitivos) que se pueden generar si existe una reflexión intensa de un objeto superficial, que de otro modo ocultarían las reflexiones que se encuentran a mayores profundidades.

El medio por donde viaja el pulso electromagnético actúa como un filtro, de manera ideal la señal que se registra en la antena receptora tiene que ser el resultado de la convolución del pulso con la reflectividad del medio, sin embargo, en la realidad no solo se registran las reflexiones primarias sino también reflexiones múltiples, difracciones y ruido antropogénico (coherente y aleatorio).

La convolución en el dominio del tiempo es el equivalente a la multiplicación en el dominio de la frecuencia. Por lo tanto, el modelo convolutivo se puede expresar de la siguiente manera:

$$t = s * y * p * r \dots (2.59)$$

Donde las variables involucradas son:

t =Traza de GPR registrada

s =Pulso emitido

y =Respuesta del sistema

p =Factores de emisión y del medio de propagación

r =Reflectividad del medio

Existen dos tipos de deconvolución:

1. **Deconvolución impulsiva:** Se define como un proceso mediante el cual el pulso electromagnético es comprimido
2. **Deconvolución predictiva:** Es aquella en la que el operador es estrictamente el inverso del pulso.

II.2.3.6. Migración

La migración es una técnica de procesamiento que sitúa a los reflectores en sus posiciones correctas y colapsa las difracciones (Blancas, 2000). Este proceso especial enfoca el patrón de radiación de la antena proporcionando una imagen más clara de los objetos

El principio de este método es reconstruir con precisión la sección de GPR utilizando un modelo de velocidad del subsuelo. Lo ideal es que las hipérbolas de difracción se conviertan en puntos y las reflexiones inclinadas se ubiquen correctamente.

No obstante, Jol *et al.* (2009) menciona que todos los métodos de migración dependen de ciertos supuestos que frecuentemente no se cumplen en la práctica, especialmente en entornos geológicos complejos, por ejemplo:

- Que la velocidad del subsuelo sea conocida o pueda estimarse con precisión y por tanto se construye con capas de velocidad constante e invariable lateralmente.
- Que la fuente del radar se propague de forma uniforme y esférica.
- Que no existan efectos de dispersión o atenuación en el material (es decir, sin pérdidas ni dependencia de frecuencia).
- Que los datos se recojan en modo de incidencia normal o monoestática (que no haya separación entre emisor y receptor).
- Que los materiales no tengan pérdidas y tengan propiedades independientes de la frecuencia.

De todos estos, el más crítico es el que asume que la velocidad es constante lateralmente ya que habla de un medio continuo, homogéneo e isótropo, pero en medios heterogéneos las variaciones pueden ser muy grandes incluso en distancias cortas, lo que puede hacer que el proceso de migración no funcione del todo. Aunque existen técnicas que toleran cierta variación, una heterogeneidad excesiva puede provocar errores significativos.

Incluso si se acepta este supuesto, el éxito del proceso depende en gran medida de contar con un análisis de velocidad preciso. En un caso ideal, se recolectarían datos CMP (punto

medio común) detallados en toda la zona de estudio, pero las restricciones de tiempo y presupuesto suelen limitar esta posibilidad. En su lugar, se emplean métodos como la coincidencia de hipérbolas, que solo ofrecen información puntual o localizada sobre la velocidad. Otra opción es utilizar migración iterativa para ajustar la velocidad a fin de obtener la imagen más clara posible, siempre y cuando se cuente con referencias confiables del subsuelo. Sin estos puntos de referencia, alcanzar una solución óptima resulta difícil.

II.2.3.7. Radargramas Sintéticos

La elaboración de radargramas sintéticos es una herramienta valiosa que nos permite evaluar el tipo de respuesta esperada de un posible escenario. Pilon (1992) explica que el concepto de radargrama sintético derivó de la idea de los sismogramas sintéticos muy utilizados en la industria petrolera. Estos modelos artificiales parten del concepto de un modelo homogéneo y estratificado de la Tierra con la característica de que el tiempo de viaje es uniforme. Al igual que en el cálculo de sismogramas sintéticos, la tierra es dividida en segmentos que presentan mismo espesor y tiempo de viaje, es entonces que la suposición de una onda plana que incide en la superficie y se propaga a profundidad en las diferentes capas del modelo se cumple.

Explica que las amplitudes de las ondas se determinan según la reflexión y transmisión de la señal incidente en cada interfaz, y el cálculo se realiza asumiendo un tiempo de viaje uniforme, aunque es posible usar algoritmos más complejos. En el modelo, las amplitudes de las ondas que atraviesan las capas se acoplan con coeficientes de reflexión y transmisión. Para los cálculos, se utiliza un modelo de capas planas con una onda plana incidente, lo cual permite aproximar la propagación esférica mediante la reducción de la amplitud que es inversamente proporcional al tiempo de propagación acumulado. Aunque este modelo no refleja de manera exacta la realidad, proporciona una buena estimación de las amplitudes relativas y las formas temporales de los eventos de reflexión que se pueden observar en datos reales de una sección geológica estratificada.

III. Área de estudio

III.1 Localización

El área de estudio se encuentra en la porción sureste de la República Mexicana, específicamente corresponde al estado de Yucatán, que en conjunto con Quintana Roo y la porción norte, centro y sureste de Campeche conforman la península de Yucatán, con una extensión de 116, 497 km².

Debido a sus características topográficas, en su territorio predominan las elevaciones cercanas al nivel del mar por lo que es considerada en su mayoría una superficie llana, sin embargo, existen lomeríos, cerros bajos y sierras modestas, que cuentan con elevaciones notables y que destacan del relieve plano y bajo de la península.

Al sur del estado de Yucatán y al noroeste de Campeche se encuentra el Cordón Puc o la sierrita de Ticul que es una colina de una diferencia de elevación del orden de 100 a 150 m s.n.m cercana al municipio de Ticul, avanzando al sur de Quintana Roo, el terreno tiene un desnivel topográfico que va desde los 40 m hasta más de 250 m s.n.m., en este punto predominan los cerros bajos que rodean pequeños valles aislados; hacia la frontera de México con la república de Guatemala, precisamente al sur del estado de Campeche se localiza el cerro Champerico que es el punto con mayor altitud de la península contando con 390 m s.n.m.

Debido a la pequeña diferencia de elevaciones que existe en la orografía del lugar, la península no presenta escurrimientos superficiales de mayor alcance, a excepción de las cuencas de los ríos Hondo ubicada al sureste del estado de Quintana Roo y las cuencas Palizada, Candelaria y Champotón en el estado de Campeche.

Por su parte, Yucatán cuenta con 106 municipios que se encuentran agrupados en siete regiones, su capital es el municipio de Mérida y se encuentra localizada en el noroeste de la península del mismo nombre, con una altitud promedio de 8 m s.n.m.

Específicamente, el municipio de Kinchil se encuentra en la región litoral del estado de Yucatán y dista geográficamente 34 km dirección suroeste de la capital.

Se encuentra situada entre los paralelos 20° 45" a 20° 55" de latitud norte y los meridianos 89° 54" a 90° 12" de longitud oeste, cuenta con 48 localidades y ocupa el 0.89% de la superficie del estado y su extensión es de 160 km² (INEGI, 2010).

Sus principales colindancias son: al norte con el municipio de Tetiz, al sur con Maxcanú y Chocholá, al este con Samahil y al oeste con Celestún.

En la región de Kinchil se presenta un relieve predominantemente plano su altura promedio es de 10 m s.n.m, clasificado como una llanura de barrera.

Lo conforman tres sistemas de topoformas; llanura aluvial costera inundable y salina, llanura rocosa de piso rocoso o cementado y llanura rocosa de transición de piso rocoso o cementado (SEDATU, 2018).

El suelo de estudio corresponde a un suelo del rocoso o cementado, con algunas áreas escarpadas. En el municipio no existen corrientes superficiales considerables.

El sitio de estudio se localiza en la zona urbana del municipio de Kinchil, a 1.5 km al noroeste de la cabecera municipal.

La **Figura No. 13**, presenta de manera detallada la localización del sitio de estudio a una escala regional, por otro lado, la **Figura No. 14** muestra el contexto del sitio de estudio a una escala municipal.

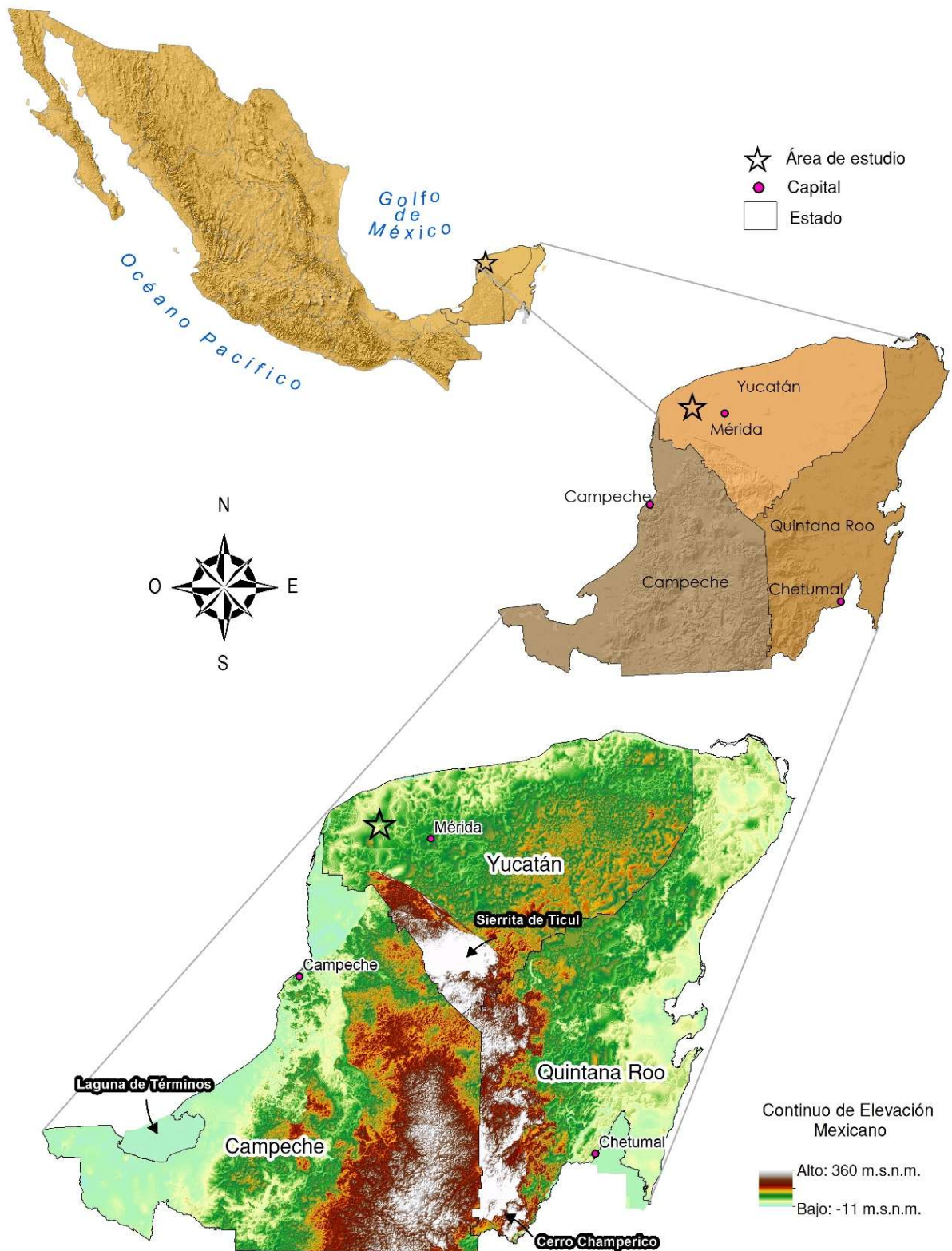


Figura No. 13: Mapa de localización regional del sitio de estudio
 13 a) Mapa regional de ubicación del sitio de estudio. 13 b) Península de Yucatán.
 13 c) Rasgos geomorfológicos. Elaboración propia con datos obtenidos de INEGI (2024).

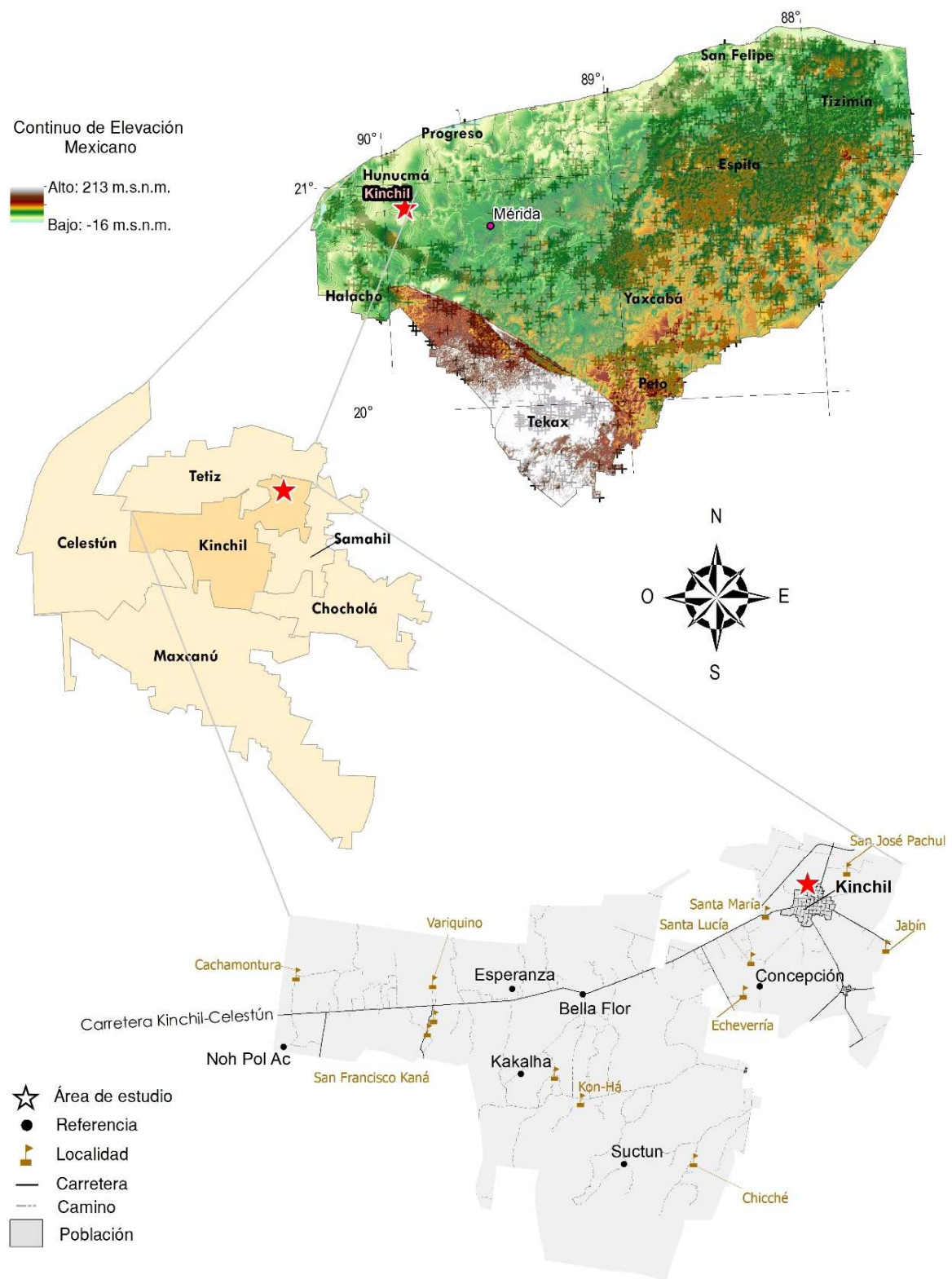


Figura No. 14. Mapa municipal y estatal del sitio de estudio
14 a) Mapa estatal de Yucatán. 14 b) Límites municipales de Kinchil. 14 c) Mapa de localización de área de estudio. Elaboración propia con datos obtenidos de INEGI (2024).

III.2 Marco Físico Regional

III.2.1. Fisiografía

De acuerdo con la clasificación de Raisz (1964), el sitio de estudio se localiza dentro de la provincia fisiográfica de la península de Yucatán (**Figura No. 15**) y debido a sus características ha sido denominada “Plataforma Calcárea de Yucatán”.

Ocupa en su totalidad la superficie del territorio de los estados de Yucatán, Quintana Roo y de manera parcial el estado de Campeche (INEGI 2016); limita con las montañas de Chiapas y se extiende al Golfo de México con una plataforma continental que se encuentra ausente por un abrupto talud vertical hacia el oriente en el mar Caribe. (Lugo-Hubp, 1990)

Es considerada una de las estructuras geológicas y geomorfológicas más jóvenes del territorio mexicano constituida por potentes estratos de rocas carbonatadas y evaporíticas que van desde el Paleógeno hasta el Cuaternario y que comenzó a emerger hace aproximadamente 26 millones de años. (INEGI 2016 y Conagua 2024)

La morfología de la península según Lugo-Hubp (1990), consiste en tres unidades principales: la planicie costera que se conforma por una franja estrecha de depósitos marinos recientes y un litoral de acumulación, la planicie interior (porción septentrional) de plataforma en estructura escalonada; finalmente la porción meridional, constituida por lomeríos de 200 a 400 m s.n.m.

Como principal rasgo fisiográfico se encuentra la sierrita de Ticul, que es una delgada alineación de lomas y cerros bajos con orientación noroeste-sureste, tratándose de un bloque elevado delimitado por una falla normal (Lugo-Hubp *et al.*, 1992) y que separa la topografía de Yucatán en dos partes (Conagua 2024).

La característica principal del relieve de la península es el desarrollo del *karst*, con cientos de dolinas, generalmente con un lago interior y que se conocen como cenotes. Gerstenhauer, 1969, citado en Lugo-Hubp *et al.* (1992), mencionan que en la Península existieron dos etapas de generación de *karst*: la primera es antigua de la época paleógena que presenta

formas propias del clima tropical como los conos *kársticos* en una superficie elevada, mientras que, la segunda es joven, en la planicie de hasta 25 o 30 m de altura debido a un ascenso gradual del agua subterránea y aunque este último inició durante el Mioceno, adquirió su aspecto actual hasta el Cuaternario.

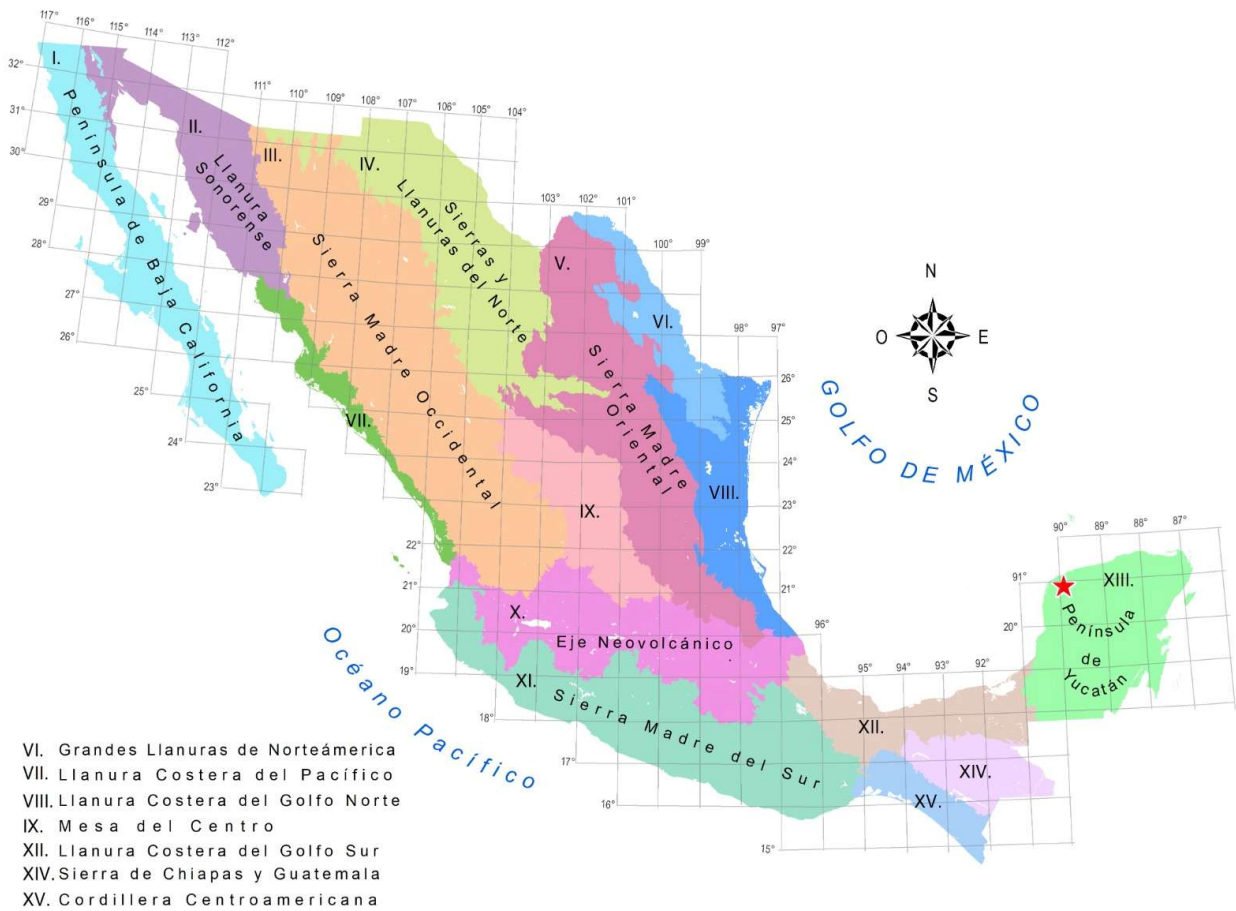


Figura No. 15. Mapa de las Provincias fisiográficas de la República Mexicana.
 Elaboración propia con datos de INEGI (2024).

III.2.2. Geomorfología

Los límites geomorfológicos de la Península de Yucatán se encuentran en el norte y parte del talud continental del banco de Campeche, al sur incluye el Petén de Guatemala y las montañas Maya de Belice, al oriente por el talud continental del mar del Caribe y al oeste la planicie costera del Golfo de México, en el sureste limita al estado de Campeche y al oriente el estado de Tabasco.

Según Conagua (2024) es posible identificar cuatro tipos de geoformas en la Península: llanuras, lomeríos, playas o barras y una pequeña sierra.

Las llanuras son las que cubren la mayor parte de la superficie, a excepción del suroeste y sur centro de la Península

Los lomeríos son del tipo altos en la porción suroeste y su característica principal es que muestran un relieve más pronunciado que las áreas que los circundan, por otro lado, los lomeríos bajos se alternan con hondonadas o con llanuras, favoreciendo el desarrollo de algunas corrientes que conectan a algunos cuerpos superficiales.

Las playas o barras se localizan en todo el perímetro del estado de Yucatán, en algunas zonas costeras del estado de Quintana Roo y Campeche, así como en la laguna de Términos.

La sierra de Ticul corresponde al rasgo más característico de la superficie del acuífero, se extiende sobre una franja con orientación noroeste-sureste de menos de tres kilómetros de ancho.

Las geoformas *kársticas* más características son: las dolinas, los cenotes, las micro cúpulas y lagunas, estas se encuentran asociadas a un fracturamiento que manifiesta mayor grado en el área de Cobá en Yucatán con una orientación muy variada, mientras que hacia la costa se manifiesta un lineamiento de fallas noreste-suroeste.

III.2.3. Geología

La Península de Yucatán, se compone en su mayoría por sedimentos calcáreos de origen marino que datan del Paleógeno al Reciente, según Butterlin y Bonet (1960). El basamento está conformado por rocas sedimentarias del Paleozoico; por encima se encuentran las rocas sedimentarias del Mesozoico y Cenozoico conformadas por sedimentos continentales, evaporíticos y calizas de plataforma que presentan un grosor de más de 3,500 m de profundidad (Lugo-Hubp *et al.*, 1992). El límite entre el Cretácico y el Paleoceno está marcado por el impacto del Chicxulub (Rebolledo *et al.*, 2000, como se cita en Landa, 2007).

En la parte sur de la península, se encuentran rocas del Paleoceno-Eoceno, que presentan características de dolomitización, recristalización o silicificación e incluyen a las evaporitas de la Formación Icaiché, compuestas por yeso, anhidrita y halita, ricas en sulfatos y cloruro de sodio (Landa, 2007 y Conagua, 2015).

Los depósitos cuaternarios y las rocas más jóvenes afloran en áreas dispersas: en una franja angosta a lo largo de la costa encontrándose coquinas, calizas y depósitos de litoral areno arcilloso en un ambiente de supramarea y están formados por fragmentos de conchas de varios organismos (Landa, 2007 y INEGI, 2016).

Según Landa (2007) y Conagua (2015, 2024) las rocas se disponen casi horizontalmente, a excepción de las regiones cercanas al río Hondo, en la frontera con Belice, en donde se presentan plegadas y en la porción sur, los estratos se interrumpen, a consecuencia de fallas normales, que dan lugar a superficies escalonadas.

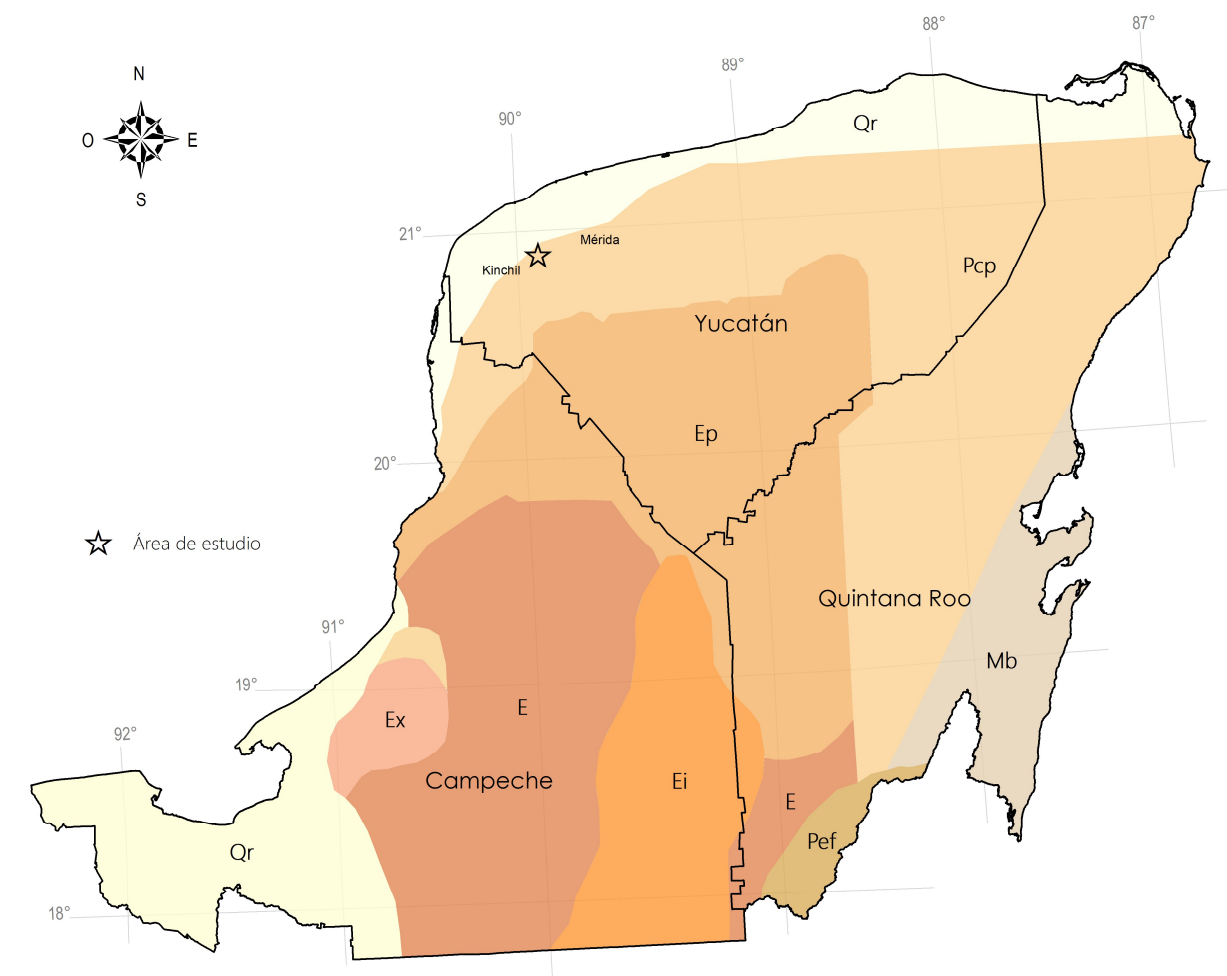
Algunos de estos sistemas de fallas cuentan con longitudes de varios kilómetros y provocan escarpes con desniveles entre 10 y 100 m de diferencia. Estas fallas originado fosas que se convierten en cuerpos de agua como la laguna de Bacalar.

Se destacan dos ejes estructurales principales: la sierrita de Ticul que es un escarpe de falla normal de 160 km de longitud por 15 km de ancho, con orientación noroeste a sureste; y el sistema de fallas normales Bacalar-río Hondo en el estado de Quintana Roo con aproximadamente 80 km de ancho, con tendencia norte-noreste y que forman horst y grabens en la zona (Velázquez y Ordaz, 1993).

Las calizas de mejores características acuíferas de la región pertenecen al Eoceno y Mioceno-Plioceno y están relacionadas con el Miembro Pisté de la Formación Chichén Itzá y la Formación Carrillo Puerto, respectivamente (Conagua, 2015).

La **Figura No. 16** ilustra el mapa del contexto geológico regional de la península de Yucatán superponiendo el área de estudio localizada en la región noroeste peninsular.

La unidad litoestratigráfica que aflora en la superficie del sitio de interés según Butterlin y Bonet (1960) es la Formación Carrillo Puerto (**Figura No. 17**), constituida por caliza-coquina de edad Mioceno-Plioceno, depositada en un ambiente marino somero con alto contenido fosilífero.



Era	Periodo	Época		Litología
Cenozoica	Cuaternario	Pleistoceno-Holoceno		Qr No diferenciado
	Terciario	Mioceno Plioceno	Mioceno Sup ? Plioceno ?	Pcp Formación Carrillo Puerto
			Mioceno Sup ? Plioceno ?	Pef Formación Estero Franco
			Mioceno Superior	Mb Formación Bacalar
	Terciario	Paleoceno Eoceno	Eoceno Medio ? Eoceno Sup ?	Ech Miembro Chumbec
			Eoceno Medio	Ep Miembro Pisté
			Eoceno Inferior	Ex Miembro Xbacal
			Eoceno ? Paleoceno ?	Ei Formación Icaiché
			Paleoceno Sup - Eoceno Medio	E Calcáreos Petén

Figura No. 16. Geología de la Península de Yucatán
Elaboración propia, redibujado a partir de Conagua (2015) según Butterlin y Bonet (1960)

III.2.3.1. Estratigrafía

En la **Figura No. 17**, se presenta la columna estratigráfica de las formaciones principales de la Península de Yucatán desde hace 66 millones de años al Reciente (SGM, 2006):

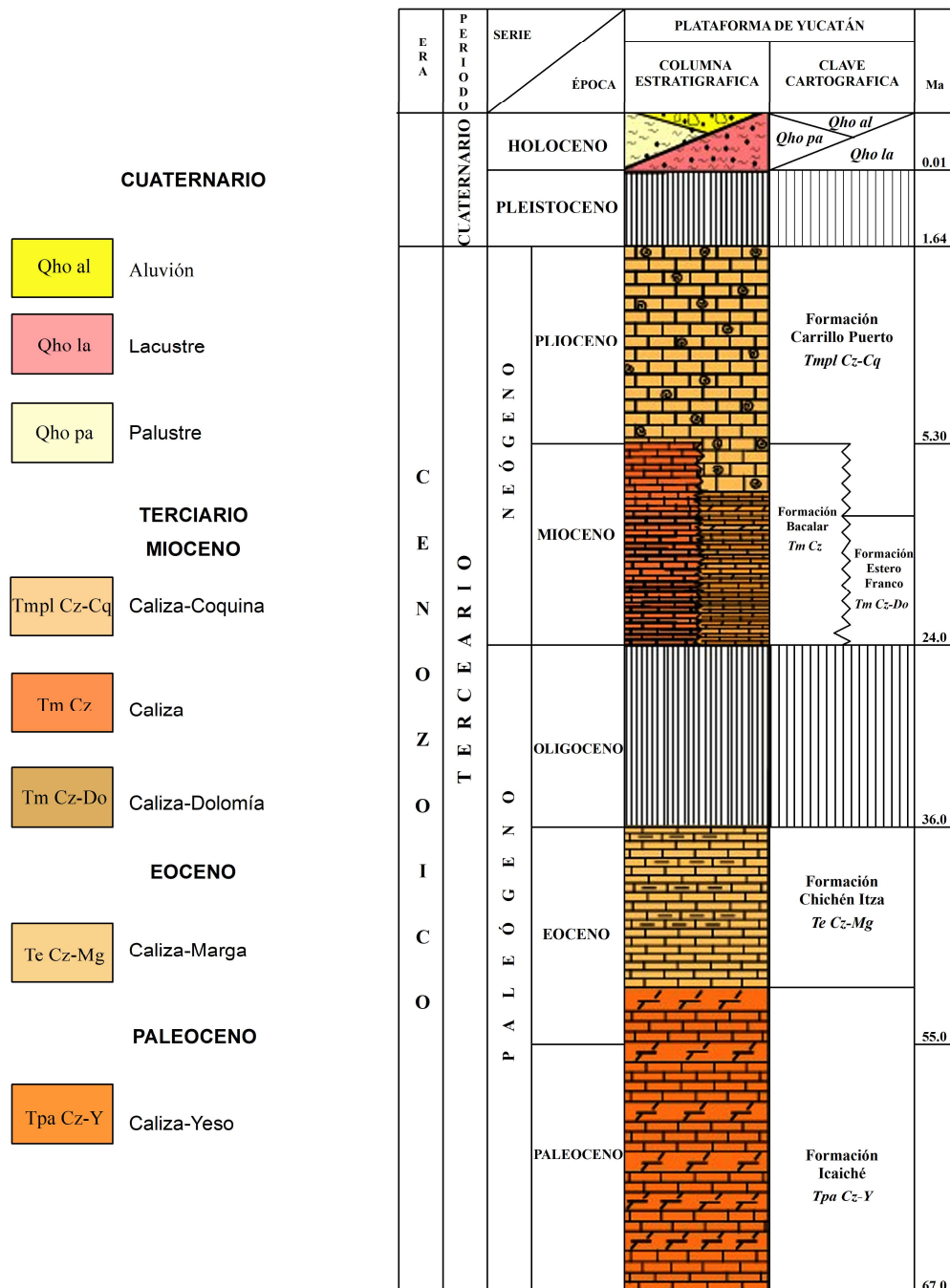


Figura No. 17. Columna estratigráfica de la Península de Yucatán. Modificada del informe del SGM, 2004 y SGM, 2005.

a) Cretácico Superior (66 ma)

La plataforma de Yucatán tiene como basamento rocas de una edad posible del PrePaleógeno, a dicho basamento le sobreyace de manera discordante una secuencia de lechos rojos de edad Jurásico-Cretácico de rocas carbonatadas (SGM, 2005). En un reconocimiento geológico realizado por Flores (1952) al sur de las Montañas Maya en Belice encontró una sección del Cretácico Superior conformada por una serie de calizas, calizas dolomitizadas y dolomías intercaladas con una capa delgada de arenisca en la sección expuesta, con microfauna de tipo lagunar y con presencia de depósitos post-arrecifales (Landa, 2007).

b) Paleoceno-Eoceno (59 a 37 ma)

Formación Icaiché – Paleoceno-Eoceno Inferior

Es una secuencia constituida por intercalaciones de calizas y yesos, horizontes de arcilla comúnmente contienen concreciones de sílice (SGM, 2004 y INEGI, 2016).

Es la unidad más antigua que aflora en la región y su distribución se presenta al oeste en la porción sur y centro, así como en la parte central y centro-sur de la península. (Conagua, 2024)

Estas rocas están constituidas mayoritariamente de cristales de calcita de color blanco y pardo claro, dolomitizada y silicificada, también presenta sílice en las grietas y los nódulos son bastante comunes, sin embargo, los procesos diagenéticos son muy fuertes, de modo que los fósiles no se aprecian (Landa, 2007).

Formación Chichen Itzá – Eoceno Medio-Superior

Cubre concordantemente a la Formación Icaiché, aflorando en la porción oeste y centro de la península, por sus características sedimentológicas y micropaleontológicas, refleja un ambiente marino de plataforma somera (SGM, 2004 y Conagua, 2024).

Según Butterlin y Bonet (1960) las rocas de esta formación son calizas fosilíferas que presentan escasas variaciones litológicas, aunque condiciones de microfauna muy particulares, distinguiéndose tres miembros:

1. Miembro Xbacal

Caracterizado por presentar calizas, a veces blancas o grises, pero generalmente amarillentas e impuras, en capas de espesor pequeño a mediano, a veces masivas. También se presentan margas amarillas o a lutitas verdosas. Estas rocas forman pliegues cerrados, con echados que alcanzan 20° o más en oposición al resto de la formación.

2. Miembro Pisté

Conformada por estratos de calizas blancas o amarillentas, generalmente masivas y de capas gruesas en la parte inferior presentan mínima cantidad de fósiles. En la parte superior destacan calizas blancas masivas y compactas, ricas en fósiles característica del Eoceno Medio.

No presentan una mayor inclinación, de hecho, son prácticamente horizontales, a excepción de la porción sur en el estado de Campeche, donde las calizas se encuentran plegadas en anticlinales y sinclinales.

Las calizas del Miembro Pisté aflora extensamente en la península, conformando la totalidad de las partes central y centro-occidental de la misma.

3. Miembro Chumbe

Consiste en calizas masivas muy cristalinas de coloración blanquecina que se asemejan al mármol, también tiene presencia de microfauna característica del Eoceno medio y superior.

Este miembro parece descansar concordantemente sobre el miembro Pisté, y está cubierto por la secuencia de rocas calizas del Mioceno tardío.

c) Oligoceno (36 a 24 ma)

Cubriendo a la formación Chichén Itzá, afloran rocas que se estima datan del Oligoceno y se constituyen por paquetes carbonatados de mudstone, grainstone y boundstone. (SGM, 2004 y Conagua, 2024). Su ambiente de depósito es de plataforma somera, donde se desarrollaron

abundantes organismos que dieron origen a coquinas. Esta unidad sobreyace en concordancia a rocas de la Formación Chichén Itzá y subyace a rocas de la Formación Carrillo Puerto.

d) Mioceno-Plioceno (24 a 1.68 ma)

Formación Estero Franco – Mioceno Superior

Esta unidad se constituye de una alternancia de calizas y dolomías que cambian de facies lateralmente a la Formación Bacalar y descansa concordantemente a la Formación Icaiché.

Los afloramientos son de color ocre a blanco en estratos medianos a gruesos, a excepción de las láminas de material limo-arcilloso.

Se localiza en el centro y noreste de Quintana Roo, así como el margen occidental del río Hondo en la frontera con Belice, formando una franja con orientación noreste-suroeste (INEGI, 2016).

Formación Bacalar – Mioceno Superior

Esta unidad es un cambio de facies lateral hacia una carbonatación que dio lugar a rocas calizas de color crema beige que por intemperismo da un color gris blanquecino de textura cristalina.

Estratigráficamente sobreyace en concordancia a la Formación Estero-Franco y a su vez está cubierta en concordancia por la Unidad Carrillo Puerto. Se encontró en una franja alineada al noroeste de Chetumal, a lo largo de la laguna de Bacalar hasta Xul-Ha en Quintana Roo. (SGM, 2004)

Formación Carrillo Puerto – Mioceno Superior – Plioceno

Se conforma por un paquete carbonatado (mudstone, wackestone, grainstone y packstone) y coquina (boundstone), que en algunos horizontes se encuentra interestratificada con brecha calcárea.

El ambiente de depósito de esta unidad corresponde a una plataforma somera y el espesor reportado es de varios centenares de metros como también del orden de 5 a 25 m. (SGM 2004 y Conagua, 2024).

Se considera que sobreyace en concordancia a las rocas del Oligoceno, sin embargo, generalmente se observa discordantemente a la Formación Chichen Itzá y concordantemente a la Formación Estero Franco (Conagua, 2024). Esta unidad se distribuye en una pequeña franja en la porción norte de Quintana Roo.

e) Pleistoceno-Reciente (Holoceno)

Pleistoceno

Afloran diferentes tipos de litologías; en el estado de Campeche, aflora una unidad de coquina de bioclastos, que hacía el norte se compone de bioclastos y conglomerado polimíctico con clastos de caliza, coquina, brecha y sílice cementados en una matriz bioclástica constituida por fragmentos de conchas y calcita, intercalada con calcarenitas y coquina, denominada Unidad Bioclastos Seybaplaya. (Conagua, 2024)

Depósitos Palustres

Conformados por arcillas y limos de color negro con alto contenido de materia orgánica. Se distribuyen de manera minoritaria en la parte norte y este de la bahía de Chetumal (SGM 2004).

Depósitos Lacustres

Se clasifican lacustres a aquellos depósitos en donde existe gran cantidad de restos vegetales mezclados con limos y arcillas sin descomposición, asociados a ambientes de laguna. Afloran en el margen derecho de la Laguna de Bacalar en una franja alargada con dirección noreste suroeste y en el oeste de la bahía de Chetumal (SGM 2004).

Depósitos Aluviales

Se conforma de limos y arcillas de color gris a café oscuro depositados en las partes bajas donde forman abanicos aluviales no consolidados. Estos depósitos se distribuyen en zonas de la península.

III.2.4. Clima

De acuerdo con el Reporte de la Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Península de Yucatán (2105), estado de Yucatán realizado por Conagua (2024) modificado de García (1964) clasifica los climas predominantes en el estado de Yucatán siguiendo el sistema de Köppen. En el suroeste, cerca de la laguna de Términos, predomina un clima cálido húmedo con lluvias intensas en verano ($Am(f)$). En la costa sur de Campeche y Quintana Roo se presenta un clima cálido subhúmedo ($Aw_2(x')$). El centro norte y suroeste del acuífero tiene clima cálido intermedio subhúmedo (Aw_1), y en la zona más alta del acuífero (sierrita de Ticul) el clima es cálido subhúmedo (Aw_0). Además, hay diversas zonas con clima semiseco muy cálido (BS_1 y BS_0) en porciones costeras y al norte del acuífero. El reporte de información geográfica realizado por INEGI (2010) en el municipio de Kinchil se presenta un clima semiseco de muy cálido a cálido subhúmedo con lluvias en verano.

Las temperaturas en climas cálidos (A) oscilan entre 22 y 26°C, y su variabilidad depende de la lluvia invernal y humedad. Los climas secos (B) pueden variar dependiendo de la temperatura e índice de humedad. La temperatura del municipio de Kinchil oscila entre 26 y 28°C (INEGI, 2010).

III.2.5. Edafología

Los estudios realizados por Estrada-Medina *et al.* (2019) mencionan que en Yucatán los suelos predominantes son los Leptosoles como es el caso de Kinchil (INEGI, 2010), aunque también se encuentran Arenosoles, Regosoles, Solonchak, Gleysoles, Histosoles, Luvisoles, Vertisoles y Stagnosoles, distribuidos en distintas zonas del estado (Bautista *et al.*, 2015). Los autores explican que, aunque la roca caliza es abundante no es el sustrato principal, los suelos se forman principalmente a partir de sedimentos marinos, residuos volcánicos ricos en minerales arcillosos y polvo del Sahara, transportados por el viento aportando fósforo al suelo (Cabadas *et al.*, 2010; Das *et al.*, 2013).

El clima y la edad superficial influyen como factores esenciales en la formación del suelo, afectando la disolución de la caliza y la reducción de carbonatos (Bautista *et al.*, 2011).

Los suelos rojos profundos (Luvisoles) se originan por la mezcla de materiales volcánicos, metamórficos y graníticos transportados por el viento, combinados con residuos calizos (Perry *et al.*, 2003). La presencia de carbonatos secundarios varía según el microrelieve, ausentes en zonas altas y presentes en las bajas (Krasilnikov *et al.*, 2013). En el norte predominan suelos someros con caolinita, mientras que en el sur se encuentran suelos profundos con montmorillonita, especialmente en áreas con mal drenaje (Isphording, 1976). Los suelos de Yucatán presentan altos niveles de carbono orgánico, siendo mayores en humedales y zonas elevadas, aunque estas últimas tienen menos tierra fina y más pedregosidad (Delgado-Carranza *et al.*, 2017).

Las condiciones kársticas dan lugar a cuatro tipos principales de suelos: arenosos en la costa, orgánicos en humedales, rojos en planicies y negros en montículos. Los suelos negros tienen mayor contenido de carbonatos (45%) y mejor fertilidad química, mientras que los suelos rojos tienen mejores propiedades físicas para la agricultura. (Aguilar 2007 en Estrada-Medina *et al.*, 2019)

III.2.6. Hidrografía

De acuerdo con el Reporte de Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Península de Yucatán (2105), estado de Yucatán realizado por Conagua (2024), el acuífero se encuentra dividido por cuatro regiones hidrológicas principales: al suroeste la Región Hidrológica No. 30 Grijalva-Usumacinta, con diversas cuencas y lagunas importantes como la laguna de Términos; al oeste la región No. 31 Yucatán Oeste, con cuencas y corrientes como el río Champotón y lagunas como Silvituc; al norte la región No. 32 Yucatán Norte, caracterizada por la falta de corrientes superficiales importantes y la presencia de numerosos cenotes; y al sureste la región No. 33 Yucatán Este, con el río Hondo como principal corriente

natural y varias lagunas destacadas como Bacalar. Estas regiones incluyen diversas subcuencas, ríos y lagunas que forman un sistema hidrológico complejo, predominando ecosistemas de manglares, humedales y cuerpos de agua fluviales, que se distribuyen en los estados que conforman el acuífero (Campeche, Yucatán y Quintana Roo).

El área de estudio forma parte de la región hidrológica RH-32 (Yucatán Norte), cuya cuenca principal es Yucatán (clave RH-32B), y dentro de esta, la subcuenca correspondiente es la de Mérida (RH-32Ba). Esta región es de tipo exorreico, lo que significa que sus aguas desembocan en el mar. La subcuenca tiene una pendiente media del 1.44 %, una altitud máxima de escurrimiento de 95 metros y una longitud de 100.645 kilómetros. En la **Figura No. 18** se observa el contexto hidrológico, así como los principales escurrimientos del área de estudio.

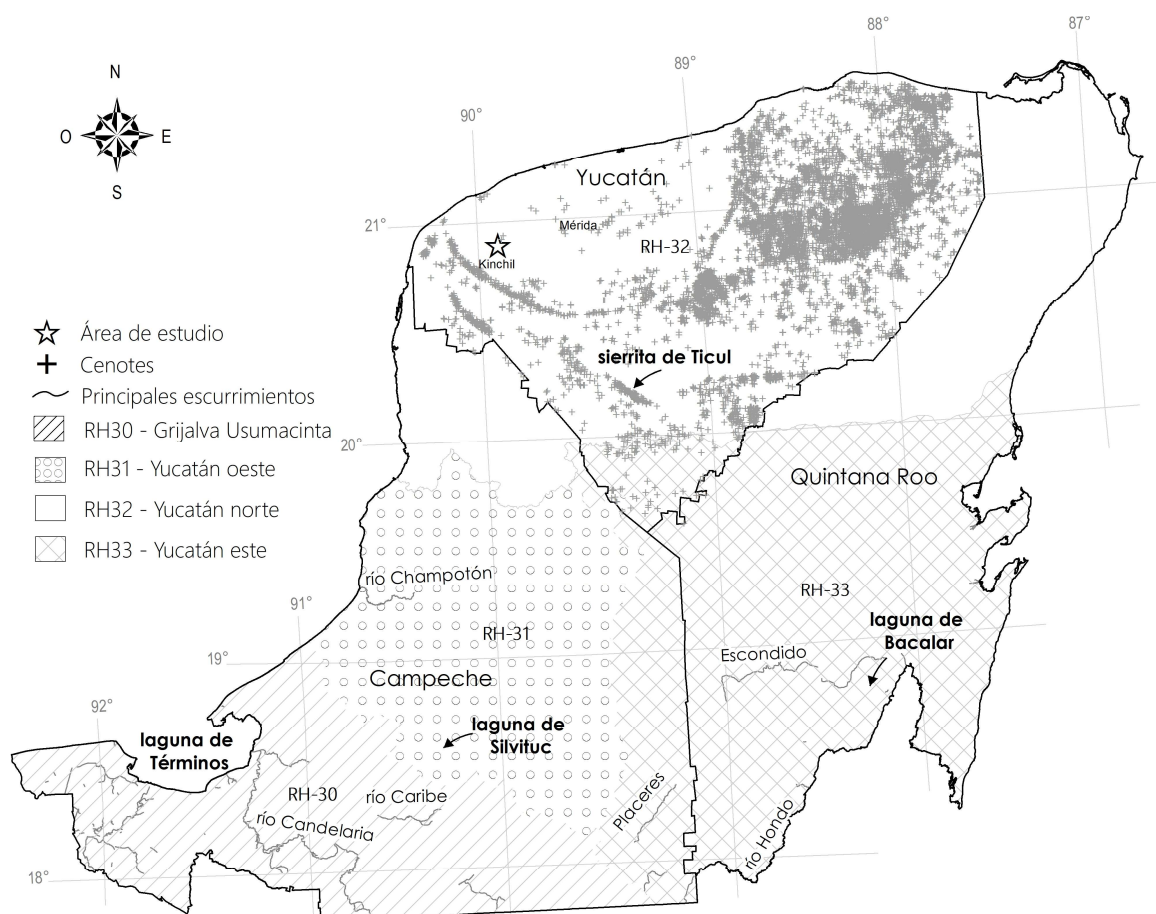


Figura No. 18. Mapa de ubicación del sitio de estudio sobre cuencas hidrológicas.
Elaboración propia con datos obtenidos del SIATL (2024).

III.2.7. Marco hidrogeológico del sitio de estudio

La Península carece de corrientes superficiales, principalmente en la porción norte; la porción sur solo manifiesta un drenaje incipiente que se desvanece en cuerpos de agua superficiales o sumideros. Gran parte de la precipitación pluvial se evapotranspira y el resto se infiltra al acuífero por medio de las fracturas, oquedades o conductos *kársticos* (Velázquez Aguirre, 1986).

Pérez-Ceballos *et al.* (2012) explica que el agua subterránea fluye desde las áreas con mayor precipitación, situadas en el sur del estado, hacia la zona costera, desplazándose en direcciones noroeste, noreste y norte. Es en estas regiones es donde ocurre la descarga natural del acuífero, particularmente en dirección hacia Celestún (noroeste) y Dzilam de Bravo (noreste). Se ha identificado una relación entre las direcciones con mayor conductividad hidráulica y el patrón de desarrollo de cavidades por disolución (García y González, 2010).

Velázquez Aguirre (1986) plantea, la existencia de dos acuíferos regionales de carácter kárstico distintos mostrados en la **Figura No.19** y denominados en función de la edad de las rocas que los conforman:

Acuífero Miocénico: Es de tipo hidrológico permeable caracterizado por presentar alta transmisividad, poca carga hidráulica, nivel freático estable y dirección de flujo radial desde el área de recarga hacia las costas. Limitado al suroeste por la sierrita de Ticul, al oeste de manera parcial por el sistema de fallas Bacalar-río Hondo; hacia el norte, noroeste, noreste y sureste por costas.

Acuífero Eocénico.: Esta unidad presenta subdivisiones hidrogeológicas, aunque contiene varios acuíferos colgados de carácter local, su nivel freático se encuentra profundo (60 a 100 m) y estable, a diferencia de los acuíferos colgados. Existen zonas topográficamente bajas de menor permeabilidad que soportan cuerpos de agua. Sus límites son: al oeste y suroeste por la planicie costera de la península y al noroeste, entre la ciudad de Campeche y la población de Maxcanú por un arco fallado.

Al norte se encuentra separada por el frente estructural de la Sierrita de Ticul. Finalmente, hacia el oriente presenta un límite transicional compuesto por bloques fallados y escalonados del sistema Bacalar-río Hondo.

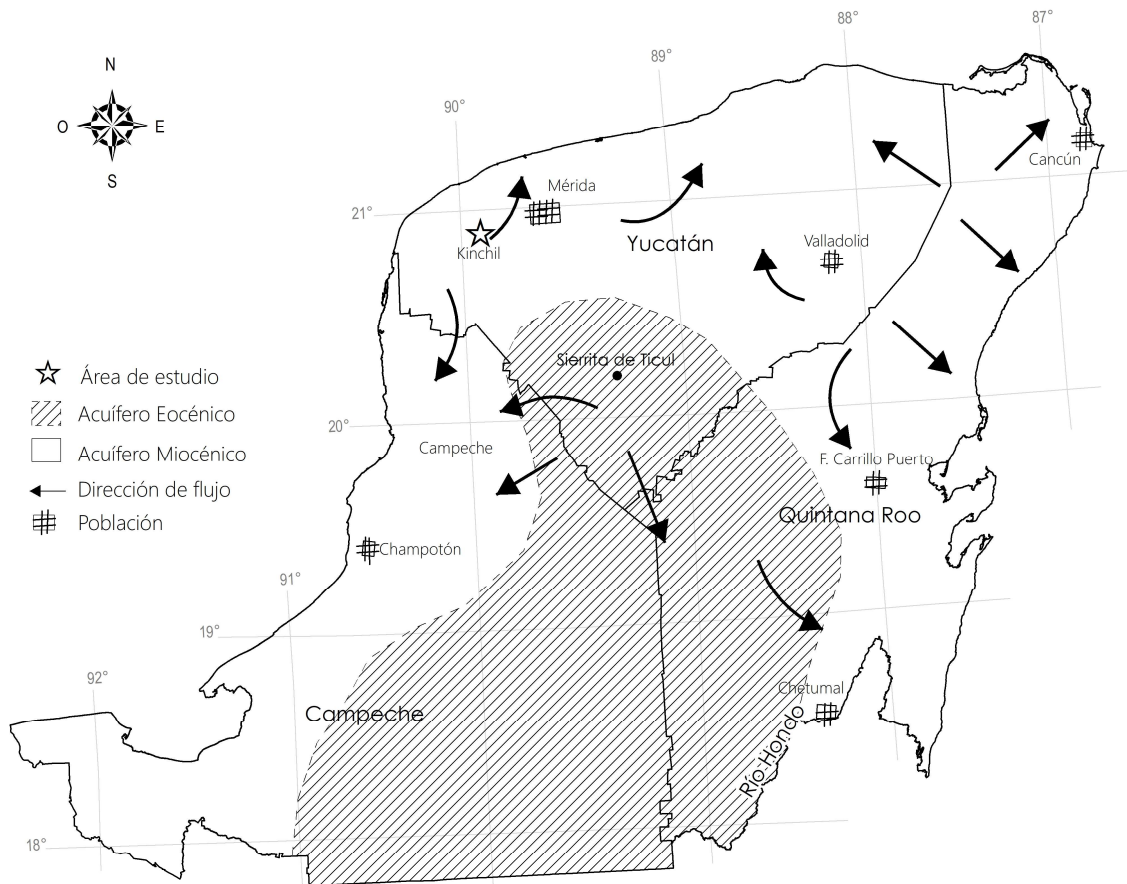


Figura No. 19. Mapa de los acuíferos kársticos regionales.
(Modificado de Velázquez Aguirre, 1986).

III.2.8. Red piezométrica

La red piezométrica constituye una herramienta fundamental para evaluar el comportamiento de almacenamiento acuífero Península de Yucatán, ya que permite conocer la evolución del nivel freático, su almacenamiento y las variaciones espaciales y temporales asociadas a los procesos de recarga y descarga.

Conagua (2015) explica que estas redes tienen como objetivo determinar la condición del almacenamiento de un acuífero mediante la comparación de niveles hidrostáticos obtenidos en diferentes periodos de tiempo, los cuales son representados a través de mapas piezométricos o de elevación.

Esta red se encuentra integrada por pozos de monitoreo espaciados sobre un área, la cual puede alcanzar a cubrir un municipio o incluso varios estados.

INEGI (2011) describe que el acuífero es del tipo costero y muestra heterogeneidades respecto a sus características hidráulicas, aunque existe un solo manto freático presenta variaciones en la calidad del agua de forma estratificada, tomando como ejemplo el municipio de Mérida: en la parte superior existe contaminación debido a pozos someros mal diseñados que fungen como sumideros y por descargas residuales clandestinas hasta la profundidad de 20 m aproximadamente, esto obliga a que el aprovechamiento del acuífero se efectúe entre 20 y 40 m de profundidad ya que allí se obtiene agua dulce de buena calidad, a la profundidad de 55 y 60 m se localiza la interfase salina y posterior a esta profundidad se encuentra el límite de agua salada marina.

Las profundidades a los niveles estáticos varían de acuerdo con su lejanía de las costas, pues entre éstas y Mérida tienen de 1 a 5 m; entre Mérida y el Cordón Puuc de 10 a 30 m y después de éste, de 60 a 100 m. Por ser alta la transmisividad y recarga del acuífero, los abatimientos cíclicos anuales que se presentan no son de consideración, son menores a un metro durante los meses del estiaje y se recuperan después de las lluvias

La dirección del flujo se rige por la compleja morfología subterránea representada por canalículos, fisuras, galerías de diversas formas y diámetros, intersticios, planos de estratificación, etc.; que hace difícil deducir las características normales del flujo.

Lo que se puede afirmar es que presenta un flujo radial a partir del sur del estado hacia las costas con direcciones preferenciales sureste-noroeste, sur-norte y suroeste-noreste, en un medio cavernoso altamente complicado.

III.2.9. El acuífero kárstico de la península de Yucatán

Los estudios de Estrada *et al.* (2019) exponen que debido a sus características el *karst* de Yucatán es del tipo Holokarst ya que toda el agua es drenada al subsuelo y gracias a su gran afluencia ha permitido la formación de un gran acuífero, el cual es la única fuente de agua potable en el estado.

Por su parte, Marín *et al.* (2004) describe que el acuífero está conformado por un lente de agua dulce que descansa sobre agua salada y que reporta intrusión marina en la zona sur del anillo de cenotes y al noreste de la sierrita de Ticul.

Bauer-Gottwein *et al.* (2011) citado en Estrada *et al.* (2019) explica que el flujo hidrológico es completamente subterráneo y se comporta de manera radial, con una dirección que va de sur a norte hacia las zonas de las costas.

Sin duda alguna, unos de los rasgos más característicos de la península es la presencia de cenotes cuyo origen se debe a la disolución y el colapso de la roca caliza. Beddows *et al.* (2007) en Estrada *et al.* (2019) estiman que existen entre 7,000 a 8,000 cenotes, sin embargo, destacan que existen otro tipo de estructuras como: las denominadas Sartenejas o *Haltunes*² las cuales son depresiones circulares que se desarrollan sobre la roca dura y captan agua de lluvia, lo que puede modificar su tamaño desde unos cuantos centímetros hasta varios metros. En el sur del estado donde los suelos son más profundos y los afloramientos de roca escasean, se pueden encontrar Ollas de agua o *Jagüeyes*, las cuales son depresiones sobre suelos impermeables donde se acumula el agua de los escurrimientos superficiales.

Finalmente, existen otras depresiones nombradas rejolladas, los cuales son cenotes colapsados cuya base se encuentra en el nivel del manto freático. La acción del agua arrastra materiales superficiales que son depositados en el fondo, sin embargo, el agua no se acumula lo que genera microambientes con suelos más profundos y húmedos, alterando la humedad y temperatura con respecto a las áreas circundantes.

² Palabra de origen maya *ha* significa “agua” y *tun* “piedra”. Así lo menciona la investigación de Estrada *et al.* (2019).

IV. Metodología

IV.1. Diseño del levantamiento y procesamiento de datos

Para el diseño del levantamiento y procesamiento de GPR, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

1. Recopilación de información

En este paso se hizo una recopilación de información de carácter geológico que permitan conocer la distribución de las unidades en el suelo de estudio y con esto proponer el diseño de adquisición.

2. Adquisición de datos y configuración de parámetros del equipo de GPR

Se realizan pruebas en el sitio de estudio para establecer los parámetros de adquisición (Frecuencia, intervalo de muestreo y autostacks). De ser posible se calibra el equipo utilizando el objetivo de interés con el fin de obtener la velocidad del medio; para este caso se realizó la línea No. 05 sobre la cavidad expuesta, lo que permitió medir la profundidad y estimar la velocidad del suelo. A la par del levantamiento, se elaboran las notas de campo con el propósito de poder asociar las características observadas en los radargramas con el suelo del sitio de estudio (karstificación, ductos, coladeras o cambios de material).

3. Control de calidad y procesado de datos

En un inicio, se realizó una primera evaluación de los datos desde campo para corroborar que las líneas no presentan errores de levantamiento; en gabinete con los radargramas crudos y sin la aplicación de ningún filtro, se comienza a diseñar el flujo de procesamiento que será aplicado a todas las secciones de GPR.

4. Modelado de datos

Para la presente investigación se emplearon radargramas sintéticos que representan las condiciones del sitio de estudio, con el propósito de conocer la respuesta del método aplicado y con ello, obtener resultados más aproximados a la realidad.

IV.2. Adquisición de perfiles

La campaña de adquisición de datos consistió en un mallado de treinta y nueve líneas de GPR distribuidas en la periferia de la propiedad, el equipo utilizado fue un sistema monoestático de MALA Geoscience y una antena direccional con frecuencia central de 450 MHz, modelo Easy Locator Core. La frecuencia de la antena fue seleccionada en función del tipo de terreno y el objetivo a identificar a una profundidad máxima de 4 m de profundidad; se utilizó el arreglo *común offset* o reflexión, para el levantamiento de las secciones.

La unidad de control tiene adaptada una tableta electrónica con el software de MALA-Vision como visualizador de datos con la cual se pueden aplicar funciones de ganancia y contraste en tiempo real, además de realizar un filtrado básico para eliminar el ruido de fondo, entre otras opciones, está integrado con un odómetro y con un GPS para la ubicación de las líneas.

La distribución de perfiles se realizó en toda la extensión del patio trasero y central de la casa, además se realizó la línea 5 sobre el sitio donde se encuentra la pequeña caverna a la que los habitantes de la localidad nombraron “Pozo Cueva” del cuál extraen agua y es una fuente de abastecimiento que los habitantes utilizan para desempeñar actividades domésticas como riego y lavado general.

Se llevaron a cabo veintiocho líneas alrededor de la periferia de la casa, abarcando todos los sitios de interés, en especial el patio central donde se localiza la caverna. Su distribución se ajustó con respecto al área disponible en el sitio de estudio; cuentan con una orientación norte-sur y presentan longitudes variables.

Adicionalmente se llevaron a cabo once líneas con dirección oeste-este, las cuales cortan de manera perpendicular a las anteriores y permiten evaluar el suelo de estudio en ambas direcciones. Estas líneas cuentan con longitudes variables debido a los límites del predio.

Finalmente, en la **Figura No. 20** se muestra el croquis de distribución de secciones con respecto a la ubicación de la cavidad y los límites de los predios circundantes.

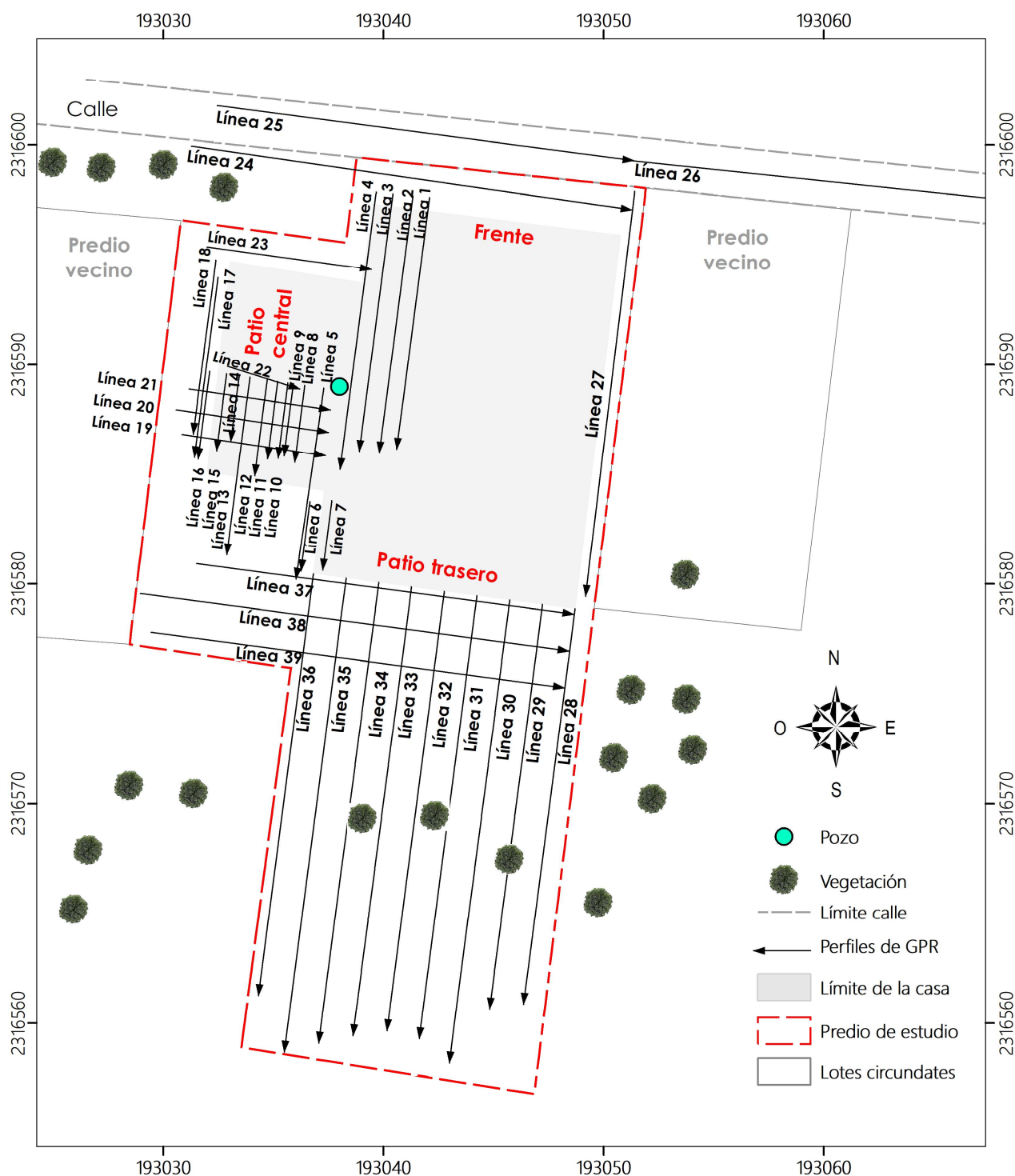


Figura No. 20. Croquis de distribución de las secciones de GPR
 Los perfiles se realizaron dentro del inmueble en donde se encuentra el Pozo producto del karst, en el municipio de Kinchil. Las flechas indican la orientación de los perfiles.

IV.3. Procesamiento de Datos

A los radargramas obtenidos de la adquisición de campo se les realizó un flujo de procesamiento que permitiera incrementar la profundidad de investigación, mejorar la resolución, corregir factores geométricos de las trazas para utilizar filtros avanzados y poder realizar una interpretación espacial adecuada, destacando eventos que a simple vista no son claros en profundidad.

El objetivo principal de esta sección es mejorar la calidad de las imágenes obtenidas. Según Lapazaran (2004), los tres pasos fundamentales en el procesamiento de las señales sísmicas (y de GPR) son la deconvolución, el reagrupamiento y la migración; por tal motivo, para la presente investigación fueron incluidos en el flujo de trabajo, además de que su aplicación mejoró la visualización de las anomalías.

Como complemento a los resultados del procesamiento y con el fin de obtener una interpretación más tangible de los datos de GPR, se desarrollaron modelos 2-D del sitio de estudio. Esto permitió realizar un análisis comparativo entre la polarización de las trazas extraídas de los radargramas sintéticos y las trazas de los radargramas reales, buscando indicadores (principalmente cambios en la polaridad de las reflexiones) que se pudieran asociar a posibles cavidades.

En la **Figura No. 21** se muestra, como ejemplo, el radargrama crudo del perfil 05, que corresponde a la línea que se tomó como calibración. A simple vista no hay ningún evento que se destaque a profundidad, por tal motivo, es necesario procesar los datos para obtener información del subsuelo.

Específicamente, la línea 05 cuenta con una longitud total de 7.761 m; fue levantada frente al pozo donde los habitantes extraen agua y el nivel estático fue medido a 4 m de profundidad.

A continuación, se describen uno a uno los pasos del procesamiento y parámetros utilizados en el flujo diseñado para esta investigación:

Sección original

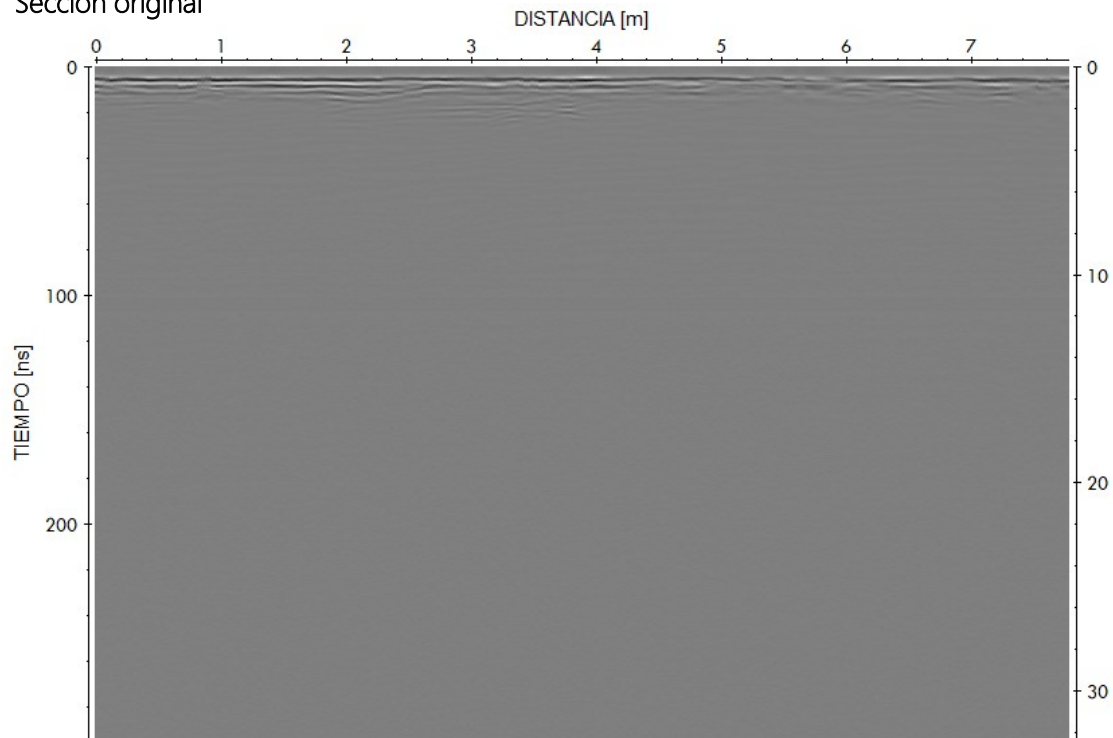


Figura No. 21. Radargrama crudo de la L-05 de GPR

La imagen muestra la sección obtenida de la adquisición de datos, el cual será utilizado como ejemplo para explicar los parámetros utilizados para el tratamiento de los datos.

1. Saturación de la Señal

Debido a la fuerte energía de la onda aérea, onda terrestre y reflectores someros, además de la proximidad del receptor al transmisor del GPR (Jol *et al.*, 2009), el receptor se satura de señal y no logra ajustarse con la suficiente rapidez, lo que genera grandes amplitudes que ocasionan un efecto de baja frecuencia que decae rápidamente en el tiempo y pueden enmascarar las señales que, si son de nuestro interés, a este efecto se le conoce como “dewow” (Fisher *et al.*, 1994).

Existen varios métodos para sustraer dicho efecto de las trazas, sin embargo, para esta investigación se utilizó un filtro DC.

La **Figura No. 22** muestra una traza cruda aleatoria del radargrama de la línea 05 antes de la aplicación y después de utilizar el filtro. En la **Figura No. 22-b** se muestran los efectos de amplitudes que se eliminaron después de la aplicación del filtro.

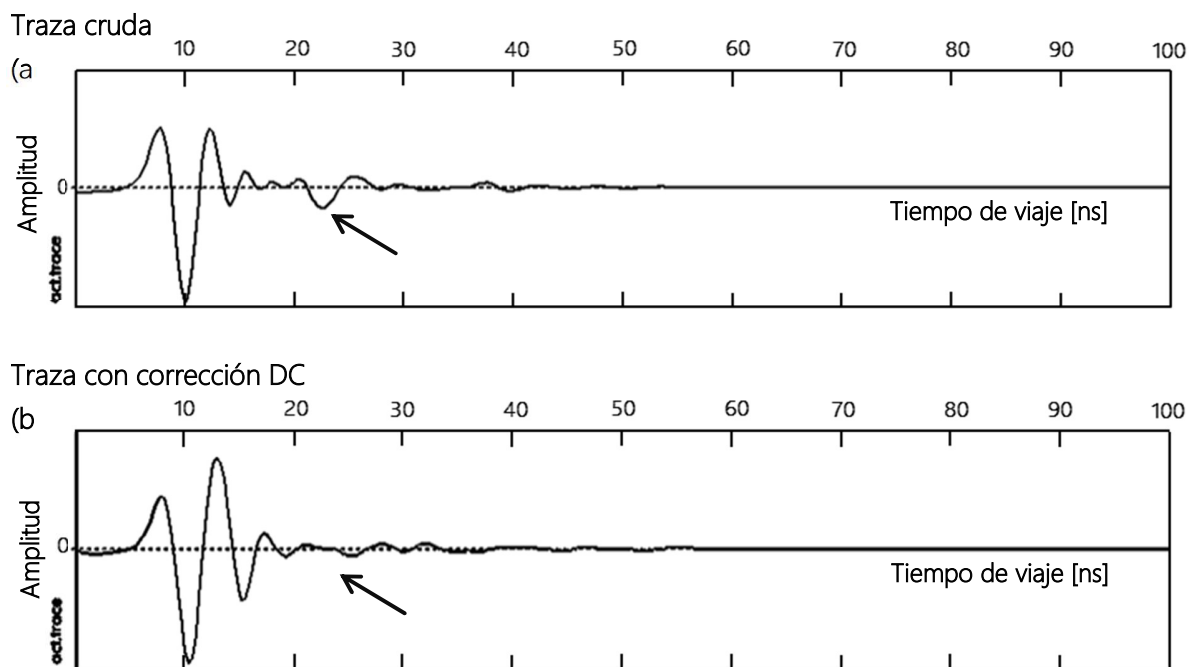


Figura No. 22. Aplicación del filtro de desplazamiento continuo
 22-a) La imagen muestra la traza cruda. 22-b) Misma traza después de la aplicación del filtro

2. Redistribución de las trazas:

El siguiente paso consistió en redistribuir las trazas de los radargramas, ya que no siempre conservan la misma distancia entre sí, ya sea por errores internos del equipo, variaciones bruscas en la topografía, u otras causas. Sin embargo, algunos pasos requieren que esta condición se cumpla para su aplicación. Por ello, se seleccionó una escala adecuada conforme a los parámetros de la adquisición para la visualización de los datos, recordando que la elección de estos parámetros siempre depende del criterio del intérprete.

3. Edición de las trazas:

Es frecuente que algunas trazas presenten errores, siendo, el más común alguna falla en el sistema de la unidad de control. Para que estas no afecten o influyan en la efectividad de los algoritmos aplicados, es necesario suprimir, silenciar o modificar el contenido de las trazas "ruidosas".

En la **Figura No. 23**, se muestra la comparación de una traza normal y una traza que presenta amplificación, la **Figura No. 23-a** muestra una traza que se considera “ruidosa” ya que no se ha aplicado ningún proceso para que sea amplificada, a diferencia de la **Figura No. 23-b** que muestra una traza normal, en este caso únicamente fue silenciada para no perder la distribución espacial de todas las trazas y que esto no afectara a los siguientes pasos del procesamiento.

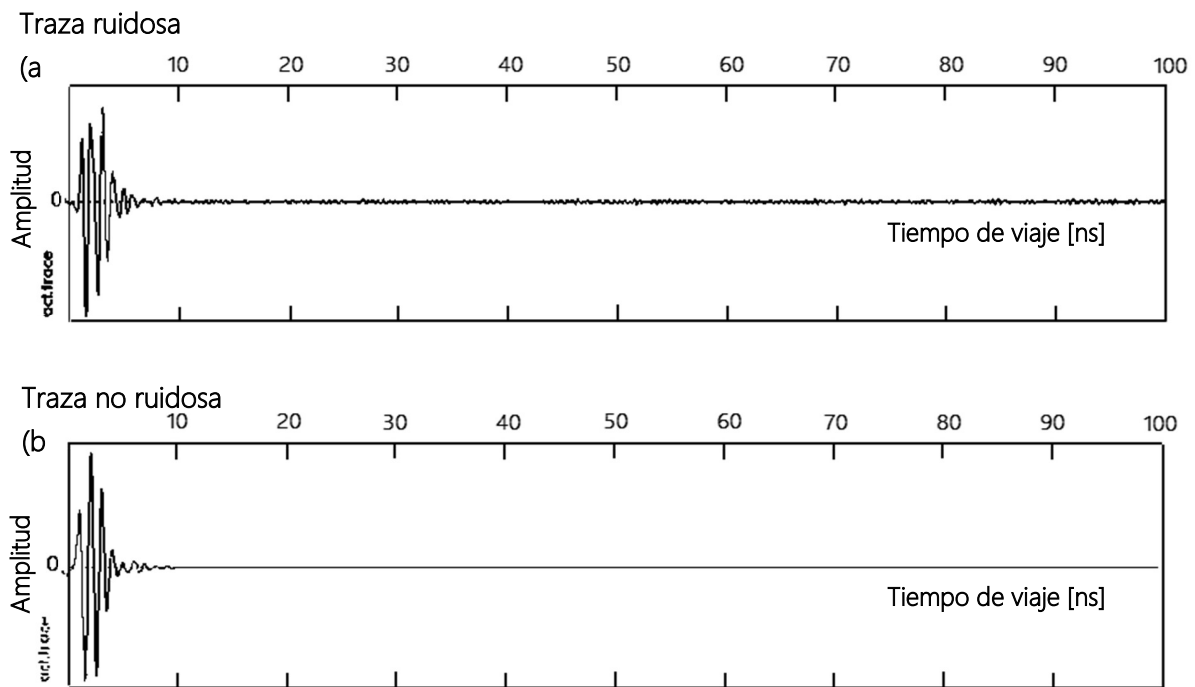


Figura No. 23. Selección de trazas ruidosas

La imagen muestra la comparación de dos trazas crudas que se tomaron para ejemplificar el “ruido”. 23-a) muestra una traza amplificada por lo que es considerada ruidosa. 23-b) muestra una traza normal.

4. Normalización:

Con el fin de homogeneizar la distribución de energía en todas las líneas y compensar las diferentes condiciones de acoplamiento de la antena se aplicó un factor de normalización. Este filtro consiste en calcular un único factor de escala para cada perfil, a partir del cociente del valor medio promedio del conjunto de líneas y el valor total de la energía individual de cada sección. Este filtro no modifica la distribución interna de la energía dentro de los perfiles; solo ecualiza la energía total tomando en cuenta el conjunto de radargramas seleccionados.

5. Correcciones estáticas:

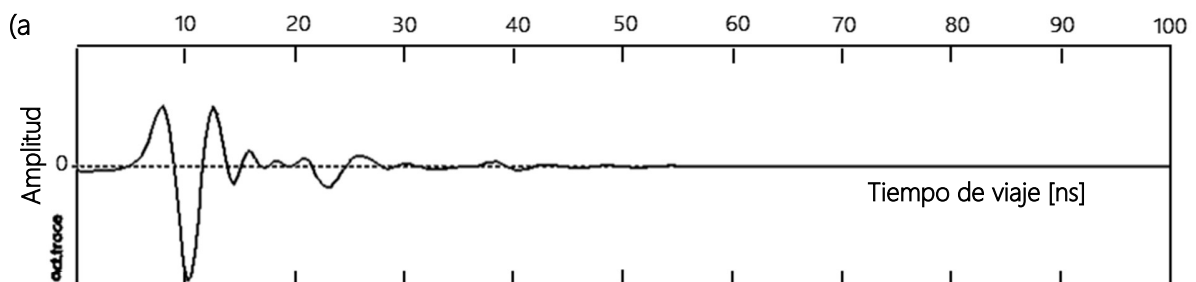
Las correcciones estáticas son aquellas que no tienen dependencia temporal por lo que se realizan sobre el eje del tiempo de cada traza por separado. En estas se incluyen la eliminación de trazas vacías, el recorte de la ventana temporal, la variación del inicio de la ondícula, la corrección de la polarización de la ondícula, entre otros. Son denominadas estáticas porque al ser aplicadas se mantienen con los mismos parámetros para toda la ventana temporal por lo que no tienen deformaciones locales. Para el tratamiento de los datos se realizaron las correcciones en los tiempos de viaje de las ondas electromagnéticas. A continuación, se mencionan los parámetros utilizados de la aplicación y en la **Figura No.24** se muestra el resultado:

- Eliminación de trazas vacías: En caso de que el radargrama tenga trazas vacías previas al comienzo de la línea y posterior a la finalización, deben ser eliminadas.
- Definir el tiempo cero: Se eligió el primer pico negativo de una cantidad representativa de trazas, para este perfil se desplazó -4.46 ns, con esto se ajustó a una posición de tiempo cero en común para todas las trazas.
- Corte a profundidad: Para esta adquisición se seleccionó el tiempo de 60 ns, ya que dentro de este intervalo la señal se considera útil, además de que la forma de las anomalías no presenta deformaciones, esto es importante ya que queremos evitar aplanar las hipérbolas de difracción.

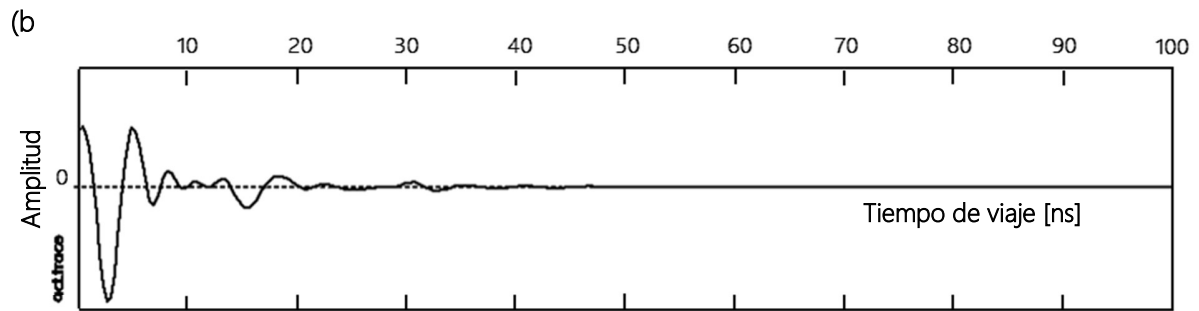
El tiempo posterior se eliminó con el fin de mejorar la visualización del radargrama para

los pasos posteriores.

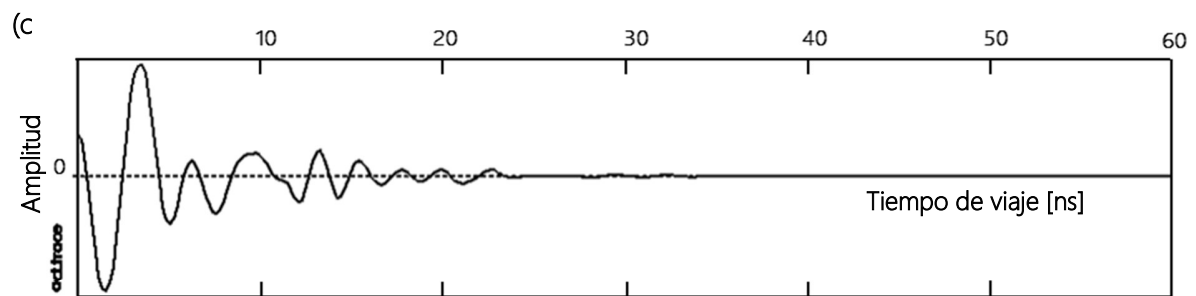
Sección original



Sección desplazada al tiempo cero



Sección cortada en profundidad



Radargrama filtrado

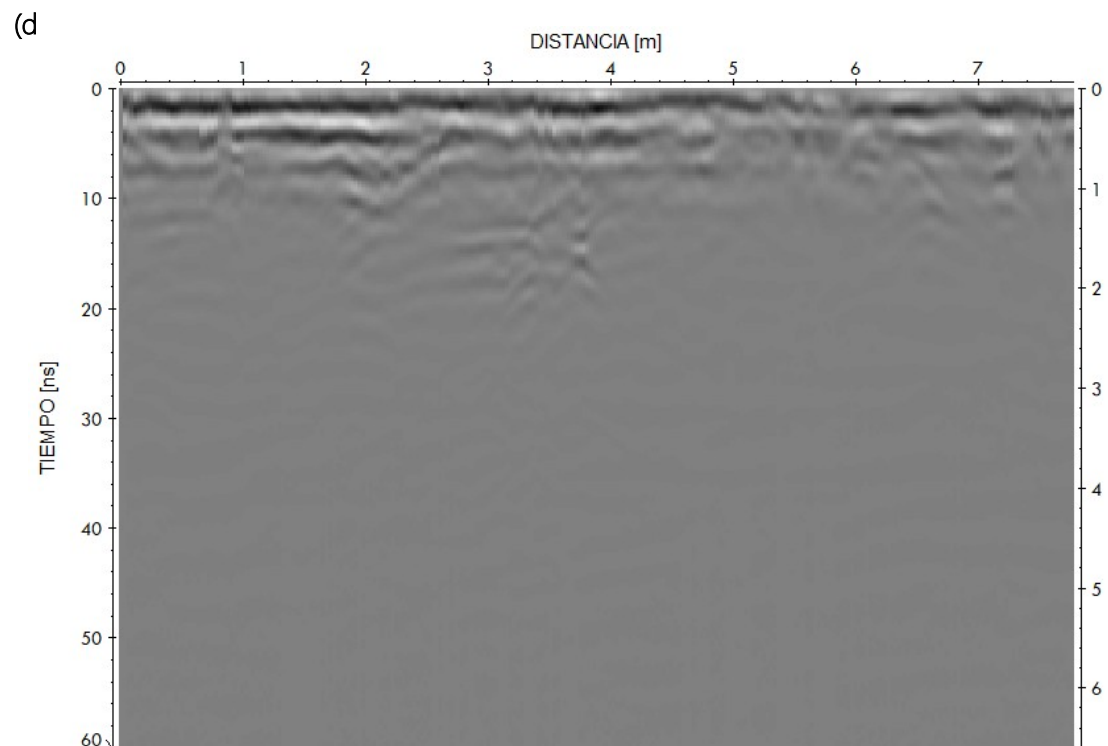


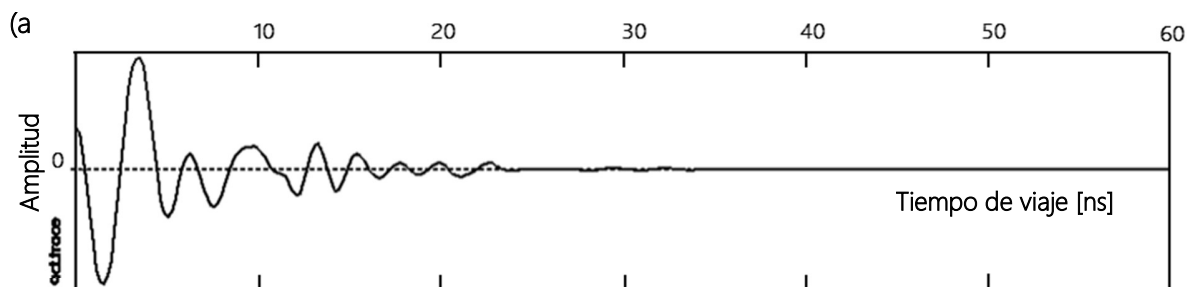
Figura No. 24. Selección y aplicación de las correcciones estáticas.
 Las imágenes a, b y c muestran una traza cruda que se tomó para ejemplificar las correcciones estáticas. 24-d) muestra el radargrama obtenido después del filtrado.

6. Ganancias:

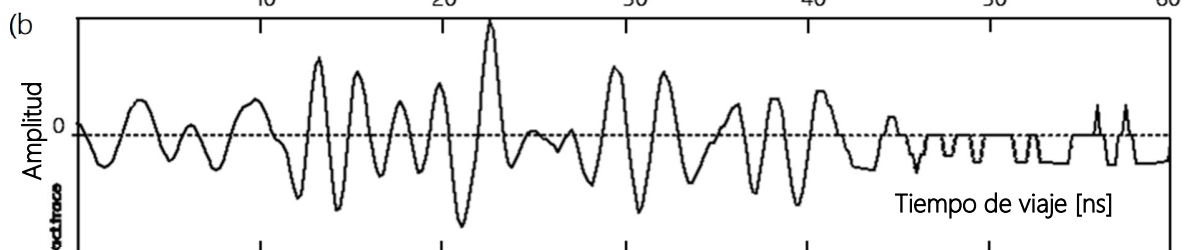
Las señales emitidas por las antenas son rápidamente atenuadas a profundidad y podrían perderse por efectos de divergencia, atenuación, dispersión, entre otros. Además, es difícil observarlas a profundidad debido a las señales más someras que también suelen ser más intensas por lo que es necesario aplicar alguna función de ganancia para recuperarlas.

Las ganancias mejoran la visualización de las secciones de GPR ya que recuperan información relativa de la amplitud, en general las amplitudes de las señales decrecen rápidamente con respecto al tiempo debido a la dispersión geométrica, todas las funciones tienden a operar de manera similar, aplicando un factor multiplicador a regiones sucesivas de la traza en el tiempo, sin embargo, es importante recordar que de alguna manera los datos se están alterando y que la señal se amplifica de manera indiscriminada, es decir, tanto las señales adjudicadas a ruido aleatorio como las señales coherentes son amplificadas. Para esta adquisición solo se recurrió a utilizar una ganancia de decaimiento a profundidad utilizando un valor de 0.25 como escala de ventana temporal, el resultado de la aplicación del filtro se muestra en la **Figura No. 25**.

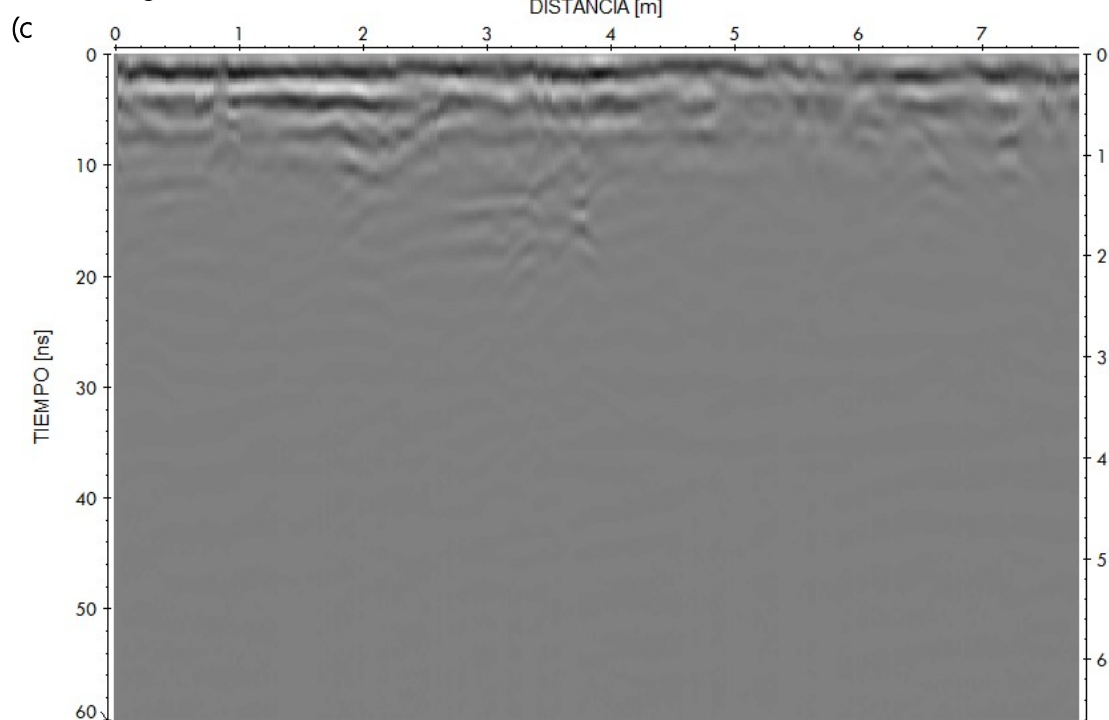
Sección original



Sección original



Sección original



Sección filtrada

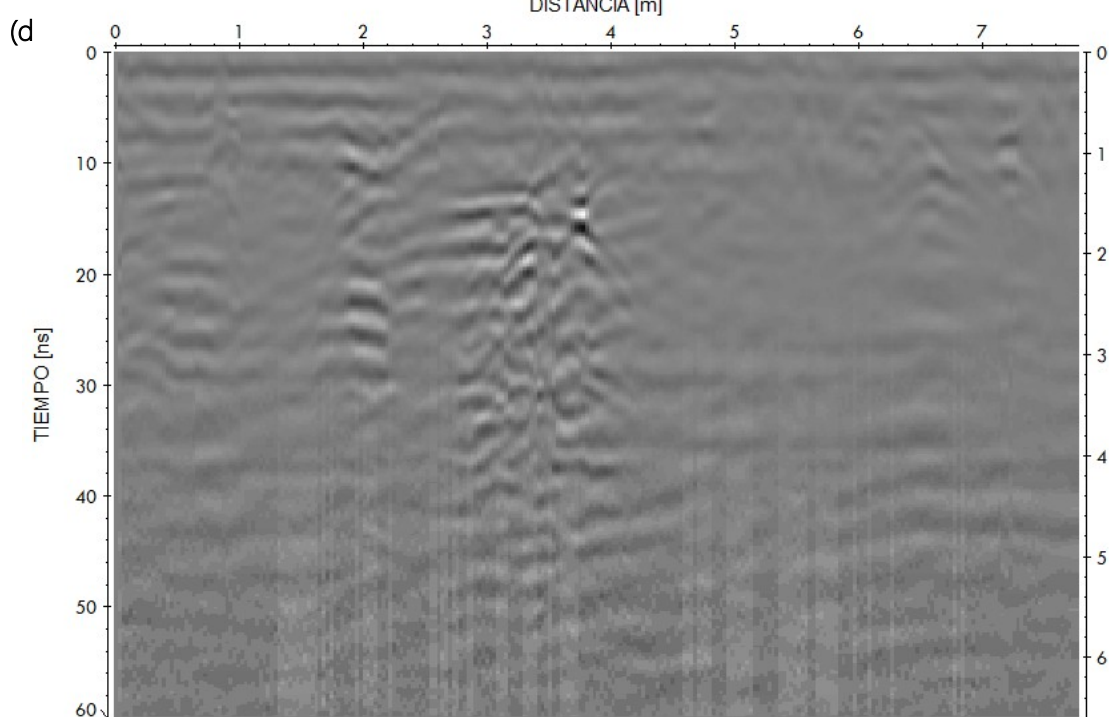


Figura No. 25. Aplicación de Ganancia.

25-a) La imagen muestra una traza aleatoria sin ganancia. 25-b) Se muestra la misma traza después de la aplicación de la ganancia elegida. 25-c) La imagen muestra el radargrama sin ganancia. 25-d) Se muestra la sección después de filtrar.

7. Filtro Pasa banda:

Mediante este filtro se seleccionan las frecuencias que predominan en el radargrama, permitiendo solo el paso de la señal útil y atenuar o suprimir aquellas que no entran en dicho intervalo y que se consideran “ruido” (tomando en cuenta el ruido aleatorio y ruido coherente).

El propósito principal del filtrado es eliminar el posible ruido del radargrama, manteniendo el margen de frecuencia donde la señal domina y este paso mejora la relación señal-ruido.

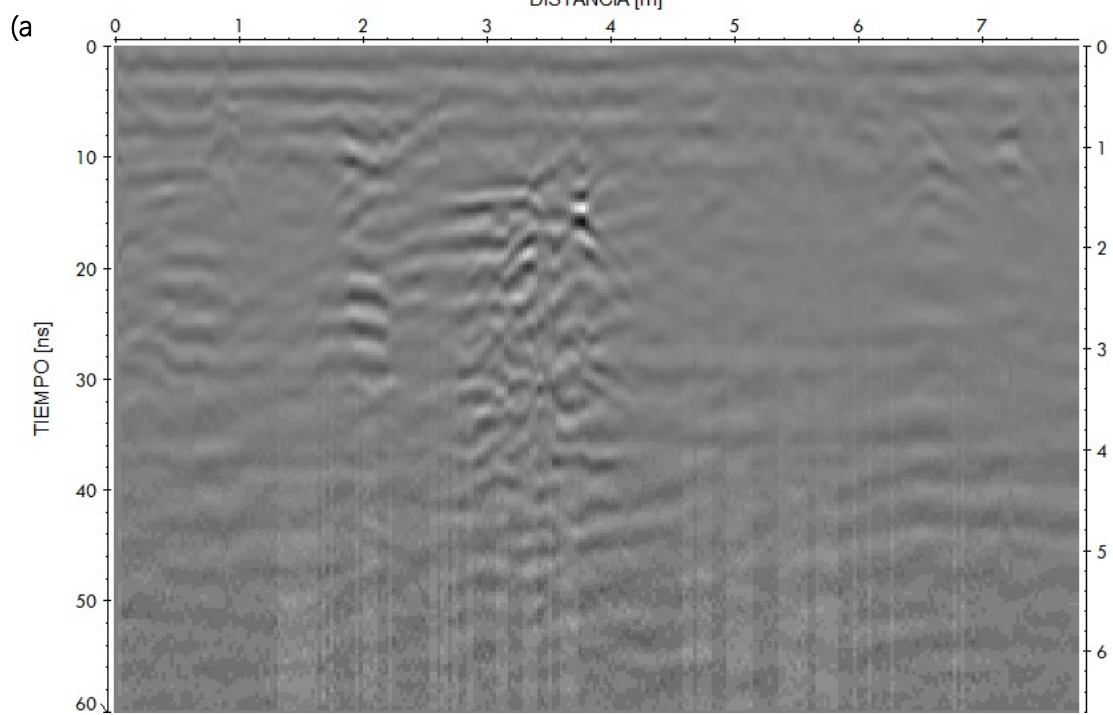
Para la presente investigación se utilizó un filtro 1-D de paso banda, el software aplica de forma vertical la misma operación sobre cada traza de manera individual.

Para la selección de los parámetros del filtro utilizamos en apoyo el espectro de frecuencias de una cantidad de trazas significativas de cada radargrama en donde se seleccionó un intervalo definido; para la línea 05 de GPR se utilizó el valor de 180 a 610 MHz que fue la ventana que mejor funcionó, designando así la frecuencia de corte bajo y alto de dicho filtro.

En la **Figura No. 26** se muestran los radargramas obtenidos antes y después de la aplicación de dicho proceso.

La **Figura No. 26-a** muestra un radargrama con tonos grises similares a los efectos de estática en la parte profunda, después de seleccionar la frecuencia de corte y aplicar el filtro pasa banda, podemos denotar que en la **Figura No. 26-b** se muestra el radargrama más limpio a profundidad, sin efectos de estática o múltiples, por lo que se cumplió el objetivo de la aplicación del filtro.

Sección original



Sección filtrada

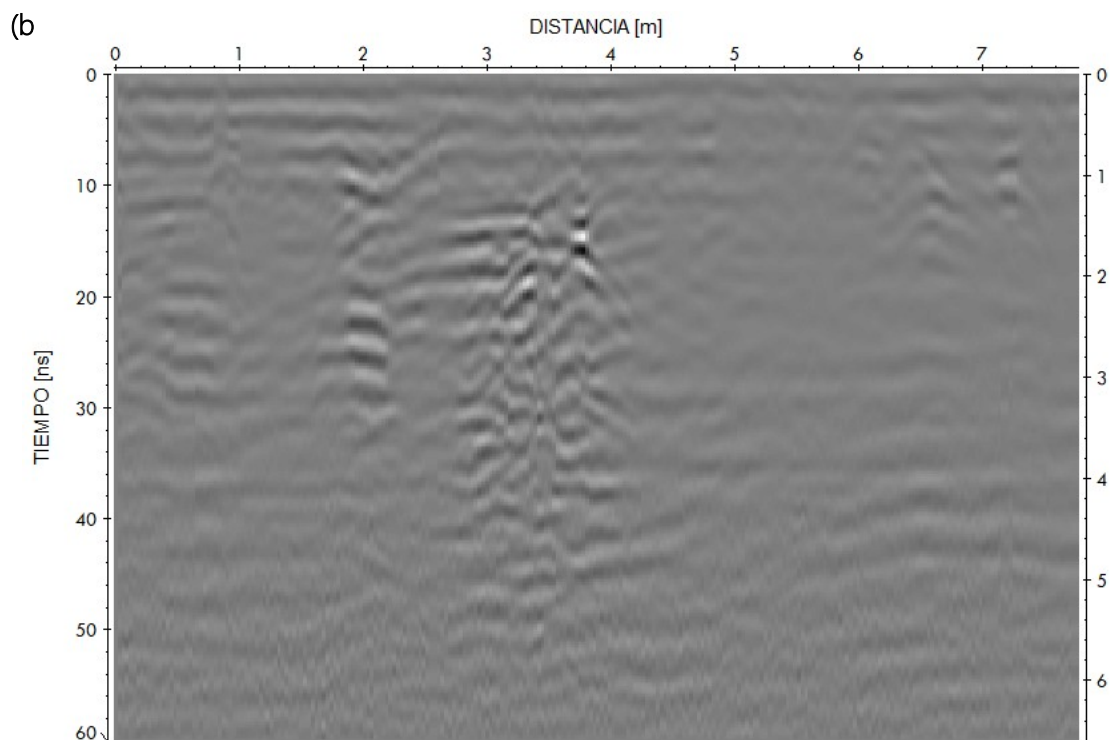


Figura No. 26. Selección del filtro paso banda

26-a) Muestra el radargrama antes de la aplicación del filtro pasa banda. 26-b) muestra el radargrama después de la aplicación del filtro diseñado.

8. Deconvolución:

La deconvolución es uno de los filtros especiales que es utilizado para incrementar la resolución temporal y suprimir las señales múltiples de los datos (Blancas J., 2000).

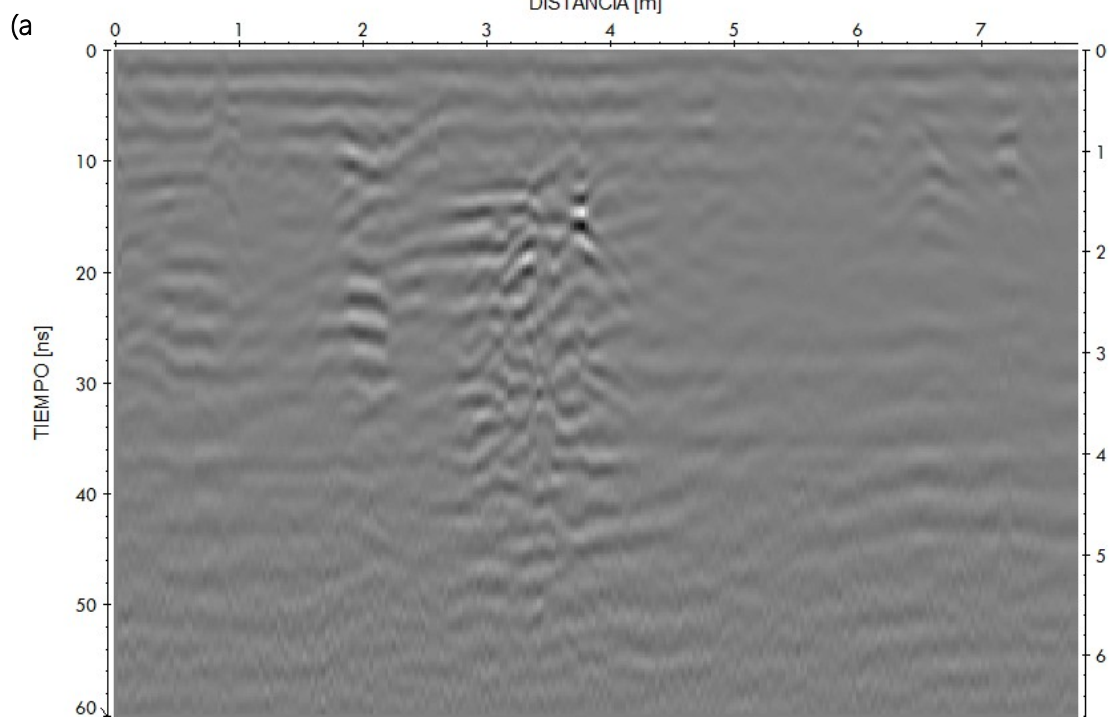
Para el procesamiento se utilizó una deconvolución impulsiva, esta actúa sobre cada traza de forma independiente.

El software calcula para cada traza la autocorrelación sobre un número predefinido de muestras y lo utiliza como señal de entrada, de manera recursiva calcula la traza del filtro de deconvolución para después convolucionarla con la traza original.

Para el diseño de este filtro, se seleccionaron los instantes de comienzo y final de la ventana temporal, así como la longitud de la traza del filtro deconvolutivo. Además, se agregó un porcentaje de 40 % de ruido blanco o preblanqueo para estabilizar el proceso de deconvolución.

En la **Figura No. 27** se muestran los radargramas obtenidos antes y después de la aplicación de dicho proceso. La **Figura No. 27-b** muestra un cambio considerable ya que con este paso se logró eliminar los múltiples.

Sección original



Sección filtrada

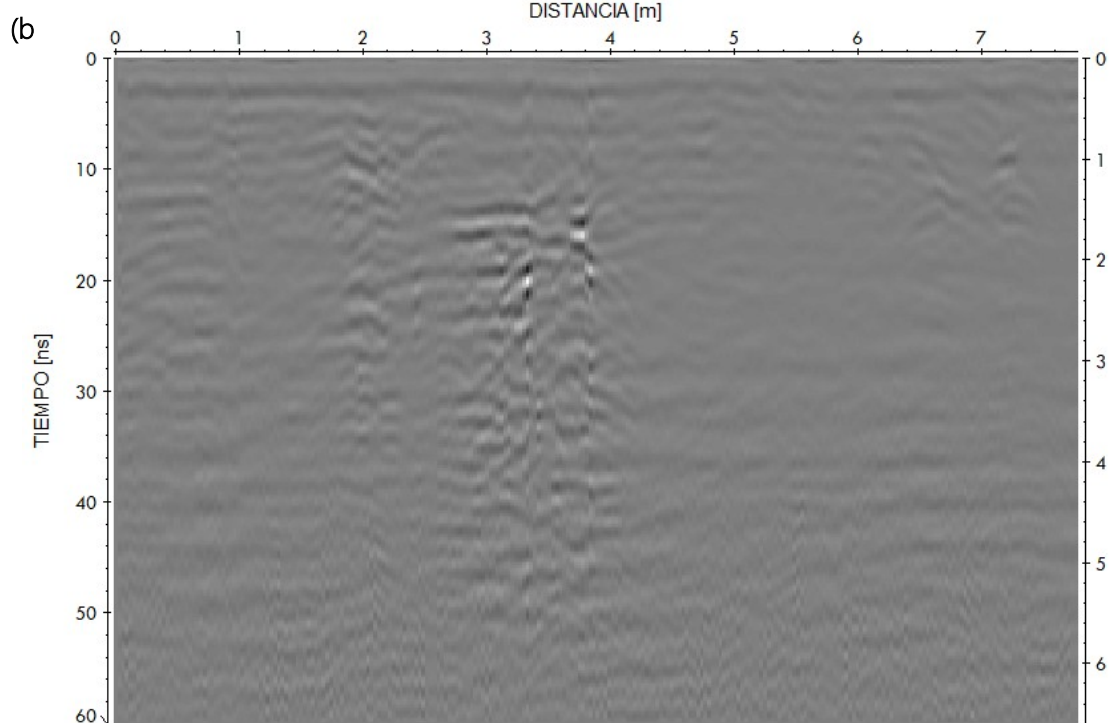


Figura No. 27. Aplicación de la deconvolución
27-a) La imagen muestra el radargrama antes de la aplicación de la deconvolución. 27-b) La figura muestra el radargrama después de aplicar el filtrado.

9. Migración

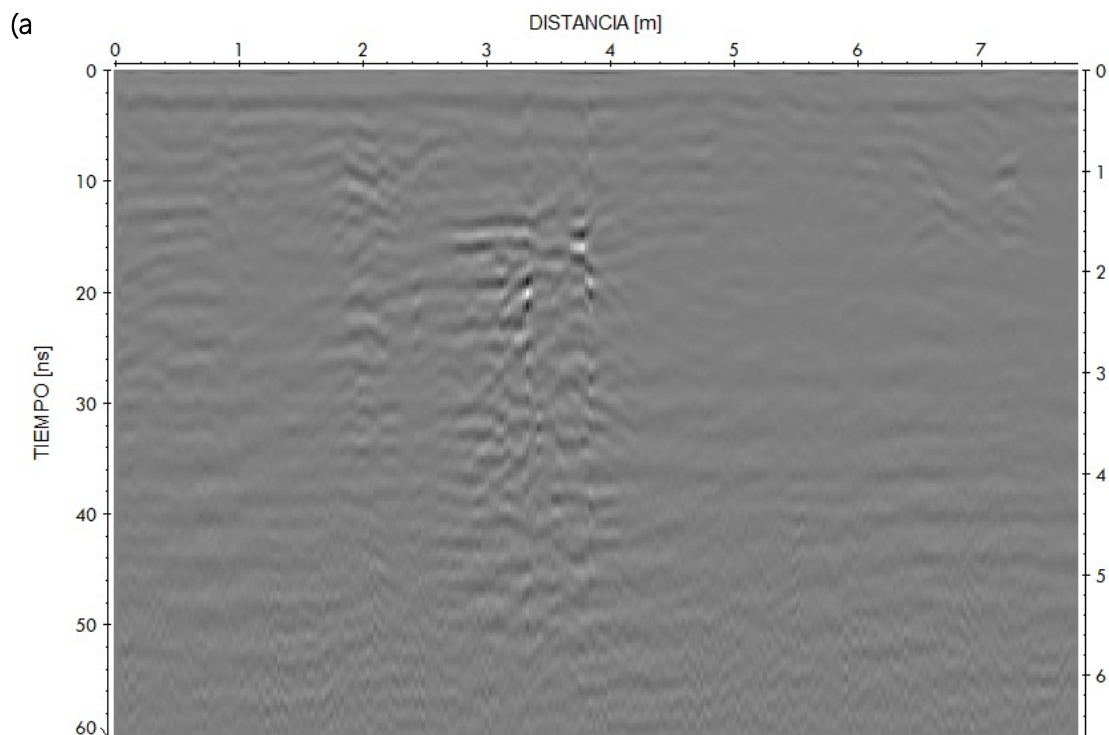
El objetivo de este paso es reacomodar las anomalías a su distancia y profundidad real, la migración rastrea la energía de reflexión y difracción hasta la fuente que la produce basándose en una velocidad constante.

Este proceso intenta suprimir la direccionalidad de la fuente y el receptor de los datos de reflexión, intentando reconstruir la distribución geoméricamente correcta de la reflectividad del radar en el subsuelo.

Es uno de los filtros más importantes, ya que al aplicarlo a menudo se obtiene una mejor aproximación a la realidad, pero para lograr su efectividad es necesario considerar que las trazas deben estar equiespaciadas y que no exista una topografía muy abrupta.

La velocidad que fue utilizada para la aplicación de la migración fue obtenida a partir del modelo 2-D de la cavidad expuesta. En la **Figura No. 28** se muestran los radargramas obtenidos antes y después de la aplicación de dicho proceso.

Sección original



Sección filtrada

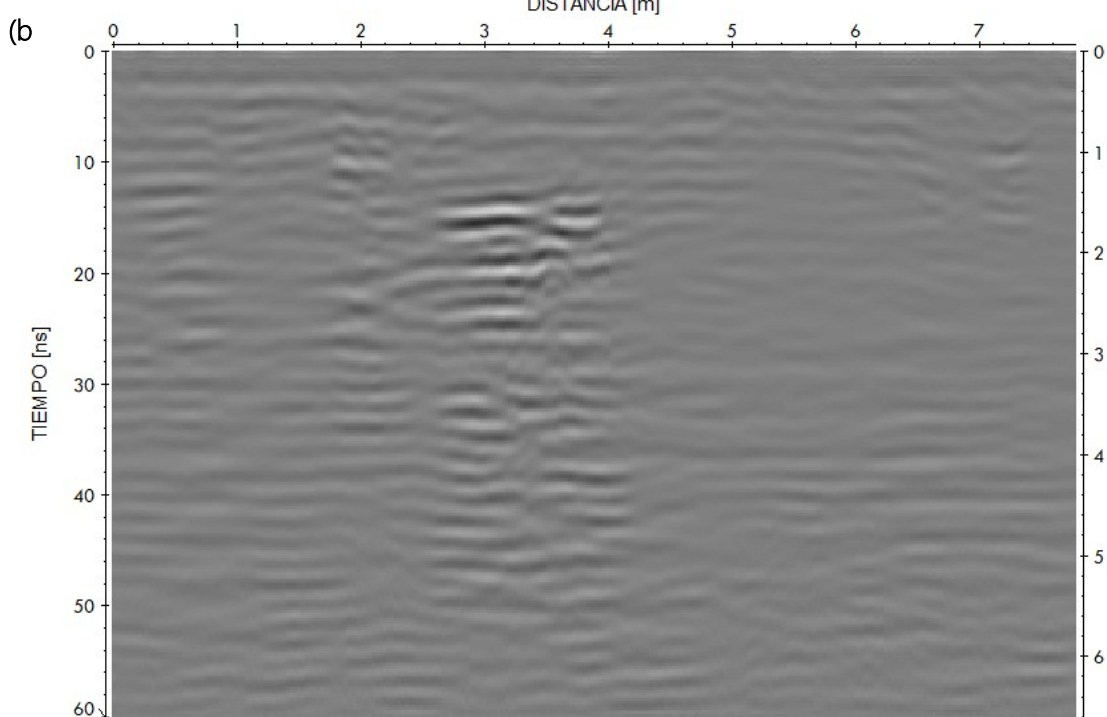


Figura No. 28. Aplicación de la migración

La imagen 28-a) muestra el radargrama antes de la aplicación de la migración mientras que la figura 28-b) muestra el radargrama después de aplicar el filtrado.

10. Construcción de modelos sintéticos:

En el trabajo publicado por Ortega-Ramírez *et al.* (2023) se muestra como una propuesta la construcción de radargramas sintéticos con el objetivo de verificar como debería verse el contraste de las velocidades (constantes dieléctricas) entre una cavidad y el material circundante.

Dado que se contaba con información suficiente del área de estudio como: la profundidad medida de la caverna expuesta, su ubicación exacta sobre línea de calibración y la profundidad al nivel freático, fue conveniente generar radargramas sintéticos.

Para este caso y debido a la geología del sitio de estudio, se asumió que el material circundante corresponde a una caliza homogénea, sin grandes efectos de karstificación, ni variaciones laterales importantes.

Para el modelado de los radargramas se utilizó el software MatGPR. Este programa importa el modelo estructural sintético que previamente fue propuesto, lo almacena y calcula las matrices de la constante dieléctrica relativa, la permeabilidad magnética y las estructuras del factor de calidad. El software ejecuta una rutina que calcula la velocidad correspondiente al modelo directo y finalmente importa el radargrama con la resolución elegida.

Para analizar las posibles condiciones kársticas, se consideraron cuatro modelos de radargramas, tomando en cuenta que el nivel estático se encuentra en constante fluctuación y que las cavidades podrán estar saturadas o no de agua. A continuación, se exponen los diferentes casos evaluados de la presente investigación:

1. Cavidad totalmente vacía

El primer caso corresponde a una cavidad que se asume totalmente vacía por lo que se utilizaron los siguientes parámetros: en el interior de la cavidad se utilizó la velocidad del aire ($V_{\text{aire}} = 0.3 \text{ m/ns}$) y para el medio rocoso, se utilizó el valor de la caliza ($V_{\text{caliza}} = 0.15 \text{ m/ns}$). En la **Figura No. 29-a** se observa la geometría del modelo 2-D que fue propuesto para el caso de estudio 1, asumiendo que el medio es continuo y lo único que lo interrumpe es la cavidad; la **Figura No. 29-b** muestra el radargrama sintético obtenido del procesamiento, la anomalía que se generó por el contraste de las propiedades electromagnéticas es una hipérbola de difracción en donde la cima y la base se muestran bien definidas, estas corresponden a los límites físicos de la cavidad. No obstante, es importante considerar que, en algunos casos, las anomalías pueden no mostrarse bien definidas, por lo tanto, es conveniente extraer una traza sintética del Modelo 1 y analizarla (**Figura No. 29-c**). El comportamiento de la traza nos indica una primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de cuatro polarizaciones positivas (flechas en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo). Esta información es valiosa, ya que nos describe las polarizaciones que sufrió la ondícula según la respuesta del sitio de estudio. Por lo que, buscaremos identificar este patrón en los radargramas reales de la adquisición de campo.

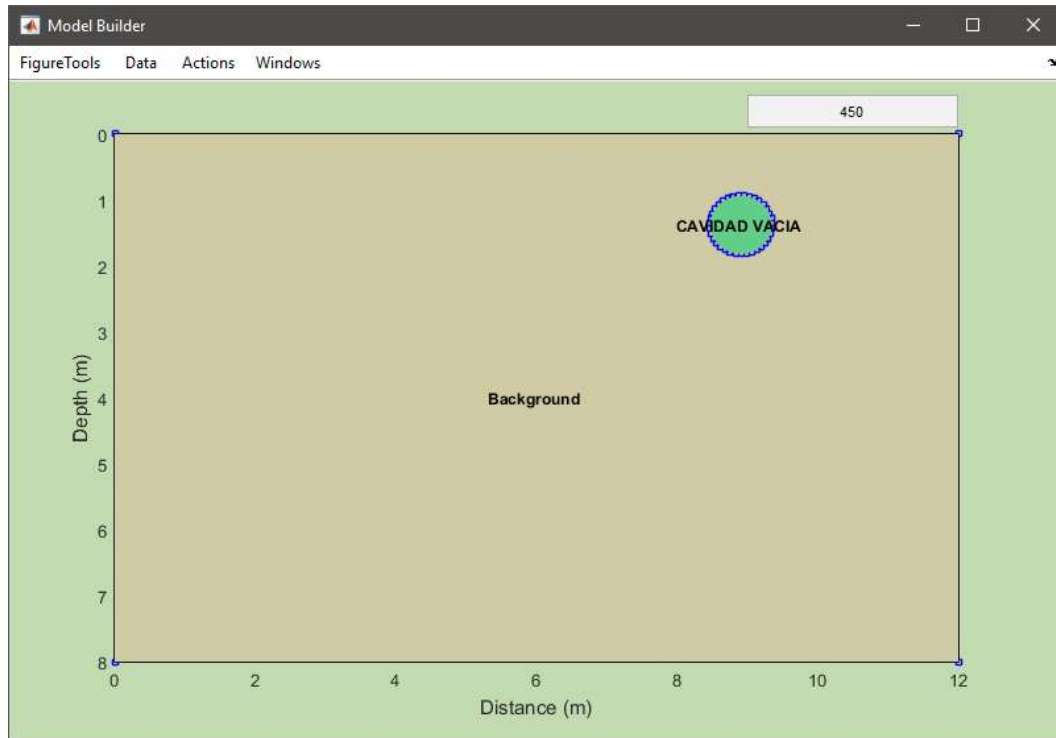


Figura No. 29-a. Modelo Sintético de una cavidad totalmente vacía.
Muestra el modelo obtenido de la simulación de una cavidad que se encuentra llena de aire.

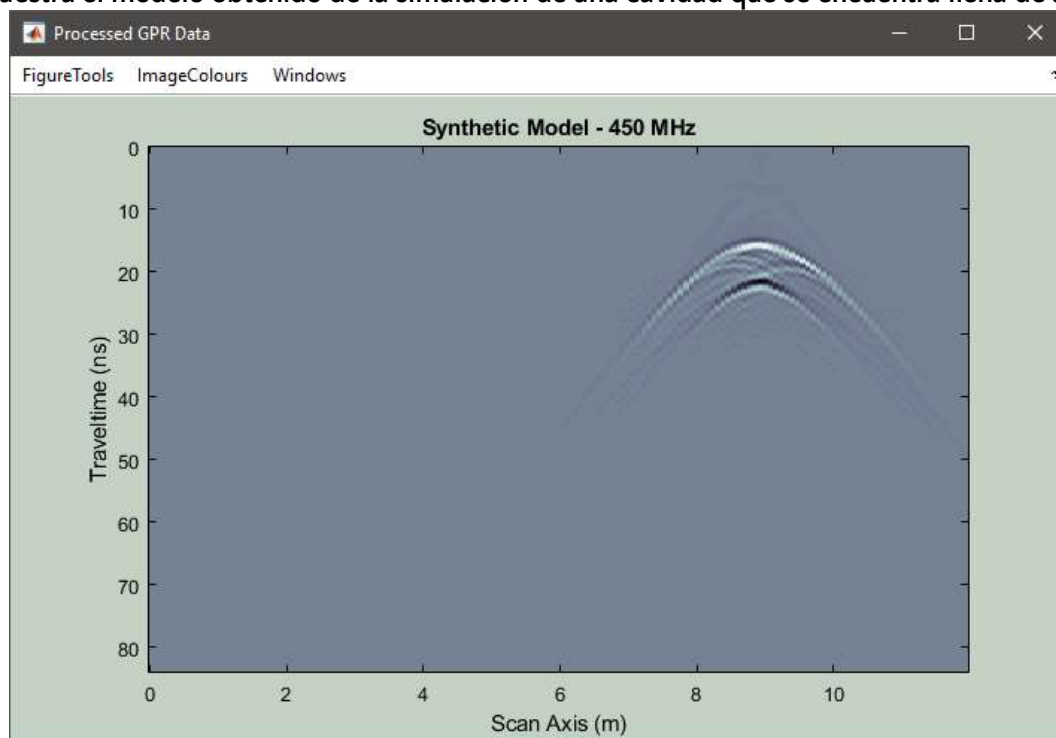


Figura No. 29-b. Radargrama sintético obtenido de la simulación de datos del Modelo 1

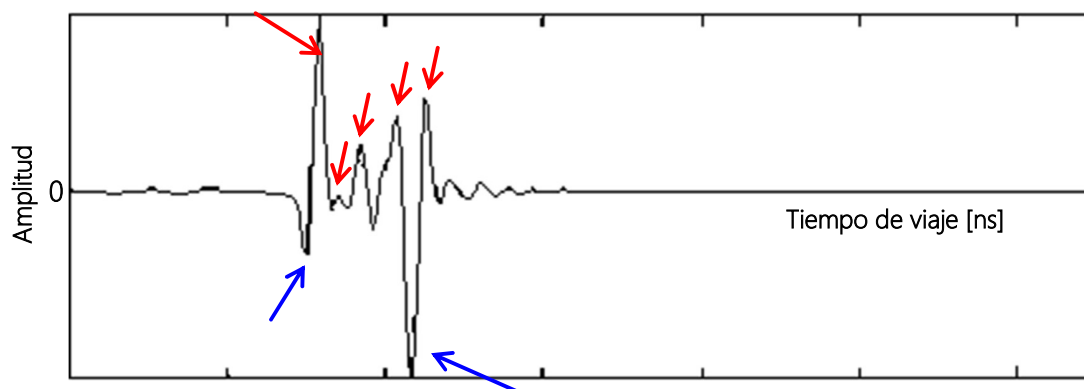


Figura No. 29-c Polarizaciones de la traza extraída del radargrama sintético del Modelo 1. La imagen muestra la Traza 115 obtenido del radargrama sintético del caso 1, mostrando la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de cuatro polarizaciones positivas (flechas en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

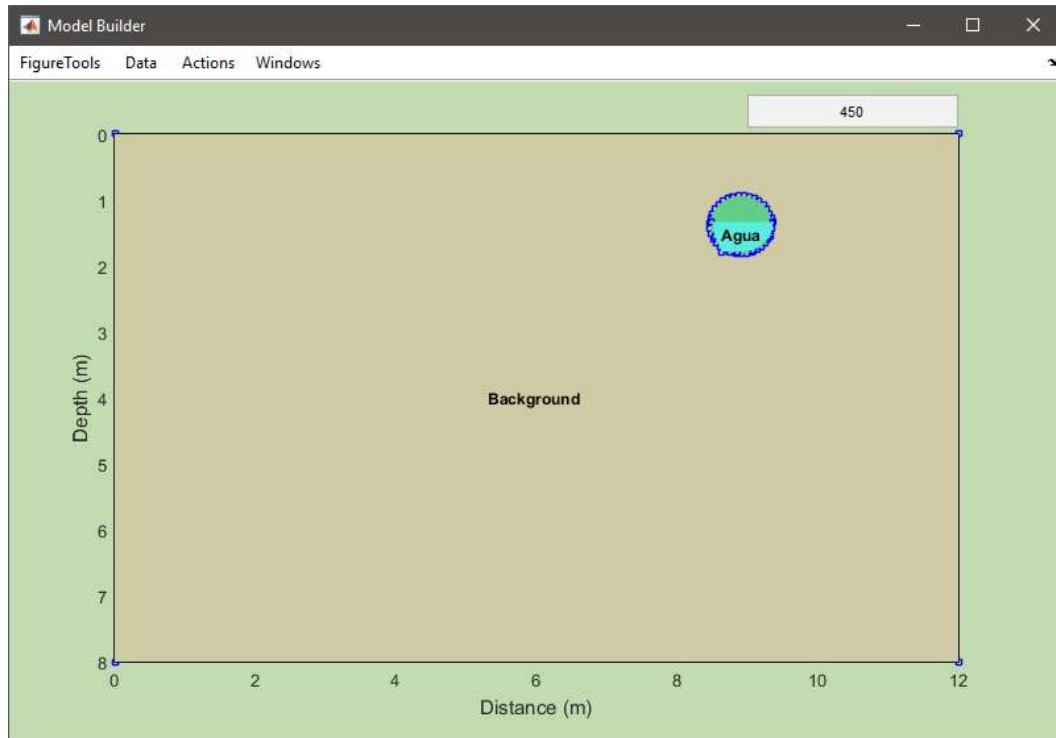
2. Caverna Parcialmente vacía

El caso representado en la **Figura No. 30** corresponde a una caverna subterránea que se encuentra parcialmente rellena de aire y agua.

En función de esta hipótesis, se asignaron valores de velocidades específicas para cada medio: para la parte vacía se utilizó la velocidad del aire ($V_{\text{aire}} = 0,3 \text{ m/ns}$), para la parte saturada se utilizó la velocidad del agua ($V_{\text{agua}} = 0,1 \text{ m/ns}$) y para el medio rocoso circundante ($V_{\text{Medio}} = 0,15 \text{ m/ns}$).

En la **Figura No. 30-a** se observa la geometría del modelo 2-D que fue propuesto para el caso de estudio. La **Figura No. 30-b** muestra el radargrama sintético correspondiente, donde de nuevo se observa una hipérbola de difracción con una cima y base bien definidas, similar al caso anterior; sin embargo, analizando a detalle las profundidades, éstas no corresponden a los límites físicos de la caverna, si no a la cima de esta y el nivel donde se encuentra el agua.

De manera análoga al caso 1, la **Figura No. 30-c** muestra la traza sintética extraída del modelo. Su comportamiento indica una primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de tres polarizaciones positivas (flechas en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).



**Figura No. 30-a. Modelo Sintético de una cavidad parcialmente llena de agua.
Muestra el modelo obtenido de la simulación del caso 2**

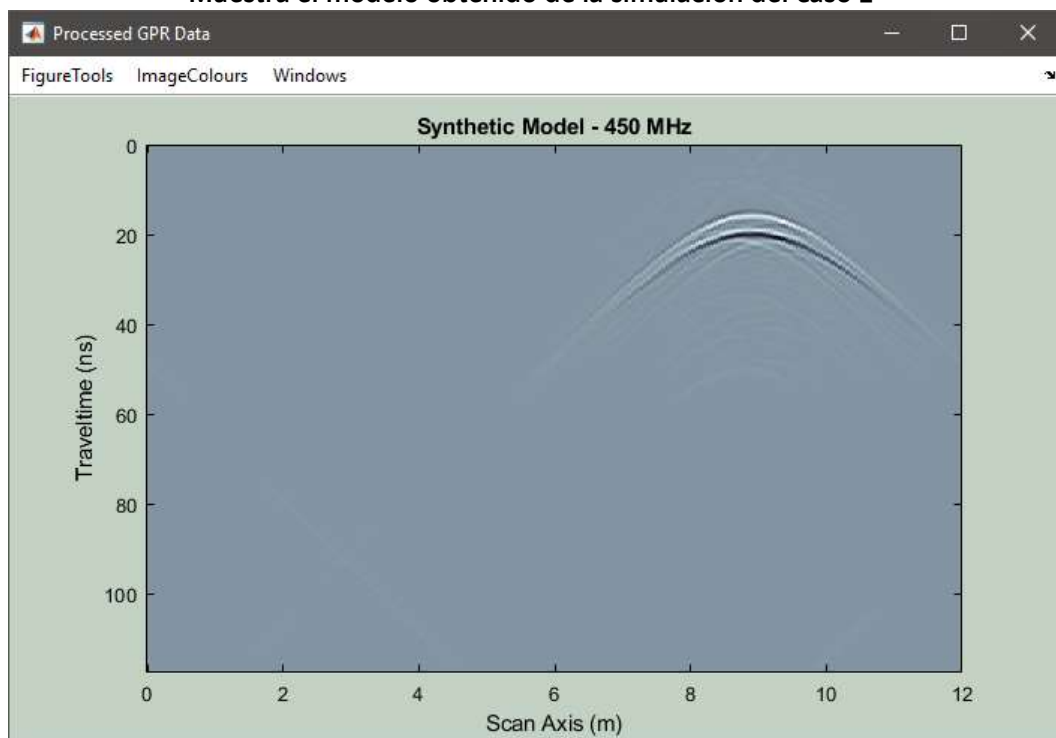


Figura No. 30-b Radargrama sintético obtenido de la simulación de datos del Modelo 2

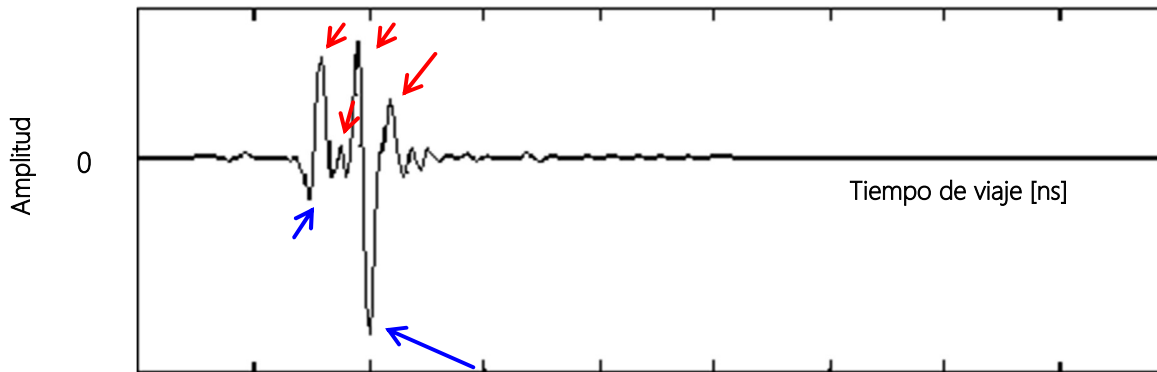


Figura No. 30-c. Muestra las polarizaciones de la traza extraída del radargrama sintético del Modelo 2. La imagen muestra el análisis de las polarizaciones de la Traza sintética 217, la primera polarización es negativa (flecha en color azul) seguida de tres polarizaciones positivas (flechas en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

3. Caverna Llena de agua

Se toma en cuenta un tercer caso de estudio (Ver **Figura No. 31**) en el cual las cavidades se encuentran totalmente saturadas de agua por lo que los parámetros que se utilizaron fue la velocidad del agua para la cavidad ($V_{\text{agua}} = 0,1 \text{ m/ns}$) y para la caliza ($V_{\text{Medio}} = 0,15 \text{ m/ns}$).

Al igual que en los casos anteriores, en la **Figura No. 31-a** se observa la geometría del modelo 2-D, mientras que, en la **Figura No. 31-b** se muestra el radargrama sintético correspondiente.

El radargrama obtenido para el caso 3 nuevamente presenta una hipérbola de difracción; sin embargo, el ángulo de difracción es mayor en comparación de los dos casos anteriores, aunado a lo anterior, solo se muestra la cima de la caverna.

Finalmente, en la **Figura No. 31-c** se muestra una de las trazas modeladas que se extrajeron del radargrama sintético, para este caso el comportamiento de la traza indica una primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continua con una polarización negativa muy pronunciada o de mayor amplitud (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

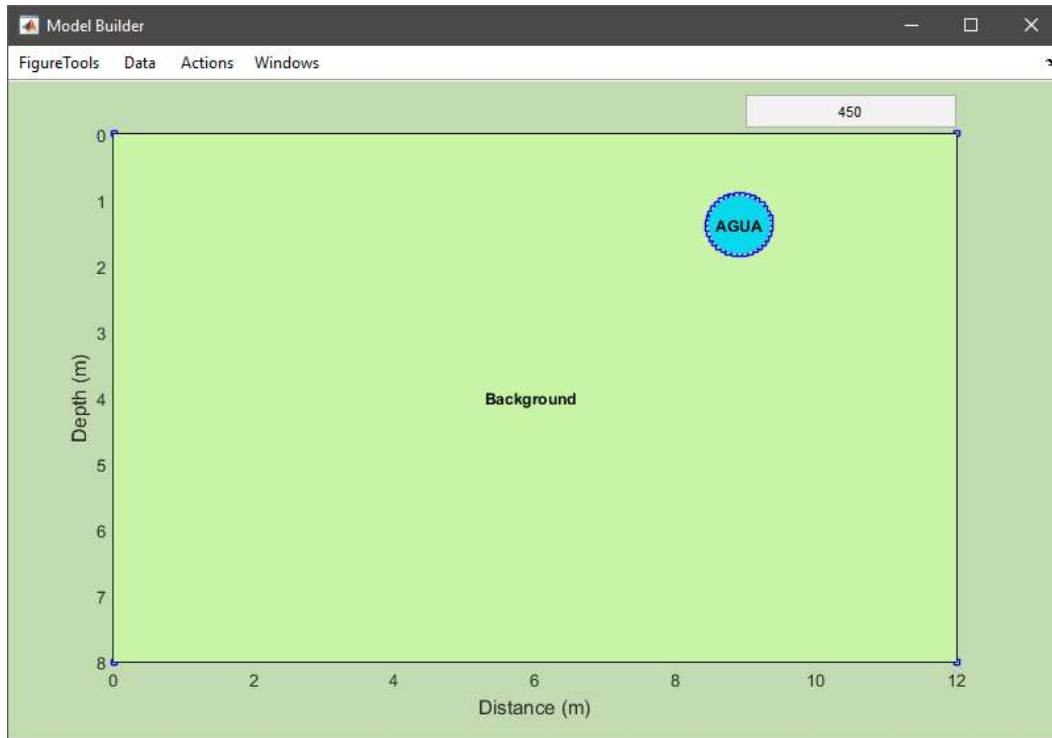


Figura No. 31-a. Modelo Sintético de una cavidad totalmente saturada de agua
Muestra el modelo obtenido de la simulación de una cavidad que se encuentra totalmente llena de agua.

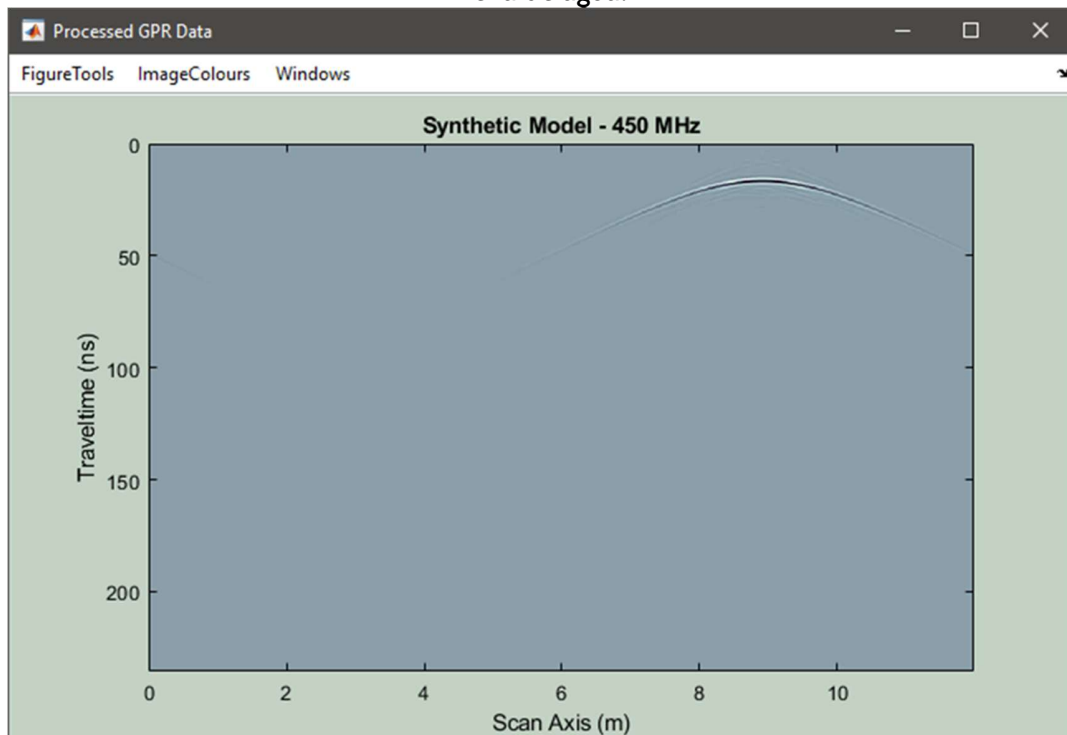


Figura No. 31-b. Radargrama sintético obtenido de la simulación de datos del Modelo 3

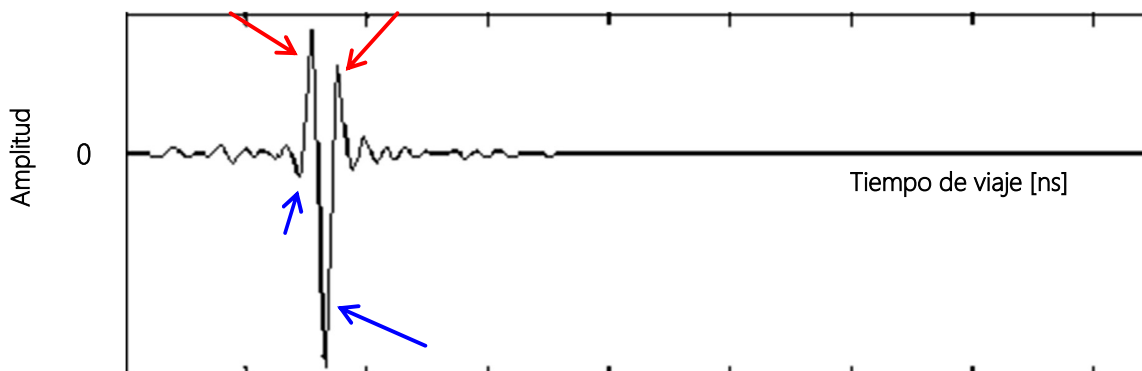


Figura No. 31-c. Muestra las polarizaciones de la traza extraída del radargrama sintético del Modelo 3. La imagen muestra el análisis de la Traza 434, mostrando la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

4. Cavidad vacía y Cavidad saturada de agua

El último caso se puede observar en la **Figura No. 32**, se consideró bajo la hipótesis de que existe una cavidad totalmente vacía ubicada sobre de otra saturada de agua. Los parámetros que se tomaron en cuenta fueron los mismo que en los casos anteriores.

Del modelo 4 se muestra en la **Figura No.32-a**, una de las trazas modeladas que se extrajo del radargrama sintético.

De igual manera que en los casos anteriores, la **Figura No. 32-b** y **Figura No. 32-c** muestra la geometría del modelo 2-D que fue propuesto y su correspondiente en radargrama. En este último se observa nuevamente una hipérbola de difracción con una cima y base bien definidas; a profundidad la segunda hipérbola que correspondería al medio saturado fue atenuada y no es posible observarla con la misma claridad como la que fue generada por el contraste con el medio y el aire.

Finalmente, para este caso el comportamiento de la traza indica una primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de cinco polarizaciones positivas (flecha en color rojo), continúan una pronunciada negativa (flecha de color azul), para terminar con una polarización positiva pronunciada (última flecha en color rojo), la cual mantiene coherencia con el caso de estudio no.1 asociado a una cavidad vacía.

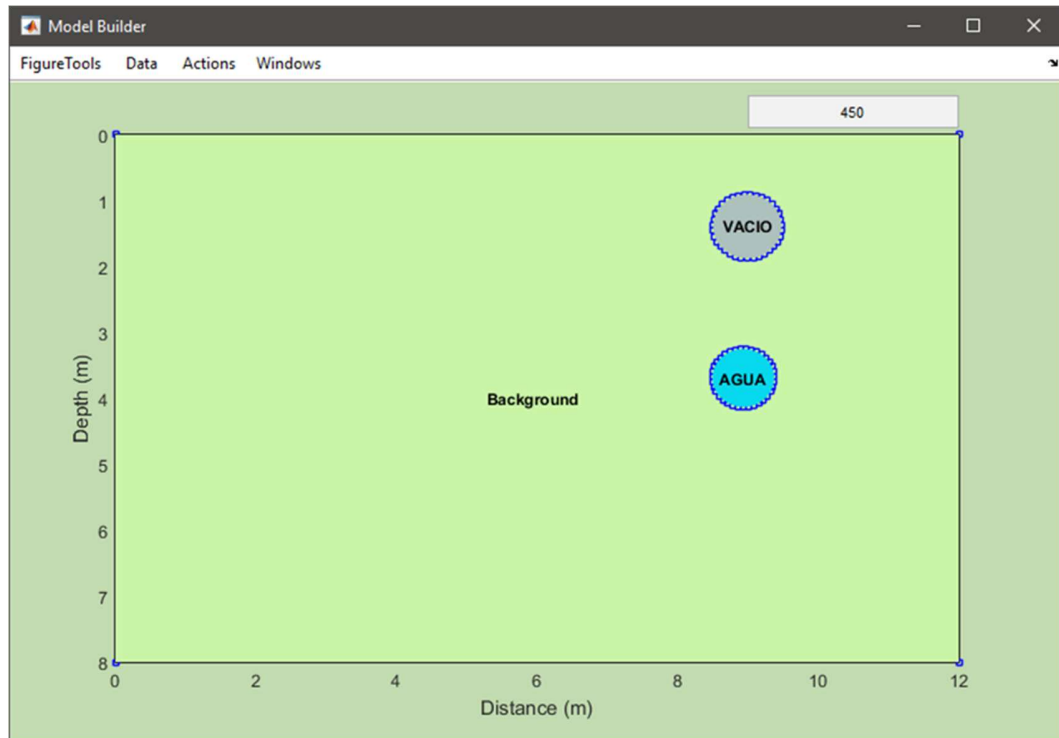


Figura No. 32-a Modelo Sintético de dos cavidades de profundidad variable
Muestra el modelo obtenido de la simulación de una cavidad que se encuentra totalmente
llena de agua y otra totalmente vacía.

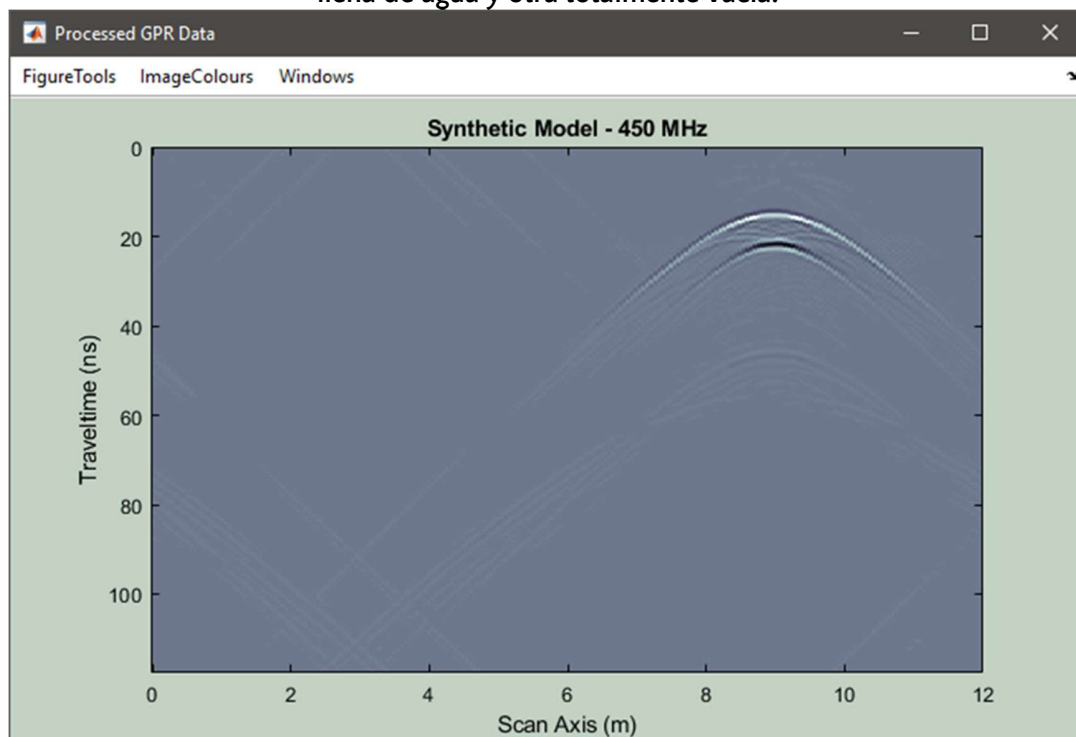


Figura No. 32-b. Radargrama sintético obtenido de la simulación de datos del Modelo 4

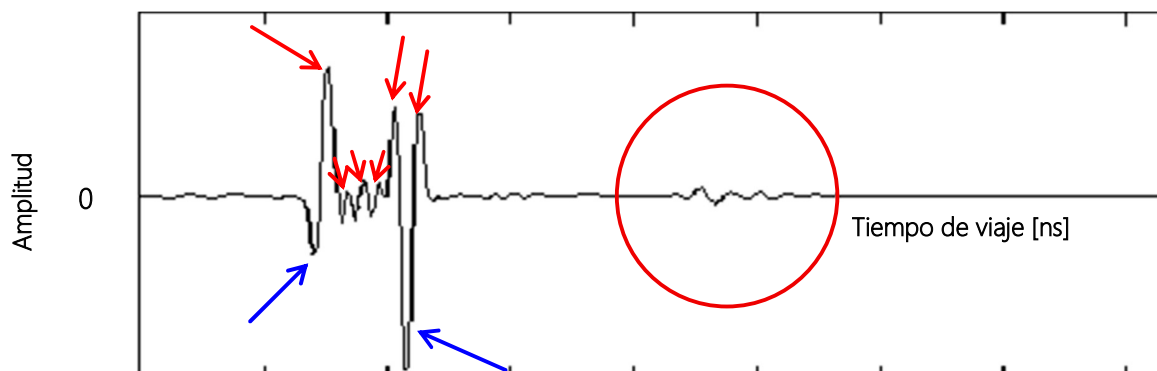


Figura No. 32-c. Muestra las polarizaciones de la traza extraída del radargrama sintético del Modelo 4. La imagen muestra el análisis de las polarizaciones de la Taza 217, se observa la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de cinco polarizaciones positivas (flechas en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

11. Comparación traza a traza:

Como último paso del procesamiento se realizó un análisis de todas las trazas que conforman a la sección procesada del perfil 05, buscando que las trazas del radargrama real siguieran el mismo comportamiento en las polarizaciones de las ondículas de los diferentes modelos sintéticos, para buscar similitudes en el comportamiento de las polarizaciones entre ambos radargramas.

De dicho análisis, se concluye que la traza 120 que está a una distancia de 3.5979 m de longitud del inicio del radargrama y se muestra en la **Figura No. 33** presentó las mismas características que el **Caso No. 3** que simula una cavidad totalmente llena de agua ya que indica una primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

Es importante mencionar que a diferencia del radargrama sintético, en el radargrama real la anomalía generada no muestra una hipérbola bien definida, si acaso se muestra como una zona de alta amplitud que fácilmente pudo ser descartada, sin embargo, al realizar la comparación de trazas se obtuvo un posible indicador de la existencia de dicha cavidad saturada de agua en el sitio de estudio.

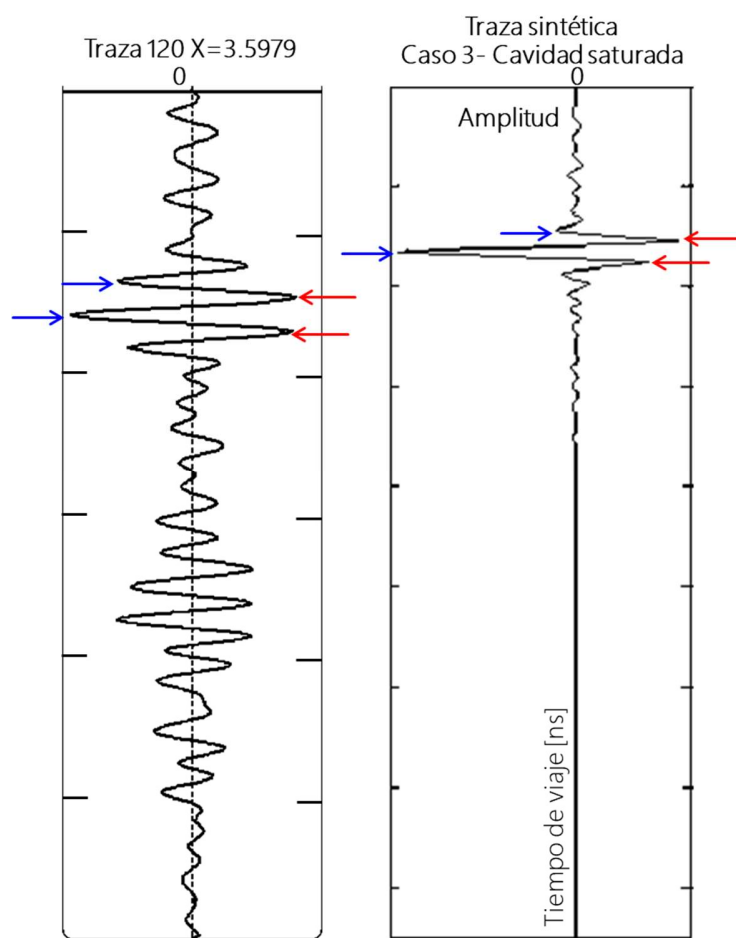
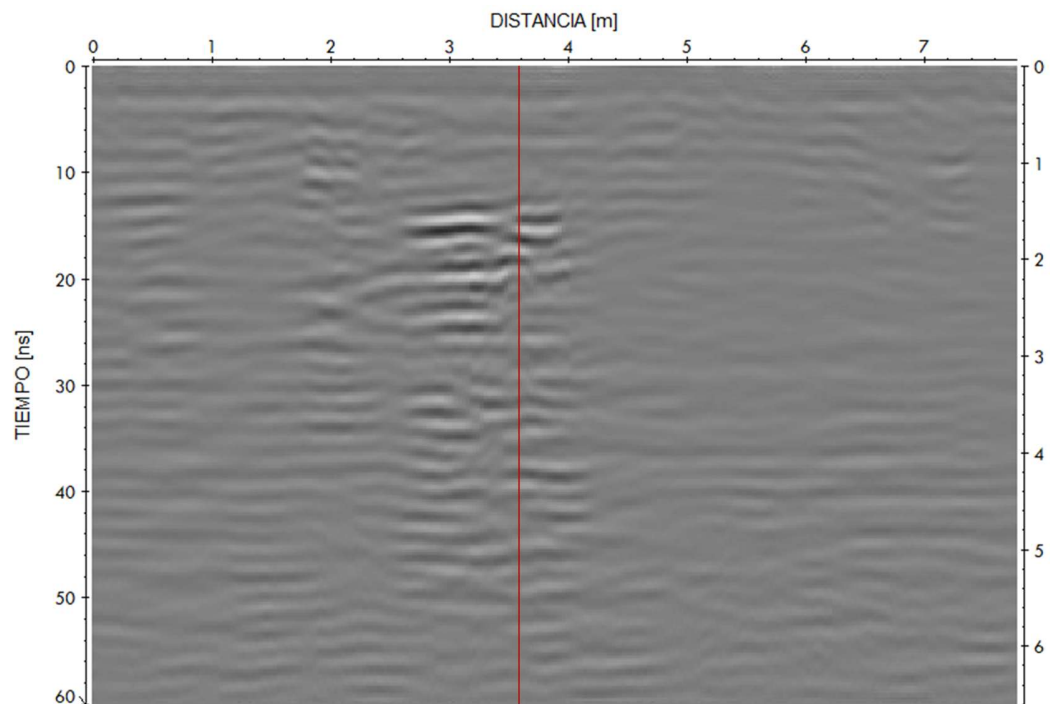


Figura No. 33. Comparación de trazas sección de GPR 05.

V. Resultados y Discusión

V.1. Descripción de las secciones de GPR

El orden que se llevó a cabo para la descripción de los resultados se realizó con base a su distribución en campo y tomando en cuenta el interés que representan los resultados obtenidos para la investigación.

De esta manera se describirán las líneas 1 a 8 que se encuentran en las cercanías de la caverna de estudio, continuando con las líneas 9 a 22 ubicadas en los pasillos y en la extensión del patio central de la casa, las líneas 23 a 27 localizadas en el frente y periferia del inmueble, finalmente, las líneas 28 a 39 realizadas en la porción sur del sitio de interés que corresponde al patio trasero del predio.

Para la interpretación y procesamiento de los datos, se utilizaron los radargramas procesados y sin procesar, con el objetivo de disminuir la incertidumbre y obtener los resultados más cercanos a la realidad, y así evitar el ruido provocado por la aplicación de filtros, además para la interpretación de las secciones se utilizaron las notas de campo, buscando variaciones en la amplitud, hipérbolas de difracción y/o zonas de alta reflectividad asociadas en la campaña de adquisición a posibles cavidades y/o roca altamente *karstificada* presente en el sitio de interés.

V.2. Integración de Resultados

Para la presentación de los resultados se consideró mostrar los radargramas más representativos para la investigación, aquellos en que se muestren hipérbolas de difracción o un gran contraste en la amplitud con el objetivo de simplificar este apartado.

La localización de las líneas que se seleccionaron para se presenta en la **Figura No. 34**.

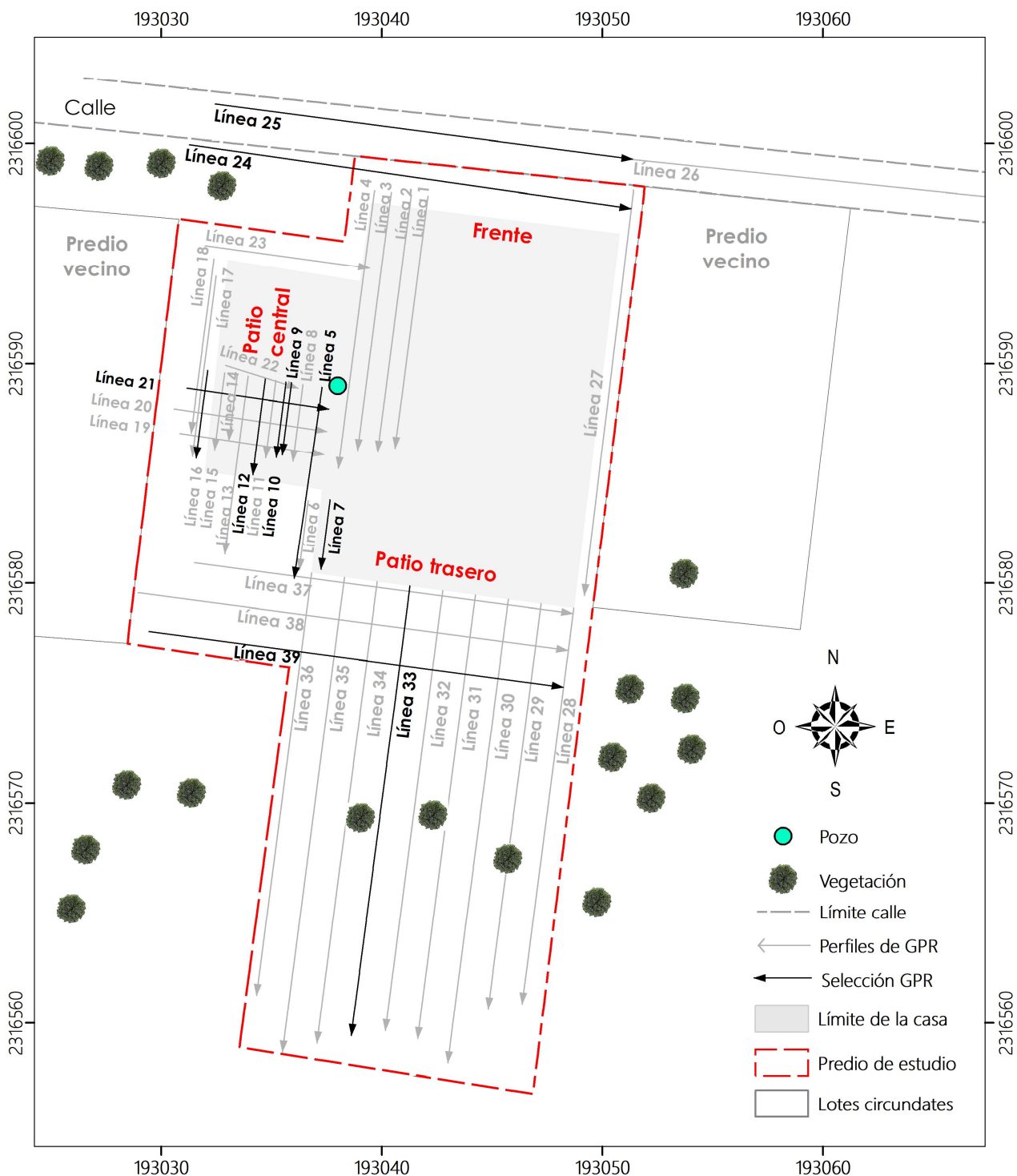


Figura No. 34. Croquis de localización de secciones procesadas de GPR
 Los perfiles se realizaron dentro del inmueble en donde se encuentra el Pozo producto del karst, en el municipio de Kinchil. Las flechas indican la orientación de los perfiles.

Líneas ubicadas cercanas al pozo – Caverna expuesta

Línea 1 a 4 de GPR

Las líneas 01 a 04 de GPR se llevaron a cabo sobre los espacios disponibles del patio central de la casa, son paralelas entre ellas y cercanas a la línea L-05, presentan una longitud de 11 metros y una orientación norte-sur.

Después del procesamiento los radargramas no muestran hipérbolas de difracción tal como los modelos propuestos, pero al final de la línea 1 y 3 se presentan zonas de contraste en la amplitud y su ubicación coincide con la orientación de la caverna expuesta. Al realizar el análisis de polarización de las trazas se concluye que en ninguna línea se encontraron grandes similitudes con los radargramas sintéticos propuestos.

Línea 6 de GPR

La línea GPR-06 tiene una longitud de 3.396 metros y fue trazada con una orientación norte a sur se realizó en las áreas libres del patio central de la casa.

Del procesamiento se concluye que el radargrama no presentó anomalías de gran interés, cambios en la polarización o indicios de cavidades.

También se buscó alguna similitud entre las polarizaciones de las diferentes trazas, pero no se encontró congruencia con los modelos sintéticos propuestos.

Línea 7 de GPR

La línea GPR-07, es paralela a la anterior y presenta una longitud de 2.759 metros. Después del procesamiento se obtuvo el radargrama de la **Figura No. 35**, la escala utilizada asigna el color negro al valor de menor amplitud y el color blanco al valor de mayor amplitud, el resto de los valores son distribuidos en tonalidades de grises.

A la distancia de 1 m de longitud es posible identificar una zona de contraste en la amplitud (tonos negros y blancos) por lo que en ese punto se extrajo una traza del modelo real para compararla con las trazas de los radargramas sintéticos. De dicha comparación se

encontró que la traza no. 39 presentó los mismos cambios en las polarizaciones que el **Caso No. 3** asociado a una cavidad saturada, las flechas en la imagen indican el sentido de cambio, señalando la primera polarización negativa se mostrada en color azul, seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continúa una muy pronunciada negativa (flecha de color azul), para terminar con una positiva muy pronunciada (última flecha en color).

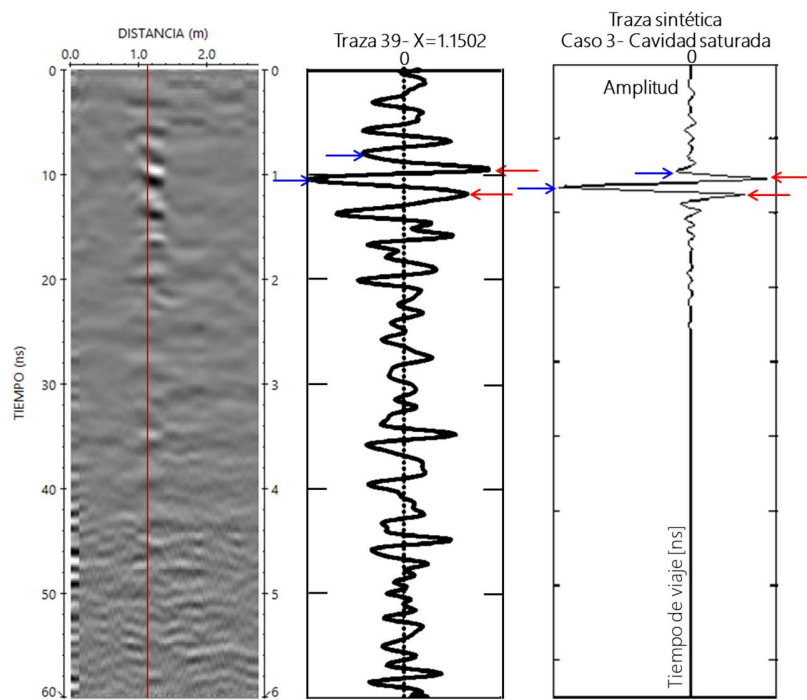


Figura No. 35. Comparación de trazas sección de GPR 07.

La imagen muestra el análisis de la Traza 39 con la traza sintética del modelo 3, ambas presentan la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continúa de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

Línea 8 de GPR

La línea de GPR-08 tiene una longitud de 3.577 metros y una orientación norte-sur. Tras el procesamiento, se identificó una zona de gran contraste entre las distancias de 2 y 3 metros. A partir del análisis de trazas, se determinó que la traza no. 59 ($x= 1.6960$ m) y la traza no. 89 ($x= 2.6534$ m) presentan la configuración que el **Caso No. 3**, correspondiente a una cavidad saturada de agua.

Líneas ubicadas en el patio central – Parte central del predio

Línea 9 de GPR

La línea de GPR 09 tiene 3.365 metros de longitud, se levantó en los pasillos del sector este del patio central, paralela a la línea 5 y concuerdan en inicio y sentido. El resultado del procesamiento se muestra en el radargrama de la **Figura No. 36**.

En una distancia de 2 a 3 metros se identificó una zona de gran contraste en la amplitud (tonos negros y blancos en el radargrama), al realizar el análisis de polarizaciones, se encontró que la traza no. 85 ($x=2.53$ m) presenta la misma configuración que el **Caso No. 4**, ambas trazas muestran la primera polarización negativa que se indica con una flecha de color azul, seguida de cinco polarizaciones positivas (flecha en color rojo), continúan una pronunciada negativa (flecha de color azul), para terminar con una polarización positiva pronunciada (última flecha en color rojo), este comportamiento se asoció a los límites de una cavidad vacía.

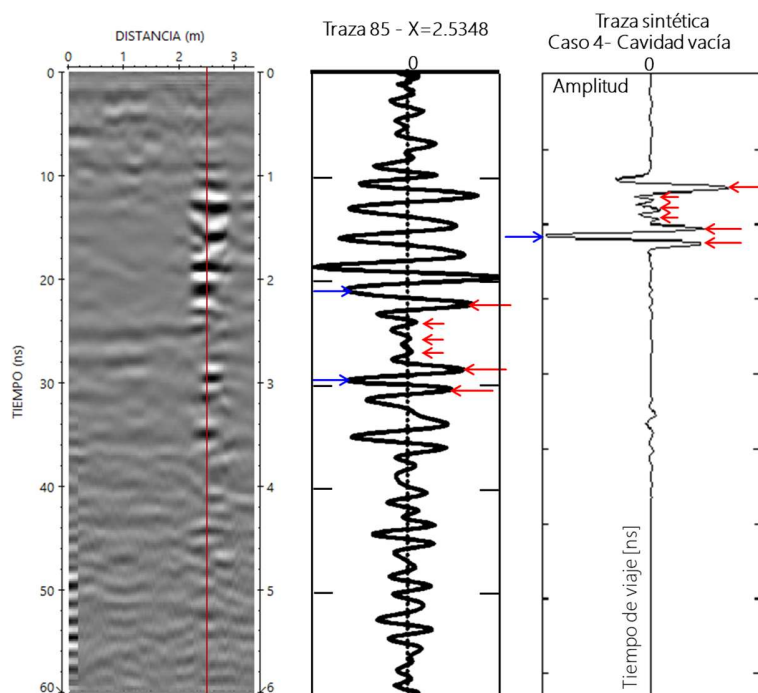


Figura No. 36. Comparación de trazas sección de GPR 09.

La imagen muestra la comparación de la traza 85 del radargrama (línea en color rojo) con la traza sintética del modelo 4, ambas presentan la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de cuatro reflexiones positivas (flechas en color rojo), continua una negativa (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

Línea 10 de GPR

La línea de GPR 10 cuenta con una longitud de 3.517 metros, es paralela a la anterior, está orientada de norte a sur y se desplazó una distancia de 1.5 metros a la izquierda.

El radargrama obtenido del procesamiento se observa en la **Figura No. 37**. Se destaca en el intervalo de 2.6 a 3 metros una zona de contraste en la amplitud (tonos negros y blancos en el radargrama), la cual se alinea espacialmente con la registrada en la línea anterior.

Del análisis de trazas se extrajo la no. 97 que se encuentra a una distancia de 2.90 metros, está presentó las mismas características que el **Caso No. 2** que corresponde a una cavidad parcialmente saturada. Las flechas indican el sentido de las polarizaciones, la primera polarización negativa se muestra en color azul, seguida de tres polarizaciones positivas (color rojo), continúan una pronunciada negativa, para terminar con una polarización positiva, este comportamiento se interpretó como una cavidad semi saturada.

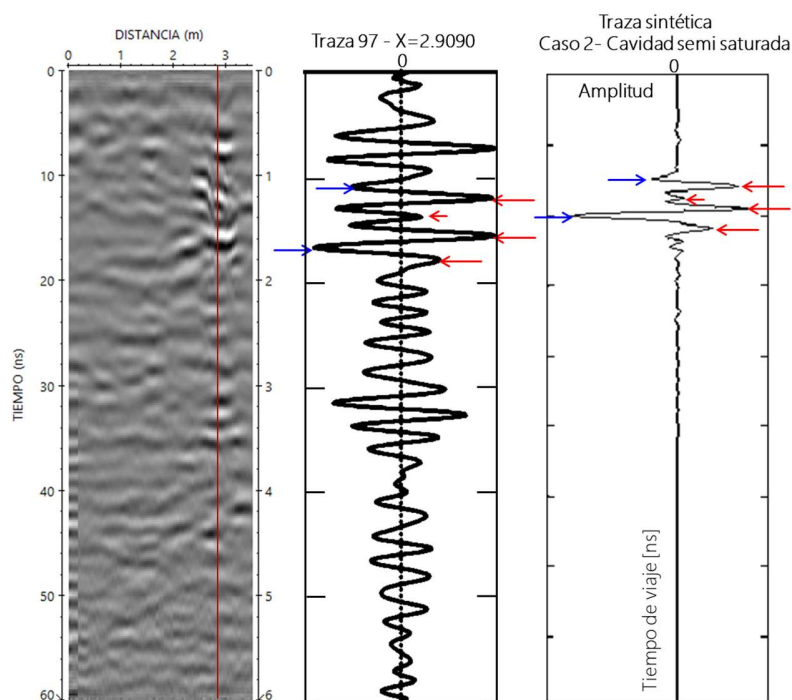


Figura No. 37. Comparación de trazas sección de GPR 10.

La imagen muestra la comparación de la traza 97 (línea de color rojo en el radargrama) con la traza sintética del modelo 2, ambas presentan la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de tres polarizaciones positivas (flechas en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

Línea 11 de GPR

La línea de GPR-11, presenta una longitud de 3.577 metros y una orientación norte a sur. Después del procesamiento no se observaron zonas de contraste o hipérbolas de difracción, de interés.

Del análisis de trazas se encontró que, la traza no. 59 ($x = 1.6960$ m) y la traza no. 89 ($x = 2.6534$ m) presentan las mismas polarizaciones que el **Caso No. 3**, las cuales corresponden a una cavidad saturada de agua.

Línea 12 de GPR

La línea de GPR-12, presenta una longitud de 4.457 metros. Tras el procesamiento, se obtuvo el radargrama de la **Figura No. 38**. Se identificó una hipérbola de difracción en una distancia de 3.3 metros por lo que se extrajo la traza no. 110, esta presentó las mismas similitudes en el sentido de las polarizaciones que el **Caso No. 3**, asociado a una cavidad saturada de agua.

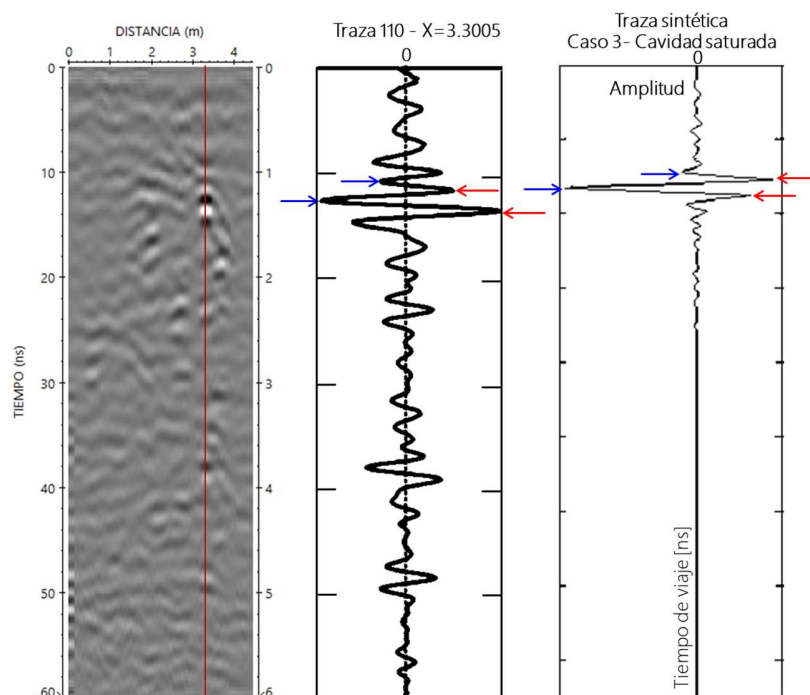


Figura No. 38. Comparación de trazas sección de GPR 12.

La imagen muestra el análisis de la traza no. 110 (señalada con una línea roja en el radargrama) con la traza sintética del modelo 3, ambas presentan la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

Línea 13 a 15 de GPR

Las líneas 13 a 15 de GPR se llevaron a cabo sobre el patio central de la casa en la porción centro, son paralelas entre ellas y tienen orientación norte-sur. Todas presentan una longitud variable del orden de 3 a 8 metros.

Después del procesamiento, en las líneas no se presentaron anomalías con forma de hipérbolas o alguna zona de contraste importante.

Aun así, del análisis de trazas concluye lo siguiente:

Del Perfil de GPR-13 no se encontró ninguna traza de interés o que tenga similitudes con los modelos propuestos; en el Perfil de GPR-14 se identificó la traza no. 56 ($x = 1.6688$ m) parecida a la traza sintética del **Caso No. 2**, que corresponde a una caverna semi saturada; finalmente la traza no. 39 ($x = 1.1636$ m) del perfil de GPR-15 muestra similitudes con el **Caso No. 3**, el cual representa una cavidad saturada de agua.

Los resultados se incluyen en el croquis de anomalías de GPR (**Figura No.45**).

Línea 16 de GPR

La línea de GPR 16, presenta una longitud de 4.093 metros, con orientación norte a sur.

En la **Figura No. 39** se muestra el radargrama obtenido del procesamiento, identificando zonas que presentan gran contraste de amplitud en un intervalo de 1 y 3 metros respectivamente, y resultan de gran interés debido a los resultados de las líneas anteriores.

Se extrajo la traza no. 31 y la no. 118 que corresponden al rango de distancias antes mencionadas, encontrando que éstas presentaron las mismas polarizaciones que la traza sintética del **Caso No. 3** asociado a una cavidad totalmente saturada de agua.

Las flechas en la imagen indican el sentido de las polarizaciones que sufrió la ondícula, la primera polarización negativa se muestra en color azul, seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continúan una pronunciada negativa (flecha de color azul), para terminar con una polarización positiva pronunciada (última flecha en color).

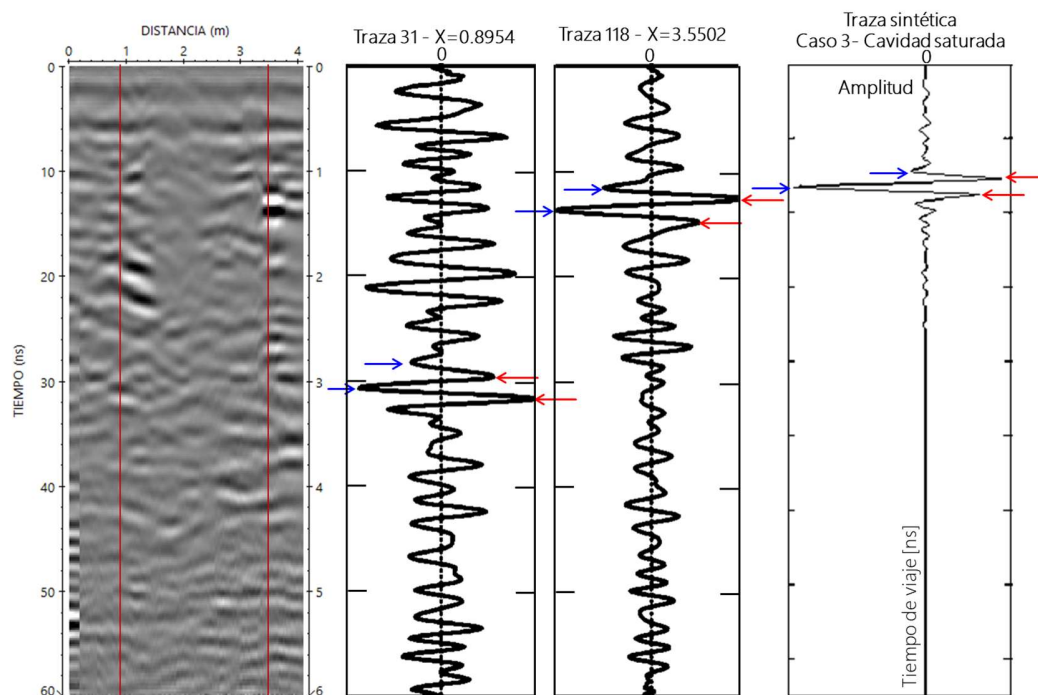


Figura No. 39. Comparación de trazas sección de GPR 16.

La imagen muestra la comparación de las trazas no. 31 y 118 con la traza sintética del modelo 3, todas presentan la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

Línea 17 a 20 de GPR

Las líneas 17 y 18 de GPR son paralelas entre ellas, presentan una orientación norte a sur, mientras que, las líneas 19 y 20 de GPR son perpendiculares a las anteriores (L8 a L18). Todas cuentan con una longitud del orden de 7 a 8 metros aproximadamente.

De las anteriores, ninguno de los radargramas mostró hipérbolas de difracción bien definidas o variaciones abruptas en la amplitud.

Aun así, del análisis de trazas concluye lo siguiente:

Del Perfil de GPR-17, GPR-19 y GPR-20 se identificó en orden de aparición, la traza no. 137 (GPR-17, $x = 4.1124$ m), la no. 110 (GPR-18, $x = 3.3123$ m) y la no. 96 (GPR-20, $x = 2.8648$ m) las cuales corresponden en congruencia con la traza sintética del **Caso No. 3**; en la línea 18 se identificó la traza no. 88 ($x = 2.6302$ m) similar a la traza sintética del **Caso No. 1**; finalmente los resultados se incluyen en el croquis de anomalías de GPR (**Figura No.45**).

Línea 21 de GPR

La línea de GPR 21, se localiza en el patio trasero de la casa, presenta una longitud de 6.973 metros y fue trazada en sentido oeste-este, corta de manera perpendicular a las líneas 8 a 18 y es paralela a la 19 y 20.

El radargrama de la **Figura No. 40**, muestra en una distancia de 3 a 4 metros una hipérbola de difracción que, debido al contexto, se podría asociar a una cavidad.

Del análisis de trazas se extrajo la traza no. 99 y la no. 134 que corresponden al rango de distancias antes mencionadas, encontrándose que estas presentaron las mismas polarizaciones que el **Caso No. 3** asociado a una cavidad totalmente saturada de agua.

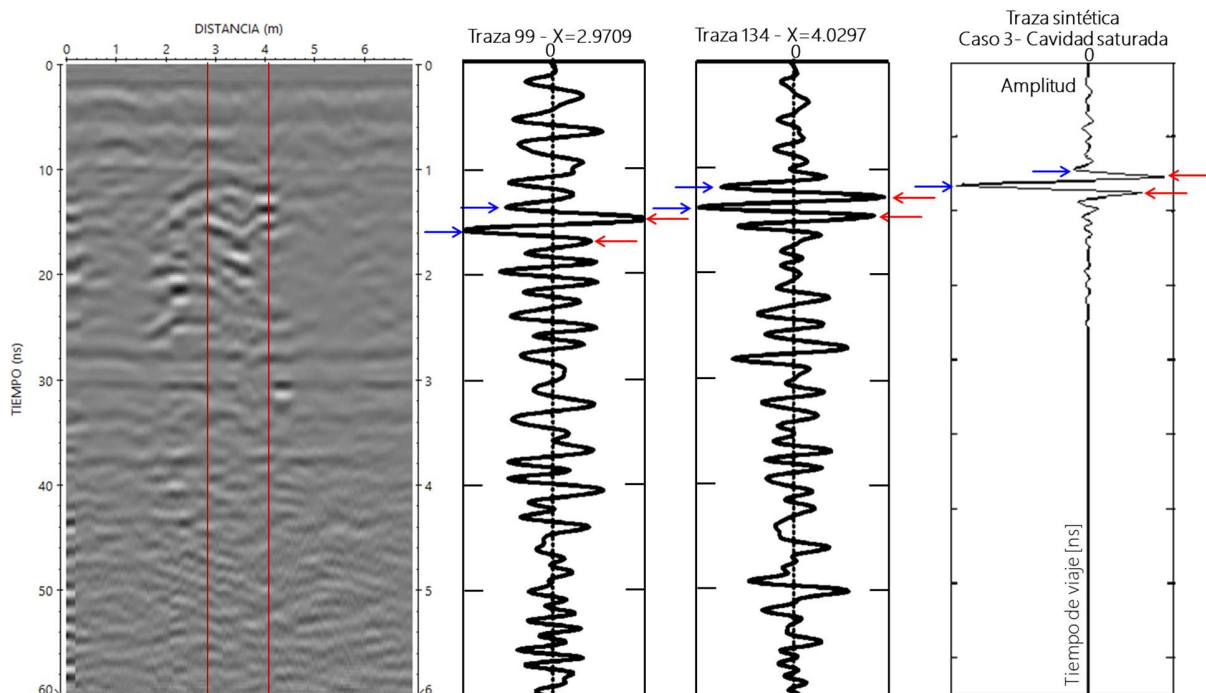


Figura No. 40. Comparación de trazas sección de GPR 21.

La imagen muestra la comparación de las trazas no. 99 y 134 con la traza sintética del modelo 3, todas presentan la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

Líneas ubicadas al frente del inmueble - Porción norte del predio

Línea 22 y 23 de GPR

Las líneas 22 se localiza paralela a la anterior y presenta una longitud aproximada de 5.518, por otro lado, la línea 23 se ubica al frente de la casa, presenta una longitud aproximada de 8.16 metros. Ambas fueron trazadas en sentido oeste-este.

Una vez procesados los radargramas no se identificaron hipérbolas o contrastes notorios.

Del estudio y análisis de las trazas tampoco se identificaron coincidencias importantes con los modelos sintéticos.

Línea 24 de GPR

La línea GPR 24, se localiza en el frente del inmueble en la proximidad de la casa, presenta una longitud aproximada de 20.283 metros y fue trazada en sentido oeste-este.

Después del procesamiento el radargrama de la **Figura No. 41** muestra en la distancia de 1.8 m una hipérbola de difracción.

Al realizar el análisis de las trazas en esa distancia, se extrajo la traza no. 608 que presentó las mismas polarizaciones que el **Caso No. 3** asociado a una cavidad totalmente saturada de agua.

Línea 25 de GPR

La línea GPR 25 es paralela a la anterior y también se realizó en el frente del inmueble, pero sobre la calle. Presenta una longitud aproximada de 19.888 metros corre en sentido oeste-este.

Después del procesamiento el radargrama de la **Figura No. 42** muestra en la distancia de 1.8 m una hipérbola de difracción definida y que mantiene la tendencia de la línea antecesora.

Al realizar el análisis de las trazas en esa distancia, se extrajo la traza no. 592 que al igual que la línea-24, presentó las mismas polarizaciones que el **Caso No. 3** asociado a una cavidad totalmente saturada de agua.

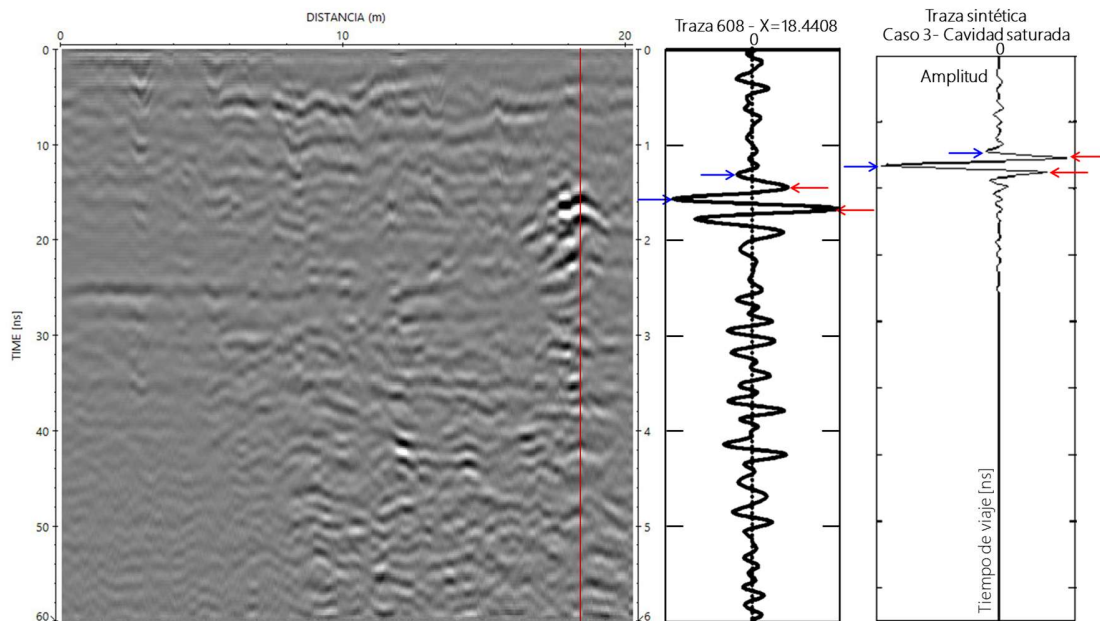


Figura No. 41. Comparación de trazas sección de GPR 24.

La imagen muestra la comparación de la traza no. 608 con la traza sintética del modelo 3, ambas presentan la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

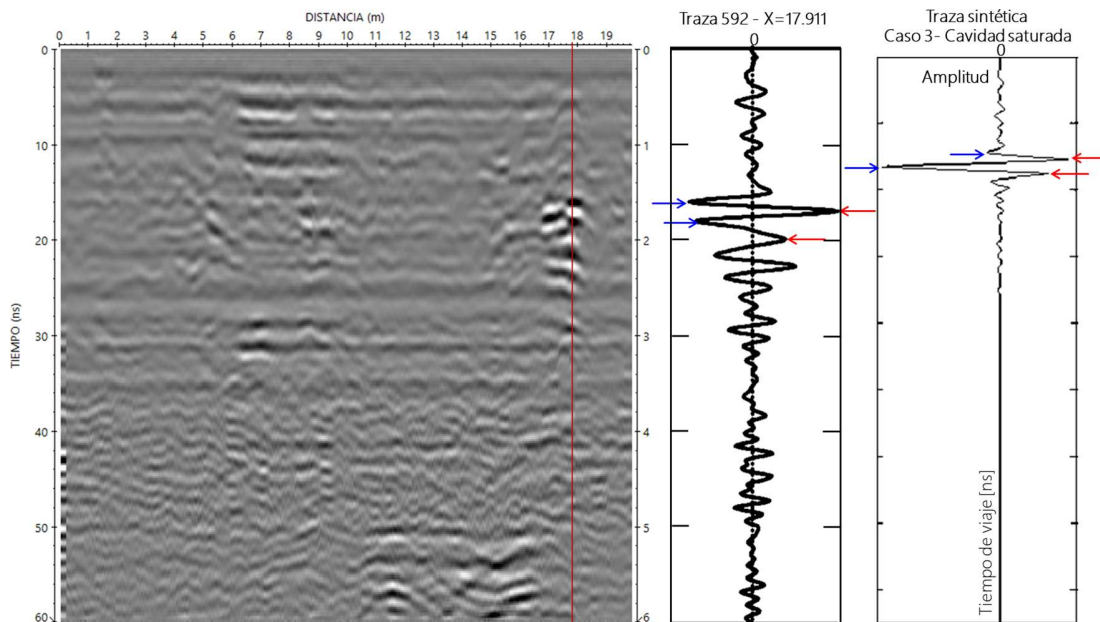


Figura No. 42. Comparación de trazas sección de GPR 25.

La imagen muestra la comparación de la traza no. 592 con la traza sintética del modelo 3.

Línea 26 y 27 de GPR

La línea de GPR 26, se localiza en el frente del inmueble y se realizó inmediata a la anterior, presenta una longitud aproximada de 20.555 metros y fue trazada en sentido oeste-este.

Por otro lado, la línea de GPR 27, se localiza en el costado este del inmueble sobre el límite del predio vecino, presenta una longitud aproximada de 18.645 metros y fue trazada en sentido norte-sur.

Después del procesamiento los radargramas no evidencian anomalías distintivas, como hipérbolas o contrastes significativos.

Del análisis de trazas realizado se concluye que en ninguna de las líneas anteriores se presentan similitudes relevantes con los modelos propuestos.

Líneas ubicadas en el patio trasero - Porción sur del predio

Líneas 28 a 32 de GPR

Las líneas de GPR 28 a 32, se localizan en la extensión del patio trasero del inmueble, presentan una longitud del orden de 18 a 20 metros y fueron trazadas en sentido norte-sur.

Después del tratamiento de los datos, los radargramas no muestran anomalías características como hipérbolas bien definidas o zonas de contraste.

Al evaluar las polarizaciones de las trazas se determinó que no existen grandes similitudes con las de los radargramas sintéticos.

Línea 33 de GPR

La línea de GPR 33, se localiza en el patio trasero de la casa con orientación norte a sur, abarcando una longitud de 20.642 metros.

El radargrama de la **Figura No. 43** muestra en las distancias de 2, 3 y 8 metros distintas zonas de contraste en la amplitud (colores blanco y negro) que, debido al contexto y a los resultados de las otras líneas se puede asociar a una cavidad.

El análisis de trazas confirma que la traza no. 80, 122 y 283 que corresponden a los intervalos de distancia antes mencionados presentaron las mismas polarizaciones que el **Caso No. 3** asociado una cavidad totalmente saturada de agua.

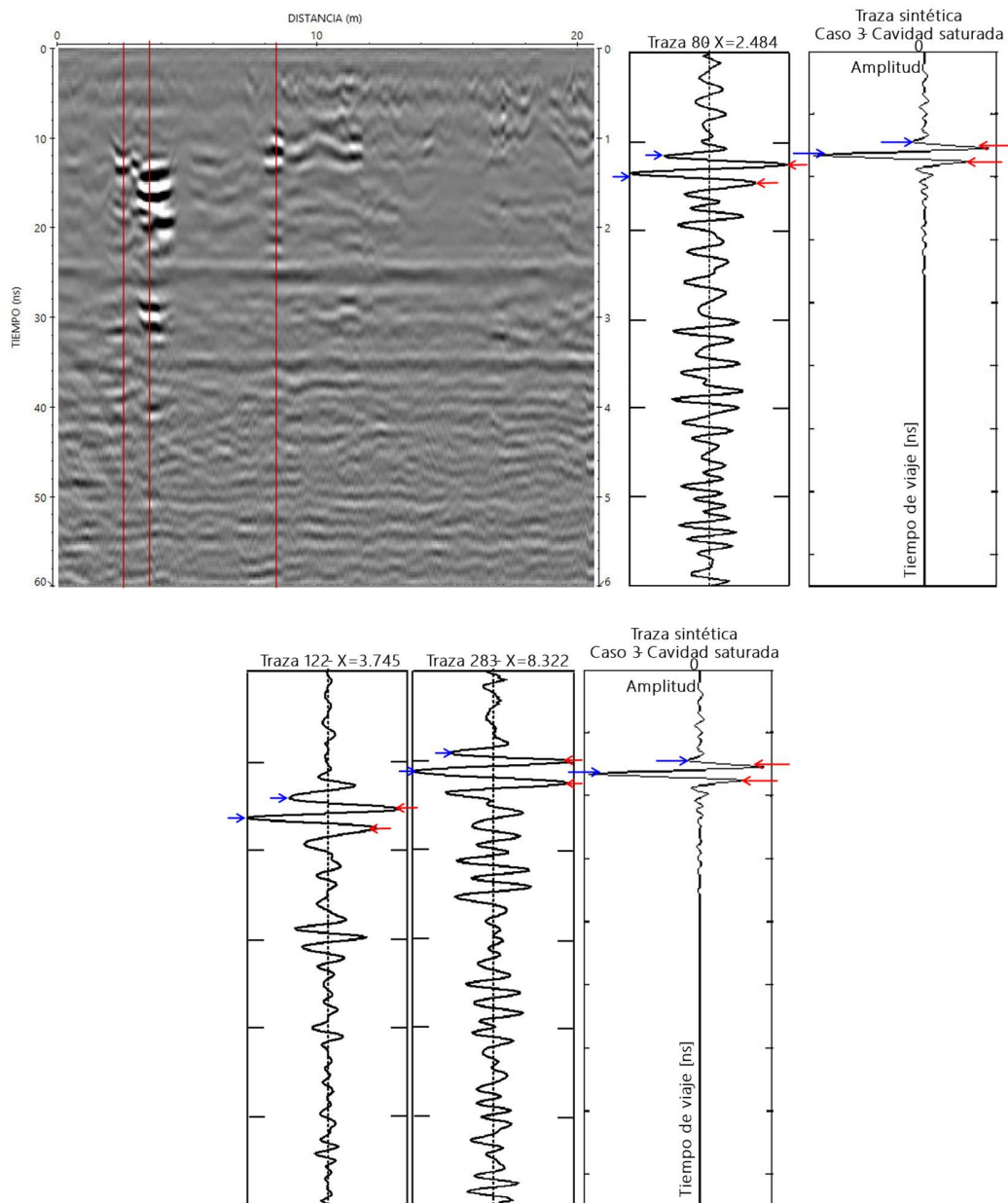


Figura No. 43. Comparación de trazas sección de GPR 33.

La imagen muestra la comparación de las trazas no. 80, 122 y 283 con la traza sintética del modelo 3, todas presentan la primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de una polarización positiva (flecha en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo).

Línea 34 a 38 de GPR

Las líneas de GPR 34 a 36, se localizan paralelas a las anteriores (L28 a 33) la porción poniente, presentan una longitud aproximada de 19 a 21 metros y fueron trazadas en sentido norte-sur.

Las líneas de GPR 37 y 38, se ubican sobre el pasillo que conecta al patio central con el patio trasero del inmueble, presentan una longitud aproximada de 17 y 19 respectivamente, su orientación es oeste-este por lo que cortan perpendicularmente a las líneas 28 a 36.

Tras el procesamiento de los radargramas, estas líneas no muestran anomalías relevantes como hipérbolas definidas o variaciones abruptas en la amplitud.

Del análisis de trazas realizado se concluye que en ninguna línea se encontraron grandes similitudes con los modelos sintéticos propuestos.

Línea 39 de GPR

Por último, la línea de GPR 39, cuenta con una longitud de 18.979 metros tiene orientación oeste-este y pasa por el centro de del predio.

El radargrama de la **Figura No. 44** muestra que en un rango de 11 a 13 metros existe una zona de alta reflectividad que, con base a los resultados de las otras líneas se puede asociar a una cavidad.

El análisis de trazas confirma que la traza No. 361 y 420 que corresponden a los rangos de distancias antes mencionadas presentaron las mismas polarizaciones que el **Caso No. 1** y el **Caso No. 3** asociadas a una cavidad vacía y otra totalmente saturada de agua.

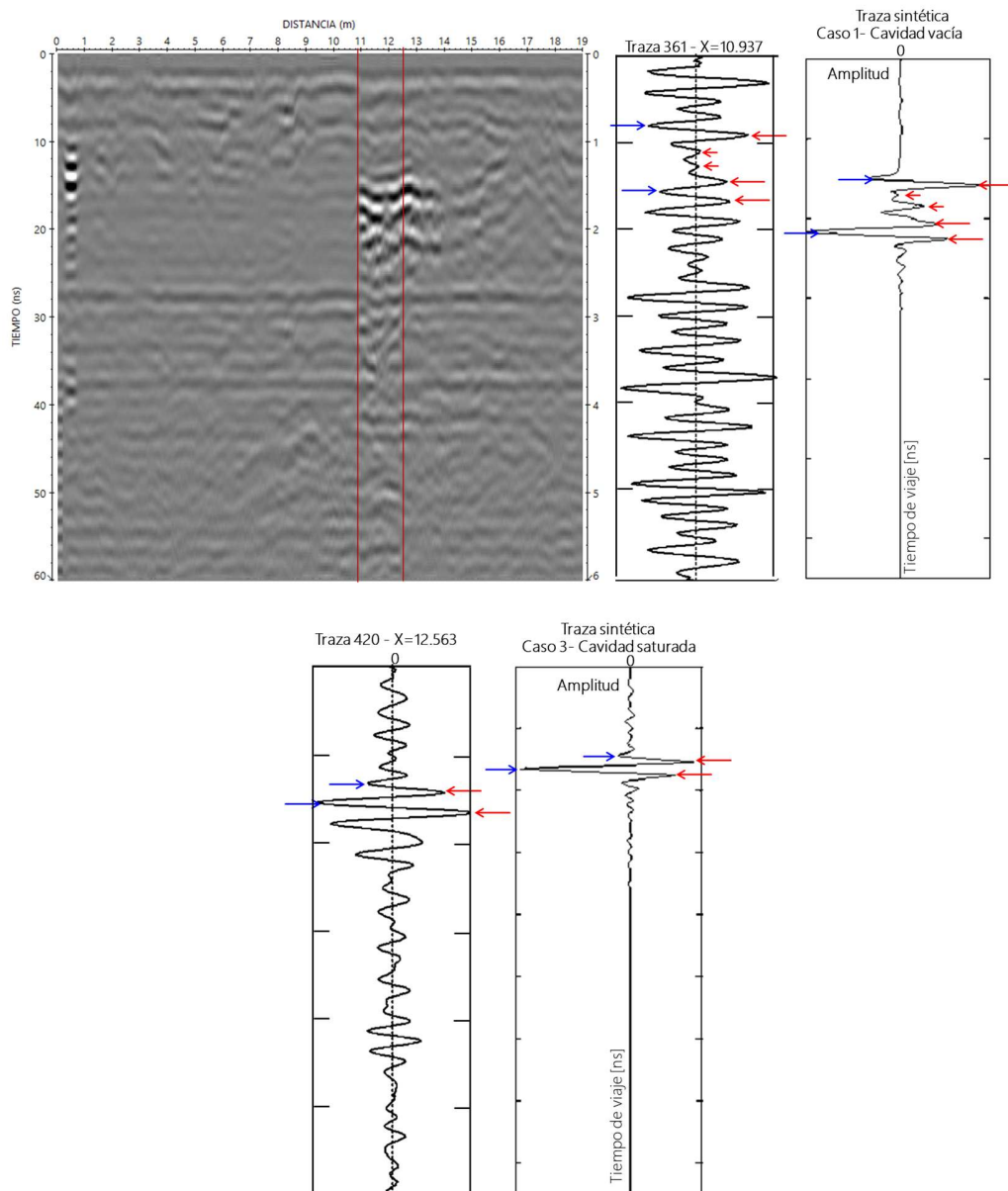


Figura No. 44. Comparación de trazas sección de GPR 39.

El comportamiento de la traza no. 361 nos indica una primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de cuatro polarizaciones positivas (flechas en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo) asociada a una cavidad totalmente vacía. Por su parte, el comportamiento de la traza no. 420 nos indica una primera polarización negativa (flecha en color azul) seguida de una polarización positiva (flechas en color rojo), continua de una negativa muy pronunciada (flecha color azul) y finaliza con una positiva (última flecha en color rojo) asociada a una cavidad totalmente saturada.

V.3. Discusión de Resultados

El método de Radar de Penetración Terrestre (GPR) demostró ser eficaz para la detección y la caracterización de cavidades en el sistema kárstico de la Península de Yucatán.

Mediante el análisis e interpretación de los 39 radargramas obtenidos de la adquisición de campo, se evaluó la presencia de posibles cavidades kársticas y su distribución en el sitio de estudio.

La escala de colores empleada representa los valores de amplitud para cada radargrama, el color negro indica el valor mínimo, mientras que, el color blanco representa el valor máximo, los valores intermedios se muestran en tonalidades de grises.

A partir del procesamiento de datos, se buscaron hipérbolas de difracción y/o zonas de contraste en la amplitud (valores mínimos y máximos) que pudieran asociarse a un cambio en la velocidad del medio lo suficientemente contrastante para generar variaciones en la polaridad de la ondícula (p.ej., caliza-aire y caliza-agua) tal como las investigaciones realizadas por Kofman *et al.* (1999) y Ortega-Ramírez *et al.* (2023).

Los resultados revelaron que las líneas próximas al pozo, donde ya se tiene la evidencia de karstificación, no exhibieron anomalías significativas, sin embargo, esto puede ser asociado a la presencia de saturación ya que los documentos de Annan (1992) mencionan que la presencia de agua puede limitar la profundidad de investigación, además de que el espacio para llevar a cabo la adquisición fue reducido.

Al frente del inmueble se identificaron hipérbolas de difracción, cuya respuesta es la que exhibe la mayor similitud con los radargramas sintéticos, manteniendo congruencia con la investigación realizada por Annan (1992) para la caracterización de cavidades en calizas, así como las aplicaciones prácticas documentadas por Lapazaran (2006) en contextos geológicos análogos.

Dichas hipérbolas exhiben coincidencia espacial entre ambas líneas de adquisición (L-24 y L-25), lo que sugiere la existencia de posibles trayectorias de interconexión subterránea en la porción norte del predio de estudio.

En los perfiles desarrollados en el patio central y en el patio trasero se delimitaron zonas de contraste (tonos negros y blancos predominantes), que sirvieron como indicadores principales para llevar a cabo el análisis de trazas individuales propuesto por Ortega-Ramírez *et al.* (2023). Los hallazgos de este trabajo exhiben congruencia con los de dichos autores, dado que el análisis comparativo de la polaridad entre las reflexiones identificó coincidencias exactas entre los radargramas reales y los sintéticos propuestos en líneas específicas (7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 33, y 39), correspondientes a los casos 1 al 4. En su mayoría en el área de estudio predomina el caso no. 3, caracterizado por una cavidad completamente saturada de agua.

De lo anterior se concluye, aunque la saturación de agua representa una limitación del método, la modelación de radargramas bajo condiciones kársticas específicas en el sitio de estudio permitió asociar las reflexiones de las polarizaciones a los límites físicos de las cavidades: cuando están vacías, dichas reflexiones corresponden a interfaces roca-aire-roca; en presencia de saturación, corresponden al contraste entre vacío-agua o roca-agua. En consecuencia, la presencia de agua limitó la información obtenida de las trazas de manera parcial, permitiendo identificar el tipo de cavidad, pero impidiendo conocer su dimensión precisa a profundidad.

Con respecto a las limitaciones del método de GPR aplicado a la búsqueda de cavidades en sistemas kársticos, en la adquisición de campo se destaca la imposibilidad de cubrir toda el área de estudio con líneas de mayor longitud debido a la geometría irregular del predio, así como, la profundidad máxima alcanzada por la antena debido al tipo de geología.

Del procesamiento de datos, la simulación de radargramas fue una herramienta exitosa ya que validó la respuesta del método en el sitio de estudio, obteniendo el comportamiento de las trazas bajo las condiciones kársticas del sitio de interés.

Finalmente, con base en la información obtenida de la presente investigación se elaboró un croquis (**Figura No. 45**), en el cual se sintetizan los resultados y se correlacionan espacialmente las anomalías detectadas en el sitio de estudio. Dichas anomalías fueron agrupadas por colores según el tipo de cavidad asociada conforme a los casos de estudio modelados (caso no.1 a 4).

A partir de estos resultados, se generó un segundo croquis (**Figura No. 46**), en donde se proponen tres zonas prioritarias para verificar las anomalías detectadas mediante la técnica de GPR se propone utilizar métodos directos, específicamente, realizar sondeos de avance controlado (SAC) llevando un registro de los tiempos de perforación.

Es recomendable, como paso previo a la etapa de verificación, complementar los hallazgos de esta investigación con métodos adicionales como Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), para obtener un segundo parámetro con el cual evaluar el origen de las anomalías encontradas y de esta manera delimitarlas con mayor precisión.

La integración de ambas técnicas permitirá proponer sitios para realizar exploración directa en puntos específicos con los que se podrán conocer las características de la caliza y corroborar los resultados propuestos en este estudio.

En el caso de que los métodos directos confirmen la existencia de las cavidades mapeadas, se sugiere extender la exploración geofísica a los predios colindantes realizando líneas adicionales de Radar de Penetración Terrestre (GPR) y posteriormente, Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) para caracterizar el subsuelo en los sitios correspondientes a la periferia del inmueble, en especial en la porción norte y oeste del sitio de estudio con el objetivo de detallar a profundidad la extensión de la karstificación y estudiar su posible interconexión con el suelo del sitio de estudio.

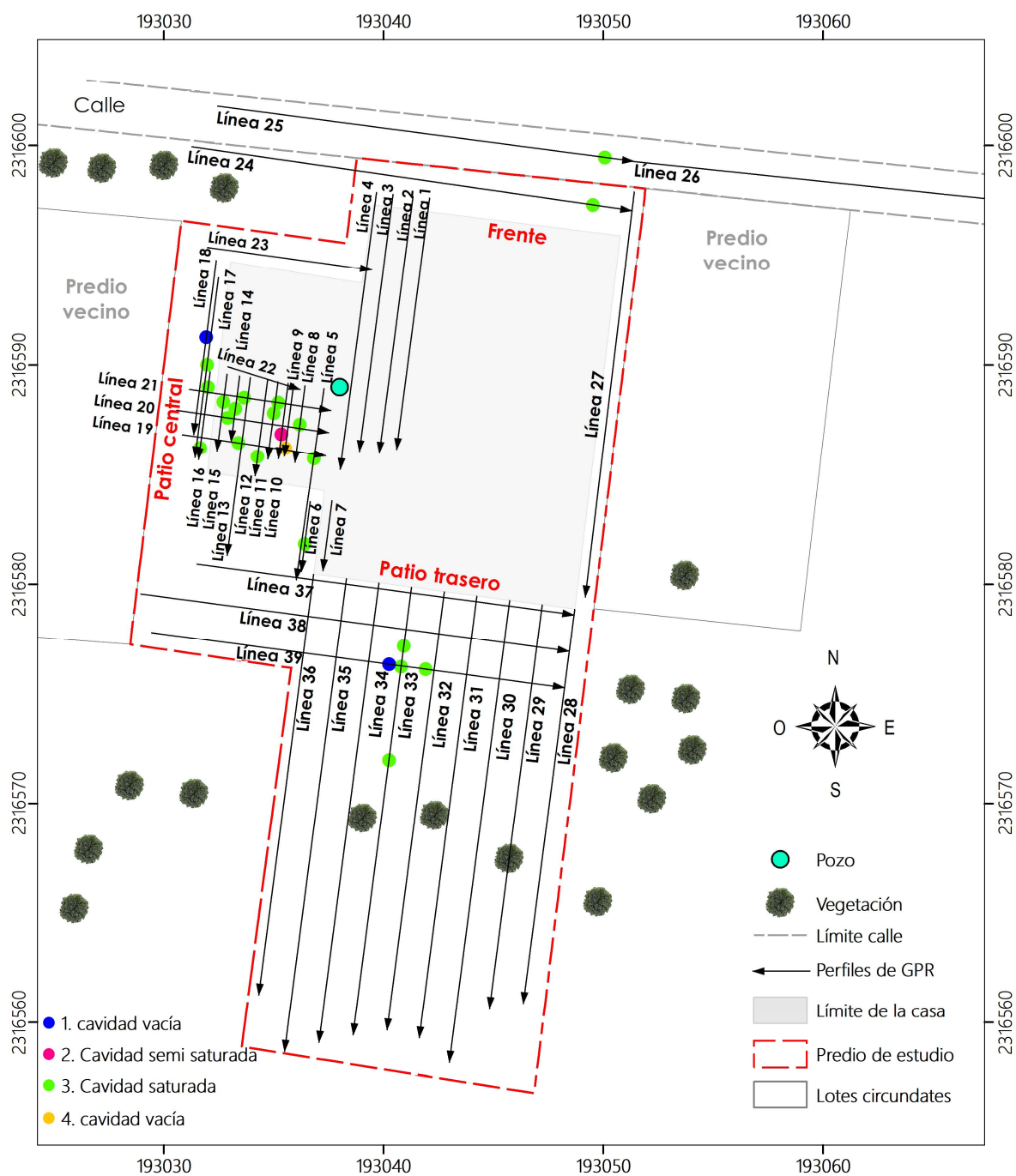


Figura No. 45. Croquis de anomalías de GPR
 Se muestran los resultados del procesamiento vaciados en un plano en planta del sitio de estudio.

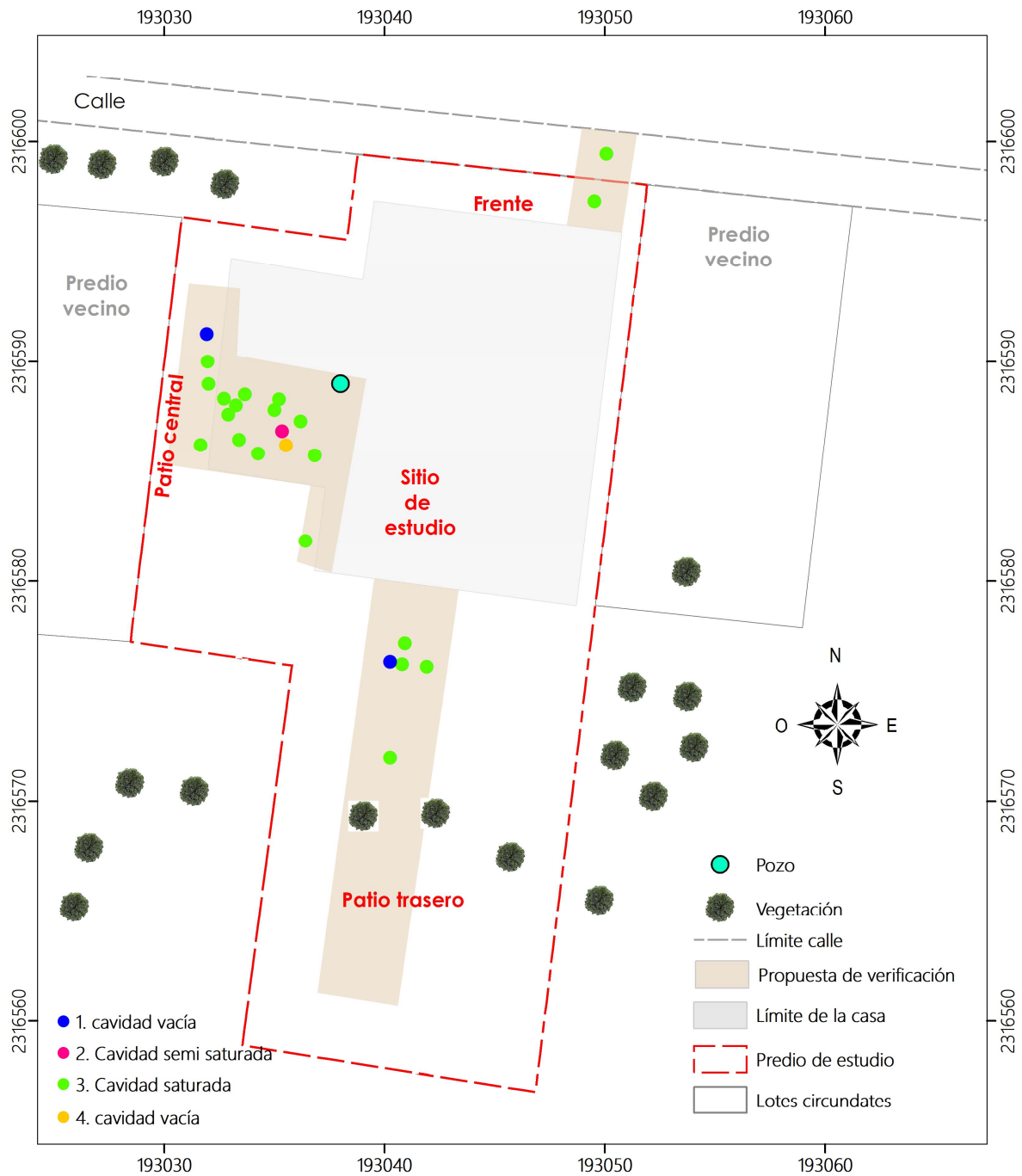


Figura No. 46. Croquis de sitios propuestos de verificación
 Se muestran los resultados del procesamiento vaciados en un plano en planta del sitio de estudio.

VI. Conclusiones

La aplicación del Radar de Penetración Terrestre (GPR) para este caso en particular fue de gran utilidad debido a que nos permitió identificar los efectos de la karstificación mediante el análisis de las variaciones en la polarización de las reflexiones.

La elaboración de los radargramas sintéticos de las condiciones kársticas específicas validaron la respuesta del método en el sitio de estudio y permitieron conocer el contraste en las velocidades de los diferentes medios (caliza-aire, caliza-aire-agua y caliza-agua) y con esto anticipar el comportamiento de las variaciones de polaridad en las trazas.

Tras el procesamiento de datos, los diferentes radargramas presentaron hipérbolas de difracción y zonas de contraste en la amplitud, las cuales fueron los principales indicadores para realizar el análisis de polaridad de reflexiones. De la comparación entre las trazas sintéticas y las trazas reales, se encontró que varias presentaron las mismas características de los modelos kársticos propuestos, predominando el caso 3 que se correlaciona con una cavidad saturada de agua.

Con la información obtenida de la presente investigación, fue posible elaborar un plano en planta (**Figura No.45**) en donde se delimita la extensión de la karstificación en el predio de estudio, a su vez esto permitió proponer tres zonas de interés (**Figura No.46**) en donde se condensa la mayor cantidad de anomalías asociadas a cavidades, localizadas en la porción norte, centro y sur del inmueble.

De las limitaciones que se encontraron respecto a la adquisición de campo, se destaca la imposibilidad de cubrir toda el área de estudio con líneas de mayor longitud debido a la geometría irregular del predio y la profundidad máxima alcanzada por la antena debido al tipo de geología.

Una ventaja importante para el procesamiento de los datos es la información *a priori* de la zona de estudio, como la ubicación exacta de la caverna, profundidades medidas del techo y base, una línea de calibración y el nivel freático local. Estos datos resultaron indispensables para la interpretación, la construcción de los radargramas sintéticos y para la obtención de la velocidad de propagación del medio. Sin ellos, se tendría una menor certeza de correlacionar la respuesta de la ondícula con las propiedades físicas de la roca.

Asimismo, una de las limitaciones principales que presenta la técnica y se identificó en la presente investigación, se asocia a la saturación del medio, la señal electromagnética se atenúa al llegar a interfaces saturadas. No obstante, con la modelación de radargramas bajo condiciones kársticas específicas en el sitio de estudio se concluye que las reflexiones mostradas en las polarizaciones pueden asociarse a los límites físicos de la caverna cuando se encuentre vacía, mientras que, en presencia de saturación dichas reflexiones corresponden al contraste entre vacío-agua o roca-agua. En consecuencia, la presencia de agua limitó parcialmente la información obtenida de las trazas, permitiendo identificar el tipo de cavidad, pero impidiendo conocer su dimensión precisa a profundidad.

En conclusión, con los resultados obtenidos de la presente investigación se cumplió el objetivo de caracterizar el suelo del sitio de estudio, al proporcionar evidencia sobre la presencia y distribución de las cavidades en el área de interés.

Finalmente, se recomienda complementar los resultados de la presente investigación con métodos adicionales como tomografía de resistividad eléctrica (ERT), que proporcionaría un segundo parámetro con el cual evaluar el origen de las anomalías encontradas y de esta manera delimitarlas con mayor precisión.

Con ayuda de los resultados de ambas técnicas geofísicas será posible proponer sitios para realizar exploración directa en puntos específicos, con los que se podrá conocer las propiedades de la caliza y corroborar la interpretación de la presente investigación.

En caso de que los métodos directos confirmen la existencia de las cavidades mapeadas, se sugiere extender la exploración geofísica a los predios colindantes a la periferia del inmueble, en especial en la porción norte y oeste del sitio de estudio con el objetivo de detallar a profundidad la extensión de la karstificación e identificar su posible interconexión con el sitio de estudio.

Referencias

- ❖ Aguilar Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., & Delgado, C. (2013). "Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos". *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(2), 243–263.
- ❖ Aguirre L. V. (1968). "Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la península de Yucatán". *Tecnología y ciencias del agua*.
- ❖ American Society for Testing and Materials. 2019. ASTM D6432-19 Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for subsurface investigation
- ❖ Annan, A.P. (1992). "Ground Penetrating Radar," Workshop Notes, Sensor and software. Ontario, Canadá.
- ❖ Ávila Lugo Fernando, Zárate López Javier, Sáenz Pita Margarita Rebeca. 2004: "Carta geológico-minera Chetumal E16-4-7 escala 1: 250 000 Estados de Quintana Roo y Campeche". Servicio Geológico Mexicano (SGM)
- ❖ Blancas-Vázquez, J. E. (2000). "Principios y aplicaciones del método de Radar de Penetración Terrestre". (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México).
- ❖ Butterlin, J. y Bonet, F. (1960). "Stratigraphy of the northern part of the Yucatán Peninsula." *New Orleans Geological Society*. New Orleans, U.S.A. Páginas: 52–61
- ❖ Caicedo H., Bernardo & Mancera C., Elkin & Alfonso T., Julián. "Aplicaciones del georradar de subsuelo en obras civiles". *Revista de Ingeniería*, no 18 (2003): 32–40.
- ❖ Callaghan, J., Sauck, W., & Desmond, L. G. (1996). A Ground Penetrating Radar survey of the Great Plaza and Great Ball Court, Chichén Itzá, Yucatán, México -- Report 2. (Final) to Instituto Nacional De Antropología e Historia Centro Regional Yucatán Mérida, Yucatán, México.
- ❖ Chalikakis K., Plagnes V., Guérin R., Valois R. & Bosch F. (2011). "Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: An overview." *Hydrogeology Journal*, Páginas: 327–250. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x>
- ❖ Cole, L. J. (1910). "The Caverns and People of Northern Yucatan." *Bulletin of the American Geographical Society*, 42(5), 321–336. Doi: <https://doi.org/10.2307/199038>
- ❖ Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Península de Yucatán (3105), Estado de Yucatán.
- ❖ Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Península de Yucatán (3105), Estado de Yucatán. <https://ocayucatan.org/actualizacion-de-la-disponibilidad-media-anual-de-agua-en-el-acuifero-peninsula-de-yucatan/>
- ❖ Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Manual de monitoreo piezométrico de acuíferos. [ManualDeMonitoreoPiezometricoDeAcuiferos2008_c.pdf](#)

- ❖ Daniels D. J., Gunton D.J., & Scott H.F. (1988). "Introduction to subsurface radar." IEE Proceedings F (Communications, Radar, and Signal Processing). Volume 135, Issue 4. Doi: <https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1988.0038>
- ❖ Edward C. J., Keith G. B. (1973). "*Ondas electromagnéticas y sistemas radiantes*". Parainfo. 823 páginas. ISBN: 978-8-42830-381-1
- ❖ Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J., Álvarez-Rivera, O., & Barrientos-Medina, R. C. (2019). "*El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología*". Acta Universitaria 29, e2292. doi. <http://doi.org/10.15174.au.2019.2292>
- ❖ Estrada-Medina, H., Tuttle, W., Graham, RC, Allen, MF y Jiménez-Osornio, JJ (2010), "*Identificación de Formaciones Kársticas Subterráneas mediante Georradar en el Norte de Yucatán*", México. Vadose Zone Journal, 9: 653-661. <https://doi.org/10.2136/vzj2009.0116>
- ❖ Fetter, C. W. (2001). "*Applied Hydrogeology*." Prentice-Hall 4ª edición, 598 páginas.
- ❖ Fisher S., Stewart R. y Jol H. (1994). "*Processing ground penetrating radar (GPR) data*"
- ❖ Ford, D., & Williams, P. (2013). "Karst Hydrogeology and Geomorphology. In *Karst Hydrogeology and Geomorphology*". Doi. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- ❖ García Rodríguez, M. y Fernández Escalante A. E. (2009). "*Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo*". Ediciones FIEC.
- ❖ Gómez-Nicolas, M. P. (2014). "*Análisis de la conectividad entre cenotes a través de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Teoría de Redes*". Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto Politécnico Nacional. Doi. [10.13140/RG.2.2.28783.94889](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28783.94889)
- ❖ Goldscheider, N., & Drew, D. (Eds.). (2007). *Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology*, 26 (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482266023>
- ❖ Ida, N. & Bastos, J. (1992). "*Electromagnetics and calculation of fields*"
- ❖ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). "*Compendio de información geográfica municipal: Kinchil*". Páginas 8. INEGI. [Compendio de información geográfica municipal 2010. Kinchil, Yucatán.](https://inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825086886)
- ❖ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). "*Estudio de información integrada del acuífero cárstico Península de Yucatán*". Páginas 132. ISBN 978-607-530-000-9. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825086886>
- ❖ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). "*Estudio hidrológico del Estado de Yucatán*". Páginas 92. ISBN 970-13-3721-2. INEGI. [Estudio hidrológico del estado de Yucatán](https://inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825086886)
- ❖ Jol, H. M. (2009). "*Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*." ELSEVIER. Eslovenia. Páginas 524. ISBN: 978-0-444-53348-7
- ❖ Julivert M. (1957). "*Morfología Carstica*". Revista de Ciencias, VII (1). Páginas 57-80

- ❖ Kirsch R. (2006). "Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology." Springer. 493 páginas. ISBN:978-3-54029-383-5.
- ❖ Konikow, Leonard F. y Bredehoeft John D. (2020). "Desarrollo de recursos hídricos subterráneos: Efectos y sostenibilidad". Proyecto de Aguas Subterráneas, Guelph, Ontario, Canadá. <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-4-4>
- ❖ Kofman L., Ronen A. y Frydman S. (2006). "Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records". Journal of Applied Geophysics, Volume 59, Issue 4. Pages 284-299. ISSN 0926-9851. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.09.005>.
- ❖ Kuniansky E.L., Taylor C. J., Williams J. H. & Paillet F. (2022). "Introducción a los acuíferos kársticos". The Groundwater Project, Ontario, Canadá. 216 páginas. ISBN:978-1-77470-040-2. Doi. <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-040-2>
- ❖ Landa Arreguín, J. F. (2007). "Caracterización del residuo silicatado de las calizas como material parental de los suelos de la península de Yucatán". (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México).
- ❖ Lugo-Hubp J. (1990). "El relieve de la República Mexicana". UNAM. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Volumen 9, Número 1. Páginas 82-111. <https://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/1255>
- ❖ Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J. F., & Espinosa-Pereña, R. (1992). "Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán". UNAM. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Volumen 10, Número 2. Páginas 143-150. <https://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/1236>
- ❖ Miranda Huerta Alfonso, Lemus Bustos Oniver, Cureño Suriano Ricardo, Zárate Barradas Ricardo. 2005: "Carta geológico-minera y geoquímica Mérida F16-10, escala 1: 250 000, Estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo". Servicio Geológico Mexicano (SGM)
- ❖ Ortega-Ramírez J., Bano M., Punzo-Díaz J.L., Villa-Alvarado L.A., Salas-Corrales J.L. (2023). "Applying Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography for the Detection of Archaeological Structures in a Pre-Tarascan Classic-Epiclassic Site, Tingambato, Michoacán, Mexico." Archaeological Prospection, Volume 31, Issue 3, pp. 203-216, 14 pp. Doi: [10.1002/arp.1945](https://doi.org/10.1002/arp.1945)
- ❖ Parasnis, D.S. (1986). Principles of applied geophysics. Chapman and Hall, London.
- ❖ Pérez-Ceballos, R., Pacheco, J., Euán-Ávila, J. I., Hernández-Arana, H., 2012, Regionalization Based on Water Chemistry and Physicochemical Traits in the Ring of Cenotes Yucatan, Mexico: Journal of Cave and Karst Studies, 74, 90-102. Doi: <https://doi.org/10.4311/2011es0222>
- ❖ Persico, R. (2014). *Introduction to ground penetrating radar: inverse scattering and data processing*. Wiley, IEEE Press.
- ❖ Pilon, J. A. (1992). *Ground penetrating radar (Geological Survey of Canada, Paper 90-4)*. Geological Survey of Canada.

- ❖ Pulido Bosch, A. (2001). "*Investigación y exploración de acuíferos kársticos*". Boletín Geológico y Minero, Vol. 112, Núm. especial, Páginas: 65-76. ISSN: 0366-0176
- ❖ Rodríguez, M. & Escalante E. (2008). "*Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo*". FIEC Páginas 135. ISBN: 978-84-96866-15-7
- ❖ Salas, J. L. (2007). "*Detección de estructuras civiles subterráneas por medio de Radar de Penetración Terrestre en las inmediaciones de la Av. Carlos Hank Gonzales y el río de los remedios, Estado de México*". (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México).
- ❖ Sharp, Jr., J. M. (2023). "A glossary of hydrogeology." The Groundwater Project. <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-079-2>
- ❖ Stevanovic Z., Gunn J., Goldscheider N. & Ravbar N. (2024). "*Karst: Environment and Management of Aquifers*." Doi: <https://doi.org/10.62592/AWCU2984>
- ❖ Uliana, M. M. (2025). "*Hidrogeología básica: Una introducción a los fundamentos de la ciencia de las aguas subterráneas*". El Proyecto de Aguas Subterráneas. <https://doi.org/10.62592/CBIQ7579>
- ❖ Velázquez Aguirre, L. (2015). "*Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la península de Yucatán*". Tecnología Y Ciencias Del Agua, 21-29.
- ❖ Velázquez, L., & Ordaz, A. (1993). Provincias hidrogeológicas de México. Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana, 2(1). Doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM1993v52n1a3>
- ❖ Veress M., (2020). "*Karst Types and Their Karstification*." Journal of Earth Science. Volumen 31. Páginas 621-634. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1306-x>