

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN.

La determinación del espesor del pavimento es información necesaria para muchas aplicaciones relacionadas con la evaluación de pavimentos flexibles. El GPR “Ground Penetration Radar” es una técnica no destructiva siendo un dispositivo que consiste en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas sobre un medio y su posterior recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades, arrojando imágenes en dos dimensiones para su interpretación (Amplitud vs Tiempo) con capacidad de adquirir gran cantidad de información en un período corto de tiempo determinando así los espesores y posibles anomalías del pavimento se hace siempre referencia a la norma ASTM D-4748 que regula el uso del georradar; y el método destructivo que se utiliza comúnmente para la determinación de espesores es el extractor centrifugo.

Para determinar los espesores en carreteras se utilizan actualmente en Bolivia métodos destructivos como son el extractor de núcleos y la excavación de calicatas que dañan la estructura de la carretera. El Georradar es una tecnología relativamente nueva y no muy conocida en nuestro país, por lo que la confiabilidad de los resultados obtenidos viene dada de la interpretación del comportamiento de los fenómenos que se producen por la propagación de las ondas en los medios estudiados y se hacen sobre la base de la confianza que se tiene de los datos recolectados en campo y la interpretación de los radargramas presentados por el equipo.

Sin embargo se tiene constancia que ya ha sido empleado el uso de este equipo GPR para diversas aplicaciones en el país, el equipo se encuentra en el departamento de La Paz (Laboratorio de la ABC). Este equipo se utilizó en la Ciudad de Santa Cruz.

El tramo de estudio corresponde al tramo San José de Chiquitos– Robore. “Realización del examen técnico respecto a daños, grietas y otros problemas técnicos, y de la evaluación técnica general de este tramo.

A nivel internacional esta tecnología fue utilizada en el país de Ecuador en la antigua Vía a Conocoto “Realizando una evaluación y diseño de pavimentos por el método no destructivo - georadar (GPR).”

El autor con este trabajo pretende determinar el espesor de carpeta asfáltica del pavimento flexible del tramo Uyuni – Condo K analizando la confiabilidad que tiene el GPR en la determinación de espesores, realizando una comparación con los núcleos extraídos del mismo tramo de manera que podamos validar y establecer los espesores medidos con el GPR, tomando como aspecto clave el análisis de los valores numéricos captados por este tipo de equipo en una prospección real de la carpeta asfáltica. Esta información es muy valiosa de cara a minimizar las campañas de extracción de núcleos o calicatas las cuales requieren una gran cantidad de tiempo y recursos, además que presentan una influencia elevada en la agresión a la vida útil del pavimento.

De tal forma se determinan los espesores de la carpeta asfáltica del tramo carretero correspondiente a la red vial Tramo Uyuni – Condo K utilizando estos resultados para verificar espesores e identificar anomalías de la carpeta asfáltica, que nos ayudan de gran manera a maximizar los recursos, disminuir el tiempo y disminuir el daño a la carretera.

Estos datos de espesor tienen mucha importancia económica debido al alto costo que representa la construcción de la carpeta asfáltica en la construcción del paquete estructural, así mismo el impacto social es que debido a espesores menores no especificados en normativa sufre un deterioro prematuro y la vía se vuelve en una vía incomoda, insegura, inestable y es mucho más cuando se hace uso de los métodos destructivos en las carreteras llegando a tener mayores problemas de transitabilidad por el mismo.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El estudio para la “Determinación de Espesores de Carpeta Asfáltica en Pavimentos Flexibles utilizando el GPR en el Tramo Uyuni – Condo K, se lo realiza con la finalidad de determinar el espesor del tramo, verificar la variabilidad de manera directa e

indirecta de los espesores, y así de tal manera con el GPR se tendrán espesores promedio característicos que no van a ser muy lejanos a lo real.

El determinar el perfil de espesores de todo el tramo de estudio nos permite:

- Verificar los espesores de cada capa para un estudio de posibles fallas.
- Que se esté cumpliendo con el espesor de diseño de la carretera (Carreteras Nuevas).
- Verificar los espesores para el tema de auditorías.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Situación problémica

Nuestra problemática actual es que para determinar espesores de carpeta de pavimento flexible, capa base y sub base utilizamos métodos destructivos los cuales son métodos que presentan el mayor inconveniente de deterioro a la carretera y para poder tener una vasta cantidad de muestras representativas además del tiempo invertido y la mano de obra requerida.

La implementación de nuevas tecnologías y la confiabilidad de las mismas que nos permitan optimizar los diseños de sobrecarpetas, contar con perfiles completos de los tramos carreteros, que nos permitan evaluar los espesores puestos en obra representan una optimización en los recursos económicos.

Es por ello que se ha decidido enfocar la aplicación del presente trabajo a la determinación de espesores de carpeta asfáltica del tramo Uyuni – Condo K aplicando esta tecnología nueva que es el Georradar GPR (Ground Penetration Radar) para la determinación de espesores. Ya que en la actualidad, estos métodos no destructivos han adquirido gran importancia en la evaluación de pavimentos; debido a su rapidez, son económicos y lo más importante que no afectan a la estructura del pavimento, de tal manera que es posible obtener los espesores de la estructura del pavimento, brindando cada vez un mejor rendimiento de trabajo, menor daño físico y operacional al pavimento, cada vez más utilizada por diferentes países.

1.3.2. Problema

¿Cómo determinar los espesores de la carpeta asfáltica de manera más efectiva y eficiente en pavimentos flexibles?

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Determinar los espesores de carpeta asfáltica en el pavimento flexible del Tramo Uyuni – Condo K, haciendo uso del método del GPR (No destructivo) de tal manera verificar que las lecturas tomadas con el GPR sean las lecturas que nos dan con la extracción de núcleos y verificar los espesores de diseño de la carretera de manera que podamos validar su efectividad en los resultados medidos con el GPR.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar una descripción detallada de todo el ensayo de prospección mediante el uso del GPR en el tramo de estudio, teniendo en cuenta su funcionamiento teórico, representatividad y confiabilidad para la determinación de espesores en la carpeta asfáltica.
- Determinar el espesor de carpeta asfáltica utilizando el método no destructivo GPR verificando así el cumplimiento de las especificaciones de diseño.
- Realizar la extracción de núcleos sobre la carpeta asfáltica para verificar las lecturas realizadas con el GPR en el pavimento flexible.
- Realizar el postproceso de adquisición de las lecturas proporcionadas por el georradar mediante el programa de visualización Ground Visión, y el Procesado e interpretación de los resultados finales en el programa Rad Explorer.
- Correlación existente entre el tiempo de reflexión de la onda electromagnética (t) y el espesor real núcleo de la carpeta asfáltica (h).
- Correlación entre la velocidad de propagación de la onda (v) y espesor real núcleo carpeta asfáltica (h).

- Comparar los resultados obtenidos en el ensayo de prospección mediante el uso del georradar con los resultados de extracción de núcleos de la carpeta asfáltica, y sus respectivos ensayos de laboratorio.
- Analizar el grado de confiabilidad en la determinación de espesores en pavimento flexible utilizando el equipo georradar.
- Evaluar el error de la medida de espesores calculando la confiabilidad y validez en la interpretación de los radargramas.
- Realizar ensayos de laboratorio, para un análisis del comportamiento de la propagación de onda por el medio estudiado (Carpeta Asfáltica).
- Formular las conclusiones y recomendaciones sobre el tema de estudio realizado.

1.5. HIPÓTESIS

Si realizamos la determinación de los espesores de la carpeta asfáltica del tramo Uyuni – Condo K utilizando la metodología del GPR entonces se podrá obtener indicadores de espesores que pueda compararse y verificar con núcleos extraídos del mismo tramo de tal manera establecer la confiabilidad de esos espesores medidos con el georradar con el fin de utilizar estos resultados para, verificar que se esté cumpliendo con los espesores de diseño, y para estudios en caso de auditorías en carreteras.

1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES.

1.6.1. VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1.1. Variable independiente.

- Espesor del núcleo extraído del tramo de estudio.

1.6.1.2. Variable dependiente.

- Espesores determinados de forma indirecta del tramo, con el GPR.

1.6.1.3. Conceptualización y operacionalización de variables.

Tabla 1.1. Conceptualización y operacionalización de variables

		Operacionalización		
Variable nominal	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor- acción técnicas

Variable independiente		Para este caso de estudio solo sobre pavimento flexible		Pie de metro con una precisión de 0,1mm
V1 Espesor del núcleo de la carpeta asfáltica del pavimento	Espesor de la carpeta asfáltica medida por diferentes métodos		El espesor se informara en (cm)	Extractor Centrifugo según la norma ASTM D-3549

		Operacionalización		
Variable nominal	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor- acción técnicas
Variable dependiente V2 Espesores de capa determinados con el GPR	Se refiere a la verificación de los espesores de forma indirecta que se hará en la carpeta asfáltica del tramo en estudio	Auscultación indirecta carpeta asfáltica mediante ondas electromagnéticas	El espesor se informara en (cm)	Tipo de antenas para la medición
				Respuesta dieléctrica de los materiales de suelo
				ASTM D6432-11
			Trazas	GROUND VISION Y RADEXPLORER, programas con los que el equipo mide y procesa los espesores
				Velocidad de propagación de onda electromagnética a través del medio (espesor de pavimento)

Fuente. Elaboración propia

1.7. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.

1.7.1. COMPONENTES

1.7.1.1. Unidad de estudio

Radargramas obtenidos de las lecturas realizadas con el equipo.

La unidad de estudio es la determinación de los radargramas, porque estamos utilizando el GPR, de toda la lectura de un tramo se pueden escoger diferentes radargramas y evaluar.

1.7.1.2. Población

La longitud de la carretera presentada en Radargramas obtenidas con la lectura del GPR, mi población es toda la longitud del tramo de 165.390 km, que se medirá el espesor de la carpeta asfáltica

Figura 1.1. Esquema de determinacion centrada



Fuente. Elaboración propia

1.7.1.3. Muestra

El número de radagramas.

Para el proceso y toma de datos con el GPR, se hizo lecturas de todo el tramo de estudio, cada 1.5 Km se midió los espesores, dando un total 110 radargramas.

1.7.1.4. Muestreo

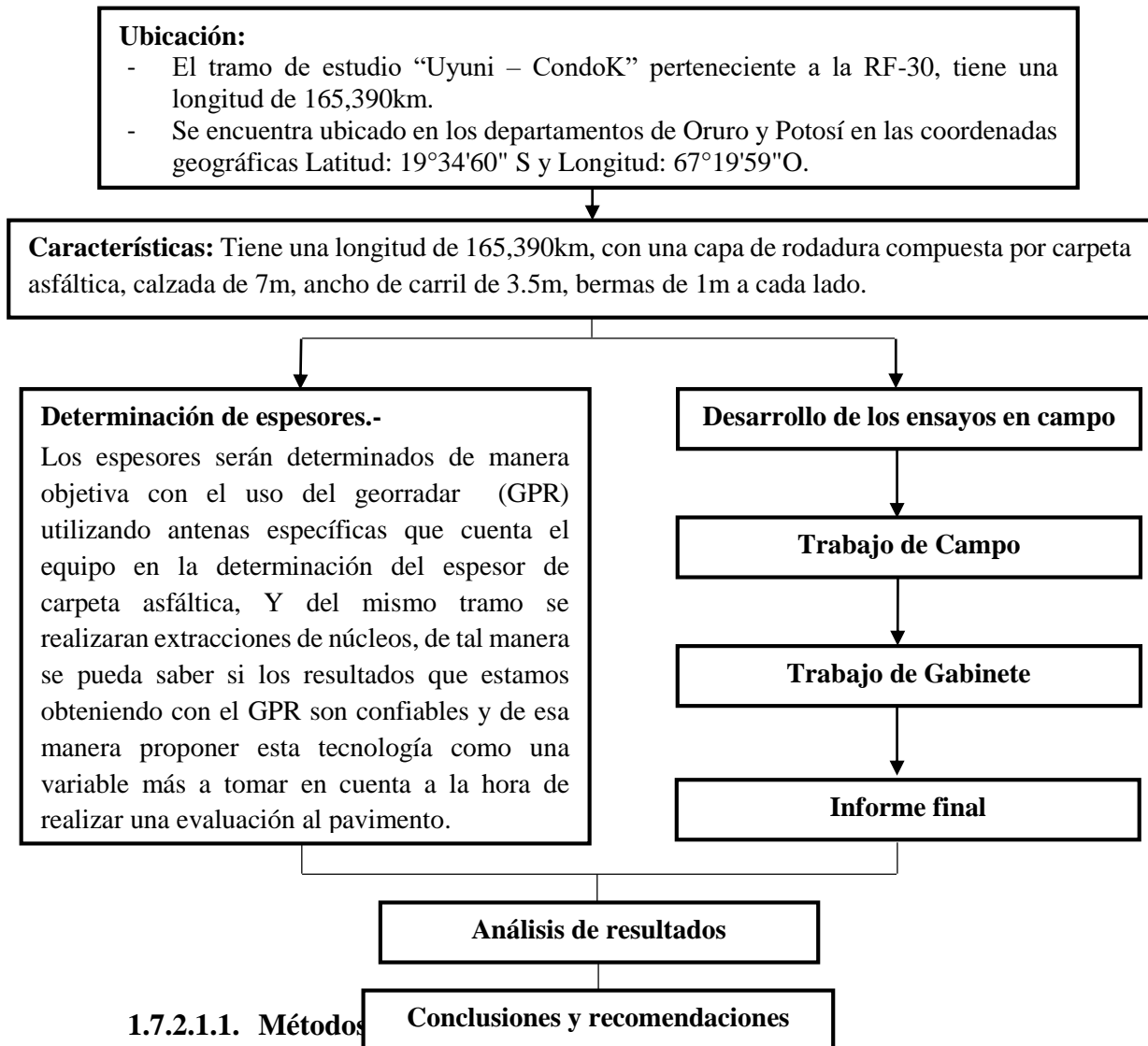
El muestreo se realizó en el tramo en estudio de la siguiente manera:

- La adquisición de datos se realizó, con el uso del GPR de forma continua sobre el tramo de estudio, con un largo de 165,390 km, realizando una pasada por el carril, con una velocidad promedio de 40 km/h, esta velocidad se decidió para obtener información suficiente del pavimento sin provocar interferencias con el tema de las antenas.
- Se realizó la extracción de núcleos cada 5km se sacó núcleo del tramo en el carril derecho huella externa, empezando de la progresiva 0+000 y terminando en la progresiva 165+390.

1.7.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

1.7.2.1. Proceso metodológico

Figura 1.2. Esquema del proceso metodológico

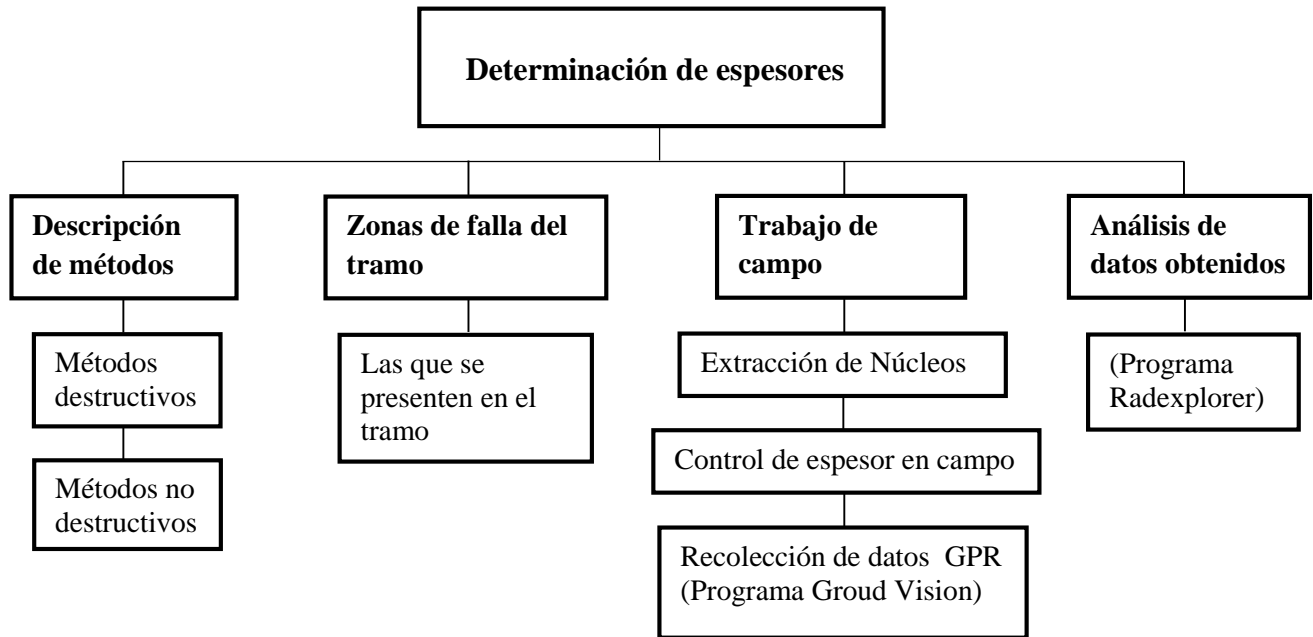


Fuente. ~~Elaboración propia~~

El presente trabajo es una combinación de investigación, labor de campo y comparación de datos obtenidos para determinar la coincidencia o la imprecisión de la detección mediante GPR (exploración indirecta) con los registros de extracciones de núcleos sacados físicamente del tramo (exploración directa).

Se estableció un particular interés por obtener el espesor de la carpeta asfáltica que nos arroja el GPR para compararlos con los espesores obtenidos de la exploración directa y determinar la fiabilidad del uso de esta tecnología nueva.

Figura 1.3. Esquema de trabajo en el tramo



Fuente. Elaboración propia

1.7.2.1.2. Técnicas

El muestreo no probabilístico se aplica para la determinación de espesores de carpeta asfáltica porque no es que haya probabilidad de que haya espesores o no haya espesores, lo que se pretende saber es cuanto es el espesor en la carpeta asfáltica del pavimento flexible del tramo Uyuni – Condo K.

La técnica que se hizo es a través de mediciones del tramo con el GPR y a través de extracciones de núcleos en el mismo tramo para estudiarlos como elementos de estudios.

Con el uso del georradar van a ser estudiados en sub tramos de 15 km respectivamente, esto para facilitar a la hora de realizar el procesamiento de datos en el programa (Rad Explorer), se realizara la lectura con el georradar de todo el tramo, obteniendo así los radargramas de todo el tramo y determinando cada 1.5km los espesores del tramo de estudio.

En lo que concierne a la extracción de núcleos se sacara 1 núcleo cada 5 km respectivamente por el carril derecho específicamente la huella externa en todo el largo del tramo de estudio.

1.7.2.1.3. Medios

Los siguientes instrumentos y equipos constituyen los medios utilizados para la determinación de espesores en el tramo Uyuni – CondoK.

- Georradar (GPR) Mala ProEx
- Extractor de núcleos
- Pie de metro con una precisión de 0,1 mm
- Bolsas de polietileno para el almacenamiento de los núcleos

Figura 1.4. Georradar mala proex



Figura 1.5. Extractor de núcleos



Figura 1.6. Vernier de laboratorio central ABC



1.8. ALCANCE

El alcance del trabajo es la “Determinación de los espesores de Carpeta Asfáltica en Pavimentos Flexibles utilizando el GPR en el tramo Uyuni – Condo K”

El primer capítulo, comprende cómo será la introducción de la aplicación, que hablara de los conceptos y propósitos del mismo, el planteamiento del problema que tratara la situación problemática y problema por el cual se realiza el proyecto, los objetivos general y específicos, los mismos que se pretenden cumplir con el proyecto y la hipótesis de la investigación, con sus variables dependientes e independientes bien conceptualizadas y operacionalizadas.

El segundo capítulo, comprende la parte teórica, donde se detalla el estado de conocimiento, es decir, toda la información necesaria y relevante al proyecto, como es todo lo referente al equipo GPR en base a la normativa ASTM (qué es, cómo funciona, para qué se usa actualmente) calibración del mismo, Extractor de Núcleos usos del mismo, información de la capa asfáltica, normas, etc.

El tercer capítulo, describe y se hace una síntesis de la investigación que se ha llevado a cabo mediante datos de auscultaciones en el tramo Uyuni – Condo K, el tratamiento de datos, la metodología usada en la medición, se describe una guía elaborada por el tesista acerca del manejo del equipo resumido y aplicado a las carreteras y el análisis e interpretación de los datos con ayuda del software.

El cuarto capítulo, se muestran los resultados de la investigación que se ha efectuado, las relaciones extraídas del análisis y la relación final que permite determinar espesores mediante el georadar terrestre.

El quinto capítulo, Por último se señalara las conclusiones y recomendaciones que al terminar todo el proyecto se observaron, dichas conclusiones hablaran principalmente si los objetivos, tanto general como específicos se cumplieron o en qué grado o porcentaje se cumplieron y las recomendaciones trataran sobre los requisitos que se necesitan cumplir para tomar en cuenta la propuesta final que se presentara y utilizar de manera eficiente los valores de dicha propuesta obtenida durante la realización del proyecto.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DEL GEORADAR EMPLEADO EN LA DETERMINACIÓN DE ESPESORES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La técnica del georadar en adelante GPR, es una técnica no destructiva para detectar estructuras y cambios en las propiedades de los materiales, en tal caso superficies reflectoras en el interior de los medios. Sin embargo, otra aplicación consiste en la detección de compuestos generados por el hombre como lo son concreto, asfalto y otros materiales de construcción, Una de las ventajas de este método es que se obtienen imágenes del subsuelo en tiempo real y de manera continua.

En este trabajo mediante la formación de estas imágenes y con el procesado en el programa se determinan los espesores de la estructura del pavimento. El equipo consiste en un sistema de control (ordenador) conectado a unas antenas que se desplazan sobre la superficie del medio que se desea analizar. Estas antenas son las

encargadas de emitir energía hacia el interior del medio y de registrar las ondas que provienen de las reflexiones producidas en las discontinuidades interiores.

Las aplicaciones del georadar GPR como técnica ecológica, no destructiva y de alta resolución están ampliamente documentadas, también por la gran versatilidad que lo caracteriza.

Los campos de utilización del GPR incluyen exploraciones de flujos de agua subterráneos (Davis&Annan, 1989); investigaciones arqueológicas (Imai et al.; Bevan 1991, Vega Pérez Gracia 2001); monitorización para la recuperación de aceite en procesos industriales (Witterholt and Kretzschmar, 1984); aplicaciones de ingeniería civil (Lau et al., 1982); en la detección de tuberías enterradas y de fugas de agua (Eyuboglu et al., 2004; Tavera y Pérez, 2007); para la localización de minas en zonas de guerra etc.

La teoría que constituye el funcionamiento del georadar se desarrolla ya en la segunda mitad del siglo XIX. La falta de los soportes tecnológicos adecuados ha impedido durante mucho tiempo su desarrollo. Después de que Maxwell y Hertz (1864-1886) enunciaran las leyes físicas que rigen la propagación de las ondas electromagnéticas en los medios, se tuvo que esperar hasta los años 30 del siglo XX, cuando Sir Watson y Watt construyeron el primer sistema radar que fue utilizado en la Segunda Guerra Mundial para fines militares. Después de la guerra se hicieron experimentos aislados que utilizaban el radar como método de prospección del suelo. Luego, durante varios años, el georadar fue olvidado hasta llegar a los años 50. En esa época un avión estadounidense se estrelló en Groenlandia al no haber podido detectar una capa de hielo en el suelo. El particular acontecimiento hizo que algunos investigadores se interesaron al uso del radar como metodología de prospección del subsuelo empezando justo por el hielo polar. En la década siguiente se utilizó también con otros materiales (J.C. Cook), y en el 1976 Moffat & Puskar construyeron un interesante radar creado específicamente para la detección de las reflexiones en el subsuelo. En la última

década del siglo XX con el rápido desarrollo de los ordenadores se entró en la época más fecunda de los avances del aparato radar¹

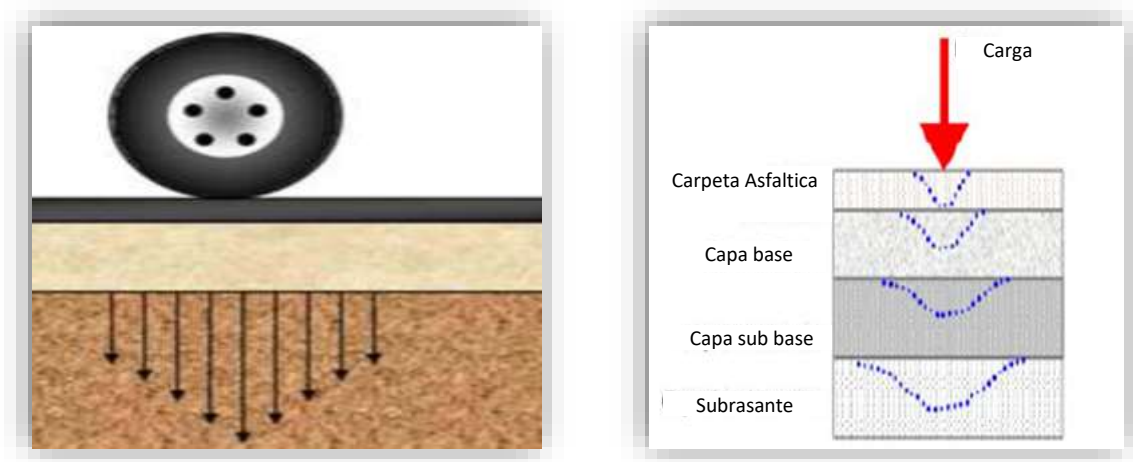
El GPR es usado en la actualidad en los países anglosajones y en Norteamérica como metodología para medir el espesor de las diferentes capas del pavimento y de esta forma saber en qué condiciones se encuentra estas capas.²

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. DEFINICIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE

Pavimento flexible es también conocido como pavimento de asfalto cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como ser las vías.

Figura 2.1. Componentes del pavimento flexible



Fuente: Universidad Nacional Ing. Diego Leon

Está construido con materiales débiles y menos rígidos (que el concreto), más deformables, formada por varias capas como lo son la sub-rasante, la sub base, la base y la carpeta asfáltica, estas capas descansan en una capa de suelo compactado, llamada sub-rasante, en las capas superiores donde los esfuerzos son mayores, se utilizan

¹ Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. Vega Pérez García (Barcelona, Julio del 2001)

² Veloz Aguirre María (Evaluación y Diseño de pavimentos por el método no destructivo)

materiales con mayor capacidad de carga y en las capas inferiores donde los esfuerzos son menores, se colocan materiales de menor capacidad.³

Entre las características principales que deben cumplir los pavimentos flexibles se encuentra las siguientes:

- **Resistencia Estructural.-** Debe soportar las cargas impuestas por el tránsito que producen esfuerzos normales y cortantes en la estructura. En los pavimentos flexibles se consideran los esfuerzos cortantes como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural. Además de los esfuerzos cortantes también se tienen los producidos por la aceleración, frenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructura.
- **Durabilidad.-** La durabilidad está ligada a factores económicos y sociales. La durabilidad que se le desee dar al camino, depende de la importancia de este. Hay veces que es más fácil hacer reconstrucciones para tener que gastar tanto en el costo inicial de un pavimento.
- **Requerimientos de Conservación.-** Los factores climáticos influyen de gran manera en la vida de un pavimento. Otro factor es la intensidad del tránsito, ya que se tiene que prever el crecimiento futuro. Se debe tomar en cuenta el comportamiento futuro de las terracerías, deformaciones y derrumbes. La degradación estructural de los materiales por carga repetitiva es otro aspecto que no se puede dejar de lado. La falta de conservación sistemática hace que la vida de un pavimento se acorte.
- **Comodidad.-** Para grandes autopistas y caminos, los métodos de diseño se ven afectadas por la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad de proyecto. La seguridad es muy importante al igual que la estética.⁴

Por lo general las fallas que se presentan en los pavimentos flexibles a lo largo de su vida útil pueden dividirse en tres grupos:

³ Rafael Alejandro Torrez Zirion (Análisis Comparativo de Costos entre el Pavimento Flexible y Pavimento Rígido)

⁴ Ricardo Javier (Deterioros en Pavimentos Flexibles y Rígidos)

- **Falla por insuficiencia estructural.-** Es cuando el pavimento es construido con materiales inapropiados en cuanto a resistencia. Se puede utilizar con buena calidad pero espesor insuficiente.
- **Falla por defectos constructivos.-** Es cuando el pavimento está bien proporcionado y con materiales de buena calidad pero que en su construcción se cometieron errores.
- **Falla por fatiga.-** Es cuando el pavimento a su inicio estuvieron bien proporcionado y construidos, con el paso del tiempo y la continua repetición de cargas sufren efectos de fatiga, degradación estructural, pérdida de resistencia y acumuladas deformaciones.

2.2.2. TIPOS DE DAÑOS EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los daños que presenta una estructura de pavimento flexible pueden ser clasificados en cuatro categorías:

- **Fisuras.-** Fisuras longitudinales y transversales (FL), Fisuras en juntas de construcción (FCT), Fisuras por reflexión de juntas o grietas en placas de concreto (FJT), Fisuras en media luna (FML), Fisuras de borde (FBD), Fisuras en bloque (FB), Piel de cocodrilo (PC), Fisuras por deslizamiento de capas (FDC), Figuración incipiente (FIN).
- **Deformaciones.-** Ondulación (OND), Abultamiento (AB), Hundimiento (HUN), Ahuellamiento (AHU).
- **Perdida de Capas estructurales.-** Descarcamiento (DC), Baches (BCH), Parche (PCH).
- **Daños superficiales.-** Desgaste superficial (DSU), Perdida de agregado (PA), Pulimento de agregado (PU), Cabezas duras (CD), Exudación (EX), Surcos (SU).
- **Otros.-** Corrimiento vertical de la berma (CVB), Separación de la berma (SB), Afloramiento de finos (AFI), Afloramiento de agua (AFA).

2.2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

2.2.3.1. Ventajas

- Su construcción inicial resulta más económica.
- Tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años.

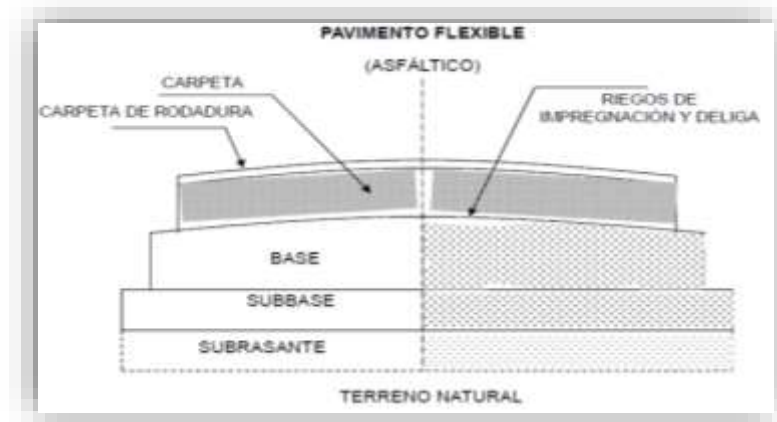
2.2.3.2. Desventajas

- Para cumplir con su vida útil requiere de un mantenimiento constante.
- Las cargas pesadas producen roderas y dislocamientos en el asfalto y son un peligro potencial para los usuarios. Esto constituye en serio problema en intersecciones, casetas de cobro de peaje, donde el tráfico está constantemente frenado y arrancado.
- Las distancias de frenado para superficies de hormigón son mucho mayores que para las superficies de asfalto sobre todo cuando el asfalto esta húmedo y con huellas.⁵

2.2.4. COMPOSICION DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Los pavimentos flexibles están formados por una carpeta bituminosa apoyada sobre dos capas no rígidas, la base y la sub base, las cuales se encuentran conformadas por materiales que deben llenar las especificaciones requeridas. La calidad de estas capas va disminuyendo con la profundidad.

Figura 2.2. Componentes del pavimento flexible



Fuente: Rafael Alejandro (Análisis comparativo de costos entre el pavimento flexible y rígido)

⁵ Ricardo Javier (Deterioros en Pavimentos Flexibles y Rígidos)

Las capas del Pavimento flexible deben cumplir diferentes características las cuales son:

- Resistir y distribuir adecuadamente las cargas producidas por el tránsito.
- Tener la impermeabilidad necesaria, para impedir la infiltración que puede darse por parte del agua.
- Resistir la acción destructora de los vehículos.
- Poseer una superficie de rodadura adecuada, que permita fluidez y comodidad hacia el tránsito de vehículos.
- Ser flexible para adaptarse a ciertas fallas de la base o sub-base.⁶

2.2.4.1. Sub rasante

La Sub-rasante, se define como la parte de la corteza terrestre, que le va a servir de soporte o deberá estar preparada para soportar la estructura del pavimento; puede ser sub-rasante natural (en el caso de los cortes), o constituirse en el sitio (artificial, para los terraplenes), cuyos espesores suelen considerarse entre 20 a 50 cm respectivamente.⁷

Con respecto a los materiales que constituyen la capa subrasante, necesariamente deben utilizarse suelos compactables y obtener por lo menos el 95% de su grado de compactación, tamaño máximo del material debe ser de 7.6 cm, expansión máxima del material es menor a 2 %, un límite líquido máximo de 40 % y por ultimo un índice plástico máximo de 12 %.

2.2.4.2. Capa sub base

La función de la sub base, en un pavimento flexible, es puramente económica, buscando así obtener un espesor utilizando el material más barato posible. Podría construirse dicho espesor con materiales de alta calidad como en el caso de la base, pero usualmente se hace aquella más delgada y se sustituye en parte por la sub base que es de menor calidad, trayendo como resultado un aumento en el espesor total del pavimento, pues es un hecho que cuando menor es la calidad del material utilizado, mayor será el espesor necesario para soportar los esfuerzos transmitidos.

⁶ Manual para la inspección visual de Pavimentos Flexibles

⁷ Estudios de la sub-rasante. Msc. Ing. Luis Alberto Yurquina Flores

Otra función de la sub base es la de servir de transición entre la base y la sub rasante; ya que el material de la base es granular más o menos grueso y el de la sub base es más fino que le anterior, de esta manera sirve como filtro para evitar que el material de la base se incruste en la sub rasante. La sub base sirve también para absorber las deformaciones que provienen de la sub rasante y que pueden ser perjudiciales para el pavimento en general.

De las funciones mencionadas anteriormente, la estructural y la económica son las que más se proyectan en la construcción de pavimentos, el resto dependen de las circunstancias y de los materiales con los que se cuente para la sub base. Generalmente las dos cualidades que se buscan en el material de sub base son: la resistencia friccionante y la capacidad de drenaje; teniendo cada una, en su razón de ser, la importancia de su preferencia.

La capacidad de drenaje, igualmente importante, es necesaria debido a la doble función que realiza tanto con el agua que se infiltra de la superficie, como la que asciende por capilaridad.

Los espesores de sub - base, son muy variables y dependen de cada proyecto específico, pero suele considerarse 12 a 15 cm como la dimensión mínima constructiva.

Las características de calidad que se buscan en los materiales de sub – base se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características de calidad en los materiales de sub base

Materiales de Sub - base	
Características	Zonas en que se clasifican el material de acuerdo con su granulometría
Límite líquido máximo	25 %
Límite plástico máximo	6 %
Compactación mínima	100 %

Valor relativo de soporte estándar saturado, en porcentaje	50 min
Equivalente de arena, en porcentaje	30 min

Fuente: Apuntesingenierocivil.blog

2.2.4.3. Capa base

Su función primordial es la de proporcionar un elemento resistente que transmita los esfuerzos producidos por el tránsito, hacia la sub base y sub rasante, en una intensidad adecuada. Esta también reduce el espesor de la carpeta más costosa. Muchas veces la base también debe trabajar como la sub base, respecto a la doble función de drenaje mencionada anteriormente.

Básicamente el material que constituye a la base, en el pavimento flexible, debe ser friccionante y provisto de vacíos.

Los espesores de las bases son muy variables de acuerdo con el proyecto de que se trate, pero suele considerarse que 12 o 15 centímetros. Es muy importante mencionar que esta capa debe impedir, hasta donde sea posible, la infiltración del agua al interior del pavimento.

Las características de calidad que se buscan en los materiales para la base, se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Características de calidad en los materiales de la base

Materiales de la Base

Características	Zonas en que se clasifican el material de acuerdo con su granulometría
Límite líquido en porcentaje (máx.)	25 %
Índice plástico máximo	6 %
Partículas alargadas	35 %
Compactación	100 %
Valor relativo de soporte estándar saturado, en porcentaje	100 min
Equivalente de arena, en porcentaje	50 min
Índice de durabilidad, en porcentaje	40 min

Fuente: Apuntesingenierocivil.blog

Es la capa que se coloca sobre la base. Su objetivo principal es proteger la estructura de pavimento, impermeabilizando la superficie, para evitar filtraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores. Evita la desintegración de las capas subyacentes a causa del tránsito de vehículos.

La capa de rodadura también contribuye a aumentar la capacidad soporte del pavimento, absorbiendo cargas, si su espesor es apreciable (mayor de 4 centímetros).

2.2.4.5. Carpeta asfáltica

La carpeta asfáltica es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir.

El asfalto, llamado cemento asfáltico, es el último residuo de la destilación del petróleo a temperaturas normales, es sólido y posee un color café oscuro. Para poder mezclarlo con los materiales pétreos, este debe tener una temperatura de 140°C.

Los materiales pétreos para construir carpetas asfálticas son suelos inertes, provenientes de río o arroyos, de depósitos naturales denominados minas o de rocas.

El tipo y espesor de una carpeta asfáltica se elige de acuerdo con el tránsito que va a transitar por ese camino.

El contenido óptimo de asfalto para una carpeta, es la cantidad de asfalto que se necesita para formar alrededor de la partícula una membrana con un espesor suficiente para resistir los elementos del interperismo, para que el asfalto no se oxide. El espesor no debe ser muy grande porque se pierde resistencia y estabilidad.

Se recomienda que las partículas que se utilicen tengan forma esférica ya que las que son en forma laja o de aguja pueden romperse muy fácilmente y puede afectar la granulometría.⁸

Las funciones de la Carpeta Asfáltica son las siguientes:

- Proporcionar una superficie de rodamiento que permita un tránsito fácil y cómodo para los vehículos.
- Impedir la infiltración de agua de lluvia hacia las capas inferiores.
- Resistir la acción de los vehículos.

2.2.5. EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

Se entiende por evaluación de un pavimento como un “enjuiciamiento sistemático sobre el valor o mérito de un objeto, para tomar decisiones de mejora”.

La evaluación de pavimentos consiste en un informe, en el cual se presenta el estado en el que se halla la superficie del mismo, para de esta manera poder adoptar las medidas adecuadas de reparación y mantenimiento, con las cuales se pretende prolongar la vida útil de los pavimentos, la evaluación de pavimentos es importante, pues permitirá conocer a tiempo los deterioros presentes en la superficie, y de esta manera realizar las correcciones, consiguiendo con ello brindar al usuario una serviciabilidad óptima.

⁸ Manual para la Inspección visual de Pavimentos Flexibles Ing. Gustavo Andrés Patiño.

La evaluación de pavimentos, también permitirá optimizar los costos de rehabilitación, pues si se trata un deterioro de forma temprana se prolonga su vida de servicio ahorrando de esta manera gastos mayores.

La objetividad en la evaluación de pavimentos juega un papel primordial, pues se necesita personas verdaderamente capacitadas para que realicen las evaluaciones, de no ser así, dichas pruebas pueden perder credibilidad con el tiempo y no podrán ser comparadas, además, es importante que se escoja un modelo de evaluación que se encuentre estandarizado para poder decir que se ha realizado una evaluación verdaderamente objetiva.

La evaluación de pavimentos comprende a la evaluación de las condiciones de la superficie y a la evaluación estructural.

2.2.5.1. Evaluación superficial

La evaluación superficial se deja ver cuando el pavimento no brinda un paso seguro sobre él, los vehículos no viajan de forma cómoda.

Existen varios métodos utilizados para la evaluación superficial del pavimento entre los más conocidos son:

- **Índice de condición del pavimento (PCI).**- Es un índice que fluctúa entre cero u cien utilizado para indicar la condición de la carretera donde cero indica un pavimento fallado y cien indica un pavimento en excelente estado.

Tabla 2.3. Rangos de calificación del PCI

Rangos de calificación del PCI	
100 - 85	Excelente
85 - 70	Muy bueno
70 - 55	Bueno
55 - 40	Regular
40 - 25	Malo
25 - 10	Muy malo
10 - 0	Fallado

Fuente: AASHTO, Guía para diseño o estructuras de pavimentos 1993

El PCI no puede medir la resistencia al deslizamiento, rugosidad o capacidad estructural del pavimento, solo proporciona un conocimiento acerca de la condición real de la carretera.

- **Índice de Regularidad Internacional IRI.-** Ha sido un parámetro ampliamente utilizado para determinar las características superficiales que presentan los pavimentos.

La variable principal en todo esto es el IRI lo cual nos podrá dar de manera general un estado de carretera, el IRI se determina con un vehículo denominado tipo respuesta muy similar se coloca un sensor en un neumático de un vehículo especial donde se detecta la irregularidad de la carpeta de rodadura si existe un bache como es tan sensible el sensor entonces la llanta se entrara y el sensor detectara una depresión si el bache presenta piel de cocodrilo o deformación entonces el sensor va sumando esas deformaciones.

- **Índice de Serviciabilidad Presente PSI.-** Se define el Índice de Serviciabilidad como la condición necesaria de un pavimento para proveer a los usuarios un manejo seguro y confortable en un determinado momento.

Inicialmente esta condición se cuantifico a través de la opinión de los conductores, cuyas respuestas se tabulaban en la escala de 5 a 1.

Tabla 2.4. Rangos de calificación del PSI

Índice de Serviciabilidad (PSI)	Calificación
5 – 4	Muy buena
4 – 3	Buena
3 – 2	Regular
2 – 1	Mala
1 – 0	Muy mala

Fuente: AASHTO, Guía para diseño o estructuras de pavimentos 1993

- **Textura del Pavimento Índice de Fricción Internacional IFI.-** Es una referencia de aplicación internacional de la fricción y la textura de un pavimento. Este parámetro surge como una respuesta para armonizar la practica internacional y prevenir errores de interpretación ante la existencia de muchos equipos para la medición de la textura y fricción de pavimentos.

El IFI está representa la Macro textura y la Micro textura donde:

- **La Micro Textura** de un pavimento es la que se encarga de otorgar resistencia al deslizamiento en superficies mojadas en la interfaz neumático-pavimento, permite la penetración del agua entre el neumático y el pavimento de manera que se genere el agarre necesario.

Los equipos para la medición de la Micro textura son:

- Grripteste
- Mu meter
- Péndulo Británico

- **La Macro textura** de un pavimento es la desviación que presenta la superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal comprendidas entre 0.5 y 50 mm. La macro textura es la que se encarga de la capacidad drenante del pavimento.

Los equipos para la medición de la macro textura son:

- Circulo de Arena
- Stationary Laser Perfilometer VTL
- Perfilometro Laser de Alta Frecuencia

2.2.5.2. Evaluación estructural

La evaluación estructural de pavimentos debe presentar un dato que permita relacionar la evaluación superficial del pavimento con la respuesta del mismo ante la acción de una carga.

El pavimento puede ser evaluado mediante tres distintas formas:

- Inspección visual.
- Ensayos no destructivos.
- Ensayos destructivos.

Los métodos de evaluación estructural son:

2.2.5.2.1. Métodos destructivos.- Se los realizan mediante sondeos, calicatas a cielo abierto o Extracción de núcleos.

Nos permiten obtener una visualización de las capas de la estructura del pavimento, estas determinaciones permiten obtener el estado actual del perfil estratigráfico a través de las propiedades reales de los materiales que lo componen.

Estos trabajos suministran información adicional como:

- Los espesores de las capas conformantes
- Los contenidos de humedad
- La posible causa del deterioro de la capa (agrietamiento)
- La capacidad de soporte en el material de subrasante.

2.2.5.2.2. Método no destructivo.- Estos ensayos se pueden llevar a cabo mediante medidas de deflexión o mediante hondas electromagnéticas que son herramientas importantes en el análisis no destructivo de los pavimentos.

Los equipos no destructivos para la evaluación de un pavimento son:

- Viga Venkelman

- Deflectometro de Impacto
- Perfilometro Laser
- Vehículo Multipropósito
- GPR (Ground Penetration Radar)⁹

2.2.5.3. MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ESPESORES

La determinación de espesores es utilizada por ejemplo para optimizar un diseño de sobre carpeta sobre pavimento flexible, el control de volúmenes de obra colocados, verificar los espesores de cada capa para un estudio de posibles fallas, para asentamientos debido a variaciones en los espesores, verificar los espesores para temas de auditorías. Es en este entendido la importancia del análisis que se presenta en este estudio.

De acuerdo al Ing. Augusto (2005) cuando el PCI (Índice de Condición del Pavimento), está en 55 ± 7 se debe iniciar las acciones de rehabilitación.

Un método utilizado para ello es el diseño de refuerzo estructural por el método AASHTO 1993 o el Método Empírico Mecanicista. Cualquiera de los métodos escogidos requiere como dato de entrada el espesor del pavimento flexible y las capas adyacentes hasta nivel de la subrasante.

2.2.5.3.1. Métodos para la obtención de núcleos utilizando el extractor de núcleos (ASTM C 42/C 42M).- Es el método actualmente más utilizado que implica el daño estructural a la carretera en diferentes puntos; para evitar que el daño sea mayor se reduce el tamaño de la muestra y las decisiones se toman sobre estimaciones subjetivas.

Se requiere apoyo en la seguridad vial, mínimo dos obreros y un técnico que una vez concluida la extracción de núcleos se procede a llevarlo a laboratorios para proceder a medir con un pie de rey los espesores de los núcleos, además requiere de equipo extra como es una saltarina y proceder con la reparación en las zonas donde se realizó la extracción.

⁹ Gestión Integral de Pavimentos “Evaluación de la condición Superficial, Funcional, Estructural y de Materiales del paquete Estructural. Ing. Percy Flores Laura. (Tarija-Bolivia 22 al 23 de Mayo 2014).

2.2.5.3.2. Métodos para determinar los espesores de las capas de pavimento usando el GPR (ASTM D-4748).- Está basada en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio, con la posterior recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades.

2.3. GEORRADAR GPR (GROUND PENETRATION RADAR)

2.3.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha dicho anteriormente, este proyecto de grado pretende introducir el método del georradar terrestre para la determinación del espesor de carpeta asfáltica en pavimentos flexibles. Esta tecnología GPR ha sido ampliamente adoptado como una serie de técnicas electromagnéticas diseñadas para la ubicación de objetos o en este caso de la tesis para la determinación de espesores de pavimento. Antes de realizar las lecturas por el tramo de estudio es recomendable verificar que el pavimento este seco, debido a la gran influencia que tiene el agua, en la velocidad de propagación de onda del georradar.

Así pues, a continuación se hace una pequeña presentación de este método, los conceptos teóricos más básicos y las bases que nos permiten relacionar los resultados obtenidos con el georradar terrestre.

Se hace referencia, siempre, a la normativa americana ASTM D4748, que regule el uso del georradar.

2.3.2. CONCEPTOS GENERALES DEL GPR

Actualmente para la obtención de espesores de un paquete estructural del pavimento que se quiera hacer en un x tramo cualquiera, que se requiera para su análisis, tradicionalmente se recurre a una serie de ensayos destructivos como ser Extractor de Núcleos o Calicatas. Estos resultados además de brindar ensayos muy puntuales, requieren una gran cantidad de tiempo, toma de muestras para ensayos en laboratorio, análisis de cada uno de los elementos por separado, deducir acerca de las características estructurales del mismo y Recursos. Son poco eficientes, riesgosos y lo más importante es que reducen la vida útil del pavimento, al convertirse estos en puntos de falla de la estructura que luego implica realizar reparaciones en la zona afectada.

El uso de estos métodos directos, destructivos presentan muchas desventajas como:

- Obtención de datos requiere mayor cantidad de tiempo.
- Costos muy elevados.
- Mayores molestias en el tráfico.

Es entonces donde las técnicas no destructivas para la inspección de obras civiles se convierten en una poderosa herramienta para el diagnóstico de alta calidad y bajo costo.

Brindando cada vez un mejor rendimiento de trabajo, una recolección sistemática de los parámetros del pavimento, menor daño físico y operacional al pavimento.

La técnica del georradar, más conocido por sus siglas en inglés como GPR (Ground Penetrating radar). Es un ensayo de tipo no destructivo, que proporciona información de alta resolución a una profundidad típica de 0 a 10m, aunque es posible alcanzar hasta 40m en ciertos casos.

El georradar GPR es un método de prospección basado en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio con la posterior recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades, Estas discontinuidades son cambios bruscos de los parámetros electromagnéticos del subsuelo, es decir, de la conductividad, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética. La incidencia de dicha energía sobre la heterogeneidad del medio es lo que provoca fenómenos de reflexión, refracción y difracción, los cuales son detectados por una antena receptora que capta la energía electromagnética tras su propagación por el medio. De esta forma, se detectan cambios en las propiedades electromagnéticas de los materiales del subsuelo ya que son estas características del suelo, juntamente con las propiedades de la onda emitida, las que determinan la propagación de la energía por el medio.

Nos brinda imágenes en dos dimensiones amplitud vs tiempo que permite obtener información y posibles anomalías del pavimento. Por esto aunque se trata de registros puntuales las reflexiones que son detectadas por la antena receptora son denominadas (trazas), una traza de amplitud puede describir intuitivamente como la cantidad de energía reflejada por las discontinuidades detectadas en el pavimento en función del tiempo, estas trazas corresponden a un vector de energía recibida, transcurrido desde la generación del pulso, el conjunto de estas trazas o una serie de trazas una al lado de otra, son registros almacenados en el computador y son conocidos como radargramas.

Los radargramas son una representación gráfica de las trazas generadas cada vez que se produce un pulso electromagnético durante la medición.

Así pues, si varían las propiedades del subsuelo varía la propagación de energía, permitiendo así el conocimiento de los estratos y capas que constituyen el subsuelo o el pavimento o bien la presencia de aire en este.

En particular, las ventajas que presenta el método del georradar sobre otros métodos tradicionales tales como los sondeos y perfiles eléctricos, etc., son las siguientes:

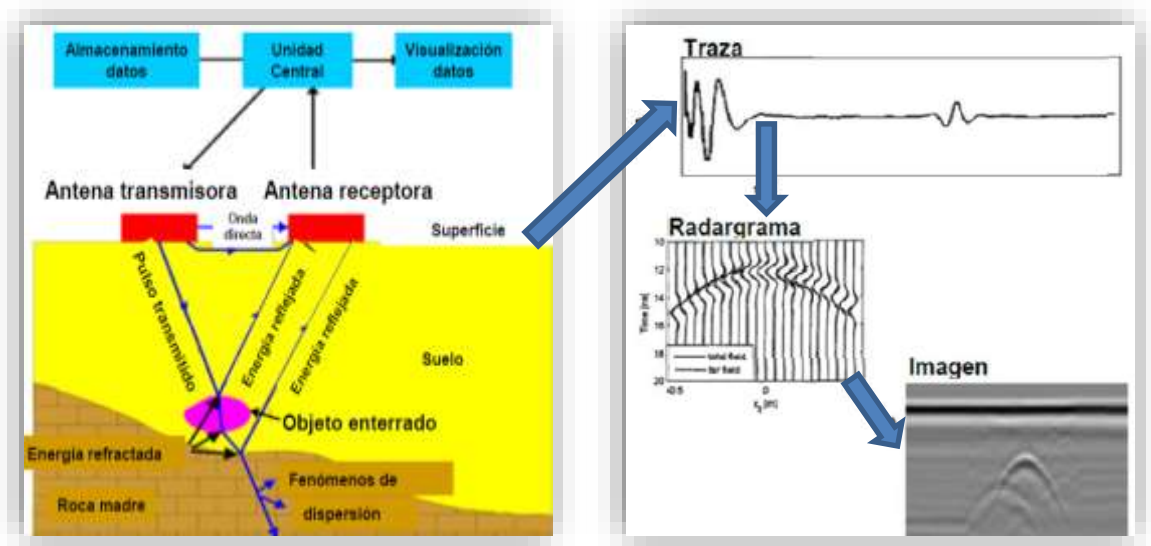
- Método no destructivo.
- Realización de medidas continuas en el espacio.
- Rapidez de la toma de medidas y de la interpretación de datos.
- Ausencia de impactos ambientales (no genera ruidos, ni polvo, ni interrupciones del tráfico, etc.)
- Mínima interferencia, e incluso simultaneidad, con las labores y trabajos habituales desarrollados en la zona de exploración.

Normalmente, el equipo consiste en un sistema de control (ordenador) conectado a unas antenas con frecuencias que van desde 10MHz a 4GHz, que se desplazan sobre la superficie del medio que se desea analizar. Estas antenas son las encargadas de emitir energía hacia el interior del medio y de registrar las ondas que provienen de las reflexiones producidas en las discontinuidades interiores, estos pulsos electromagnéticos van desde 50 a 100 pulsos por segundo de corta duración y normalmente va de 1 a 10 nanosegundos.

El pulso radiado penetra en tierra donde parte de él se refleja hacia la superficie cada vez que interaccionada con un objeto, estructura o cambio de estratigrafía del terreno como se muestra en la figura 2.3¹⁰

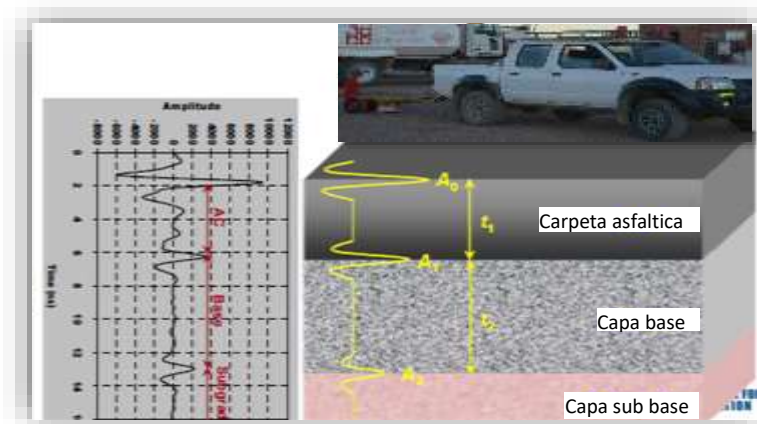
¹⁰ Estudios de la zona no saturada del suelo Vol. VII. F.J.Samper Calvete y A.

Figura 2.3. Obtención de imágenes a través de prospección por GPR



Fuente: Tesis Master Agustín Cuadrado Cabello

Figura 2.4. Interpretado de una señal

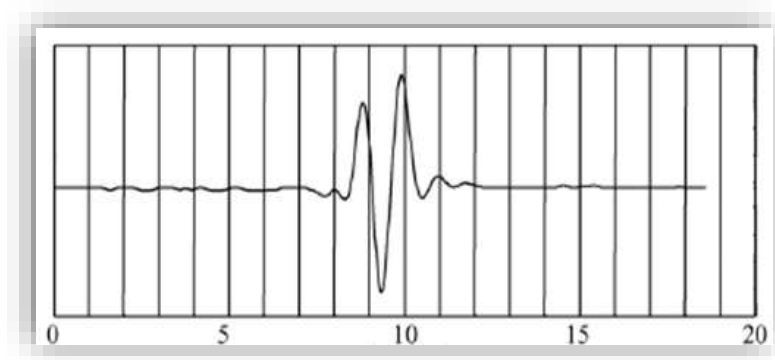


Fuente: Convenio 587 de 2003 y foto del equipo de la ABC

La propagación de estos pulsos electromagnéticos por un medio se puede definir teóricamente a partir de las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas. Sus fundamentos teóricos son los mismos que de los de un radar convencional empleado para detectar un objeto, pero el georradar utiliza un ancho de banda más amplio, y las antenas receptora y emisora se dirigen hacia el medio a estudiar (subsuelo, estructura u objeto).

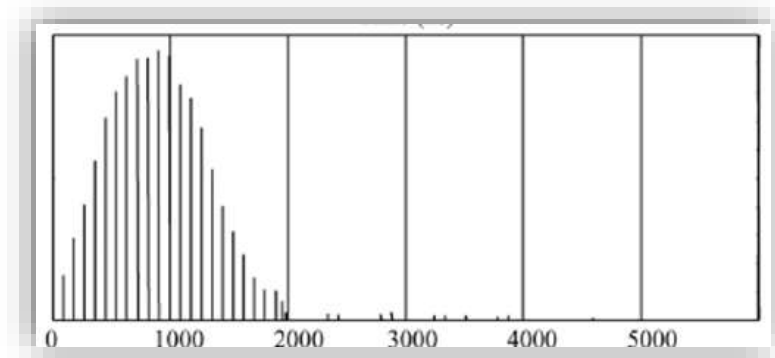
Cada medio posee unas características electromagnéticas propias que son: la permitividad o constante dieléctrica relativa ϵ , la permeabilidad magnética relativa μ y la conductividad eléctrica σ .

Figura 2.5. Forma de una señal



Fuente: Tesis Master Agustín Cuadrado Cabello

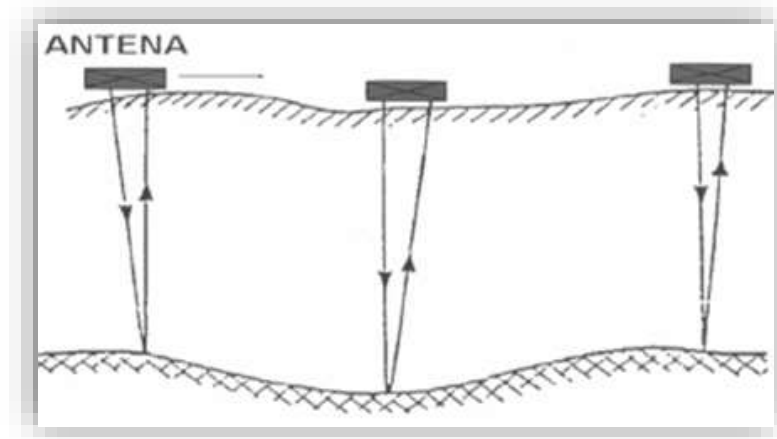
Figura 2.6. Espectro de una señal



Fuente: Tesis Master Agustín Cuadrado Cabello

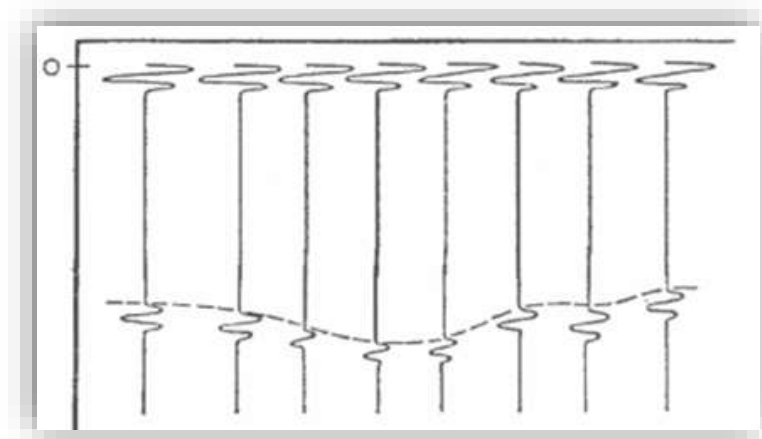
La adquisición de datos con el georradar se debe realizar orientando la antena hacia el subsuelo y registrando las reflexiones detectadas tras la emisión del impulso electromagnético, obteniendo así una traza. Al desplazar la antena sobre la superficie del terreno se irán detectando y almacenando el conjunto de reflexiones existentes bajo la línea de desplazamiento de la antena. De esta forma, en el eje de abscisas se registran los radargramas, o registros de georradar, representan el movimiento de la antena en una determinada dirección, mientras que el eje de ordenadas se muestra el tiempo de retardo entre la emisión del pulso y la detección de las reflexiones en la superficie por parte de una antena receptora, siendo éste, por lo tanto, un viaje de ida y vuelta, tal y como se escenifica en la Fig. 2.7.

Figura 2.7. Esquema de una señal



Fuente: Tesis Master Agustín Cuadrado Cabello

Figura 2.8. Imagen de una señal



Fuente: Tesis Master Agustín Cuadrado Cabello

La magnitud de frecuencia central de auscultación de la antena determina su capacidad de penetración y su resolución.

- Es así que si se tiene una antena con frecuencia alta (800 a 250 MHz) se genera ondas de amplitud baja. (Implica buena resolución pero baja penetración).
- Es así que si se tiene una antena con frecuencia baja (100 a 250MHz) (Disminuye le resolución, pero aumenta la penetración).¹¹

Por otro lado, las frecuencias que se utilizan en este método permiten una resolución elevada en estudios superficiales de un medio. Es por ello que en la teoría del GPR tres

¹¹ Estudios de la zona no saturada del suelo Vol VII F.J.Samper Calvete y A.

términos están interconectados entre sí, como son la frecuencia, la constante dieléctrica (también conocido como coeficiente de reflexión) y la resolución. Como reglas generales, cuanto mayor es la frecuencia de la señal, más corta es la longitud de onda; cuanto mayor es la constante dieléctrica de los objetivos menor es el área de la huella cubierta por la antena y viceversa.

El principal condicionante del georradar se refiere a su penetración limitada en el subsuelo. Por una parte los equipos actuales ya han sido diseñados para ser ligeros y poder ser manejados por 1 a 2 personas en algunos casos lo que implica una reducción del tamaño de las fuentes de alimentación y que redundan en una potencia limitada en cuanto al impulso emitido y, por lo tanto su penetración en el medio.

Por otra parte la naturaleza del suelo juega un factor decisivo en ese aspecto, ya que los medios conductivos (por ejemplo, arcillas húmedas) pueden llegar a atenuar totalmente la señal, haciendo inútil la aplicación del método, el método presenta cierta dependencia de las condiciones superficiales, que pueden llegar a enmascarar los registros provocando interpretaciones erróneas; esto suele suceder cuando el contacto entre las antenas y el suelo no es el idóneo (provocando reflexiones adicionales relacionadas con la variación del contraste de impedancias antena-suelo), o cuando en la superficie estén presentes elementos metálicos que enmascaran parcialmente las reflexiones del subsuelo (por ejemplo las armaduras en un forjado de hormigón). Otros factores que pueden originar distorsiones y/o interpretaciones erróneas se relacionan con la presencia cercana de fuentes emisoras de campos electromagnéticos intensos (líneas de alta tensión) el empleo de teléfonos por parte de los operarios.

Con todo, el principal inconveniente del georradar no se deriva de las razones anteriores, sino de su empleo inadecuado; su uso sin el conocimiento adecuado de sus capacidades impiden el aprovechamiento óptimo de sus ventajas y pueden llevar a incurrir en errores que perjudican el prestigio de la técnica al presentar resultados no acordes con el alcance real de la técnica.¹²

2.4. FUNDAMENTOS TEORICOS DEL GEORRADAR DE PENETRACIÓN DEL SUBSUELO GPR (GROUND PENETRATION RADAR)

¹² Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VII. F.J. Samper Calvete y A. Paz González, 2005.

2.4.1. INTRODUCCIÓN

El georradar es un radar diseñado para que el medio por el que se propaga la energía sea el subsuelo, pavimento o cualquier otro medio material. Por lo tanto, la prospección con georradar se basa en la emisión y detección de ondas electromagnéticas que se propagan por un medio heterogéneo. La incidencia de esta energía en las inhomogeneidades del medio provoca fenómenos de reflexión, refracción y de difracción, que pueden ser detectados por una antena receptora que capta la energía electromagnética tras su propagación por el medio material que a menudo, suele ser el subsuelo terrestre.

En cuanto a los aspectos operativos del proceso, el equipo GPR está configurado y conectado a una fuente de alimentación, normalmente una batería de 12 voltios o una fuente de corriente alterna; antes de empezar a utilizarlo, se debe esperar el tiempo indicado por el fabricante en posición estable, así como hacer los ajustes del intervalo de tiempo con que se van a grabar los resultados, la frecuencia de muestreo, las ganancias de la señal y los filtros de paso de banda, parámetros que se deben definir de acuerdo con la profundidad del objetivo y la frecuencia de la antena empleada. Se puede utilizar una rueda de medición de distancias para controlar el avance del proceso de sondeo. Igualmente es necesario revisar las condiciones del terreno y registrar la presencia de objetos metálicos cerca de la línea de análisis, dado que esas condiciones pueden afectar el proceso de interpretación de los resultados.¹³

El equipo está configurado de modo que durante el proceso, el operador de la unidad de control pueda ver tanto la pantalla del monitor como las antenas, las cuales se montan normalmente en un carro con ruedas para facilitar su desplazamiento. Dependiendo del tipo de estudio, las antenas se mueven tirando manualmente a través de la superficie del suelo o remolcadas con un vehículo. Para la operación manual de las antenas, las velocidades de exploración pueden oscilar entre 20 y 100 lecturas por segundo, mientras que para estudios como carreteras o ferrocarriles, la velocidad de barrido puede llegar a 200 lecturas por segundo o más.

¹³ Evaluación de la técnica de prospección mediante el uso de Georradar. Edwin Alfonso R. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia 2015.

La unidad básica del tiempo de viaje de las ondas electromagnéticas es el nano segundos (ns) donde $1\text{ns} = 10^{-9}(\text{s})$ es general para todas las aplicaciones.

2.4.2. PROPAGACION DE ONDAS ELECTROMAGNETICAS

La base teórica de este método de prospección es por la teoría de campos electromagnéticos, cuyas ecuaciones básicas fueron formuladas por Maxwell en 1867 relacionando los campos eléctrico y magnético con sus fuentes. Estas relaciones se completan con las denominadas ecuaciones de continuidad, que especifican el comportamiento de estos campos en las zonas en las que existen distribuciones superficiales de carga, es decir, ahí donde tenemos discontinuidades en el medio. A partir de estas ecuaciones se puede determinar el comportamiento de una onda de radar durante su propagación por un medio determinado o con el empleo de software.

Estas ecuaciones para el campo eléctrico y magnético, son:

$$\begin{aligned}\nabla D &= Pf \\ \nabla B &= 0 \\ \nabla * E &= -\frac{\partial B}{\partial t} + M \\ \nabla * H &= -\frac{\partial D}{\partial t} + J\end{aligned}\quad (\text{ecs. 2.1})$$

Donde:

∇ = Duración de pulso (s)

E = Intensidad del campo eléctrico (V/m)

B = Inducción magnética (W/m²)

M = Imanación (A/m)

H = Intensidad del campo magnético (A/m)

D = Vector de desplazamiento eléctrico (C/m²)

Pf = Densidad de carga libre (C/m³)

$$J = (\text{A/m}^2) \text{ Densidad de corriente}$$

Este sistema de ecuaciones en conjunto con las ecuaciones de continuidad, las cuales se presentan a continuación (para medios homogéneos e isotrópicos), permite el entendimiento de las interacciones entre las ondas electromagnéticas y los medios en los cuales se propagan.

$$\left. \begin{array}{ll} D = \epsilon E & (\text{ecs. 2.2.1}) \\ H = \frac{B}{\mu} & (\text{ecs. 2.2.2}) \\ J = \sigma E & (\text{ecs. 2.2.3}) \end{array} \right\} (\text{ecs. 2.2})$$

El sistema de ecuaciones 2.2 contiene los tres parámetros que caracterizan un medio electromagnéticamente: ϵ , σ , μ . En donde la conductividad σ representa la medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. La permitividad dieléctrica ϵ brinda la medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Finalmente la medida de la capacidad de un medio para atraer los campos magnéticos viene descrita por la permeabilidad magnética μ .

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell y con la ecuación general de propagación de ondas se pueden obtener las relaciones que rigen la propagación de una onda electromagnética en función de las propiedades del medio por el que se produce. Con estas relaciones es posible determinar la velocidad de propagación de la onda, la longitud de onda en el medio material y la atenuación que sufre la energía durante la trayectoria.

2.4.3. PARÁMETROS ELECTROMAGNÉTICOS DE UN MEDIO

AL momento de entender el funcionamiento del georradar es necesario tener en cuenta que propiedades físicas de los suelos inciden en la forma como se comportan ante los fenómenos eléctricos y magnéticos; esas diferentes propiedades de las rocas, del aire y del agua que componen los suelos, como elementos sólidos, gaseosos y líquidos, son

las que hacen posible la utilidad del GPR. Específicamente las propiedades que tienen incidencia en los resultados son la conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética.

Los parámetros electromagnéticos citados anteriormente (conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética) son los que definen un medio al paso de una onda electromagnética.

A continuación se presentan los parámetros electromagnéticos de un medio (conductividad, permitividad eléctrica y permitividad magnética).

2.4.3.1. Conductividad (σ)

La conductividad de un medio nos proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad de volumen de corriente debido al movimiento de estas cargas libres. Es decir, proporciona una medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. Según la ley de Ohm expresada en la ecuación 2.2.3.

Las unidades de medida de la conductividad, en el S.I., son omhs/metro o el equivalente de Siemens/metro. La conductividad de un medio es la inversa de su resistividad. En general se puede distinguir entre materiales conductores, semiconductores y aislantes según el valor de su conductividad.

En muchos medios, como por ejemplo el suelo, el contenido de agua en los poros del material y la composición química de esta, son los factores que determinan su conductividad, más que los granos minerales que lo componen. En la mayor parte de rocas y suelos en los que se realizan estudios, la conductividad es principalmente electrolítica ya que, excepto en el caso de existencias de minerales metálicos o de arcillas, la mayor parte de los materiales habituales pueden ser considerados como aislantes. En estos medios, la conducción eléctrica se debe básicamente a la existencia del fluido con iones en disolución en los poros y fisuras. Por lo tanto, cuanto mayor es el contenido en agua, el porcentaje de iones disueltos y la porosidad del medio, mayor será su conductividad. Adicionalmente, la temperatura afecta a la movilidad de los

iones, de forma que influye en la conductividad electrolítica, cambiando así la conductividad del medio.

2.4.3.2. Permitividad dieléctrica (ϵ)

La permitividad dieléctrica relativa (según la ecuación 2.2.1) es una constante que da medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Proporciona un valor de la respuesta estática del material cuando está en presencia de un campo eléctrico externo, es decir, describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. La constante dieléctrica del vacío es 1. Para la mayoría de los materiales que se pueden encontrar en el subsuelo al realizar una prospección electromagnética, los valores de permitividad dieléctrica relativa se encontrarán entre 1 (aire) y 81, siendo esta última la constante dieléctrica del agua a 20° de temperatura.

Este parámetro es la magnitud física en la que se basa el georradar y representa la permitividad al paso de un impulso electromagnético con respecto a la permitividad que presenta el vacío. Es por tanto, un factor adimensional. En la práctica, esta constante depende de la conductividad eléctrica y del espesor de material atravesado.

2.4.3.3. Permeabilidad magnética (μ)

Relaciona la inducción magnética con la intensidad de campo magnético según la ecuación 2.2.2. Se mide en Henri/metro y se puede escribir como el producto de la permeabilidad magnética del vacío y la permeabilidad relativa del material.

En la mayor parte de los materiales que se estudian con georradar (siempre que no contengan materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética es próxima a 1, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético. En consecuencia puede no tener una gran influencia.

2.4.3.4. Velocidad de propagación

La propagación de las ondas electromagnéticas en un material se puede obtener a partir de relaciones entre las ecuaciones de Maxwell y las ecuaciones de propagación de ondas.

Las ondas electromagnéticas viajan en un medio a una velocidad que depende de la constante dieléctrica relativa del subsuelo, de la velocidad de la luz en el vacío, y de la permeabilidad magnética relativa. La velocidad de la onda electromagnética (V_m) en un cierto material viene dada por la ecuación 2.3.

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{(\epsilon_r \mu_r / 2) ((1 + (1 + P^2)))}} \quad (\text{ec. 2.3})$$

Donde P es el llamado factor de pérdida de energía de un material, de manera que $P = \sigma / \omega \epsilon$ en donde σ es la conductividad, $\omega = 2\pi f$ (siendo f la frecuencia de la onda) y ϵ la constante dieléctrica relativa.

En un material con un bajo factor de pérdida se tiene que P tiende a 0 y entonces la velocidad de la onda electromagnética viene dada por la ecuación 2.4. Esta ecuación se muestra simplificada descomponiendo la dieléctrica en parte relativa e imaginaria y adoptando hipótesis en los medios habituales en los que se aplica georradar (permeabilidad magnética con valor la unidad y pérdidas pequeñas).

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m/ns} \quad (\text{ec. 2.4})$$

A partir de estas expresiones, la profundidad de penetración (D) puede ser determinada mediante la ecuación 2.5, a partir de la velocidad de la onda en el medio (V_m) y del tiempo doble de propagación T , que es el tiempo entre la emisión de la onda y la recepción de la reflexión producida por dicha onda.

$$D = \frac{T * V_m}{2} \quad (\text{ec. 2.5})$$

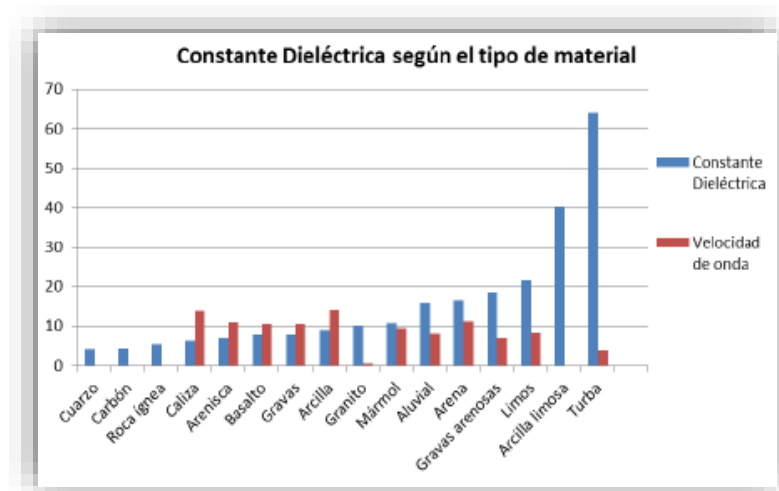
Investigaciones orientadas a la evaluación de las propiedades electromagnéticas de los materiales que conforman el subsuelo han determinado los parámetros electromagnéticos para diferentes tipos de suelos y rocas; en la Tabla 2-5 se presentan algunos de los resultados obtenidos, adicionalmente se presenta la figura 2.5 que muestra el valor medio de constante dieléctrica y velocidad de propagación de onda en función del tipo de material.

Tabla 2.5. Parámetros electromagnéticos para diferentes tipos de materiales

Tipo de material	Material	Contante dieléctrica (ϵ)	Conductividad (σ , mS/m)	Velocidad de propagación (cm /ns)
Roca	Arenisca	6 - 8	$10^5 - 10$	10,6 -11,2
	Basalto	8	-	10,6
	Caliza	4 - 9	$10^5 - 25$	14
	Carbon	4 - 5	-	-
	Cuarzo	4,3	0,001 - 3,3	-
	Granito	5 - 15	$10^5 - 10$	$10^5 - 0,6$
	Marmol	8,3 - 13	-	-
Suelos	Aluvial	9 - 23	10 - 100	6,3 - 10
	Arcilla	3 - 15	0,25 - 1000	11 - 17,3
	Arena	3 - 30	0,01 - 1	5,5 - 17
	Limos	3 - 40	1 - 100	7 - 9,5
	Gravas	< 8	< 0,8	> 10,6
	Turba	50 - 78	1 - 2	3,4 - 4,2

Fuente: (Conyers y Goodman, 1997; Garcia, 1997; Hanninen, 1997; Reynolds, 1997; Lorenzo, 1994; Pilon et al., 1994; Hanninen et al., 1992; Sutinen, 1992; Carmichael, 1990; Davis y Annan, 1989; Marshall et al., 1982)

Figura 2.9. Variación de la constante dieléctrica y la velocidad de propagación de onda en función del material



Fuente: Evaluación de técnica de prospección mediante el uso de georradar. Edwin Alfonso Roa R.

En base en la figura 2.9 se puede observar la tendencia a aumentar exponencialmente que presenta el valor de constante dieléctrica a medida que la dureza de los materiales disminuyen, así mismo, se puede apreciar la diferencia entre los materiales rocosos y los suelos, ya que en los primeros se puede hablar de un valor medio que no supera las 10 unidades, mientras que en los suelos la diferencia de la constante dieléctrica es muy variable entre los diferentes tipos estudiados.¹⁴

2.5. CARACTERÍSTICAS DE LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS EN LOS MEDIOS MATERIALES

Los registros de reflexión del GPR se interpretan analizando sus características, determinadas por el comportamiento de las ondas al atravesar el medio. Los fenómenos más importantes que se producen en estos métodos de reflexión son:

- Los que afectan a la resolución.
- Los que limitan la penetración de energía: atenuación y dispersión.
- Los que determinan el porcentaje de energía reflejada y transmitida en cada contacto.
- Los que determinan la velocidad de propagación de la onda en cada material.

En este apartado se va a resumir, de forma conceptual, dichos fenómenos. En particular la atenuación y la resolución vertical y horizontal. Ambos factores (atenuación y resolución) determinan la amplitud de la señal recibida, la profundidad que alcanza y la distancia mínima entre elementos anómalos que permite su identificación como eventos diferenciados de un registro. Para realizar la interpretación de las imágenes deben tenerse en cuenta estos datos junto con la velocidad de propagación de la onda en el medio.

Los fenómenos descritos dependen básicamente de la frecuencia de la radiación utilizada (característica del aparato empleado) y el tipo de material que se esté analizando (permitividad dieléctrica). En general, los materiales presentes en suelos pueden clasificarse según el comportamiento a este tipo de ondas. En un extremo encontraríamos los que permiten pasar las ondas sin que se produzca apenas atenuación

¹⁴ Evaluación de la técnica de prospección mediante el uso de georradar. Edwin Alfonso Roa R.

(hielo polar, aire, etc.) y en el otro extremo, materiales opacos frente a las ondas (por ejemplo agua de mar o arcillas saturadas).

Durante la propagación de una onda electromagnética se producen pérdidas de energía debido a diferentes causas, tales como:

- Pérdidas por la atenuación de la onda
- Pérdidas producidas en la reflexión y refracción en cada interfaz electromagnética que atraviesa la onda.
- Dispersión de la energía
- Absorción de energía que se transforma en calor.

Los dos factores descritos más importantes son la dispersión geométrica, que se produce en todos los medios, y la atenuación por absorción de energía, característico de medios densos.

La energía que finalmente capta la antena en superficie es menor que la emitida debido a los factores citados, pero además, también puede deberse a otros factores como fenómenos de acoplamiento con otras ondas, la frecuencia utilizada que está relacionada con las anomalías no visibles, tipo de superficie, contraste de parámetros electromagnéticos de las superficies en contacto, etc.).

Las dos causas más importantes al hablar de pérdida de energía son la expansión geométrica del frente de ondas y fenómenos de absorción. Estos fenómenos son más importantes para conductividades mayores, y por lo tanto, esta relación con el contenido de agua. Un análisis final de la atenuación permitirá estimar la profundidad pelicular de penetración.

2.5.1. Atenuación de onda

El coeficiente de atenuación o simplemente atenuación de un material, expresa la pérdida de energía que sufre la señal emitida al atravesar el medio por el que se transmite. En otras palabras, es un parámetro que caracteriza el grado de disminución de la amplitud de onda conforme aumenta la distancia del punto de emisión (antena). La unidad es el Db/m. Este coeficiente aumenta con el contenido del agua, la conductividad, la dispersión producida por una composición heterogénea y el contenido de partículas metálicas.

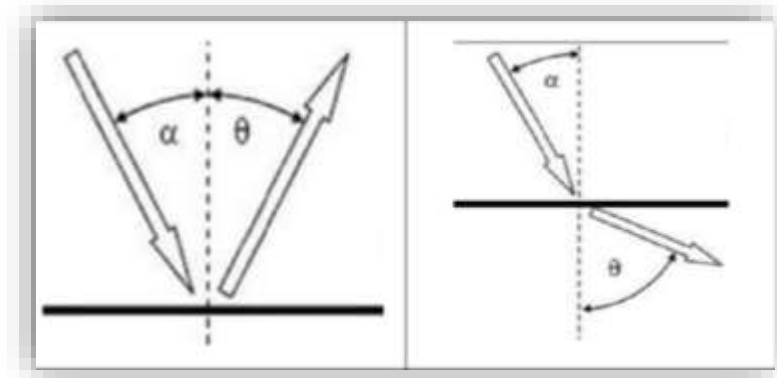
2.5.2. Reflexión y refracción

Cuando la energía electromagnética alcanza una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos del medio, se producen fenómenos de reflexión y refracción.

Cuando la interface es plana, la frecuencia de las ondas reflejadas y refractadas es la misma que la onda incidente, siendo también el ángulo de reflexión igual al de incidencia.

La Ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con las velocidades de propagación de las ondas en los medios que están en contacto. En la figura se muestra esquemáticamente cada uno de estos efectos.

Figura 2.10. Efecto de la reflexión y refracción de la energía incidente



Fuente: Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico.

El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes materiales del medio. Este porcentaje nos define los coeficientes de transmisión y reflexión de la energía.

Las expresiones para obtener los coeficientes de reflexión y refracción pueden obtenerse para distintas superficies de contacto entre distintos materiales, por lo que pueden consultarse en muy diversa bibliografía. No obstante, las ecuaciones 2.8 y 2.9 muestran un ejemplo simplificado de dichas expresiones. Habitualmente, en los estudios que se realizan con georradar, pueden simplificarse las expresiones ya que el sistema opera con un ángulo de reflexión muy pequeño, pudiendo considerar nulo los ángulos de incidencia y de reflexión (incidencia normal). Si además el medio en el que

se trabaja no es magnético, el coeficiente de reflexión (ec.2.8) y el de refracción (ec.2.9) quedan como:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (\text{ec. 2.8})$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (\text{ec. 2.9})$$

En las ecuaciones anteriores se puede observar que la suma de R y T es la unidad.

De estas ecuaciones, se puede deducir que cuanto mayor sea la diferencia entre los parámetros electromagnéticos de los medios, mayor será el coeficiente de reflexión, es decir, a mayor contraste entre los dos medios en contacto, mayor porcentaje de la energía incidente será reflejada en la discontinuidad, y por lo tanto, se tendrá un menor porcentaje de energía transmitida al medio inferior.

Valores de R elevados implican en un estudio con georradar, por una parte, la posibilidad de observar en los registros con más facilidad la onda reflejada, mientras que por otro lado la penetración en el medio disminuye y las reflexiones producidas en contrastes posteriores son de menor amplitud, ya que el porcentaje de energía refractada es menor, lo que contribuye a que la amplitud de la onda en posteriores reflexiones sea menor.

Cuando los coeficientes de reflexión y transmisión estén expresados en términos de amplitud de la onda, entonces quedan como se muestra en las ecuaciones 2.10 y 2.11.

$$r = \frac{A_r}{A_i} \quad (\text{ec. 2.10})$$

$$t = \frac{A_t}{A_i} \quad (\text{ec. 2.11})$$

En donde A_i es la amplitud de la onda incidente en la discontinuidad, A_r la amplitud de la onda reflejada y A_t la amplitud de la onda refractada o transmitida

2.5.3. Absorción

La absorción se produce cuando durante la propagación de la onda parte de la energía electromagnética se convierte en calor. Esto es consecuencia de la polarización por orientación de las moléculas de agua, fenómeno que aparece para frecuencias de la banda de microondas y de la banda de radio. Otros tipos de polarización se producen a otras frecuencias (infrarrojos y ultravioletas). Pero en la banda de frecuencias en la que opera el georradar únicamente se produce el fenómeno de polarización por orientación. Consiste en la orientación de la molécula de forma que su carga positiva se desplaza respecto a la negativa en la dirección del campo eléctrico aplicado.

La permitividad dieléctrica es el parámetro que describe la capacidad de que cargas opuestas dentro de un mismo material se separan una cierta distancia (capacidad de polarización del material).

En general, los materiales del subsuelo tienen muy poca capacidad de polarización orientacional porque no tienen la suficiente libertad para poderse orientar según el campo eléctrico, lo que si ocurre con el agua.

La existencia de agua en los poros de un medio determinado aumenta la capacidad de polarización del medio. Esto indica que las pérdidas de energía por esta causa son menores en el caso de medios con un bajo contenido de agua como una de las causas de mayor peso en la atenuación de las ondas.

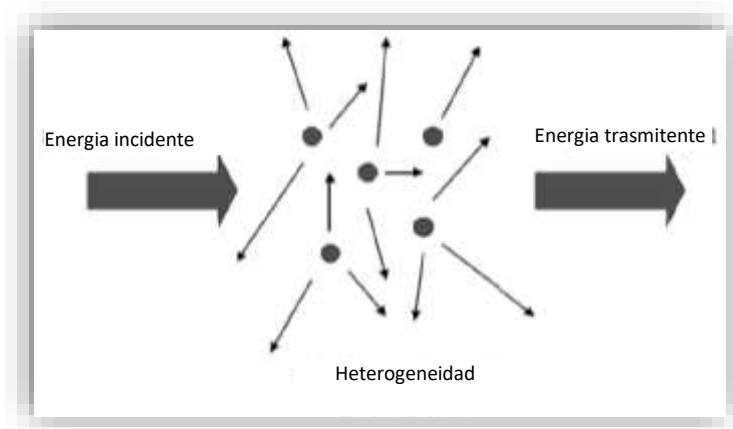
Este efecto es muy importante sobre todo para las frecuencias más altas.

2.5.4. Dispersión de la energía

Este fenómeno se produce cuando la energía electromagnética incide en objetos cuyas dimensiones son del orden de su longitud de onda o inferiores. En estos casos se produce una distribución aleatoria de la energía incidente. El resultado es una disminución de la amplitud de la onda y la generación de un ruido aleatorio de fondo

en el radargrama (imagen obtenida por el georradar). La figura 2.11 un esquema de este efecto.

Figura 2.11. Dispersión de la energía



Fuente: Texto tesina master Agustín Cuadrado Cabello

Los efectos de difracción también se engloban dentro de este grupo. Se producen cuando la onda incide con un elemento único de tamaño relativamente grande, de forma que las condiciones del medio varían bruscamente de un punto a otro.¹⁵

2.5.5. Rango del radar

El rango del radar se define como la máxima penetración que éste puede alcanzar.

De forma general puede decirse que las pérdidas que presenta una radiación electromagnética durante su propagación, a una distancia dada del emisor, son:

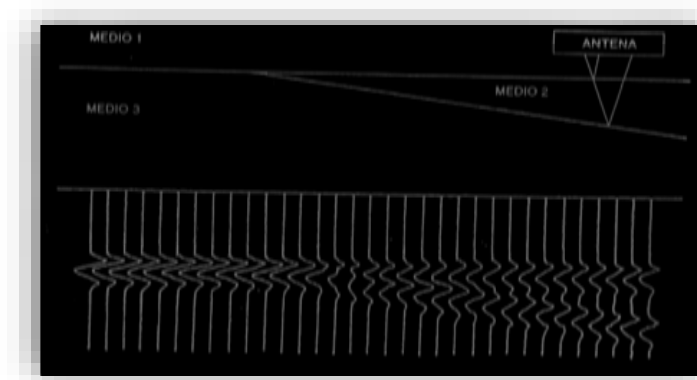
- Pérdidas producidas en la antena.
- Pérdidas durante la transmisión de la energía entre el aire y el medio.
- Atenuación en el interior del medio debido a las propiedades electromagnéticas del material.
- Atenuación por dispersión y refracción en el medio,

La longitud equivalente del pulso que se propaga (en metros) es el producto entre la duración del pulso y la velocidad de la onda electromagnética en el medio por el que

¹⁵ Detección de grietas por desecación en arcillas mediante GPR. Agustín Cuadrado Cabello (Enero 2013)

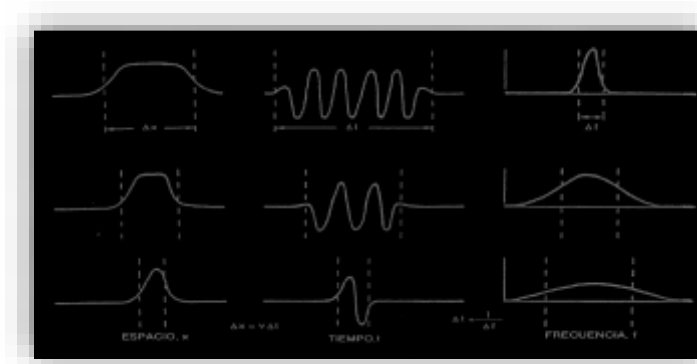
se está propagando. Esta longitud equivalente determina la resolución vertical que podremos esperar. A mayor longitud del pulso, menor resolución vertical.

Figura 2.12. Esquema del registro obtenido en un medio en el que existen dos reflectores cuya distancia entre ellos varía (Lorenzo, 1994). A partir de una cierta distancia entre ambos, las anomalías pueden separarse en el registro como eventos diferentes.



Fuente: Evaluación para aplicaciones en Arqueología y en patrimonio histórico – artístico.
Vega Perez Gracia

Figura 2.13. Relación entre la duración de una señal, la anchura del pulso y su anchura de banda (Lorenzo, 1994)



Fuente: Evaluación para aplicaciones en Arqueología y en patrimonio histórico – artístico.
Vega Perez Gracia

2.6. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS ELECTROMAGNÉTICAS DE LOS MEDIOS POR DONDE SE PROPAGA LA ONDA

2.6.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado queremos describir y analizar, basándonos en estudios antecedentes, el comportamiento de las ondas electromagnéticas durante su propagación por medios materiales, en función de las características que presentan dichos medios.

La prospección con radar de subsuelo se realiza sobre medios que, a menudo, son mezclas de distintos tipos de materiales. Hemos visto que los parámetros característicos electromagnéticos de los materiales son tres: ϵ , σ y μ . Por separado cada elemento tiene sus propias características electromagnéticas. Juntos, forman un medio cuya conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética dependen de cada uno de estos elementos y del porcentaje del mismo en la mezcla.

En las tablas siguientes se muestran los valores correspondientes de esos parámetros para diferentes materiales, junto con la velocidad de la onda v y el factor de pérdidas.

Tabla 2.6. Parámetros electromagnéticos y características de la propagación de las radiofrecuencias y microondas utilizadas para prospección en diferentes tipos de rocas.

Material	ϵ_r	$(\sigma, \text{mS/m})$	μ_r	$V(\text{cm/ns})$	r (dB/m)
Anhidrita	6,7	-	-	11,6	-
Arenisca seca	6	0,001	-	11,2	24
Basalto seco	8	-	1,08	10,6	-
Caliza seca	4 – 7	0,001	0,999987	11,3 – 13,4	14
Carbon	4 – 5	-	-	13,40 – 1,5	-
Cuarzo	4,3	0,001 – 3,3	0,999985	14,5	-
Dolimita	6,8 – 8	-	-	10,6 – 11,6	-
Margas	5 – 15	1 – 100	-	9	1 - 100
Marmol	8,3 – 13	-	-	8,3 – 10,4	-
Roca volcánica	4 – 7	-	-	-	-

Fuente: Aplicación del georradar para la mejora del rendimiento de una red hidráulica (Mario Tabera) Valencia, mayo de 2008

Tabla 2.7. Parámetros electromagnéticos para diferentes tipos de suelos y para materiales no compactados

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	V(cm /ns)	α (dB/m)
Aluviones	9 - 23	10 - 100	6,3 - 10	-
Arcilla seca	3	0,25	17,3	0,28
Arcilla húmeda	8 - 15	50 - 1000	8,6 - 11	20
Arcilla limosa	30 - 50	> 1000	-	-
Arena seca	3 - 6	0,01	12 - 17	0,01
Arena húmeda	20 - 30	0,1 - 1	5,5 - 6	2,3
Grava	< 8	< 0,8	> 10,6	-
Grava arenosa	15 - 20	< 0,8	7,7 - 6,4	-
Suelo arcilloso	2 - 3	0,1 - 1	21,2 - 17,3	-
Suelo arenoso	2 - 3	0,1 - 1	21,2 - 17,3	-
Suelo limoso	2 - 3	0,1 - 1	21,2 - 17,3	-

Fuente: Aplicación del georradar para la mejora del rendimiento de una red hidráulica (Mario Tabera) Valencia, mayo de 2008

Tabla 2.8. Parámetros electromagnéticos y características de la propagación de las ondas electromagnéticas para materiales utilizados en construcción, para diferentes plásticos y otros elementos no clasificados en las tablas anteriores.

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	V(cm /ns)
Hormigón	6 - 30	1 - 10	5,5 - 11,2
Asfalto	3 - 8	0,1 - 1	13,4 - 17,3
Suelo de cemento	8 - 15	10 - 100	7,5
PVS, poliéster	16	-	17,3
Tubería metálica	1	1000000000	-

Nylon	3,6	-	-
-------	-----	---	---

Fuente: Aplicación del georradar para la mejora del rendimiento de una red hidráulica (Mario Tabera) Valencia, mayo de 2008

En general, las principales características de los medios que influyen en los estudios con georradar son cinco: la composición química del medio, la granulometría, la densidad, la porosidad y el fluido intersticial existente. Todos los autores coinciden en el asignar a la constante dieléctrica dos valores extremos: el valor 1, relativo al aire; y el valor 80-81 relativo al agua a la temperatura de 20°C.

La propagación de las ondas electromagnéticas en el agua puede observarse que la velocidad es muy baja y la atenuación elevada.

Otro material de interés es la arcilla. Por arcilla se entiende el material cuyo grano tiene un diámetro medio inferior a 2 μm . Según varios estudios la existencia de arcilla reduce el tamaño de los poros del medio y disminuye su comunicación, creando un fenómeno de microporosidad.

2.6.2. COMPOSICION DEL MEDIO

Los medios que se estudian con georradar suelen estar formados por mezclas de diferentes materiales. Las rocas, los suelos y los materiales constructivos (hormigón, mampostería, asfalto, etc.) se componen de distintos elementos, cada uno con unas propiedades electromagnéticas características. La conductividad, permeabilidad magnética y permitividad dieléctrica del medio dependen del valor de los parámetros electromagnéticos de cada uno de sus elementos componentes y del porcentaje de cada uno de ellos en el medio analizado.

En general se puede considerar que un medio está compuesto por tres fases: la fase sólida, formada por la parte mineral u orgánica sólida; la fase líquida, compuesta por el fluido intersticial; y la fase gaseosa, que normalmente es el aire que llena los poros no saturados.

2.6.3. DENSIDAD, GRANULOMETRIA, POROSIDAD Y CONTENIDO DE AGUA

En este apartado se analizan las características que definen un medio a partir de sus propiedades geotécnicas: densidad, granulometría, porosidad y contenido de agua. Considerando los factores que interesan para los estudios con GPR, estos parámetros están fuertemente relacionados entre sí.

La densidad es la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo, y se define como la masa por unidad de volumen. Es una propiedad física que varía fuertemente dependiendo del tipo de materiales que componen el medio y de su porosidad. Este parámetro tiene su mayor variabilidad en el caso de suelos y materiales poco compactados.

La granulometría da idea del tamaño de los granos materiales del medio (parte sólida). La porosidad total se refiere a todo el espacio del medio que no está relleno de partículas sólidas (los huecos). Dentro de este concepto tienen cabida los poros interconectados entre sí y las fracturas, fisuras y poros que no presentan conexión entre ellos. A estos últimos elementos (fracturas, fisuras y poros no comunicados entre sí) se les denomina porosidad residual. La porosidad efectiva es la parte de huecos que presenta conexión y que, totalmente o en parte, pueden estar llenos de fluido libre o fluido de capilaridad. La permeabilidad de un material da idea de la facilidad con la que el fluido puede desplazarse por los poros comunicados dentro del medio.

En muchos medios hay presencia de agua en forma de agua libre en sistemas de poros comunicados entre sí o en el interior de su estructura, como es el caso de la arcilla.

2.7. INTERPRETACIÓN DE REGISTROS

En este apartado se resume el proceso que se realiza para interpretar un registro. No siempre deben efectuarse todos los pasos y las correcciones explicadas, pero en el caso más general posible se deben tener en cuenta.

2.7.1. Planificación

Hay que recordar que una buena interpretación de registros empieza con un buen planteamiento del problema que se quiere analizar. En primer lugar, antes de realizar la adquisición de datos, es necesario tener claro el objetivo del estudio. A partir de este objetivo se decide, en primer lugar, el tipo de prospección adecuado para alcanzarlo. Cada tipo de estudio tiene sus limitaciones y posibilidades, y la prospección con

georradar no es una excepción. Si se opta por los estudios con radar de subsuelo, el conocer el objetivo nos permite seleccionar también el equipo que se utilizará (tipo de georradar, antenas, información previa que necesitamos, etc.). A continuación hay que realizar la adquisición de toda aquella información previa acerca de la zona y del objetivo de estudio. Esto nos permite una planificación adecuada de la campaña de adquisición de datos y un conocimiento de las condiciones de la zona para poder ajustar los datos obtenidos. La existencia de un sondeo o la extracción de núcleos del tramo de estudio pueden permitir calibrar los registros de georradar en aquellas zonas en las que existe esta información, de manera que podremos ajustar mejor los parámetros de estudio en el resto de las áreas.

2.7.2. Realización: Tareas Preliminares

Antes de empezar a adquirir datos, aun son necesarias unas pequeñas pruebas. En primer lugar hay que comprobar que, situando la antena sobre el medio que estamos estudiando, la señal que ésta recibe es correcta. Si se observan desviaciones de línea base en la señal, o superposición de ruido de frecuencias distintas a las bandas de trabajo, se tiene que utilizar algún tipo de filtro frecuencial vertical. Si no es imprescindible es preferible prescindir del filtrado durante la adquisición de datos para perder la mínima información posible y porque se puede realizar el mismo procesado posteriormente, una vez obtenidos todos los registros.

También se ajusta el rango que ya tiene que haberse estimado al analizar el objetivo del estudio, y se comprueba en campo que dicho rango permite una longitud vertical adecuada de los registros. Es decir, que la duración del tiempo de registro es lo suficiente para poder observar las anomalías de interés.

Al analizar el objetivo de estudio se tiene que considerar también el tamaño del elemento reflector más pequeño que interesa registrar. Teniendo en cuenta este factor, hay que seleccionar la velocidad a la que se desplazará la antena (un valor exacto si la llevamos en un vehículo o aproximada si se hace caminando) y el número de trazas por segundo que se registrarán. Calculando aproximadamente, con estos dos factores, el número de trazas en las cuales se puede observar el evento debido al reflector de menor tamaño deseado, se puede decidir si se quiere y se puede aplicar algún tipo de filtro

horizontal durante la adquisición de datos o si se desea realizar la superposición (o suma) de varias trazas consecutivas también durante la adquisición de datos. Sin olvidar, desde luego, que estos dos procesos pueden realizarse también con posterioridad a la adquisición de datos.

2.7.3. Realización: Toma de datos

Durante la adquisición de datos hay una parte importante de cara a la interpretación posterior: anotar durante el recorrido de la antena todos aquellos eventos que puedan haber afectado a los registros. Para ello es preciso llevar una libreta de campo o planillas en la que se tomará nota cuidadosamente tanto de las condiciones externas como de incidentes durante los trabajos. Por ejemplo, hay que tomar cuidadosa nota sobre los elementos que se atraviesan con el perfil: si se cruza por debajo de un puente o por un túnel, se pasa sobre una conducción, se atraviesa una zona en la que se observan manchas de humedad, se cambia de material en la superficie (por ejemplo, si se pasa de una superficie asfaltada a una zona de hierba), o por ejemplo si se atraviesan zonas de arbolado o zonas despejadas.

Los incidentes que suceden durante la adquisición de datos también deben ser cuidadosamente anotados, situando el punto del perfil en el que han sucedido. Ejemplos de estos incidentes puede ser que la antena se enganche con el cable en un momento dado, que el operario no vea una cita y no introduzca la marca de distancia correspondiente, que la antena sufra una elevación o un salto, etc. Esto es básico para poder descartar algunos eventos, y poder realizar una interpretación más adecuada de los registros. Un reportaje fotográfico de la zona y de la adquisición de datos también puede ser de gran ayuda en los trabajos posteriores de interpretación.

2.7.4. Análisis de datos

El siguiente paso consiste en realizar el análisis de los datos, después de realizar el proceso de toma de datos que será almacenado por el programa Ground Vision se precede a realizar el procesado de datos en el programa RadExplorer, aplicando filtros del programa podremos visualizar de mejor manera los radargramas, para un buen procesado de datos.

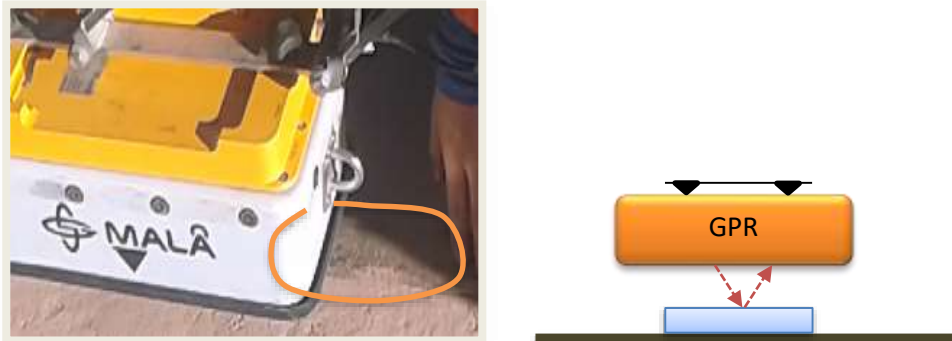
2.8. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO ANTENAS

La calibración del equipo se debe realizar tanto al odómetro que cuenta el equipo y a las antenas del equipo esto para realizar con mayor precisión las lecturas en el tramo.

- Para la calibración del odómetro se realiza en el tramo donde el vehículo deberá estar en movimiento con una velocidad de 40 km/h, se deberá situar una distancia determinada para realizar la calibración con el uso del programa Ground Vision realizamos esta calibración.
- Para la calibración de las antenas se debe tomar como elemento patrón a un dispositivo experimental, consiste en una placa metálica de dimensiones adecuadas para la antena, colocada paralelamente a la superficie emisora de la antena. Modificando la separación entre la placa y la antena se obtienen registros en los que se observa la reflexión que se produce en el metal. Las reflexiones registradas se caracterizan por su tiempo de arribo y por su amplitud.

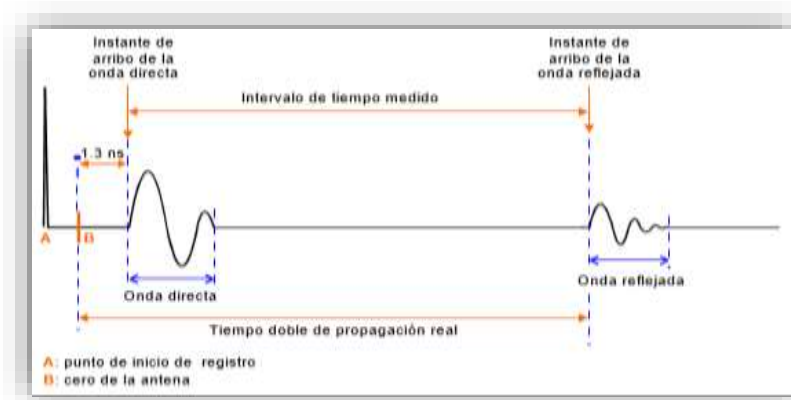
Procedemos a medir la placa metálica ya sea con el uso de un escalímetro teniendo como dato el espesor del mismo, y con ayuda del programa Rad procesando las reflexiones de la placa metálica verificaremos si nos da el mismo espesor de la placa metálica, de no darnos el mismo espesor procedemos a modificar la frecuencia de las antenas en el programa hasta que nos dé el mismo espesor de la placa metálica y ahí ya estaría calibrado el equipo.

Figura 2.14. Esquema del ensayo estático realizado. La antena se mantiene fija frente a un reflector plano metálico, emitiendo una onda y recibiendo la señal que se refleja



Fuente: Evaluación para aplicación en arqueología y en patrimonio histórico-artístico (Vega Pérez Gracia)

Figura 2.1. Esquema de una traza donde se indican los tiempos medidos y la diferencia con el tiempo doble de propagación real que determina la distancia entre el cero de la antena y el inicio de la onda directa



Fuente: Evaluación para aplicación en arqueología y en patrimonio histórico-artístico (Vega Pérez Gracia)

Los objetivos de esta serie de ensayos para la calibración son varios:

- Para colocar parámetros de medición y proceder a realizar las lecturas.
- Analizar la separación mínima entre el reflector y la antena para que no se produzca acoplamiento entre la señal reflejada y las señales internas a la antena (onda directa y ruidos). Para observar el tipo de ruido que se puede tener en un registro.

- Para realizar lecturas con mayor precisión en el tramo de estudio.
- Obtención del origen de los registros el cual es el punto temporal desde donde hay que empezar a contar el tiempo para las reflexiones que se puedan traducir a distancias con el mínimo error posible.

2.9. GPR UTILIZADO SISTEMA MALA PROEX





2.9.1. INTRODUCCIÓN








La Unidad de Control ProEx Mala es la base del Sistema de Malá ProEx tiene características intercambiables lo que lo convierte en un sistema único o de doble canal en la configuración básica o un sistema multicanal. La Unidad de Control de Malá ProEx es compatible con antenas entre 25 MHz a 2,3 GHz, con un máximo de 16 canales de grabación simultáneas. Ethernet de comunicación entre la Unidad de Malá ProEx el Control y la Malá XV monitor o un PC portátil garantizar la seguridad y la transferencia de datos fiable a alta velocidad.

2.9.2. EQUIPO BÁSICO Y FUNCIONAMIENTO

2.9.2.1. PARTES DEL EQUIPO.- Las partes del equipo son:

Tabla 2.9. Partes del georradar

Item	Ensayo		Cantidad	
1	MALA Explorer (ProEx)		1	
2	Baterías		2	
3	Cargador de batería		2	
5	Cable para adaptar a la batería de 12 V		1	
6	Odómetro		1	
7	Antena de alta frecuencia		1	

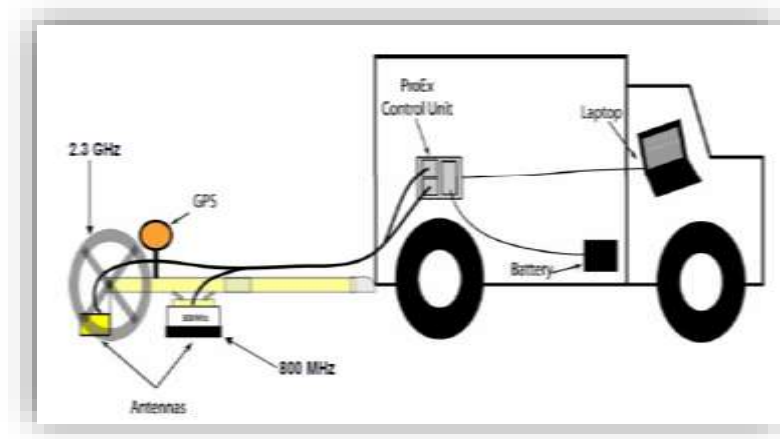
8	Antena de baja frecuencia		1	
9	Cable multi fibra /antena de baja frecuencia		1	
10	Cable de extensión		1	
11	Adaptador al remolque		1	
12	Cable multi - fibra		2	
13	Herramientas y repuestos			
14	Adaptador de poder		2	
15	Adaptador de antena de alta frecuencia		1	
16	Unidad de control		1	

Fuente: Elaboración propia y datos del laboratorio Central de la ABC

2.9.2.2. ARMADO DEL EQUIPO

El armado del equipo se realiza en el lugar de estudio, donde las antenas que forman parte del equipo del Laboratorio Central ya están instaladas en el remolque.

Figura 2.16. Ejemplo de instalación típica del georradar



Fuente: Configuración del mala ProEx sistema Road Cart

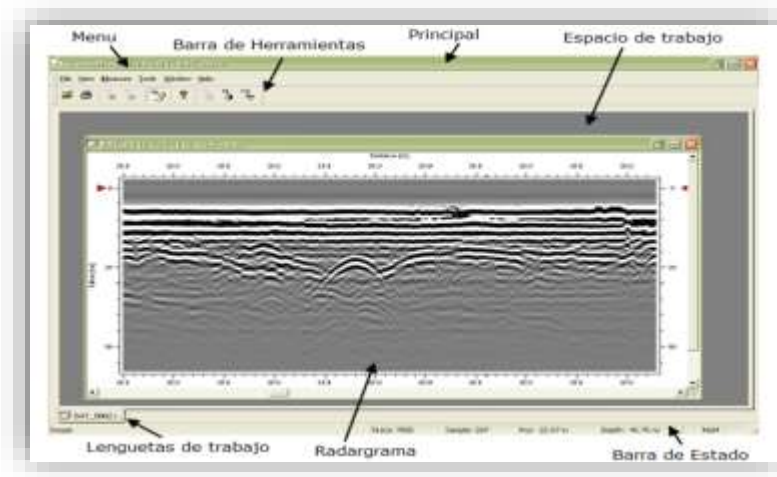
Se procede de la siguiente manera:

- Desmontar el remolque y asegurar en la parte media con sus pernos
- Enganchar al remolque al auto
- Conectar el alargador de la antena de alta frecuencia
- Conectar la antena de baja frecuencia a la adaptación en la parte trasera del automóvil, este cable adaptado con un destellador.
- Una parte del cable multifibra ya está instalado en la antena de baja frecuencia.
- Tomar el cable multifibra, el cable de conexión a la batería y el cable de la antena de alta frecuencia y asegurarlo paralelo al remolque hasta llegar al tope y hacer pasar todos estos cables por las adaptaciones en la camioneta.

2.9.2.3. TOMA DE DATOS

La pantalla principal se presentara así.

Figura 2.17. Pantalla principal del programa mala Ground Visión 2



Fuente: Configuración del Mala ProEx sistema RoadCart

- Definir los parámetros ingresando a Tools a través del menú principal y definir las unidades, en metros o pulgadas.
- Ingresar a Measurement Setting, colocar el nombre del archivo, definir el directorio y escoger y poner en funcionamiento las antenas.
- Escoger en adquisición de datos si se cuenta con odómetro Wheel, caso contrario realizar las mediciones con tiempo, para llevar un control de la distancia en función del tiempo y la velocidad
- Paralelamente para llevar el control de las progresivas, instalar el odómetro de Rouhometer
- Definir el punto inicial sobre la carretera para iniciar las medidas y colocar el eje de la llanta del georadar en el punto
- Presionar F5 y poner en movimiento la camioneta
- Avanzar a una velocidad de 40 km/h,
- En las planillas de campo en cada punto de referencia anotar la distancia que marca el odómetro del roughometer, la traza marcada en la pantalla principal.

2.9.2.4. RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos son recolectados en formato para su posterior procesado.

Los pasos a seguir son:

- Verificar que todo el equipo este correctamente instalado y asegurado

- Presionar F5 para dar inicio a las lecturas
- Avanzar a una velocidad de 40 km/h
- Utilizar las planillas para registrar el inicio de la carpeta, en que posición se encuentran las progresivas, baches, zonas urbanizadas y rompe muelles.
- Presionar F6 para parar el trabajo y nuevamente para F5 para volver a continuar
- Se recomienda empezar una nueva carpeta cada 15 - 20 km.

2.9.2.5. PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de datos se lo hace con el programa Rad Explorer, el cual se mencionara a detalle sobre el manejo del programa en el siguiente capítulo del proyecto, dentro de los accesorios del georradar está la llave física.¹⁶

2.10. COMPONENTES MALA PROEX (GPR)

De acuerdo con las regulaciones establecidas en la norma ETSI EN 302 066-1 (Europea Instituto de Normalización de las Telecomunicaciones).

- La unidad de control no se debe dejar encendido cuando se sale del sistema involuntariamente, siempre debe estar apagado cuando no está en uso.
- La antena debe apuntar hacia el suelo, paredes, etc. Cuando se esté realizando la medición y no hacia el aire.
- Las antenas deben mantenerse en estrecha proximidad a los medios de comunicación bajo investigación.

¡Nota! Las zonas menos convenientes para realizar las lecturas son en suelos ricos en arcilla, las zonas salinas, zonas con infiltración de agua y el hormigón húmedo es decir nuevo.

Para un funcionamiento seguro y fácil de los parámetros son necesarias las calibraciones, almacenado de los datos por separados en el programa Mala Ground Visión, para un mejor procesado de datos.

¹⁶ Procedimiento técnico con el georradar. Ing. Celina Rocha M. ABC

Figura 2.18. Georradar Mala ProEx



Fuente: Manual de armado georradar

Para la puesta en marcha del Mala ProEx con el fin de operar el sistema de buena manera se requieren los siguientes elementos:

- Unidad de control del Mala Pro Ex.
- Módulo de la antena (Óptica, coaxial para HF).
- Las antenas elegidas; blindadas con unidades separadas T y R.
- Fibra óptica, cables coaxiales o cable de antena HF.
- Fuente de alimentación para el Pro Ex y las antenas.
- Cable de datos Ethernet para la comunicación entre al ProEx y el ordenador portátil.
- Software de recogida de datos (Mala Ground Visión para ProEx).
- Software para el procesar e interpretar los datos (Rad Explorer).¹⁷

A continuación se muestra las partes que conforman el equipo de GPR empleado en la determinación de espesores de carpeta asfáltica del tramo Uyuni – Condo K; es un equipo de marca sueca, reconocido por sus trabajos en geofísica desde hace más de medio siglo.

Figura 2.19. Partes de la unidad de control mala ProEx



1. Unidad de control robusto Campo - IP65



¹⁷ Manual de instrucciones V.2.0

Comunicaciones 100 Mbit /



Batería o externa de 12V

2. 12V Li-ion Batería

3. Los conectores /
puertos auxiliares



Módulos de

4. módulos de



Unidad de expansión

5. Conectores de la
unidad de expansión

Este componente contiene la unidad de proceso del georradar, se encarga de recibir los datos emitidos y reflejados por las antenas (emisora y receptora, respectivamente).

La unidad de control suele ir conectada a una pantalla para visualizar la señal que se está adquiriendo. Se puede seleccionar la forma de visualización del registro en campo, optando un registro de trazas de amplitud o bien por una serie de escalas de colores o de tonos de gris, donde cada tono engloba un intervalo de amplitudes de onda registrada.

2.10.1. Unidad de control

La unidad de control ProEx posee una serie de interfaces para la conexión de terminales electrónicas que conectan las antenas para la emisión y recepción de datos (estas terminales son únicas para cada tipo de antena). Igualmente, la unidad central se

conecta directamente con el odómetro encargado de medir la distancia recorrida por las antenas sobre la zona de prospección.

Figura 2.20. Unidad de control ProEx



Fuente: Laboratorio de la ABC

Las unidades con las que cuenta la Unidad de control ProEx son:

- **Mala ProEx modulo óptico.**- El modulo óptico ProEx Malá permite la conexión de todas las antenas Malá GPR que utilizan una interfaz óptica. Esto incluye Malá blindado, sin blindaje y antenas de la pared del pozo.

Figura 2.21. Mala ProEx modulo óptico



Fuente: Laboratorio ABC

- **Modulo Mala ProEx HF.**- El mala ProEx de alta frecuencia (HF) Modulo permite la conexión de los Mala HF Antenas.

Figura 2.22. Modulo mala ProEx HF



Fuente: Laboratorio ABC

2.10.2. Antenas

Las antenas son la parte más importante del equipo se utilizan para realizar dos funciones básicas:

- Estas actúan como traductor electromagnético que transforma los impulsos eléctricos que recibe de la unidad central en una serie de pulsos u ondas electromagnéticas de corta duración que se emite en el medio a estudiar.
- Otra función de las antenas es captar la energía reflejada y transformarla en pulsos eléctricos que envía a la unidad central para que lo procese y lo convierta en información legible por el software ubicado en la pantalla de control, de manera tal que el operador pueda observarlo o por lo menos para que quede registrado para su posterior análisis mediante herramientas informáticas específicas.

Figura 2.23. Antena de alta frecuencia (2,3Ghz)



Fuente: Configuración mala ProEx

Figura 2.24. Antena de baja frecuencia (800 Mhz)



Fuente: Configuración mala ProEx

Las antenas se conectan con la unidad de control mediante un cableado que puede ser metálico u óptico. Cuando se utilizan antenas en estudios de prospección es importante que la mayor parte de la energía radiada lo haga en una dirección. Esto permite mejorar la relación señal-ruido, permitiendo obtener registros nítidos con un rango más elevado.

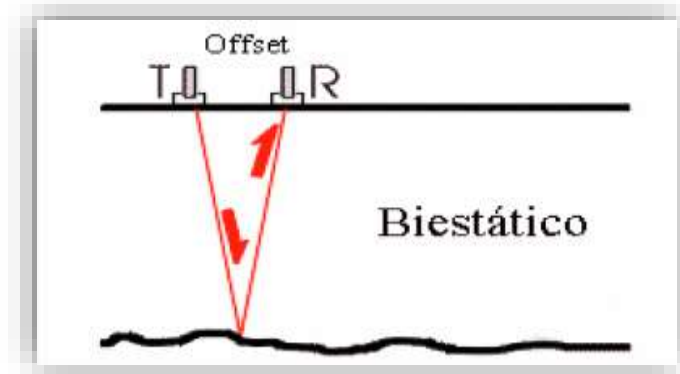
Las antenas pueden ser receptoras (Rx), transmisoras (Tx) o una solo puede desempeñar ambas funciones a la vez.

Hay sistemas que son usados con una antena transmisora y una antena receptora separadas durante la adquisición se denominan biestaticos, mientras que los que poseen una sola antena, cumpliendo ambas funciones de transmisión y recepción se denomina monoestaticos.¹⁸

- **Las antenas biestáticas.-** Son sistemas que constan de este tipo de antenas son más grandes y van atados a vehículos. Se utiliza en la auscultación de carreteras donde la rapidez y la gran recaudación de datos son importantes.

¹⁸ Uso del Georadar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas y aplicación de los perfiles de resistividad y polarización inducida en prospección minera (Richard Anselmi Perez Roa)

Figura 2.25. Sistema usado en modo biestatico (Tomada y modificada de Luca Baradello, 2003)

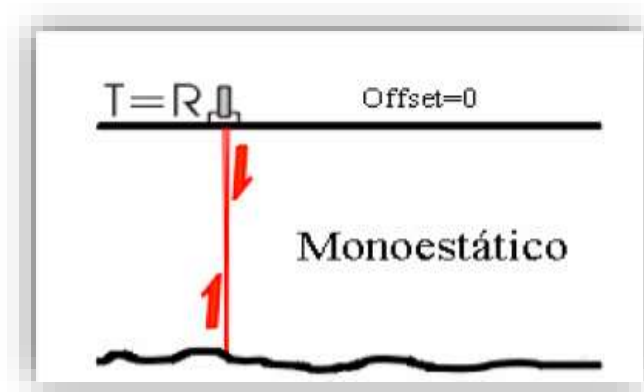


Fuente: Uso del georradar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas y aplicación de los perfiles de resistividad y polarización inducida en prospección minera (Richard Anselmi Perez Roa)

- **Las antenas monoestáticas.**- Permiten realizar con facilidad perfiles, siendo utilizadas en trabajos que requieren mayor rapidez, un número elevado de perfiles o una estructura de malla para poder analizar el medio.

Los sistemas que constan de antenas monoestáticas son más pequeños y fácilmente transportables. Se utilizan en estudio geotécnicos donde la movilidad y portabilidad es importante.

Figura 2.26. Sistema usado en modo monoestatico. (Tomada y modificada de Luca Baradello, 2003)



Fuente: Uso del georradar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas y aplicación de los perfiles de resistividad y polarización inducida en prospección minera (Richard Anselmi Perez Roa)

2.10.3. Equipos complementarios

Con el fin de facilitar la adquisición de los datos, el georradar cuenta con una serie de accesorios o equipos complementarios, los cuales se describen a continuación.

- **Pantalla:** Se vincula a la unidad central con el fin de obtener una visión en tiempo real de los registros adquiridos.
- **Odómetro:** Al igual que la pantalla el odómetro ya está conectado en la llanta del equipo y es utilizado para determinar con mayor precisión la longitud de los registros. Mide las distancias recorridas por el georradar una vez que se inicia la medición.

En función de la información que adquiere este dispositivo, la unidad de control regula la emisión de pulsos y puede ubicar los registros de cada perfil en su posición correcta, de acuerdo a la información proporcionada por el usuario.

2.10.4. Soluciones de problemas sobre el equipo

Al igual que con todos los equipos electromagnéticos es importante manejar el equipo Mala ProEx con gran cuidado y evitar la agresión externa y los golpes.

Durante el transporte de los equipos de la Mala ProEx deben ser empacados adecuadamente y firmemente en una caja de transporte.

También se deberían tomar en cuenta los cuidados para las fibras ópticas cuando estas se usan por lo que cuentan con protección, para evitar el ingreso del polvo y la suciedad. Al terminar el trabajo de lecturas con el equipo la mismo deberá ser comprobada y embalada correctamente en su caja de transporte. Las baterías deben mantenerse cargadas.¹⁹

2.11. TOMA DE DATOS EN CAMPO

El procedimiento a seguir para la toma de información en campo consiste en el desplazamiento del equipo realizando un barrido sistemático por la superficie sobre el tramo a explorar con una velocidad de 40km/h enganchado a un vehículo de trabajo como se muestra en la figura 2.17

¹⁹ Operaciones sobre el manejo del Mala ProEx V.2.0

Figura 2.27. Descripción del ensayo



Fuente: Laboratorio central tramo Uyuni – Condo K

Al desplazar el equipo (antenas) por el tramo de estudio, las antenas emiten (a medida que el operario se desplaza) una serie de pulsos electromagnéticos que varían su velocidad de desplazamiento dependiendo de las características electromagnéticas del material por el cual se desplazan (entre 1 y 100 pulsos); al detectar un cambio en esa velocidad, el GPR traza una anomalía en la gráfica indicando cambio de material o presencia de un objeto o estructura subyacente. El radargrama se genera al graficar cada uno de esos pulsos emitidos y reflejados por los materiales presentes en el tramo de estudio.

2.11.1. PROCESAMIENTO DE DATOS E INTERPRETACIÓN

La base de la diferenciación de estratos realizada por el georradar es una combinación de la aplicación de filtros sobre las ondas electromagnéticas reflejadas y el análisis de la resistividad de cada capa del suelo, la cual consiste en la cantidad de energía que el suelo quita a la onda electromagnética y el valor de la velocidad de la misma onda en un período determinado. Las herramientas para el procesamiento son de dos tipos: Las de ganancia y los filtros.

2.11.2. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS PARA INTERPRETACIÓN

Luego de la toma de datos en campo, se debe hacer uso de una o varias herramientas informáticas dependiendo del alcance que se quiera dar a los radargramas; en una

prospección simple de detección de estructuras, oquedades u objetos en general se pueden emplear aplicaciones informáticas sencillas que evidencian la presencia de estos elementos en el subsuelo; para obtener con precisión el contacto entre materiales con fines de análisis geotécnico se debe emplear software especializado que permita limpiar interferencias, eliminar ruido electromagnético, agregar contrastes y una serie de procesos matemáticos para establecer la existencia y continuidad de cada estrato.

Para el procesamiento de los datos y de las imágenes obtenidas por el GPR, existen varios programas de análisis, siendo los más destacados, Radan, Ground Vision y RadExplorer; cada herramienta cuenta con sofisticados sistemas de análisis, los cuales incluyen tanto funciones de adquisición de datos como herramientas para realizar el post procesamiento utilizando filtros que pueden limpiar la señal adquirida. Para el presente trabajo se empleó el programa RadExplorer, con el cual se realizaron todos los análisis e interpretación. Esta aplicación cuenta con todos los filtros desarrollados para el procesamiento de datos obtenidas por reflexión de ondas electromagnéticas y permite obtener imágenes (denominadas radargramas) con la claridad suficiente para determinar interfaces entre materiales y/o la presencia de estructuras subyacentes.

Un radargrama está compuesto por una sucesión de trazos verticales denominados trazes. Cada uno de los trazes corresponde a un pulso que se desplaza y retorna desde la superficie hasta el límite de profundidad predeterminado y regresa a su origen. Durante la toma de datos en campo es indispensable registrar las características del sector de estudio en la superficie (para fines topográficos) y preferiblemente contar con un registro de perforación realizado en la zona (para fines de calibración).

2.11.2.1. Software de procesamiento Rad Explorer

El procesamiento de las imágenes obtenidas en campo se realiza mediante el software RadExplorer desarrollado por la firma rusa RadExpro. Esta aplicación permite, mediante una serie de filtros basados en complejos procesos matemáticos, limpiar la imagen obtenida por el GPR para establecer con precisión las interfaces entre los materiales subyacentes, las posibles estructuras presentes en el subsuelo y la profundidad a la que estas se encuentran.

Entre los varios filtros y herramientas que posee esta aplicación las más usuales para el procesamiento de datos son:

- Band Pass
- Background Removal (BR) - Subtract Mean Trace (SMT)
- Running Average
- DC Removal

2.11.2.2.Herramienta de ganancia

Las herramientas de ganancia permiten realzar la amplitud de una señal cuando esta es muy tenue.

AGC (Automatic Gain Control): Sirve para igualar la amplitud de una traza, sobre cada una individualmente. El AGC calcula la amplitud media (sobre el cuadrado de la misma) de una ventana temporal y luego multiplica a todos los valores por este valor.

Time-varying Gain (ganancia temporal): Sirve para compensar pérdidas por atenuación eléctrica y por el carácter expansivo de la onda transmitida. El Time-varying Gain aumenta la amplitud de una traza multiplicando el dato por dos funciones crecientes en el tiempo. Una de estas es una función lineal y la otra es una exponencial. Los datos que corresponden a un tiempo mayor obtienen una ganancia mayor.

2.11.2.3.Filtros

Band Pass: Este es un filtro que selecciona las frecuencias dentro de la señal recibida. Una señal puede ser descompuesta en una combinación lineal de frecuencias. Este filtro elimina la contribución de las frecuencias bajas (Lowercut- off frequency) y las de las frecuencias altas (Highercut-off frequency). Por lo general se eliminan frecuencias menores a la mitad y superiores al doble de la frecuencia de la antena transmisora. La antena receptora detecta señales electromagnéticas, el pasa-bandas filtra aquellas

Background Removal (BR) - Subtract Mean Trace (SMT): Estos dos filtros pertenecen al grupo llamado filtros horizontales. El primero (BR), ayuda a reducir el ruido de fondo. Se entiende como ruido a las señales que aparecen en algunas trazas y

desaparecen en otras, por lo que el BR reduce los rasgos horizontales. El SMT hace algo muy similar al BR en su modo running average (promedio punto a punto), reduciendo los rasgos horizontales. En el modo total average (promedio sobre todas las trazas), busca eliminar los rasgos de horizontalidad marcada para que se destaquen aquellos que tienen un cierta pendiente (reflectores inclinados o hipérbolas) señales que no.

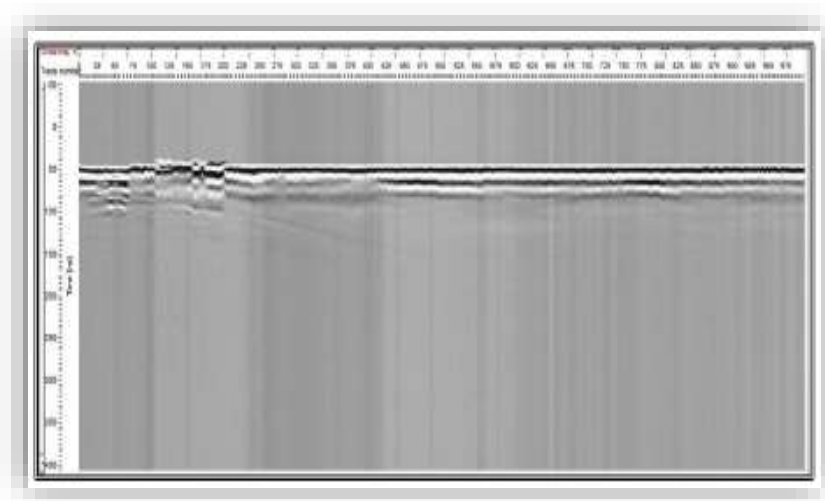
Running Average: Este filtro es una combinación de filtros verticales y horizontales. Su principal aplicación es eliminar rasgos muy marcados entre datos cercanos (esto es, temporalmente o en trazas vecinas).

DC Removal: En los casos donde la antena receptora está acoplada a una señal continua muy fuerte, este filtro cumple la función de restar la componente no nula de la amplitud sobre la cual se encuentra la señal reforzada.

2.11.2.4. Ejemplo del procesamiento de un radargrama

A continuación se describe el proceso realizado para la obtención final de un radargrama tomando como ejemplo una lectura realizada. En este radargrama se pueden identificar dos materiales diferentes. En la figura a continuación se muestra la imagen de un radargrama sin ningún tipo de procesamiento.

Figura 2.28. Radargrama sin procesar



Fuente: Lectura del tramo de estudio

2.11.2.5. Aplicación de filtros

Para el procesamiento de datos de los radargramas se utilizan filtros, los cuales permiten eliminar el “ruido” generado por distintos factores en campo; estos factores pueden ser, presencia de motores de vehículos, señales de alta frecuencia provenientes de torres de transmisión de telefonía celular o de radio, campos electromagnéticos provocados por cableado eléctrico de alta tensión, estructuras metálicas cercanas, etc.

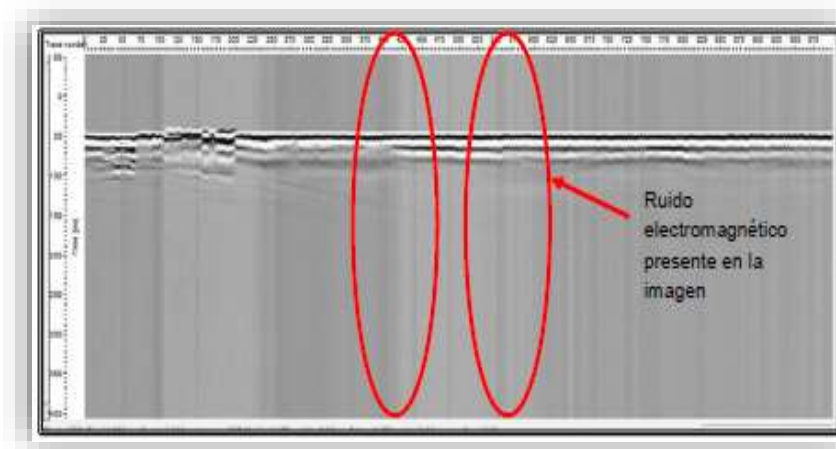
- **Time-zero adjustment**

Este primer filtro se aplica para definir el cero de referencia de la imagen, para el caso de la definición de estratos, será la superficie actual del terreno; una vez seleccionado el filtro aparecerá una línea roja punteada que muestra el cero actual tomado por el programa (parte superior del radargrama); para mostrar la profundidad en metros se hace necesario remitirse a la barra de herramientas de dibujo y seleccionar el ícono de la regla. Una vez se haya seleccionado el filtro se debe ir a la pestaña de los parámetros de módulo y ajustar la barra del First Brake, la cual permitirá bajar el cero de referencia al lugar donde necesite el usuario; para el caso de la definición de estratos será la superficie del terreno.

- **DC removal**

Este filtro permite eliminar de la imagen el ruido provocado por variaciones eléctricas del subsuelo; el ruido de este origen se revela como puntos y líneas de color gris claro u oscuro a lo largo del radargrama, como se aprecia en la figura a continuación.

Figura 2.29. Ruido electromagnético presente en los radargramas



Fuente: Lectura realizada en el tramo de estudio

Después de seleccionar el filtro, se pueden digitar las correlaciones correspondientes en función del tiempo, para que se atenué la basura registrada por los "TRACES", a menor tiempo relacionado, la corrección será más somera, y la imagen se verá menos afectada; para cada lectura realizada es necesario realizar la menor alteración posible para cada filtro aplicado, con el fin de mantener las propiedades iniciales de la imagen.

- **Trace edit**

Este filtro se utiliza para remover los truces erróneos generados en la toma del ensayo en campo; generalmente aparecen como líneas verticales negras debido a la falta de información contenida en el trace.

Se selecciona el filtro trace edit y en el model parameter, se selecciona la opción select traces y se seleccionan en la imagen los truces que están erróneos; inmediatamente después de escogidos una "X" aparece en la parte superior.

Una vez se escoge la opción de correr el filtro, se limpiarán las líneas erróneas y la imagen quedará lista para continuar el proceso.

- **Background removal**

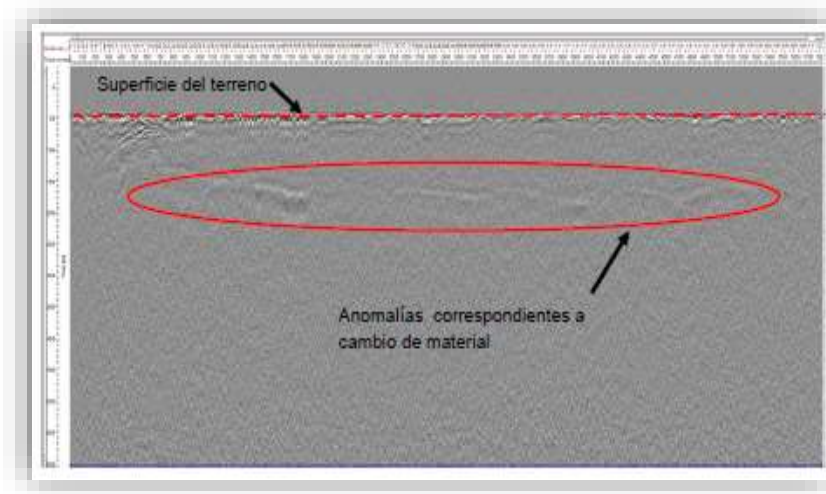
Comúnmente en un ensayo de GPR se obtienen reflejos no solo del objetivo deseado sino también de muchos elementos diferentes, a estos se les llama clutters. Adicionalmente, la señal se ve distorsionada por la onda directa, el efecto de acoplamiento de las antenas y el sonido de fondo. Con el fin de extraer con éxito la

imagen real, estos efectos extra de ruido tienen que ser eliminados; aunque los clutters no pueden ser removidos en su totalidad, las técnicas utilizadas por el filtro background removal suprimen su influencia en gran medida.

- **Amplitud correction**

La aplicación de este filtro aclara la imagen y define los detalles del radargrama; en el módulo de parámetros se selecciona ejecutar el comando, este filtro define la parte profunda del radargrama, definiendo con precisión los estratos detectados.²⁰

Figura 2.30. Radargrama con los filtros aplicados



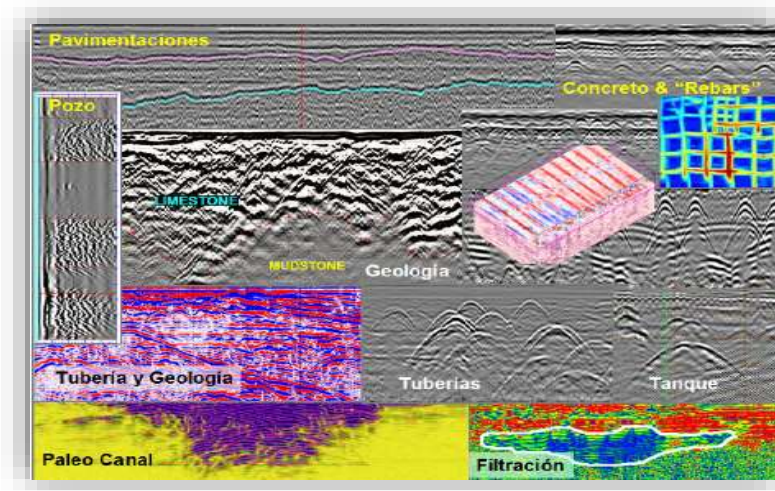
Fuente: Lectura del tramo de estudio

2.12. APLICACIONES DEL GPR

El GPR es utilizado de distintas formas en la evaluación de las carreteras: para determinar el espesor de hormigón y de los pavimentos flexibles, para localizar las zonas que se deben reforzar en pavimentos de hormigón, detección de huecos y áreas delaminadas en los puentes, localización de huecos bajo la unión de las losas de hormigón, evaluación de cauces socavación, o la detección de tuberías enterradas.

²⁰ Evaluación de la técnica de prospección mediante el uso de Georradar. Edwin Alfonso Roa Ramos

Figura 2.31. Ejemplos de imágenes de radar para diferentes aplicaciones



Fuente: TRX método GPR (Ground Penetration Radar)

En lo que concierne a la evaluación de pavimentos, las principales aplicaciones de los sistemas GPR son las siguientes:

- División del pavimento en tramos homogéneos, desde el punto de vista de la variación de las imágenes de radar.
- Medición continua de espesores de las principales capas del pavimento, hasta una profundidad de un metro (1.0m), en casos ideales. El espesor mínimo detectable para cualquier capa es de 5.0 cm y la precisión del cálculo de espesores disminuye con la profundidad del pavimento.
- Selección de sitios para la realización de sondeos o extracción de núcleos, principalmente para despejar dudas sobre problemas puntuales del pavimento.
- Detección de instalaciones subterráneas.
- Generación de insumos básicos para el cálculo de espesores de estrategias de rehabilitación y reconstrucción de los pavimentos en servicio.
- Identificación, aunque con mayor incertidumbre, de zonas con problemas aislados en el pavimento (oquedades, alta humedad, etc.).

En cuanto a los rendimientos del radar de penetración, no se puede establecer un intervalo típico de valores, dado que cada caso analizado puede requerir algunas variantes en las actividades de interpretación. Normalmente se requiere un esfuerzo mucho mayor en la interpretación de resultados que en la recolección de datos.

Algunos de los campos de aplicación donde el Georradar ha demostrado ser una técnica de gran utilidad de forma, junto con las ventajas y limitaciones del método frente a otras alternativas en prospección del subsuelo.²¹

- Aplicaciones medioambientales: detección de plumas de contaminación, delimitación de vertederos, localización de bidones y/o depósitos enterrados.
- Geología y geotecnia: estratigrafía del subsuelo, profundidad de la roca, localización del nivel freático, detección de cavidades, fracturas y fallas.
- Obra civil:
 - Pavimentos.- Localización de servicios enterrados (metálicos y no metálicos), control del pavimento en las carreteras, determinación de espesores en pavimentos, patologías en la construcción.
 - Análisis estructural.- Debido al alto contraste electromagnético entre el concreto y el acero mediante un estudio con georradar es posible determinar la estratificación y distribución de las varillas para cualquier estructura, determinación de la existencia de grietas dentro de la estructura debido al desgaste del mismo.
 - Investigación sobre túneles.- Una de las preocupaciones más grandes en el mantenimiento de túneles es la ubicación de vacíos y zonas débiles de espesor bajo, pues el proceso de estas pueden provocar el colapso del túnel. El georradar es una eficaz herramienta pues es capaz de determinar los vacíos, zonas debilitamiento y otras heterogeneidades, antes que se convierta en un serio problema.
 - Taludes y muros.- El objetivo es la búsqueda de zonas débiles, vacíos y fallas no visibles en el exterior. Adicionalmente es posible determinar donde el incremento de humedad, puede iniciar un proceso de rápida degradación e incremento de empujes.
 - Estudios de suelos.- Esta técnica puede ser usada como complemento a las exploraciones de campo, las cuales se realizan de manera puntual a muy altos costos. Pero realizando las mediciones con el

²¹ Evaluación, Análisis y Determinación de la Vida remanente del Pavimento mediante la Auscultación con el Ground Penetrating Radar (GPR) En la carretera Nuevo Laredo-CD Acuña. Ing. Javier Cabrera.

georradar se obtiene una estratigrafía continua del perfil encontrado los cambios en el mismo que no pueden ser detectados por las perforaciones.

- Arqueología: localización de estructuras enterradas, posicionamiento de túneles y/o galerías ancestrales, estudios in-situ en edificios históricos.

En cuanto al equipo, el georradar utilizado para este trabajo, siendo una tecnología no destructiva tiene sus limitaciones frente a otros métodos no destructivos dependiendo al trabajo que se quiera hacer. Entre estas limitaciones se destacan:

- No me da las deflexiones del pavimento
- El envejecimiento del asfalto
- Módulo de elasticidad de las capas del pavimento

2.13. ESTUDIOS SIMILARES DEL USO DEL GEORRADAR

El desarrollo que han experimentado las técnicas de prospección con el uso del georradar ha ampliado los campos de aplicación abriendo las puertas a nuevos estudios y posibilidades.

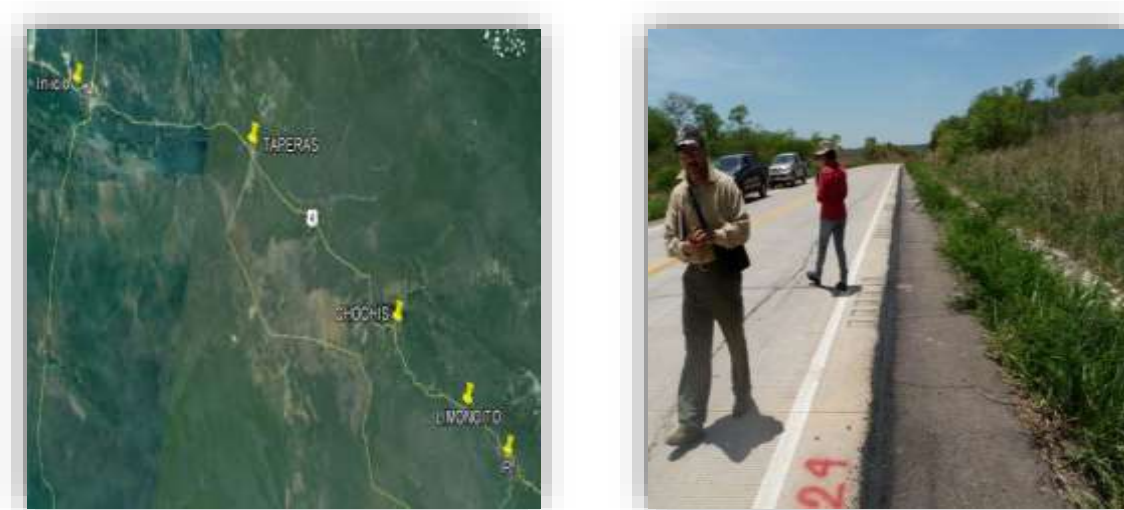
Entre los estudios similares con el uso del georradar a nivel nacional e internacional se tienen los siguientes:

2.13.1. Nacional

- A nivel nacional se realizó un estudio en el departamento de Santa Cruz que vincula con Puerto Suarez, el tramo de estudio corresponde al tramo San José de Chiquitos – Robore perteneciente a la RF4, en Octubre de 2012. Se realizó un “Examen Técnico Respecto a Daños, Grietas y Otros Problemas Técnicos en 3 sectores del Tramo Vial San José - Tapera - Robore, y de la Evaluación Técnica General de este tramo”. El tramo tiene una longitud de 137,76 km. La actividad inicial para la presente consultoría era la prospección geofísica de todo el tramo a fin de detectar sectores o lugares en que las características del terraplén (o el suelo cambiado en los sectores de corte) o el suelo debajo de la carretera presente condiciones de debilidad que puedan afectar a dichos sectores en un futuro próximo o a mediano plazo. Esta prospección geofísica se

estableció en la propuesta que se realizaría con el equipo GPR del Laboratorio Central de la ABC.

Figura 2.32. Ubicación del tramo de estudio en el uso del georradar



Fuente: Informe de avance consultora SGT LTDA

La geo prospección en este tramo se realizó sin mayor inconveniente, a pesar de lo indicado y debido a que era imperativo sacar el mayor provecho a la información del GPR se realizó una lista de los puntos identificados clasificando en puntual, zona heterogénea y oquedades continuas a lo largo del tramo de estudio, con esta información se definieron la cantidad de extracciones de calicatas a lo largo del tramo.²²

- Otro estudio que se realizó fue una “Evaluación del tramo El Alto y La Autopista”, en Mayo 2017. Mediante el uso del Georradar Mala Proex en la identificación de vacíos (cárcavas) entre la carpeta de pavimento rígido y la sub base.

El procedimiento operativo consiste en un barrido sistemático de la superficie a lo largo de una línea (huella). Durante el desplazamiento se emiten gran cantidad de pulsos por segundo (entre 1 y 100 pulsos), de manera que se obtiene un perfil que se puede considerar continuo por la cantidad de trazas que se

²² Informe de avance en “Examen Técnico Respecto a Daños, Grietas y otros problemas técnicos en 3 sectores del tramo vial San José - Taperas - Robore, y de la Evaluación Técnica General de este tramo”.

obtienen, en el que se indica el tiempo total de viaje de una señal al pasar a través del subsuelo.

Se da prioridad a la junta entre losas pues es en ese lugar donde la presencia de vacíos es más recurrente.

Figura 2.33. Junta longitudinal



Fuente: Informe de trabajo proyecto: Autopista La Paz – El Alto

Para identificar los vacíos se realizó con la ayuda de un perfil c de 30 cm de ancho por 5 cm de alto, 900 cm de largo y 1 cm de espesor el siguiente procedimiento:

- Se cabo en forma rectangular un hueco con las dimensiones del perfil c
- Se enterró el perfil
- Se procedió a las lecturas con el georadar a lo largo 5 metros esto incluía, 2 metros antes del perfil y 2 metros después del perfil

Figura 2.34. Perfil C enterrado



Fuente: Informe de trabajo proyecto: Autopista La Paz – El Alto

Figura 2.35. Lecturas sobre el suelo y sobre el perfil C



Fuente: Informe de trabajo proyecto: Autopista La Paz – El Alto

La geo prospección en este tramo se realizó sin mayor inconveniente, identificando los vacíos que se presentaron mayormente entre losa a losa a lo largo de la junta longitudinal, las losas con vacíos son altamente susceptibles a fisuras de borde.

2.13.2. Internacional

- A nivel Internacional se realizó un estudio en España Valencia, mayo 2008. Se realizó una “Aplicación del Georradar para la Mejora del Rendimiento de una Red Hídrica”.

El abastecimiento de agua potable es una más de las actividades fundamentales dentro de los distintos tipos de servicios públicos que aportan calidad de vida a los ciudadanos. En muchos sistemas de distribución, una cantidad significativa de agua se pierde a lo largo de los varios elementos de la red por fugas o consumos no autorizados. Las fugas y el consumo ilegal o no controlado de agua en las redes de abastecimiento representan un desgaste de un recurso natural que es un bien escaso, y una pérdida económica relevante.

Tienen una importancia fundamental la detección y localización de las pérdidas de agua (perdidas reales), pero también la localización de las acometidas ilegales o más generalmente de todas las componentes del sistema hídrico de las que no queda constancia en los mapas catastrales.

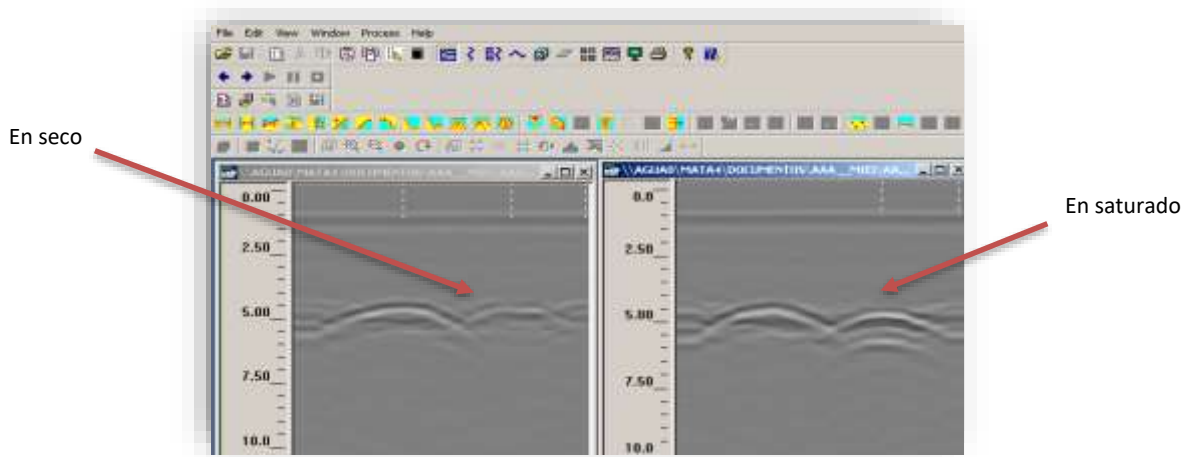
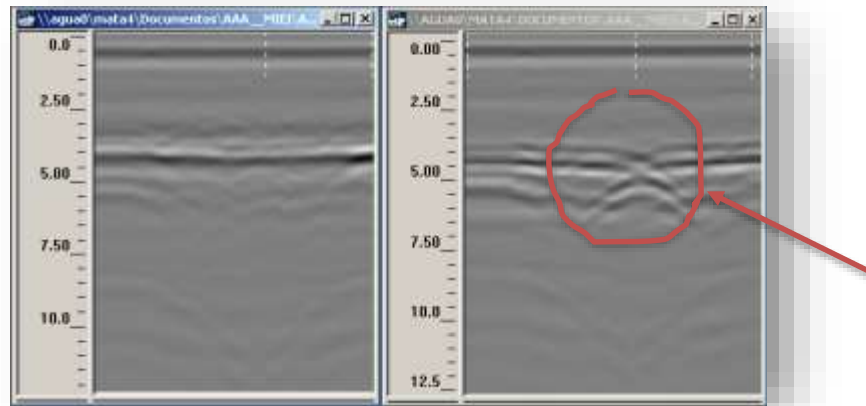
Son varias las incidencias y las componentes a tener en cuenta en una tarea de este tipo. Antes de todo es importante que los técnicos encargados tengan conocimientos previos sin los cuales es fácil tener una visión parcial e incorrecta del sistema. Otro factor importante es la experiencia de quien se encarga de las mediciones. Es una tendencia siempre más generalizada utilizar en estos casos métodos no destructivos (como por ejemplo el georadar).

Figura 2.36. Foto de ensayo in situ en la Universidad Politécnica de Valencia



Fuente: Aplicación del georadar para la mejora del rendimiento de una red hídrica. España

Figura 2.37. Perfil longitudinal de la tubería de, antes y después de vertir agua



Fuente: Aplicación del georradar para la mejora del rendimiento de una red hídrica. España

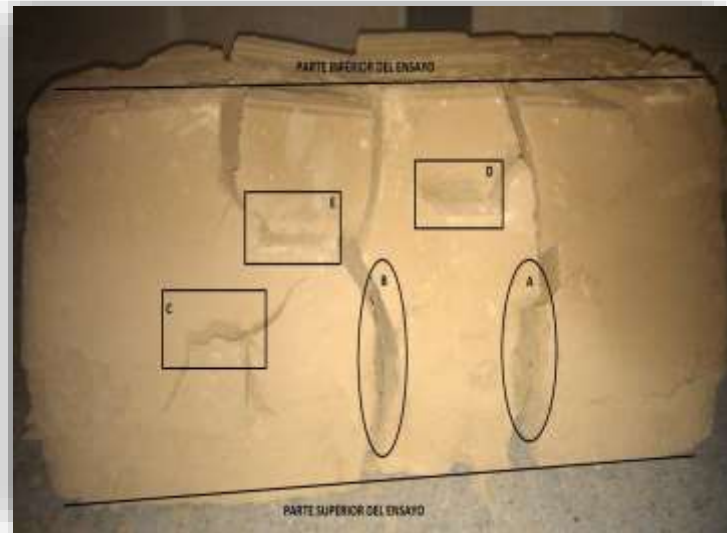
De esta manera para esta aplicación ha sido posible evaluar las respuestas y la eficacia del georradar como técnica no destructiva de localización de fugas y de tuberías, estas fugas han sido fácilmente identificables en los radargramas al igual que la identificación de cada tubería, mejorando así el rendimiento de la red objeto de estudio.

- Otro estudio que se realizó fue una “Detección de Grietas por Desecación en Arcillas Mediante GPR”, en Enero 2013. Mediante el uso del Georradar.

Es de importancia explicar el fenómeno del agrietamiento, es necesario establecer en que momento y bajo qué circunstancias se producen las fisuras en el suelo. Es en este punto donde las técnicas de prospección indirecta, y en

particular el georradar, pueden ser de especial interés al tratarse de métodos no destructivos que permiten observar lo que sucede en el interior del suelo. Mientras que la aparición de grietas superficiales permite observar su evolución en el tiempo, la técnica de georradar puede ser de ayuda para observar aquellas grietas que se forman en el interior del suelo.

Figura 2.38. Arcilla extraída de la jardinera



Fuente: Universidad Politécnica de Catalunya

De esta manera el georradar es usado para la detección de grietas en el interior del suelo en tiempo real los cuales han sido fácilmente identificables en los radargramas.²³

- Otro estudio que se realizó fue un “Patronamiento del Georradar para Medir Espesores en Pavimento”, en el Centro de Investigación de Obras Civiles de la Universidad de Los Andes.

²³ Detección de Grietas por Desecación en Arcillas Mediante GPR, Enero 2013, Universidad Politécnica de Catalunya.

Figura 2.39. Medición de la estructura del pavimento con georradar

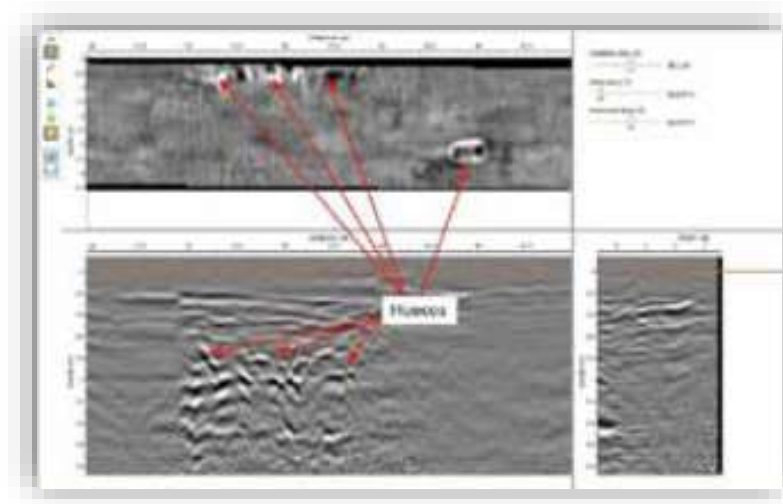


Fuente: Auscultar LTDA. Ensayos e Ingeniería Bogotá D.C.

El uso del georradar en la determinación de los espesores de estructuras de pavimentos constituye una herramienta de gran utilidad para evaluar uno de los parámetros más importantes en la evaluación del deterioro vial y su periodo de mantenimiento como son los espesores de la estructura existente, ya que constituye un método no destructivo de gran rendimiento y excelente precisión. Y demás experiencias acumuladas en los últimos años en pavimentos de carreteras como ser:

- Determinación de cavidades o huecos en profundidades.- El conocimiento pormenorizado del estado del pavimento en profundidad puede dar respuesta a multitud de patologías que se manifiestan de forma fehaciente en la capa de rodadura. Un ejemplo claro de este aspecto es la detección de zonas o puntos donde se observa la presencia de una cavidad, una zona de huecos o incluso una zona de lavado de finos.

Figura 2.40. Ejemplo de detección de huecos



Fuente: Auscultación en pavimentos Ing. David Almazán C.

Gracias a esta tecnología es posible detectar la localización en planta y la profundidad, o la capa, donde se origina esta patología.

Estas circunstancias pueden estar debidas a la existencia de un fallo local en el terreno de apoyo, a la presencia de agua por deficiencias del drenaje, construcciones localmente defectuosas, falta de compactación, o a la contaminación de capas.

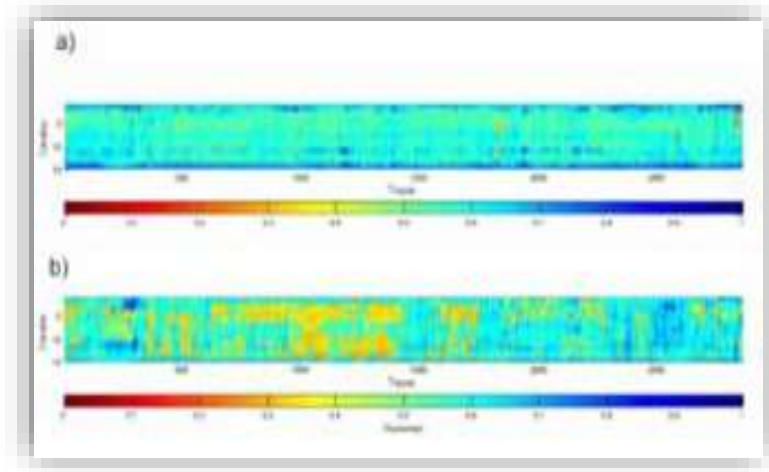
La toma de muestras inalteradas, mediante sondeos o extracciones, en las coordenadas indicadas por el equipo de auscultación, permitiría confirmar la causa que ha dado origen a la patología, y consecuentemente, determinar la medida correctora apropiada.

- Detección de zonas de acumulación de humedad.- La presencia de agua en la estructura de un pavimento, en su explanada, o incluso en el terreno de apoyo de esta, puede ser uno de los factores determinantes a la hora de analizar la vida residual de una carretera.

En ocasiones esta circunstancia puede estar debida a la rotura de canalizaciones de abastecimiento, saneamiento o drenaje, pero también puede deberse a otros factores como a las infiltraciones verticales o subhorizontales, a los fenómenos de capilaridad o a las deficiencias en los diseños de los drenajes de proyecto.

El conocimiento de esta circunstancia ha permitido minimizar multitud de intervenciones de mayor costo a nivel estructural. Es decir, las mejoras en la red de drenaje, pueden generar aumentos de la vida útil del firme a un coste muy reducido.

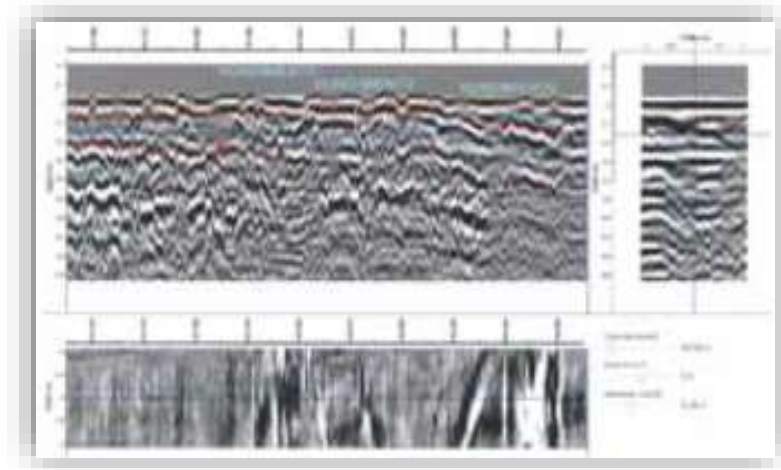
Figura 2.41. Ejemplo de detección de zonas de acumulación de humedad donde el color azul muestra la zona más húmeda y el color rojo la zona mas seca.



Fuente: Auscultación en pavimentos Ing. David Almazán C.

- Asentamientos, hundimientos o hinchamientos del terreno.- Las zonas de hundimiento, en general, están asociadas a presencia de acumulación de agua, mala compactación de las capas del pavimento, fallos locales del terreno de apoyo, asentamiento de alguna de las capas del pavimento, o a fatiga estructural del mismo.

Figura 2.42. Ejemplo de detección de hundimiento a determinada profundidad



Fuente: Auscultación en pavimentos Ing. David Almazán C.

Al igual que en los casos anteriores, mediante el empleo de este vehículo de auscultación GPR se puede detectar el foco que ha dado origen a la patología, en planta y en cota. Si bien, no conviene renunciar a las investigaciones complementarias, pues existen numerosas experiencias de éxito que demuestran su eficacia, teniendo en cuenta que el objetivo siempre es invertir en mejoras de la infraestructura, exclusivamente donde sea realmente necesario.²⁴

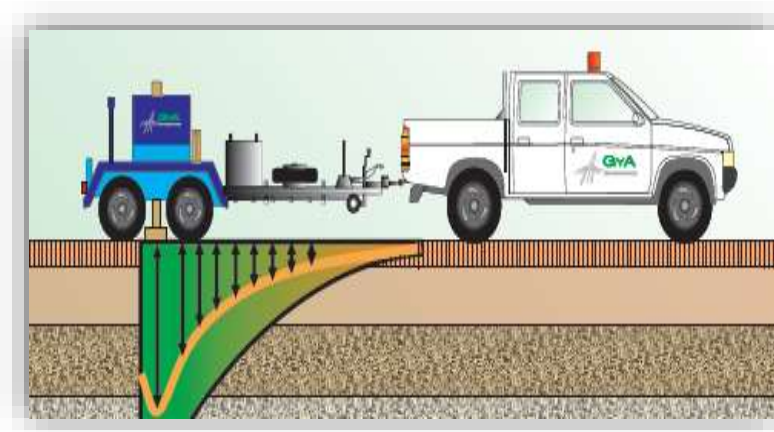
2.14. DEFLECTOMETRO DE IMPACTO

2.14.1. INTRODUCCIÓN

La deflexión es el parámetro universalmente empleado para la caracterización de la capacidad estructural de un pavimento. El ensayo consiste en la aplicación de una carga y la medición de la deformación producida en su superficie por efecto de la misma.

²⁴ Auscultación en pavimentos Ing. David Almazán C.

Figura 2.43. Deflectómetro de impacto



Fuente: Información del equipo deflectómetro de impacto Dynasted HWD

El uso de la Deflectometría de Impacto (FWD) para la evaluación estructural de pavimentos es una práctica cada vez más difundida, debido a las ventajas, tanto en la rapidez de la evaluación, como a los menores costos asociados, en comparación con los procedimientos tradicionales como ser extracción de testigos y calicatas.

El Deflectómetro de Impacto consta de:

- El vehículo tractor permite el transporte del tráiler de ensayo, desde donde el operador gobierna los ensayos mediante la unidad de control y ordenador de mando.
- Sistema hidráulico permite el levantamiento de las masas de ensayo hasta una determinada altura, desde la que se deja caer sobre una placa de ensayo de 30cm, de diámetro, pudiéndose aplicar al pavimento una carga variable a voluntad en función de las masas aplicadas y la altura de caída. El rango de variación de dicha carga se encuentra comprendida entre 4 y 24 Tn.

Se ha considerado conveniente ir reemplazando la extracción masiva de testigos en la recepción de pavimentos, por el uso de la Deflectometría de Impacto, o mediante la emisión y propagación de ondas electromagnéticas como es el GPR, efectuando solamente algunas extracciones complementarias para tener un mejor ajuste en las evaluaciones.

La utilización del deflectómetro permite la simulación del efecto producido al pavimento por el tránsito vehicular, mediante la acción de caída libre de un peso

controlado sobre una placa apoyada en la superficie de rodamiento para transmitir así una carga específica a la estructura del pavimento. Los desplazamientos verticales, producidos por efecto del impacto y sus tiempos de ocurrencia se registran por medio de sensores localizados bajo la carga.

El equipo almacena en una computadora los valores de los desplazamientos verticales registrados por cada uno de los sensores, y posterior a esta información se procesa para estimar el valor de “Los módulos de elasticidad” en las diferentes capas del pavimento mediante el programa ELMOD con este programa podemos determinar:

- Se obtiene el módulo de elasticidad de las capas del pavimento, esta información es útil para evaluar el pavimento y proyectar su rehabilitación o reconstrucción aplicando los métodos mecanísticos – empíricos.
- Se determina la vida remanente del pavimento, identificar capas débiles y el tipo de capa de refuerzo necesario.

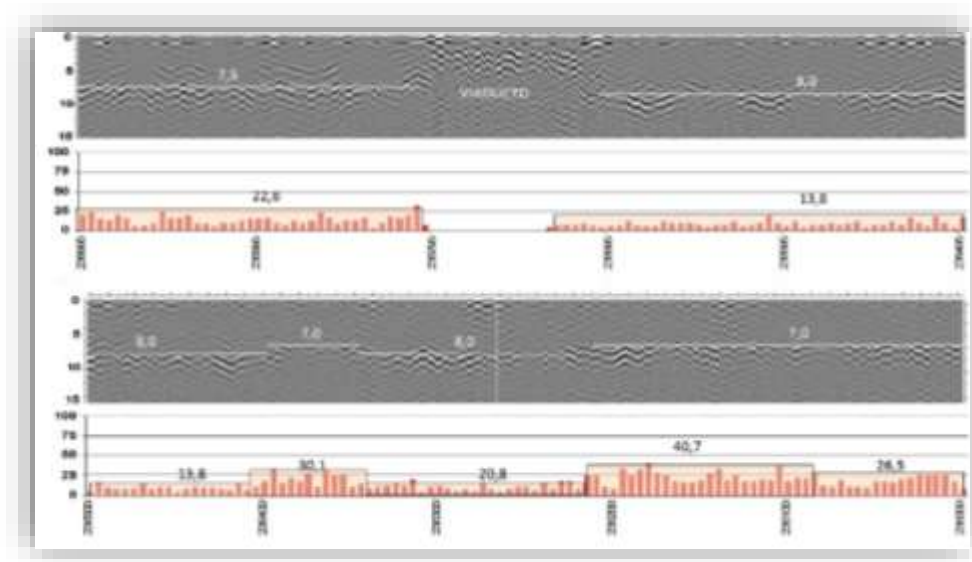
Se realizó un estudio con el uso del deflectómetro de impacto en Girona (España) relacionando los ensayos destructivos con los ensayos no destructivos.

Un tramo de la carretera se evaluó utilizando tres ensayos diferentes: GPR, deflexiones y Extracción de núcleos.

La extracción de testigos fue un proceso posterior a los dos ensayos, y se realizó en las zonas que se seleccionaron sobre los registros deflectométría y de GPR. En la figura 2.44 Se presenta un ejemplo que muestra los datos obtenidos en un tramo de carretera mediante un diagrama de deflexiones y un radargrama. Los registros se corresponden con un tramo de 1000 m.

En el diagrama de deflexiones (diagrama de barras) Por otro lado, en el radargrama se presenta el tiempo de propagación entre las reflexiones producidas en la superficie del pavimento.

Figura 2.44. Diagrama del estudio



Fuente: Universidad Politécnica de Cataluña, España

Comparando ambos diagramas puede observarse una cierta correlación entre el tiempo de reflexión y la deflexión característica.

Esta correlación indicaría que, a mayor tiempo de reflexión, menor deflexión del pavimento. Es un resultado esperado ya que, generalmente, un mayor tiempo de reflexión implica un espesor mayor de capa, asociada a una capacidad portante del pavimento más elevado.²⁵

Por otro lado, dado que el conocimiento del espesor real que existe en cada punto de la carretera es crucial para poder establecer una relación entre deflexiones y georradar (no basta con el espesor de proyecto, ya que éste no es el que hay en todos los puntos de la carretera y el mismo margen de error en la construcción de la misma hace variar considerablemente los resultados) para no tener que extraer testigos de la carretera que se quiera estudiar.

2.15. EXTRACTOR DE NÚCLEOS

2.15.1. DEFINICIÓN

²⁵ Estudio de la sensibilidad del Ground Penetrating Radar al contenido en huecos de las mezclas bituminosas en pavimentos de carreteras. Pedret - Pérez 07-18

Es muy importante mencionar que la realización de los núcleos es un elemento obligado en el desarrollo de los estudios de evaluación de pavimentos. No se puede inferir ni concluir nada si no se realizan núcleos de exploración.

A partir de la extracción de núcleos se verifican los espesores de la carpeta asfáltica preexistentes, garantizando unas condiciones homogéneas en todo el tramo.

Figura 2.45. Rotarex o extractor de núcleos



Fuente: Laboratorio central ABC

2.15.1.1.EQUIPOS Y MATERIALES

Para realizar extracciones de núcleos en carreteras se necesita un equipo Rótarex o Extractor centrífugo deberá estar refrigerado con agua.

2.15.1.2.CONDICIONES GENERALES

2.15.1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Es un equipo para la extracción de núcleos o testigos del pavimento son extraídas mediante un dispositivo metálico construido en acero, de forma tubular, con corona de corte adiamantada y refrigerada por agua.

2.15.1.2.2. OBSERVACIONES DE USO

Antes de extraer un testigo o núcleo del pavimento se debe verificar que se encuentre limpio y despejado.

Localizar el equipo a no menos de 60cm de los bordes de la pista siendo preferible colocarlo dentro del tercio central de ella.

Las brocas deben ser adecuadas en cuanto a calidad y dimensiones deben encontrarse en buenas condiciones normalmente para pavimentos de asfalto se usan brocas de 4 pulgadas (100mm).

2.15.1.2.3. PROCEDIMIENTO

En el caso de los testigos, la información es directa. Se obtiene el espesor de cada capa midiendo directamente del testigo.

La extracción de los testigos se realiza mediante una broca. Dicho artilugio es un dispositivo metálico construido en acero, de forma tubular, con corona de corte adiamantada y refrigerada por agua.

Se inicia el corte a baja velocidad y presión moderada, hasta que los dientes de la broca penetran en el pavimento. Una vez alcanzada esta condición, se aumenta la velocidad y la presión y se mantiene constante para asegurar una geometría uniforme en el testigo.

Una vez extraídos e identificados, se depositan en bolsas de polietileno de alta densidad y se colocan en cajas de embalaje, impermeables, sólidas, con tapa y con aserrín para evitar que se alteren sus propiedades durante el traslado al laboratorio.

A partir de los datos obtenidos a través del tratamiento de la información se pasa al estudio y relación de los mismos.

2.15.1.2.4. RECOMENDACIONES

En las extracciones en pavimentos asfálticos, se debe verificar que la temperatura superficial no sea demasiado elevada, para evitar que el testigo se disgregue durante la operación.

Se debe depositar los núcleos en bolsas de polietileno de alta densidad para evitar que se alteren sus propiedades.

Los núcleos deben ser almacenados en lugares apropiados sin luz solar directa a temperatura ambiente entre 10°C – 30°C a objeto de mantener inalterada su condición original.

2.15.2. PIE DE METRO

2.15.2.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Este instrumento se utilizara para medir el espesor de la carpeta asfáltica con una precisión de 0,1 mm.

En el caso de muestras simples de una sola capa le medición del espesor debe efectuarse en el manto del cilindro y de acuerdo al procedimiento que se indica a continuación:

Tome cuatro medidas distanciadas entre ellas en un cuarto de circunferencia 90°. El espesor de la muestra corresponderá a la media aritmética de los cuatro valores obtenidos.

Cuando el espesor obtenido no cumple con las especificaciones de la obra toma otras cuatro medidas en los puntos medios de las anteriores. El espesor de la muestra será el promedio de las ocho determinaciones.

Figura 2.46. Vernier



Fuente: Laboratorio de la ABC, guía de asfaltos

2.15.2.2.OBSERVACIONES EN EL USO

Cuando se especifique el espesor en cm, las lecturas deben realizarse con aproximación a 0,1 cm.

Cuando se especifique el espesor en mm, las lecturas deben realizarse con aproximación a 0,1 mm.

2.15.2.3.RECOMENDACIONES

La medición de espesor no debe efectuarse sobre muestras deformadas o quebradas, ya sea producto de la extracción en terreno (Caso testigos).

Asimismo no deberán ensayarse las muestras que sufran deterioro durante su almacenamiento previo a la medición.

Las muestras de ensayo deben estar limpias y libres de todo materia extraña adherida.²⁶

2.16. TEORÍA DEL ENSAYO PARA DETERMINAR LOS PESOS ESPECÍFICOS BULK DE LOS NÚCLEOS ASTM D 1188

2.16.1. INTRODUCCIÓN

Esta norma describe el procedimiento para determinar la gravedad específica Bulk de núcleos compactados de mezclas asfálticas recubiertas de parafina, a través de muestras que contengan espacios vacíos o interconectados o que absorban más del 2% de agua por volumen.

La extracción de los núcleos tomados del pavimento se lo debe realizar con un saca núcleos, teniendo cuidado para evitar la distorsión o agrietamiento de los núcleos.

Estas muestras deberán estar libres de materiales extraños los cuales deben ser guardados en bolsas evitando así alteraciones a los núcleos a la hora de llevarlos a laboratorio.

2.16.2. EQUIPO

Los equipos necesarios para este ensayo son los siguientes:

- Balanza, con una aproximación de 0.01 gr
- Baño de agua, para una inmersión de la muestra en el agua
- Parafina

2.16.3. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

²⁶ Manual de ensayos de suelos y materiales, asfalto

- Debemos pesar el núcleo sin parafina
- Sobre una superficie dura cortamos piezas de parafina para luego derretirla.
- Cubrimos toda la superficie del núcleo con parafina derretida, en una capa suficientemente gruesa como para que selle todos los vacíos superficiales.
- Dejar enfriar al aire, a la temperatura ambiente.
- Seguidamente pasamos a realizar el pesaje del núcleo recubierto con la parafina.
- Determinamos el peso de la muestra recubierta y sumergida en un baño de agua.

2.16.4. CÁLCULOS

Determinamos la gravedad específica Bulk de los núcleos recubierta, de la siguiente manera:

$$\text{Gravedad específica bulk} = \frac{A}{\frac{D - E}{1} - \frac{D - A}{0,91}} * 1$$

Donde:

A = Peso del núcleo sin parafina, en (gr)

D = Peso del núcleo con parafina, en (gr)

E = Peso del núcleo sumergido en agua, en (gr)

Densidad de la parafina es 0,91 g/cm³

Densidad del agua es 1 g/cm³

2.17. TEORÍA DEL ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS RICE ASTM D 2041

2.17.1. INTRODUCCIÓN

Esta norma describe la determinación de la densidad máxima teórica de las mezclas asfálticas.

2.17.2. EQUIPO

Los necesarios para este ensayo son los siguientes:

- Recipiente, para el contenido de la muestra
- Balanza, con una aproximación de 0.01 gr
- Bomba de vacío o aspirador de agua, capaz de evacuar el aire del recipiente de vacíos a una presión residual de 4.0 kPa o 30 mm Hg.
- Manómetro de presión, se utiliza para verificar que la presión especificada se aplique al recipiente y deberá ser capaz de medir una presión residual de 4.0 kPa o 30 mm Hg.
- Termómetro, con un máximo de error de 0.5 °C.
- Baño con agua, para una inmersión de la muestra.
- Válvulas de vacío, para facilitar el ajuste del vacío que se aplica en la cámara de vacío.
- Horno, capaz de mantener a una temperatura constante de 110 ± 5 °C.

2.17.3. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

- Disgregar la muestra con las manos previo colocado al horno teniendo cuidado de no romper el agregado.
- Una vez realizado el disgregado debemos enfriar la muestra a temperatura ambiente.
- Seguidamente pasamos a calibrar el recipiente llenamos el picnómetro de vacío con agua para realizar el pesaje en el aire, teniendo mucho cuidado de no atrapar aire en el proceso del mismo.
- Colocamos la muestra en un recipiente para luego pesarla designe este peso como.
- Después del pesaje añadir agua al recipiente para cubrir totalmente la muestra.

- Colocamos la tapa al picnómetro de vacío, para luego colocar al dispositivo de agitación mecánica y sujetar adecuadamente a la superficie del aparato para comenzar la agitación.
- Una vez asegura al dispositivo de agitación debemos inmediatamente eliminar el aire atrapado en la muestra aumentando gradualmente la presión de vacío hasta que el manómetro de presión residual indique 3,7+/-0,3 kPa el vacío debe lograrse alrededor de 2 min para luego liberar gradualmente la presión de vacío usando la válvula de alivio.
- Inmediatamente después de la remoción del aire atrapado procedemos a llenar lentamente el picnómetro con agua, tratando de no introducir aire en la muestra.
- Medir la temperatura del agua en el picnómetro de vacío, retiramos el termómetro para luego llenarlo completamente de agua.
- Seguidamente procedemos a realizar el pesaje determinando la masa del contenedor, muestra y la tapa.

2.17.4. CÁLCULOS

Calculamos la Densidad Máxima Teórica de los núcleos de la siguiente manera:

$$\text{Densidad Maxima Teorica} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} * 1$$

Donde:

A = Peso del recipiente, en (gr)

D = Peso del recipiente + agua + muestra, en (gr)

B = Peso del recipiente + agua, en (gr)

C = Peso de la muestra + recipiente, en (gr)

Densidad del agua es 1 g/cm³ ²⁷

²⁷ Manual de ensayos de suelos y materiales, asfaltos

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA OBTENCIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo explica toda la aplicación práctica del proyecto, se realiza una descripción general de la localización, ubicación, muestreo, equipos complementarios, calibración del equipo en campo, toma de lecturas en el tramo con el uso del equipo, previo almacenamiento en el programa Mala Ground Visión, ensayos de extracción de núcleos en el tramo de estudio y manejo del programa para el procesamiento de datos como es el RadExplorer.

3.2. UBICACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO

El tramo de estudio “Uyuni – CondoK”, se ubica en el límite de los Departamentos de Oruro y Potosí (**Anexos 1**), correspondiendo 30+380 km al Departamento de Oruro y

135+010 km al Departamento de Potosí, entre las siguientes coordenadas geográficas (DATUM WGS-84) aproximadas:

Tabla 3.1. Coordenadas geográficas del tramo de estudio

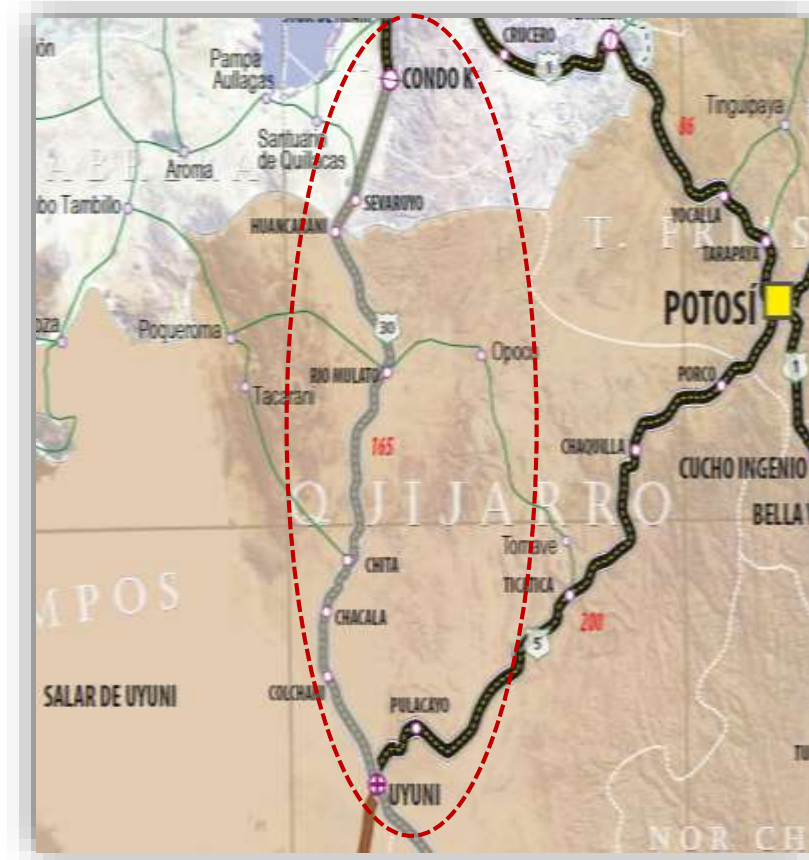
Latitud: 19°34'60" S
Longitud: 67°19'59"O

Fuente: DBC Revisión, complementación y actualización del (TESA) y Supervisión de la Carretera cruce CondoK – Uyuni

El sector Uyuni – Condo K forma parte de la carretera Villazón – Tupiza – Uyuni – Huancarani - Huari y Challapata (cruce carretera Oruro – Potosí). El tramo en cuestión se inicia en la población de Uyuni y concluye en el Cruce de Condo K, siguiendo una trayectoria en dirección Sud Este, comunicando en su trayecto varias poblaciones además de servir como carretera colectora de varias poblaciones ubicadas en su área lateral de considerable movimiento económico debido a sus actividades de tipo agrícola y minera.

La longitud total considerada para este proyecto es de 165+390 km, teniendo como punto de inicio la progresiva 00+000, ubicada en la población de Uyuni y como punto final el cruce de Condo K progresiva km 165+390.

Figura 3.1. Ubicación del tramo de estudio



Fuente: Mapa ABC Bolivia

3.2.1. Caracterización del tramo de estudio

El diseño del tramo de estudio “Uyuni – CondoK” tiene una longitud total de 165,390 km.

- Con una vida útil de 10 años aproximadamente.
- Berma con carpeta. Sección variable de 5 a 3 cm
- % de vacíos en obra al 97%, de compactación hasta el 6 %
- Cemento asfáltico convencional

De acuerdo a la información técnica, se utilizaron los siguientes parámetros:

Tabla 3.2. Parámetros de diseño

Características	Valor adoptado
-----------------	----------------

Categoría de la Carretera	Camino colector
Derecho de vía	50m a cada lado
Volumen de tránsito diario	Superior a 300
Calzada	Doble 7 m
Topografía	Llana
Velocidad de proyecto (km/hr)	80
Peralte Máximo (%)	7
Radio mínimo (m)	215
Pendiente máxima en rectas (%)	2.13
Valor de K mínimo en curvas convexas (m)	74.28
Valor de K mínimo en curvas cóncavas (m)	89.84
Ancho de carriles de circulación (m)	3.50
Ancho de bermas mínimas a cada lado (m)	1
Pendiente en bermas	2.5
Talud de terraplén	1:2 (v:h)
Talud de corte	1:1

Fuente: DBC Revisión, complementación y actualización del (TESA) y Supervisión de la Carretera cruce CondoK – Uyuni

En el siguiente cuadro, se presenta la estructura del pavimento del tramo “Uyuni – CondoK”.

Tabla 3.3. Estructura del pavimento

Capa considerada	Capas requeridas	Espesor (cm)
	Carpeta Asfáltica	5.0

Terreno Natural (M.R. =11,210 psi)	Capa Base Triturada CBR 80 %	20.0
C.B.R.= 15%	Capa Sub-base granular CBR 30%	26.0

Fuente: DBC Revisión, complementación y actualización del (TESA) y Supervisión de la Carretera cruce CondoK – Uyuni

3.2.2. Datos del diseño del pavimento

Tabla 3.4. Características del cemento asfáltico

Stratura Betupen Plus 85 - 100

Fuente: ABC (Administradora Boliviana de Carreteras)

Cemento asfáltico					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación
			Mínimo	Máximo	AASHTO
Peso específico	gr/cm ³	1.00	1.00	1.05	T-228
Punto de inflamación	°C	251.0	232		T-48
Penetración a 25°C, 100 gr, 5seg	mm.	86.7	85	100	T-49
Viscosidad Saybol Furol a 135°C	seg.	87.0	85		T-202

Tabla 3.5. Características de los agregados

Agregados				
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones	Designación

			Mínimo	Máximo	AASHTO
Peso específico agregado (3/4")	gr/cm ³	2.666	1.00	1.05	T-85
Peso específico agregado (3/8")	gr/cm ³	2.700	232		
Peso específico agregado fino	gr/cm ³	2.680			T-84
Peso unitario agregado (3/4")	gr/cm ⁴	1.442			
Peso unitario agregado (3/8")	gr/cm ⁵	1.359			
Peso unitario material fino	gr/cm ⁶	1.560			
Desgaste de los Ángeles (3/4")	%	28.1		40	T-96
Desgaste de los Ángeles (3/8")	%	29.26		40	T-96
Durabilidad agregado (3/4")	%	5.5		12	T-104
Durabilidad agregado (3/8")	%	5.42		12	
Durabilidad agregado fino	%	2.13		12	
Limite plástico	%	N.P.			T-90
Caras Fracturadas	%	96.25	75		
Equivalente de arena	°C	82.4	45		T-176

Tabla 3.6. Características de la Mezcla

Características de la Mezcla	Especificaciones
-------------------------------------	-------------------------

Descripción	Unidad	Valor	Mínimo	Máximo
Peso específico de C.A.	gr/cm ³	1	1	1
Densidad teórica	gr/cm ³	2.458		
Densidad real de la mezcla	%	2.3625		
Vacíos totales	%	3.03	2	4
Vacíos de agregado mineral	%	15.836	> 15	
Relación bitumen vacíos	%	80.7	75	82
Estabilidad	Libras	2553.3	1500	
Fluencia	(1/100'')	9.6	8	18
Cemento asfáltico	%	5.4		
Capacidad de soporte Marshall		293.6295	140	
Concentración crítica (Cs)		0.362		
Concentración en volumen (Cv)		0.312		
Relación Cv/Cs		0.8613		
Estabilidad /Fluencia	Kg/cm	4749.7	4600	
Índice de compactación		6.452	> 6	
Resistencia remanente	%	90.7	> 85	
Adherencia	%	100		
Temperatura de aplicación	°C	123-124		
Temperatura de compactación	°C	121-122		
Caras fracturadas	%	96.25	75	
Equivalente arena	%	82.4	≥ 45	

Fuente: ABC (Administradora Boliviana de Carreteras)

3.2.3. Recopilación de datos históricos del tramo de estudio

Actualmente el Proyecto se desarrolla sobre una infraestructura vial existente, perteneciente a la RF-30 de la Red Vial Fundamental de Carreteras del País.

En su trayectoria la línea del eje, atraviesa las siguientes poblaciones ubicadas en las progresivas que se indican:

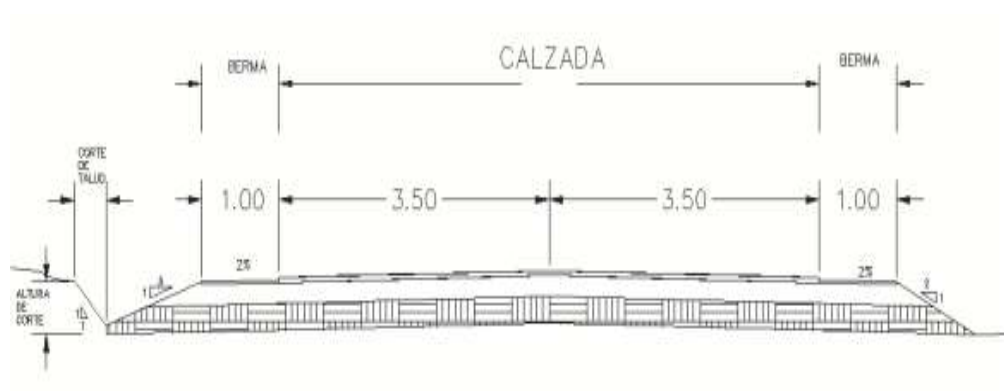
Tabla 3.7. Poblaciones cerca del tramo de estudio

Poblaciones		
Población	Departamento	Km
Uyuni	Potosí	00+000
Colchani	Potosí	20+500
Chita	Potosí	42+500
Rio Mulatos	Potosí	97+600
Huancarani	Potosí	134+500
Sevaruyo	Oruro	141+900
Cruce CondoK	Oruro	165+390

Fuente: DBC Revisión, complementación y actualización del (TESA) y Supervisión de la Carretera cruce CondoK - Uyuni

La capa sub-base está constituida por material seleccionado, sirve de capa de drenaje al pavimento, controla la ascensión capilar del agua proveniente de los niveles freáticos cercanos, o en su caso de inundación del área colindante a los taludes de la carretera, esta capa también protegerá al pavimento del incremento de volumen producido por el congelamiento de agua capilar.

Figura 3.2. Sección Transversal Típica



Fuente: Especificaciones técnicas del tramo Uyuni – Condo K

3.3. CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO DE MEDICION

Los ensayos realizados en el tramo Uyuni – Condo K para determinar el espesor de carpeta asfáltica son:

Tabla 3.8. Información de los equipos utilizados

Ensayo	Equipo	Fecha de ensayo
Inspección con el georradar	GPR (Sistema Mala ProEx)	Julio del 2016
Extracción de Núcleos	Rotarex o Extractor de nucleos	Julio del 2016

Fuente: Elaboración propia

A continuación se explican detalladamente distintos criterios que se deben tomar en cuenta para los ensayos de medición utilizados en el tramo de estudio Uyuni – CondoK.

3.3.1. Inspección con el georradar

El Georradar utilizado para este trabajo es un equipo que está compuesto por dos antenas, una antena transmisora de ondas electromagnéticas de (800 Mhz), y otra antena receptora de (2.3 Ghz), una unidad de control y almacenamiento de datos y un dispositivos de visualización (Computadora portátil). Mas accesorios son: Odómetro equipamiento como los vehículos de transporte y otros. La técnica se basa en la emisión de una serie de pulsos electromagnéticas hacia el pavimento por parte de la antena transmisora, estas ondas una vez que penetran el pavimento parte de la señal es reflejan

hacia la superficie más claramente a la antena receptora cuando esta onda encuentran un material con propiedades electromagnéticas diferentes a las del material que lo antecede; esto a medida que el instrumento se desplaza longitudinalmente sobre el sector de estudio.

La velocidad que deberá imprimir el vehículo para realizar las lecturas de medición en el tramo de estudio está alrededor de los 40 - 50km/h. Se utiliza un sistema biestatico con una antena transmisora y una antena receptora separadas durante la adquisición de datos las cuales son las siguientes:

- **Antena de alta frecuencia (HF) de 2.3 Ghz.-** Es una antena adecuada para las mediciones de alta resolución, con una penetración más profunda en el rango Mala HF, que esta aproximadamente a 40cm, es una caja blindado que a su vez se puede montar en una rueda de carro.

Esta caja blindada protege al elemento de señales externas (ruido)

¡Nota! Las antenas de alta frecuencia necesitan un tiempo de calentamiento previo mediciones, alrededor de 10 minutos.

- **Antena apantallada de 800 MHz** Es una antena, que se considera una relación capacidad de penetración - resolución adecuada para la obtención de diagramas de reflexión acuerdo con los objetivos expuestos.

Tabla 3.9. Especificaciones Técnicas de las Antenas

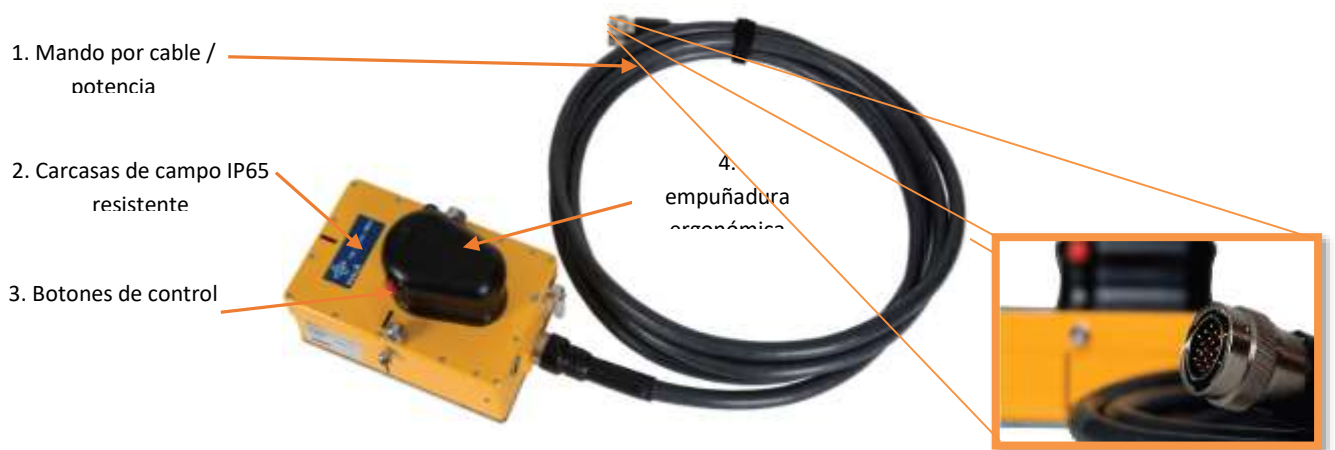
Antenas Utilizadas	Dimensiones	Peso	Aplicaciones
Antena de 800 Mhz	16 x 9 x 11cm	2,6 kg	Determinación espesores
Antena de 2.3 Ghz	38 x 9 x 12cm	0,6 kg	Determinación espesores

Fuente: Operación manual MALA Profesional Explorer (ProEx™)

Figura 3.3. Antena de 800 Mgz



Figura 3.4. Antena de 2,3 Ghz



Fuente: Elaboración propia

Las antenas ofrecen una forma fiable y no destructiva para la recolección de espesores sobre las carreteras en las que se utilizan.

3.3.2. Extracción de Testigos

El extractor utilizado en el tramo es de la marca Controls, equipo de gran versatilidad pequeño, liviano para moverlo se instalan con gran facilidad en el lugar requerido es accionado por un motor, cuenta con una broca de 4 pulgadas (100 mm).

La extracción de los testigos se realiza mediante una broca en el tramo de estudio. Dicho artificio es un dispositivo metálico construido en acero, de forma tubular, con corona de corte adiamantada y refrigerada por agua.

Se empieza realizando el corte a baja velocidad y presión moderada, hasta que los dientes de la broca penetran en el pavimento. Una vez alcanzada esta condición, se aumenta la velocidad y la presión y se mantiene constante para asegurar una geometría uniforme en el testigo como se muestra en la (fotografía 3.1).

Fotografía 3.1. Extracción de Núcleos en el tramo



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 3.2. Núcleos Extraídos del Tramo



Fuente: Elaboración propia

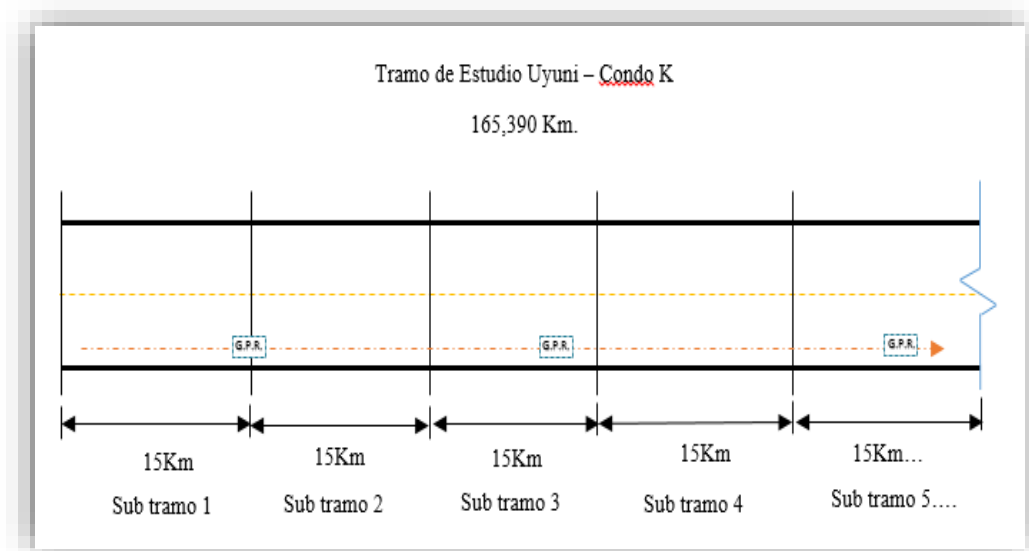
Una vez extraídos e identificados, se depositan en bolsas de polietileno de alta densidad y se colocan en cajas de embalaje, impermeables, sólidas, con tapa y con aserrín para evitar que se alteren sus propiedades durante el traslado al laboratorio.

3.4. ELECCIÓN DE LAS UNIDADES DE ESTUDIO EN EL TRAMO

El muestreo para nuestro estudio se lo realizará en el tramo en estudio de la siguiente manera:

- Esquema de trabajo para la aplicación del GPR en el tramo de estudio.

Figura 3.5. Esquema grafico de la aplicación de la técnica “GPR” en el tramo de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Considerando el largo del tramo se tiene una longitud de 165.390 km, el tramo se dividirá en sub tramos de 15 km, para el procesado de datos en el programa, respectivamente teniendo como dato el número de muestras que se obtendrá en todo el tramo realizado con el Georradar.

$$N = \frac{L_t (km)}{d (km)}$$

Dónde: d= Distancia cada cuanto se procesaran las lecturas

L_t = Largo total del tramo

$$N = \frac{165,390 \text{ km}}{15 \text{ km}}$$

N= El número total de sub tramos

$$N = 11.026$$

$$N = 11 \text{ Sub tramos}$$

Según el esquema anterior se denota que se tendrá un total de 11 sub tramos, de 15 km cada uno a lo largo de todo el tramo de estudio.

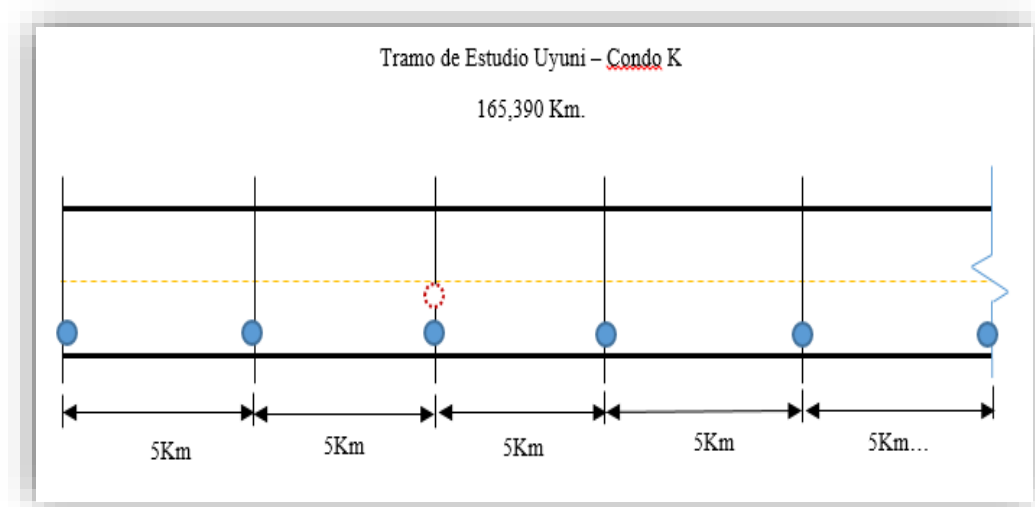
Con el GPR se hará una lectura de todo el tramo, realizando una pasada por el carril derecho de ida huella externa, con una velocidad promedio de 40 km/h,

dando como resultado los radagramas de todo el tramo y se elegirá dependiendo del largo del proyecto, cada que distancia se sacaran los espesores, en nuestro caso se sacaran cada 1.5 km hasta llegar a los 165,390 km que tiene todo el tramo, la distancia de los 15 km, nos facilitara en el procesamiento de datos en el programa Rad Explorer, donde se va introducir los radagramas registrados dentro de los primeros 15 km, luego los otros 15 km hasta completar los 11 sub tramos.

También con la utilización del Georradar GPR se permitirá hacer un inventario de drenajes referentes a las alcantarillas de todo el tramo de estudio.

- Esquema de trabajo para la extracción de núcleos en el tramo de estudio.

Figura 3.6. Esquema grafico de la aplicación de la técnica “GPR” en el tramo de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Considerando el largo del tramo se tiene una longitud de 165.390 km, se sacara 1 núcleo cada 5 km, respectivamente teniendo como dato el número de muestras que se obtendrá en todo el tramo realizado con el extractor de núcleos.

$$N = \frac{L_t (km)}{d (km)}$$

Dónde: L_t = Largo total del tramo.

d= Distancia de cada cuanto se tomaran las muestras

$$N = \frac{165,390 \text{ km}}{5 \text{ km.}}$$

$$N = 33 \text{ (Nucleos)}$$

$N = 46$ (Núcleos) debido a condiciones del pavimento

Según el esquema anterior se denota que se tendrá un total de 33 núcleos extraídos a lo largo de todo el tramo de estudio, que en este caso es el carril derecho de ida, huella externa, pero esta cantidad de núcleos se modificó a 46 núcleos, esto debido a las condiciones del pavimento en el tramo de estudio.

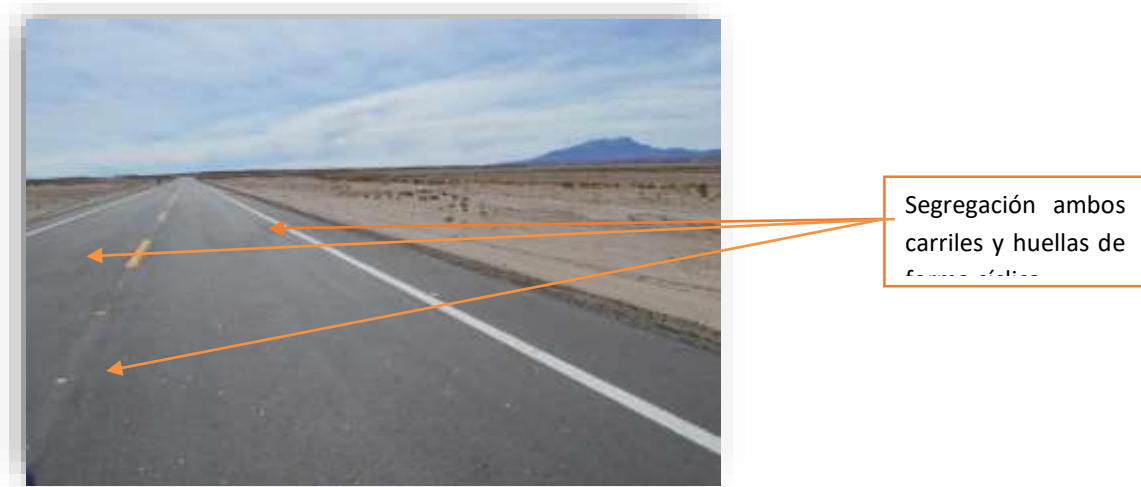
La verificación del tramo se hace dependiendo del trabajo y la magnitud del mismo para que se tome el número de muestras, y además es a criterio para determinar las muestras.

3.5. CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL TRAMO DE ESTUDIO

En el proyecto se ha hecho una inspección visual al tramo, para hacer un inventario de fallas por ser carretera nueva.

En la inspección al tramo de estudio se observa lugares de segregación debido a diferentes factores, en la fotografía se evidencia el fenómeno de segregación en la terminación de la conformación de la carpeta asfáltica.

Fotografía 3.3. Tramo Uyuni – Cruce Condo K





Fuente: Elaboración propia

Este fenómeno de segregación está asociado con una textura rugosa, textura segregada y alto contenido de vacíos, bajos porcentajes de cemento asfáltico con características de esta patología esto se evidencia en ambos tramos debido al enfriamiento de la mezcla asfáltica modificada con polímeros.

Otro de los problemas identificados es la presencia de marcas del rodillo neumático en el proceso de compactación que baja surcos o acanalamientos a lo largo de los tramos, esto se evidencia de manera visual a horas muy tempranas en la mañana o al finalizar la tarde este fenómeno se distribuye a una compactación por enfriamiento de la mezcla esto se muestra en las siguientes fotografías.

Fotografía 3.4. Surcos o Acanalamientos: Tramo Uyuni – Condo K





Fuente: Elaboración propia

Otro de los problemas identificados es la presencia de desprendimientos de agregado grueso y fino, se originan oquedades, en las siguientes fotografías se muestran puntos blancos sobre la superficie se evidencia una alta densidad de estos desprendimientos estos desprendimientos es de manera generalizada.

Fotografía 3.5. Desprendimiento de agregados: Tramo Uyuni – Condo K



Fuente: Elaboración propia

Otro de los deterioros encontrados es la presencia de fisuras en el eje, estas fisuras no se deben a la contracción de la pintura, estas fisuras están presentes a lo largo del tramo carretero de manera discontinua como se muestra en las siguientes fotografías.

Fotografía 3.6. Fisuras en el eje: Tramo Uyuni – Cruce Condo K





Fuente: Elaboración propia

En la parte de anexos se tiene una planilla de inspección más a detalle sobre las fallas del tramo de estudio.

3.6. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE CARPETA ASFÁLTICA EN EL TRAMO DE ESTUDIO MEDIANTE EL USO DEL GPR

Los trabajos de campo y gabinete se los realiza en base a la norma ASTM D 4748.

Esta etapa corresponde al trabajo de campo, que consiste en la determinación de las lecturas con el georradar vs las dimensiones de los espesores obtenidos con el extractor de núcleos.

Para el trabajo de campo es necesario contar con las siguientes herramientas de apoyo:

- Cámara fotográfica
- Planillas de apoyo
- Tiza o yeso para marcar las progresivas
- Flexómetro

3.6.1. Procedimiento de aplicación del Georradar GPR

3.6.1.1. Armado del equipo GPR

El equipo cuenta con dos antenas que son instaladas en un dispositivo de remolque (Mala Road Cart) también el odómetro es instalado en la llanta trasera al igual que los cables de fibra óptica y cables normales.

Fotografía 3.7. Equipo GPR (Mala ProEx)



Fuente: Elaboración propia

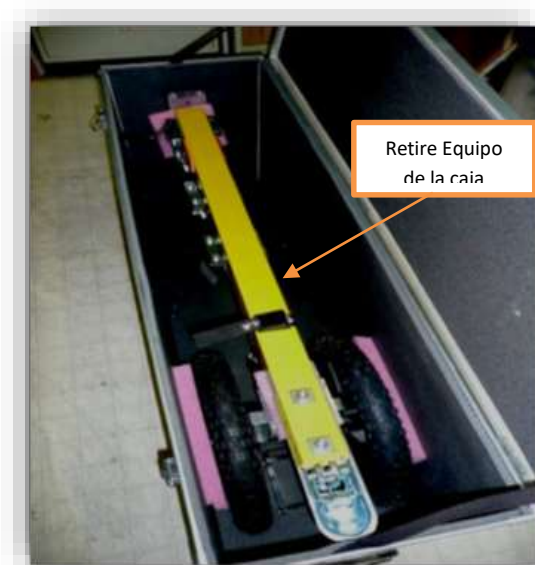
El equipo cuenta con los siguientes accesorios:

- Equipo con dos ruedas y soporte para antenas blindados de (250, 500 o 800 Mhz).
- Soporte de plástico negro para antenas blindadas HF de (1,2 o 2,3 Ghz) que se encuentran entre las ruedas.
- Acoplamiento gancho de remolque.
- Extensión de cable de antena HF.
- Enganche para remolque adicional

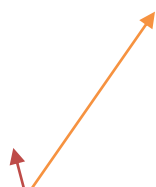
Figura 3.7. Equipo con sus demás accesorios



- **Armado General: Paso 1**



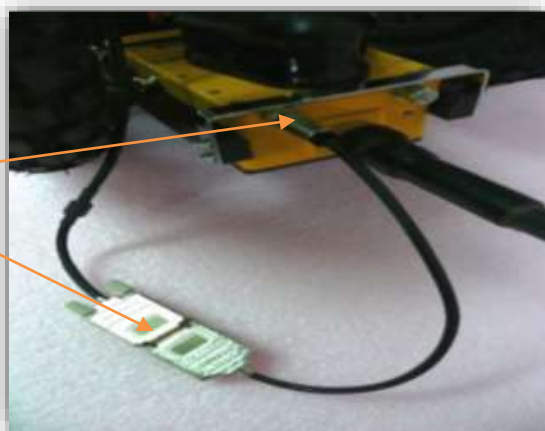
- **Armado General: Paso 2**





- Armado General: Opción de codificar

Nota: Si sólo se utiliza la antena de alta frecuencia, el codificador de la RoadCart puede ser conectado directamente a

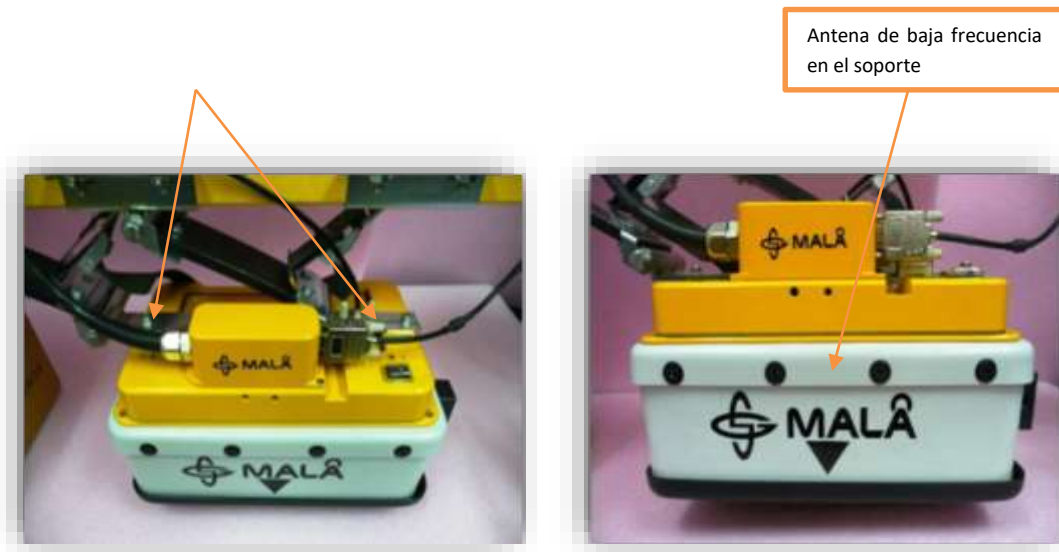


- Armado General: Paso 3



Monte la antena de baja frecuencia en el soporte

Nota: El uso de las correas, asegúrese de que la antena se ajusta a la altura correcta y está



3.6.1.2. Montaje del georradar GPR Sistema Mala ProEx al vehículo

El montaje se realiza en los predios del lugar del tramo de estudio, el cual se procedió de la siguiente manera:

- Desmontar el remolque y asegurar en la parte media con cuatro tornillos esto para enganchar al vehículo como se ve en la (fotografía 3.8)

Fotografía 3.8. Asegurado de pernos



- Enganchar el remolque al vehículo tomando todas las precauciones y revisando que este bien asegurado para evitar problemas en el trayecto del tramo.

Fotografía 3.9. Enganche al remolque



- Conectamos el alargador de la antena de baja frecuencia de 800 Mhz a la adaptación de la toma de poder en la parte trasera del automóvil, esta toma de poder ha sido adaptada al vehículo para facilitar el manejo a la hora de realizar las lecturas por el tramo (fotografía 3.10)

Fotografía 3.10. Conexión a la fuente de poder (Batería)



- Conectamos los cables de fibra óptica al módulo de interface “modulo óptico” se debe tener cuidado al realizar esta conexión al módulo porque de conectar mal podemos quemar el equipo, estos cables están marcados por siglas T (Transmisor), R (Receptor) y D (Datos) se debe verificar que la conexión se realice con las mismas iniciales respetando los nombres de los cables es decir T-T, R-R y D-D como se muestra en la figura (fotografía 3.11)

Fotografía 3.11. Conexión del alargador de la antena de baja frecuencia al módulo óptico



- Conexión del odómetro a la unidad de control (fotografía 3.12)

Fotografía 3.12. Conexión del odómetro a la unidad de control



- Alinear y conectar el alargador de la antena de alta frecuencia de 2,3 Ghz al Módulo Mala ProEx HF verificando que este se encuentre ajustado al módulo para evitar errores en la toma de datos (fotografía 3.13)
- Conectar la fuente energía que está adaptado a la batería, esta funciona a 12 voltios.(fotografía 3.14)

Fotografía 3.13. Conexión del alargador de la antena de alta frecuencia al Módulo Mala ProEx HF



Fotografía 3.14. Conexión de la fuente de energía a la unidad de control



- Tomar el cable multifibra, el cable de conexión a la batería y el cable de la antena de baja frecuencia y asegurarlo paralelo al remolque hasta llegar al tope y hacer pasar todos los cables por las adaptaciones en la camioneta para evitar que en trayecto se desenganchen y causen fallas en las lecturas al tramo (fotografía 3.13)

Fotografía 3.15. Cables asegurados al remolque



- Conectar el cable de entelnet para conectar el módulo central con el ordenador (fotografía 3.16)
- Cuando este todo conectado y asegurado el modulo central al asiento, esto para evitar que se desconecten los cables por el recorrido que realizara el vehículo, encender el modulo central, y empezaran a parpadear los foquitos de color rojo de los módulos de las antenas y sonara un tip, eso indica que todo está bien armado (fotografía 3.16)

Fotografía 3.16. Conexión del cable entelnet y Encendido del módulo central



- Prender la computadora portátil y colocar el programa con el que sacaremos los datos el cual es el Mala Ground Vision 2, en la pantalla principal del programa, si todo esta correcto e la tabla de herramientas se pondrá en rojo F5 y nos dará

la información de las dos antenas Eslot A “Modulo” y Eslot B “ Antena de alta frecuencia”(fotografía 3.17)

Fotografía 3.17. Encendido del programa Mala Ground Visión



Fuente: Elaboración propia

3.6.1.3. Manual rápido de funcionamiento del georradar aplicado al tramo de estudio

3.6.1.3.1. Configuración del sistema

La calibración del equipo se realiza de acuerdo a la norma ASTM D 4748, donde se hace la calibración del equipo con núcleos de los primeros 500 m del tramo, calibración de la movilidad, velocidad y distancia es decir calibración del odómetro del equipo.

La configuración del sistema se lo realiza de la siguiente manera:

- Encendido del equipo del computador
- Ingresamos al programa Mala Ground Vision el cual ya está instalado en el computador portátil (fotografía 3.18)

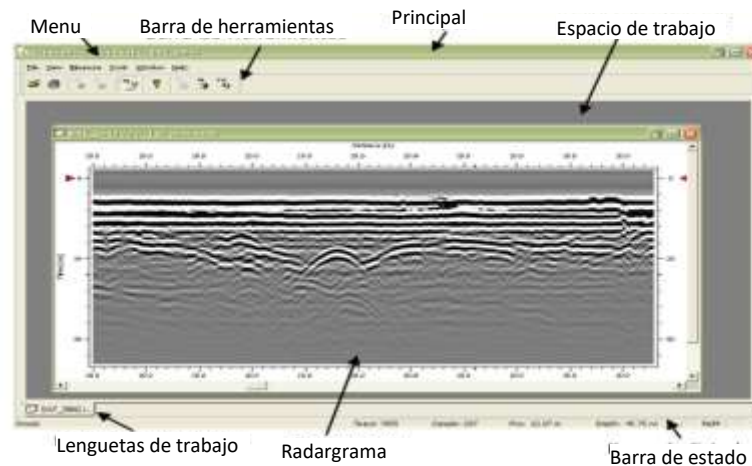
Fotografía 3.18. Ingreso al programa Mala Ground Visión



Fuente: Elaboración propia

Para la toma de datos la pantalla principal del programa Mala Ground Visión se presentara así.

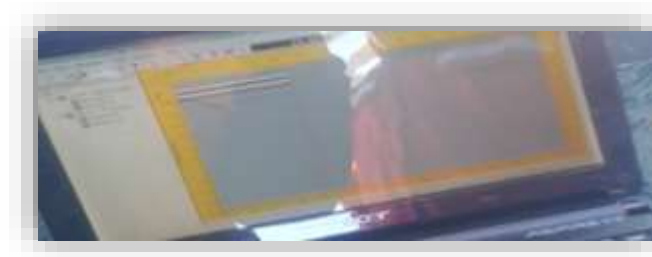
Figura 3.8. Pantalla principal del programa Mala Ground Visión



Fuente: Elaboración propia

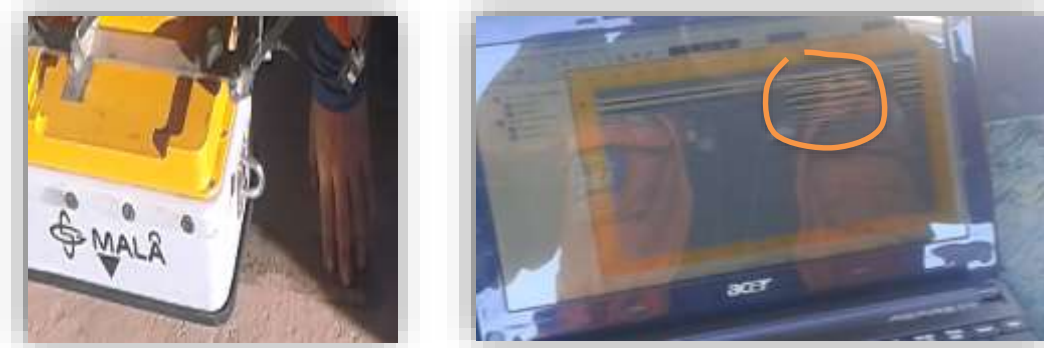
- Se va calibrar por tiempo, esto debido a que no estaremos en movimiento
- Dar click en “Medidas”, elegimos la opción “Tiempo”, Ingresamos a “Antena Setting” aquí busca la antena clic en la opción “Search” ahí buscara la señal de la antena, presionamos “Ok” antes de salir guardamos la carpeta con el respectivo nombre del proyecto y salimos.
- Dar click en F5, donde nos empezará a salir las lecturas que medirá el georradar pero por tiempo porque el equipo no está moviendo solo estamos realizando la calibración por tiempo, donde va mostrar la pantalla las lecturas por tiempo del espesor del suelo que se encuentra situado debajo del georradar como se muestra en la (fotografía 3.19)

Fotografía 3.19. Espesor medido por tiempo



- Se colocó una placa metálica debajo del georradar para ver el comportamiento de las ondas electromagnéticas sobre el medio de la placa metálica, donde se apreció la variación del radargrama en la pantalla. (fotografía 3.20)

Fotografía 3.20. Variación del radargrama respecto a una placa metálica



- Para facilitar el procesamiento de datos cuando utilizemos el programa Rad Explorer podemos anotar en que tiempo aparece alguna determinada variación, esto facilitara mucho porque a la hora que se realice el recorrido por el tramo, podemos mencionar que en el tiempo X se presenta tal cambio, de esta manera podremos desarrollar de mejor manera el procesado de datos.
- De la misma manera que con la placa metálica, se colocó debajo de la antena una botella con agua, dando variaciones diferentes en la pantalla del computador. (fotografía 3.21) El agua muestra otro tipo de variación con respecto a la del metal, eso es debido a sus constantes dieléctricas del agua, pues el agua va reaccionar más por ser más eléctrico.
- Para parar las lecturas presionamos F6.

Fotografía 3.21. Variación del radargrama respecto a una botella con agua



- Se realiza la calibración del odómetro, para esto el vehículo deberá estar en movimiento no importa la velocidad que imprima el vehículo lo que importa es la distancia en este caso es de la progresiva 43+000 hasta la progresiva 44+000.
- Dar click en “Medidas”, elegimos la opción “Wild” esta opción es para realizar las lecturas por odómetro, donde el vehículo deberá estar en movimiento para que nos de las lecturas requeridas del tramo. Ingresamos a “Antena Seting” aquí busca la antena clik en la opción “Search” ahí buscara la señal de la antena, presionamos “Ok”.
- Dar click en “Toolds” eliges la opción “Nueva calibración” en esta opción se da la distancia en la que se va calibrar el odómetro por ejemplo. Colocamos 1000 metros para ver cuantos pulsos “revoluciones “nos dará, luego elegimos la opción “Estar Calibreison” y automáticamente te da el nombre del archivo o se puede cambiar de acuerdo a lo requerido.
- Debemos ubicar el eje de la rueda del equipo donde está instalado el odómetro, con respecto a la progresiva 43+000 para realizar la calibración. (fotografía 3.22)

Fotografía 3.22. Ubicación del edómetro con respecto a la progresiva



Fuente: Elaboración propia

- Una vez cambiado todos los parámetros de medición procedemos a la calibración donde la pantalla del computador nos va ir mostrando los pulsos a medida que el vehículo avance. (fotografía 3.23)

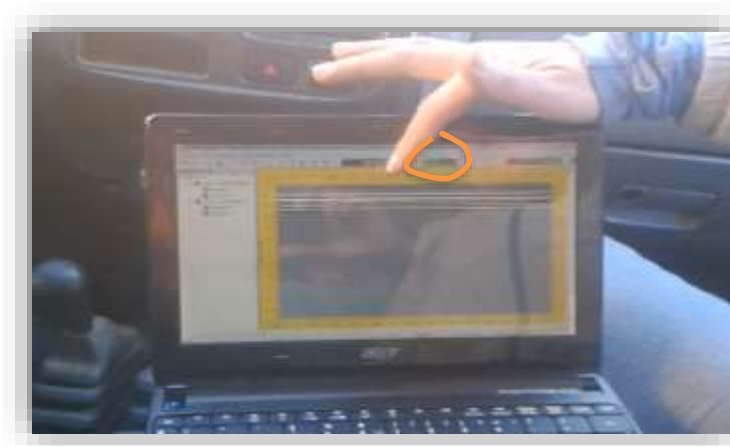
Fotografía 3.23. Calibración Odómetro



Fuente: Elaboración propia

- Debemos llegar a la progresiva 44+000 haciendo coincidir el eje de la llanta del equipo donde está instalado el odómetro, luego click en “Establecer calibración” para guardar la calibración y para finalizar “Ok”.
- Una vez ya calibrado el odómetro buscamos el nombre de la carpeta con la cual ha sido guardada la calibración, clic F5 para proceder a realizar las lecturas de todo el tramo de estudio.
- El mismo programa me muestra si se está excediendo la velocidad señalando de diferentes colores para cada velocidad.

Fotografía 3.24. Variación de velocidades



Fuente: Elaboración propia

Nota: Es recomendable anotar en que tiempo pasan las variaciones que se muestre en la pantalla del computador mientras el equipo se desplaza por el tramo, señalando cualquier variación ya sea un puente, una alcantarilla, un badén y demás, colocando iniciales las cuales ayudaran a la hora de realizar el procesamiento de datos en el programa Rad Explorer, estas señales me aparecerán en el programa como una línea punteada mencionando de donde a donde se colocó esa inicial. (Fotografía 3.25)

Fotografía 3.25. Identificación de los tiempos en los que se suscita las variaciones



Fuente: Elaboración propia

3.6.1.4. Procedimiento a seguir con el GPR

La información se recolecta con el Georradar (Sistema Mala ProEx) 13 de junio del 2016, bajo condiciones climáticas que permiten el correcto funcionamiento de los equipos y la confiabilidad en los datos adquiridos, esto es en un clima sin lluvia.

Al inicio de los trabajos se hará:

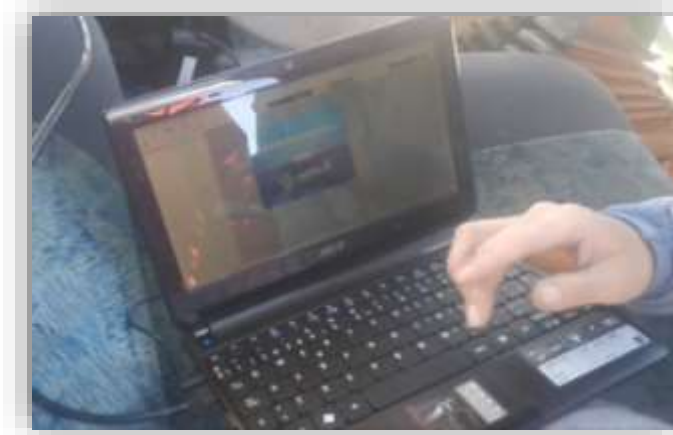
- Un control de los espesores donde se hace una pasada con el Georradar por un tramo de prueba de 500 m, y con el extractor de núcleos sacamos una muestra del mismo tramo de prueba.
- Procedemos a medir el núcleo con ayuda de un Pie de rey (escalímetro) obteniendo así cuanto es el espesor del núcleo extraído.
- Para luego entrar el programa RadExplorer procesando ese dato para verificar si el georradar (antenas) nos da el mismo espesor que el núcleo extraído en el tramo de prueba, si da el mismo espesor ya está calibrado el

equipo para realizar las posteriores lecturas en todo el tramo de estudio, si no da el mismo espesor procedemos a modificar la frecuencia de las antenas esto se realiza en el programa Ground Vision y volvemos a calibrar hasta obtener los mismos espesores determinados con el procesamiento del programa RadExplorer y las mediciones de los Núcleos extraídos de esos 500 m de prueba en el tramo.

Una vez realizado la prueba de los 500m para el calibrado del equipo, procedemos a realizar la recolección de los datos es decir las lecturas con el georradar de la siguiente manera:

- En el programa Ground Vision Dar click en “Medidas”, elegimos la opción “Wild” esta opción es para realizar las lecturas por odómetro, donde el vehículo deberá estar en movimiento para que nos de las lecturas requeridas del tramo. Ingresamos a “Antena Seting” aquí busca la antena clic en la opción “Search” ahí buscara la señal de la antena, presionamos “Ok” antes de salir guardamos la carpeta con el respectivo nombre del proyecto y salimos.

Fotografía 3.26. Programa Mala Ground Visión



Fuente: Elaboración propia

- Dar click en F5, donde nos empezará a salir las lecturas que medirá el georradar desde la progresiva 0+000 y terminara en la progresiva 165+390, nos ira mostrando en la pantalla las diferentes lecturas a medida que el vehículo se desplace por el tramo con una velocidad de 40 km/h esto según

norma, además esta velocidad ayudara a que las lecturas sean más precisas a la hora de realizar el proceso de datos en el programa.

- El vehículo de auscultación realizara una pasada con el georradar por el tramo de estudio a una velocidad de 40 km/h de acuerdo por lo recomendado en norma para obtener información suficiente del pavimento sin provocar interferencias con el tema de las antenas, teniendo mejores lecturas realizadas con el georradar, realizando una pasada por el eje del carril empezando de la progresiva 0+000 y terminando en la progresiva 165+390. (fotografía 3.27).

Fotografía 3.27. Vehículo realizando las lecturas con el equipo armado por el tramo de estudio

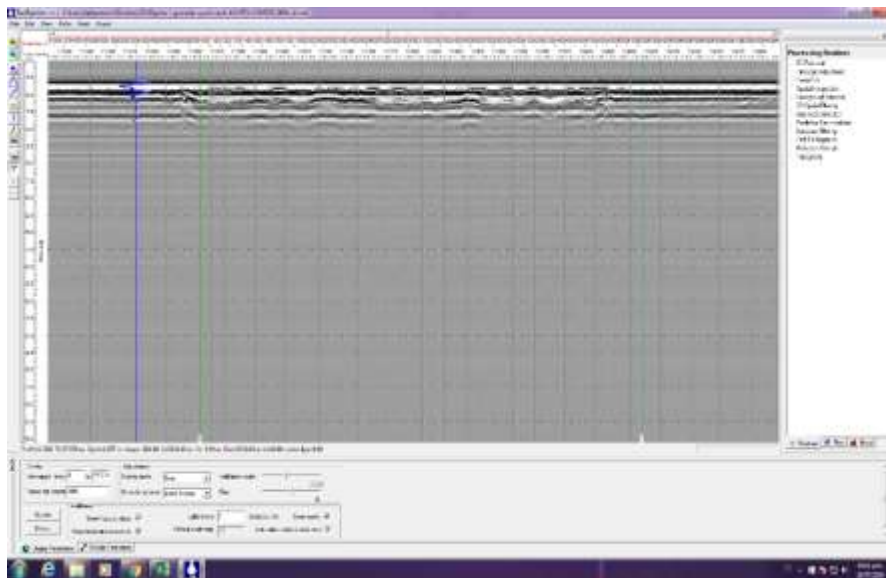


Fuente: Elaboración propia

- Estas lecturas de reflexiones que se irán produciendo en el trayecto del tramo serán registradas y almacenadas en el programa Mala Ground Visión, programa con el cual se inician los trabajos con respecto al empleo del georradar por el tramo de estudio.
- Después de realizar todo el almacenamiento de las lecturas, terminando el recorrido de todo el tramo de estudio, pasaremos a realizar la verificación e interpretación de estas lecturas con el empleo del programa Rad Explorer, programa con el cual se analiza y define los espesores que nos dan estas lecturas realizadas con el empleo del georradar, verificando así que estos espesores determinados con el georradar cumplan con los espesores de

diseño del tramo, y para un mejor control del proceso de lectura del georradar se extrae núcleos del mismo tramo de estudio, se realiza esta extracción al tres bolillos (derecha, medio, e izquierda) cada 5km empezando de la progresiva 0+000 y terminando en la progresiva 165+390 respectivamente. Llegando a contar con 46 núcleos extraídos en todo el tramo de estudio.

Figura 3.9. Programa Rad Explorer 1.42



Fuente: Elaboración propia

- El programa Rad Explorer muestra el perfil auscultado (Radargramas), mediante el georradar y refleja las discontinuidades electromagnéticas que encuentra la onda, es decir, las capas del pavimento.

3.7. PROCESADO DE DATOS TOMADOS POR EL GEORRADAR

3.7.1. Introducción

En este apartado se muestra en que consiste el tratamiento de registros con el objeto de mejorar los radargramas, destacados aquellas anomalías que corresponden con señales de interés y disminuyendo al máximo el ruido.

Antes de proceder al procesado de datos de georradar, es indispensable como cualquier otro tipo de estudio conocer o tener una información previa de la zona de estudio que en nuestro caso es una carretera.

El procesado de interpretación de datos se inicia durante su adquisición en campo, lo cual se realizado con ayuda del programa Mala Ground Visión.

Se debe observar y anotar cuidadosamente las condiciones de contorno que pueden influir en el registro, así por ejemplo evento que pudieren introducir ruido en el radargrama. Ejemplo la rugosidad de la superficie sobre la que se desliza la antena, la existencia de líneas de alta tensión, cambios de material superficial, eventos que pueden ocurrir durante el desplazamiento de la antena (tropiezos, saltos de la antena, etc.). Una superficie muy rugosa o con irregularidades importantes puede introducir en los registros ruido de alta frecuencia.

3.7.2. Parámetros de un registro

Hay parámetros que están asociados principalmente a la adquisición de datos (alguno de ellos se refieren a posteriores modificaciones de los registros) y se recogen al principio de los radargramas.

Esta información es necesaria para interpretar correctamente los resultados.

En casi todos los equipos de georradar que actualmente existen, hay una serie de parámetros que se pueden modificar y ajustar al inicio de cada prospección. Es importante realizar algunas pruebas antes de iniciar la adquisición de datos para que los resultados sean satisfactorios. Es importante conocer la profundidad a alcanzar así como la resolución que se quiere para ese estudio, para que con estos datos y junto con los resultados preliminares de las pruebas que se realizan en campo, podamos de terminar los valores más adecuados de los parámetros de adquisición de datos.

Todos los registros contienen una información sobre el radargrama. Esta información incluye el nombre del fichero, la fecha de registro y las fechas de posteriores modificaciones, su rango, la posición del inicio, el número de pulsos emitidos por segundo durante la adquisición de datos y los filtros que sean aplicados sobre el radargrama durante la adquisición o en posteriores tratamientos.

3.7.3. Registro de amplitudes del georradar

El registro que proporciona el radar de subsuelo se denomina, comúnmente radargrama. Está formado por un elevado número de trazas de amplitud. En el eje horizontal se representan distancias sobre la superficie del medio por el que se ha

deslizado la antena y en el eje vertical quedan representados los tiempos dobles de propagación de las ondas reflejadas en las anomalías internas a dicho medio (contrastos entre parámetros electromagnéticos).

El número de trazas de un radargrama depende de la longitud del registro, de la velocidad a la que se haya deslizado la antena a lo largo del perfil, del número de pulsos por segundo emitidos por la antena, del muestreo seleccionado y de la velocidad de registro del radar. Tal como ya se ha visto estos parámetros se seleccionan adecuando la prospección al estudio y al medio.

Cada una de las trazas que forman parte del radargrama es un registro de amplitudes debidas a las reflexiones producidas en el interior del medio. El conjunto de trazas permite el seguimiento de estas amplitudes a lo largo de la gráfica, representando a los reflectores que las han producido.

3.7.4. Procedimiento a seguir en la interpretación de radargramas del programa RadExplorer

El MALA Geosciense proporciona un software para el tratamiento de datos recogidos por el sistema GPR, en este caso se trata con el programa RadExplorer 1,4. Este software tiene infinidad de alternativas para aplicar los datos recogidos por el GPR.

Una vez realizado las lecturas con el georradar por el tramo de estudio procedemos a realizar la interpretación de los espesores se configuro los datos en el programa RadExplorer, de tal forma que nos permita ver la pantalla cada 1500 metros, y proceder el así con identificación e interpretación de los radargrmas, como se muestra a continuación:

Debemos abrir el programa RadExplorer:

- Click en Inicio, Click en el programa RadExplorer
- Click en Examinar para elegir la carpeta con el cual fue guardada las lecturas que se realizó en el tramo de estudio.
- Este archivo debe contar con lecturas realizadas para su posterior procesamiento, lo cual para facilitar el programa estos archivos deberán ser guardados por sub tramos de 15 o hasta 20 km de lecturas realizadas, esto

con fines de realizar un procesamiento rápido, evitando que el programa se sature u trabaje con seguridad.

- **Primera toma de contacto con el software**

Cuando se carga un archivo de datos, el área principal de trabajo del programa se divide en varias secciones principales como se muestra a continuación:

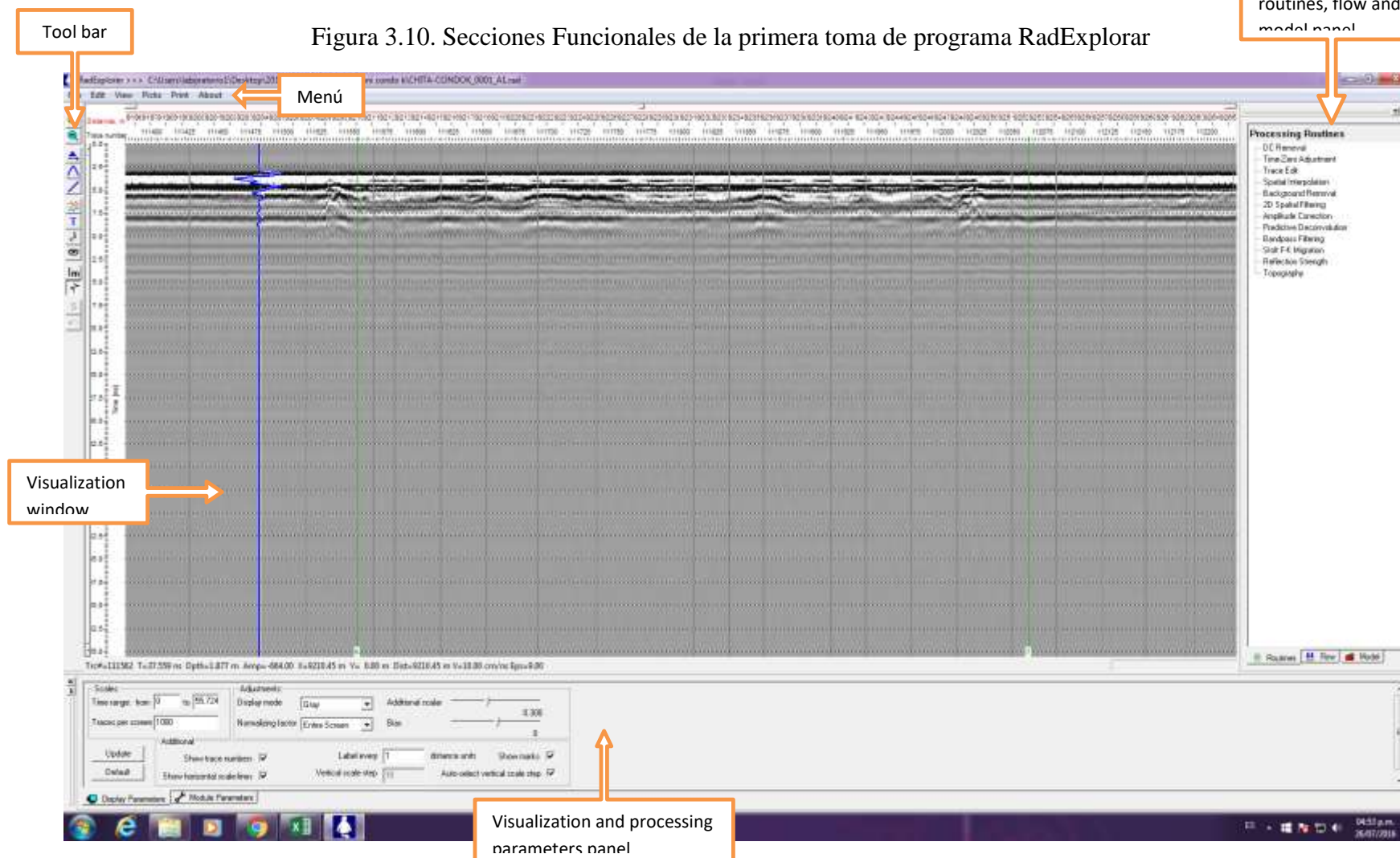
- Menú
- Tool bar. (Barra de herramientas)
- Visualization window. (Ventana de visualización)
- Processing routines, flow and model panel. (Rutinas de procesamiento de flujo, y el panel de modelo)
- Visualization and processing parameters panel. (Visualización y los parametros de procesamiento del panel)

El comando menú es más para configurar las unidades de la visualización de los parámetros de procesamiento panel.

La visualización y los parametros de procesamiento del panel incluyen dos pestañas:

- El primero de ellos está disponible todo el tiempo y permite ajustar los parámetros de visualización de datos en la pantalla (escala, modos de visualización, factores de ganancia, etc.)
- La segunda pestaña es para ajuste de los parámetros de procesamiento y su aparición depende de la rutina de proceso seleccionado (en el modo de edición del modelo interfaz del editor).

Figura 3.10. Secciones Funcionales de la primera toma de programa RadExplorer



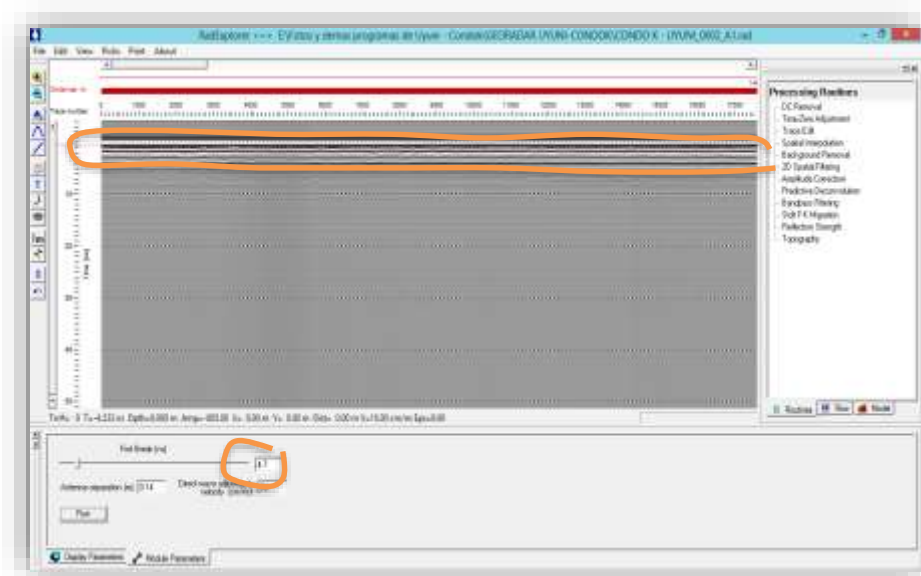
Cuando se tiene ya en la pantalla las lecturas realizadas con el georradar lo primero que debemos modificar cuando la antena está realizando las mediciones, es que la antena está a una altura determinada del pavimento estas lecturas que realizara va a considerar el aire o el espacio, es entonces que debemos modificar el cero de la antena de tal manera se puede verificar el espesor desde mi carpeta sin considerar el aire de la siguiente manera:

- Aplicamos el primer filtro Click en “Routinez” Panel, elegimos la opción “Time Zero Adjutment”, es para ajustar el punto cero de la escala de tiempo vertical al tiempo cero, es decir el momento en que la onda en realidad ha dejado el emisor antena.

Al mover el tiempo para la primera llegada en (ns) se puede ajustar el tiempo de llegada de la onda directa, pero al mismo tiempo en la ventana de visualización la línea punteada de color rojo me define la primera llegada en el tiempo que se está moviendo.(Figura 3.11)

Esta traza en cero podemos ir variando según corresponda a la hora de realizar estas mediciones, de acuerdo a la interpretación del operador.

Figura 3.11. Tiempo de ajuste

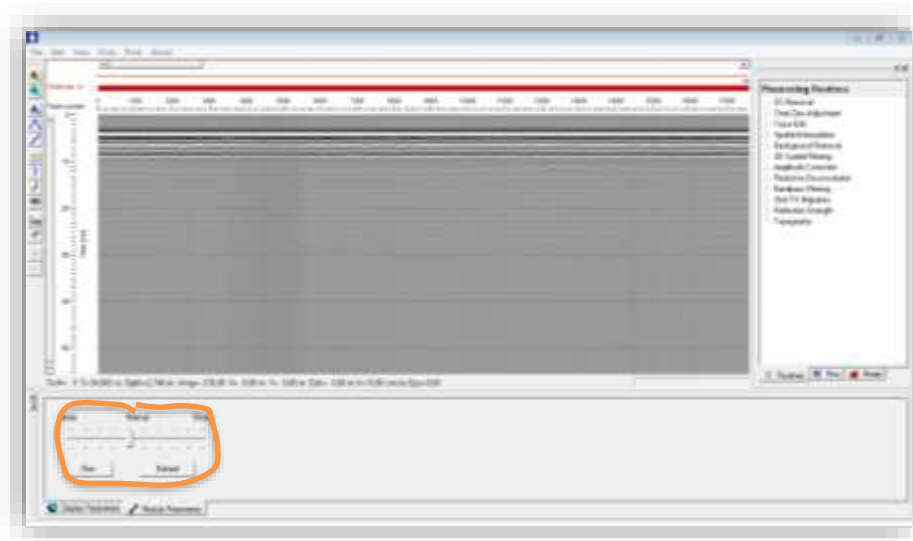


Fuente: Elaboración propia

Las rutinas de procesamiento de datos son 3 (Flujo, Panel, Modelo) se puede elegir cualquier rutina y sus parametros se mostraran en la segunda pestana del panel de parámetros.

- **Background Removid.-** Esta rutina se usa para ajustar la visión en las cuales se puede elegir entre contrastes fuertes u bajos como Weak (Contraste bajo) o Strong (Contraste fuerte) modificando cualquiera de las opciones, y presionando Run aplicamos lo seleccionado en la pantalla.

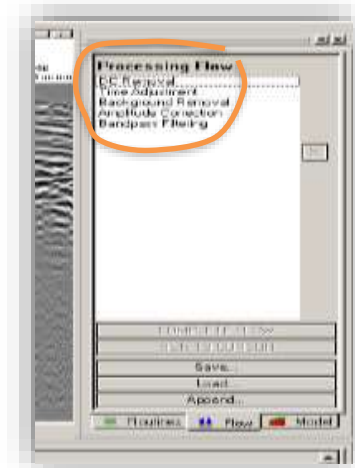
Figura 3.12. Rutina para ajustar la visión



Fuente: Elaboración propia

- **Rutina Flow.-** Todas las rutinas de procesamiento aplicados a los datos se incluyen automáticamente en el procesamiento de historia o Flow (Flujo), estas rutinas se llenan de arriba hacia abajo, es decir la primera rutina de tratamiento aplicado se muestra en la parte superior y la segunda rutina aplicado aparece en la parte inferior, esto se modifica yendo a la sección de rutinas de procesamiento.

Figura 3.13. Rutina de Flow (Flujo)



Fuente: Elaboración propia


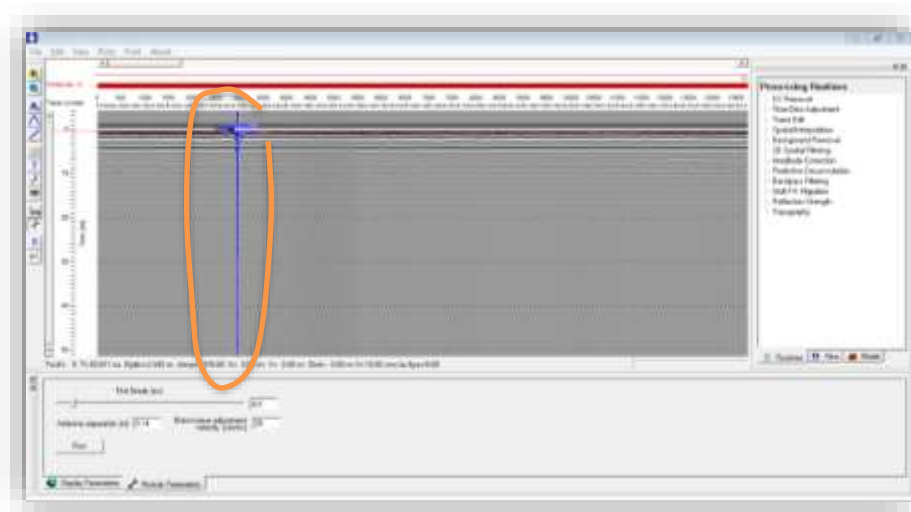
- **Rutina Model.-** La rutina Model (Modelo) es una principal rutina para la interpretación de los datos, uno de sus cambios es la profundidad donde ya se puede realizar las lecturas de los espesores, cambiando en tiempo cero.
- **Trace.-** Utilizamos una opción que hay en la barra de herramientas que es  Trace (Rastro) para mostrar un solo rastro de maniobra por encima del radargrama, se pulsa Trace y hacemos clic en el radargrama donde se desee que aparezca, este trace de color azul aparecerá a nivel del cero de la traza.

Figura 3.14. Utilización del Trace en los radargramas



Fuente: Elaboración propia

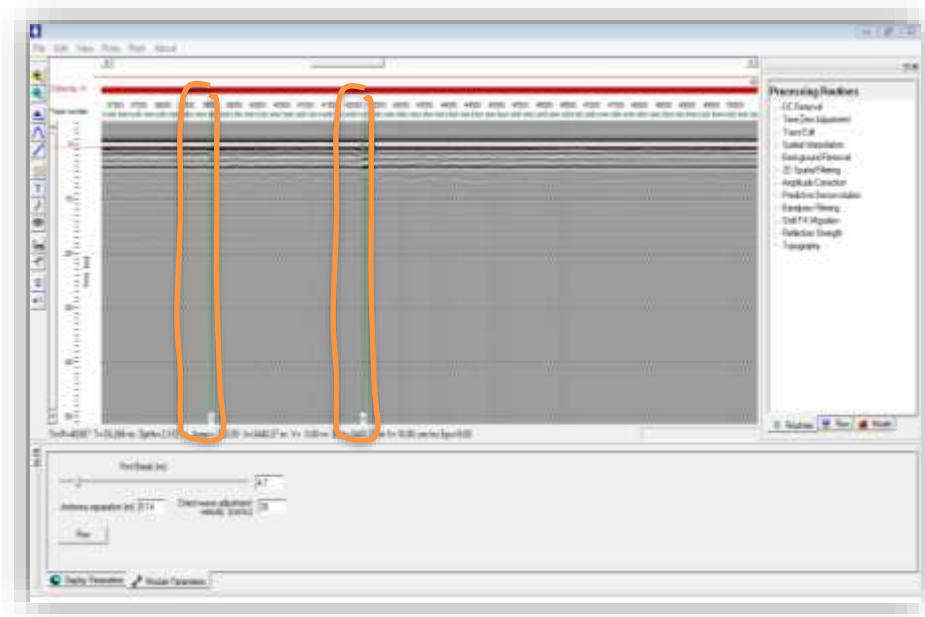
Una vez ya elegido Trace los picos más altos nos dan los primeros espesores de mi carpeta, es decir que los picos son cambios de valores dieléctricos.

Si al realizar el procesamiento de datos no me da una lectura coherente muevo el cero de la traza, al primer pico de la reflexión donde ha chocado la onda, así voy variando.

Es muy importante cuando se está realizando la recolección de datos con el programa Mala Ground Visión debemos colocar marcadores de casillas durante la grabación de datos, esto para anotar en que respectivos tiempos se está presentando variaciones en el pavimento colocando iniciales ya sea números o letras según corresponda y facilite al operador como se dijo anteriormente esto para saber de qué material se debe esa variación.

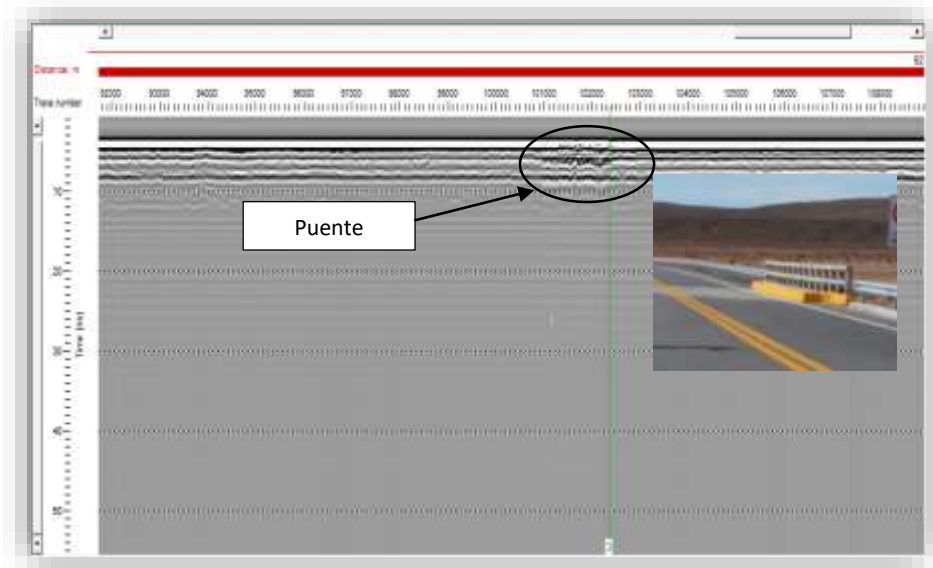
Estas marcar de referencia se visualiza en la pantalla como líneas verticales verdes numeradas. (Figura 3.15)

Figura 3.15. Marcadores de referencia



Fuente: Elaboración propia

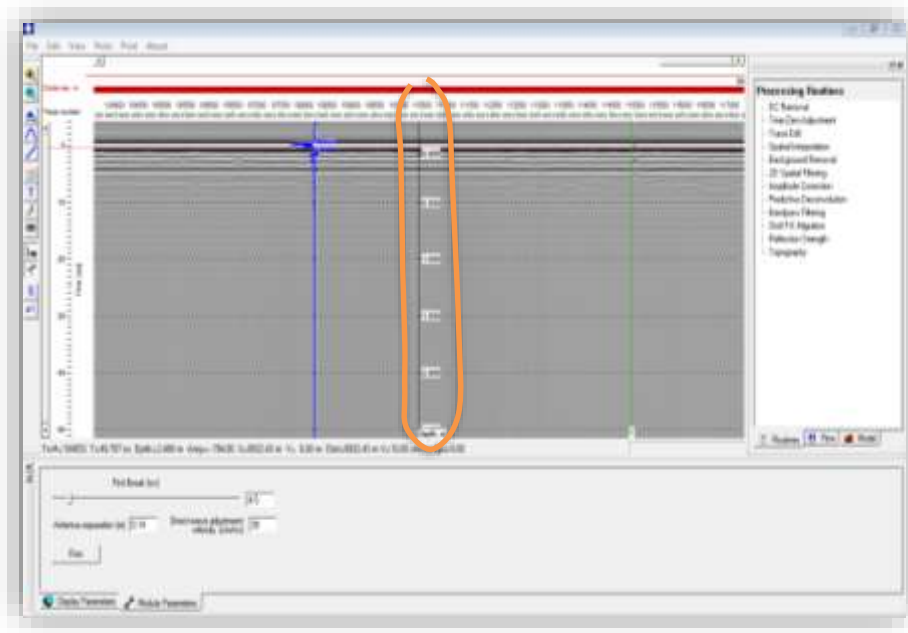
Figura 3.16. Ejemplo de los marcadores en el programa de procesamiento



Fuente: Elaboración propia

Una vez cambiando el cero de la traza, es decir el punto donde empieza el pavimento, El motivo de tener que hacer esto, como ya se mencionó anteriormente es que el georradar se encuentra a una distancia por encima del pavimento y por lo tanto la auscultación incluye una parte de aire. En líneas generales, el valor 0 se establece en la primera reflexión de onda que se observa en el radargrama. El valor 0 se establece a la misma altura para toda la auscultación realizada en el tramo. El radargrama informa del tiempo (doble) que tarda la onda en atravesar una capa y ser reflejada en la discontinuidad hasta la antena. No se sabe, en un principio, ni el espesor de la capa ni la velocidad de propagación de la onda. Se estudian los puntos kilométricos de los cuales se conoce el espesor total exacto (testigos). En estos puntos, se impone el espesor total del pavimento y se relaciona con el tiempo doble medido por el georradar, en el tramo de estudio, para así obtener el espesor de la carpeta asfáltica. (Figura 3.17)

Figura 3.17. Profundidades según modificado



Así posteriormente voy verificando mis espesores de mi carpeta con el empleo del programa RadExplorer siguiendo estos pasos previos a la hora de realizar la interpretación de datos.

A partir de imponer el espesor de cada capa y relacionarlo con el tiempo doble se obtiene la velocidad de propagación a la cual ha atravesado el firme.

De esta manera se realiza el procesamiento de datos, cuyas lecturas se realizan en campo (Carretera) con el georradar GPR, para luego almacenar estas lecturas en el programa Ground Visión, y realizar el procesamiento de los radargramas en el programa Rad Explorer, todos los radargramas uno por uno ya procesados se mostraran en (Anexo 5).

3.8.DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE CARPETA ASFÁLTICA MEDIANTE EL USO DEL EXTRACTOR DE NÚCLEOS

3.8.1. Procedimiento de aplicación (Extracción de Testigos o Núcleos)

Las extracciones de los núcleos se realizan en todo el largo del tramo de estudio empezando de la progresiva 0+000 y terminando en la progresiva 165+390 por el carril de ida huella externa del tramo.

Fotografía 3.28. Tramo Uyuni – Cruce Condo K



Fuente: Elaboración Propia

Esta extracción se lo realizara empleando un Extractor centrífugo que consta de un dispositivo metálico construido de acero, de forma tubular, con corona de corte adiamantada y refrigerada por agua.

Antes de extraer el núcleo del pavimento se debe verificar que se encuentre limpio y despejado. Se debe localizar el equipo a no menos de 60cm de los bordes de la pista siendo preferible colocar dentro del tercio central de ella. Las brocas deben ser adecuadas en cuanto a calidad y dimensiones deben encontrarse en buenas condiciones normalmente para pavimentos de asfalto se usan brocas de 4 pulgadas (100mm)

En el caso de los testigos, la información es directa. Se obtiene el espesor de la capa midiendo directamente del testigo.

Se inicia el corte a baja velocidad y presión moderada, hasta que los dientes de la broca penetran en el pavimento. Una vez alcanzada esta condición, se aumenta la velocidad y la presión y se mantiene constante para asegurar una geometría uniforme en el testigo.

Fotografía 3.29. Extracción de núcleos al tramo de estudio



Fuente: Extracción de la ABC

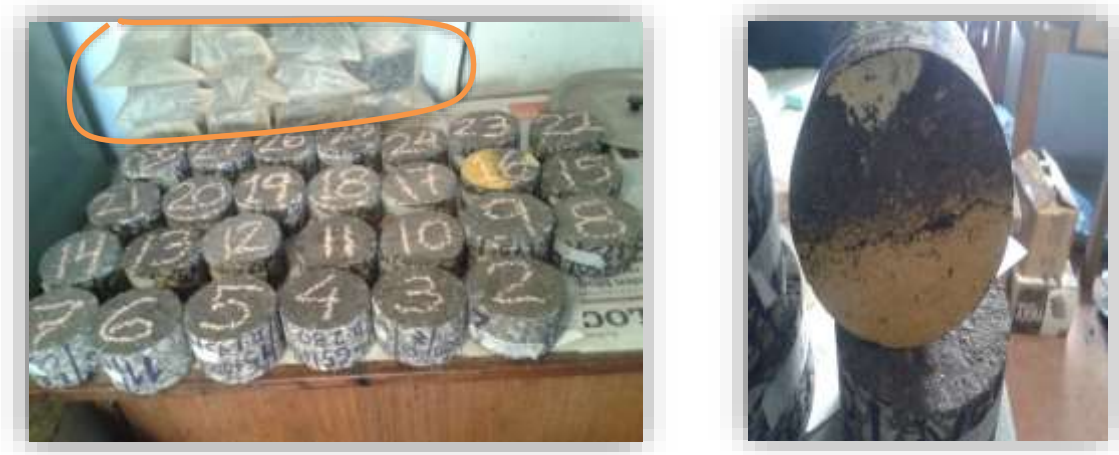
Fotografía 3.30. Dientes de la broca penetrando el pavimento



Fuente: Extracción de la ABC

Una vez extraídos e identificados, se depositan en bolsas de polietileno de alta densidad y se colocan en cajas de embalaje, impermeables, sólidas, con tapa y con aserrín para evitar que se alteren sus propiedades durante el traslado al laboratorio.

Fotografía 3.31. Núcleos extraídos y depositados en bolsas para evitar que se alteren sus propiedades



Fuente: Elaboración propia

Una vez efectuado el trabajo de extracción de núcleos al pavimento se hace la reparación de los sectores donde se efectuaron las extracciones.

Para la medición del espesor del núcleo se debe determinar colocando los núcleos horizontalmente y se efectuara cinco mediciones con ayuda del vernier; una al centro y cuatro periféricas en cada cuadrante. Se realizó las mediciones con una aproximación de 1,0mm. El espesor del núcleo será el valor promedio de las cinco lecturas.

De esta manera se realiza los trabajos en campo de forma directa (extracciones de núcleos) y de forma indirecta (GPR).

A partir de los datos obtenidos a través del tratamiento de la información se pasa al estudio y relación de los mismos.

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se presenta los resultados de la determinación de espesores de carpeta asfáltica por medio de la exploración directa (mediante la extracción de núcleos del tramo) y la exploración indirecta (mediante el empleo del GPR) con la obtención de radargramas del área de estudio.

Así mismo se realiza comparaciones de los resultados obtenidos elaborando una serie de gráficos que pretenden definir las relaciones existentes entre las diferentes variables involucradas en el estudio en base a los datos del tramo.

4.2 PRESENTACIÓN DE LOS ESPESORES DE CARPETA ASFÁLTICA Y CAPA BASE MEDIANTE LOS RADARGRAMAS

A continuación se presenta un resumen de los espesores de la carpeta asfáltica y la capa base del tramo Uyuni – Cruce Condo K mediante la interpretación de los radargramas procesados en el programa Rad Explorer obtenidos con el empleo del georradar.

Fotografía 4.1. Pasada del georradar por el tramo



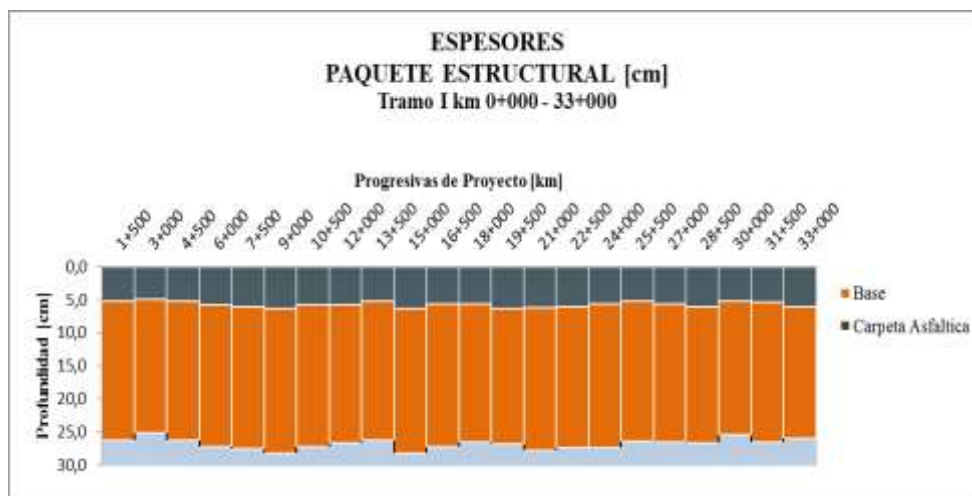
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1. Espesores medidos con el Georradar GPR

Tramo: 0+000 - 33+000
 Estructura: Pavimento Flexible

Carril: Eje

Progresiva [km]		Espesores	
		Paquete Estructural [cm]	
Desde	Hasta	Carpeta Asfáltica	Base
0+000	1+500	5,2	21,1
1+500	3+000	5,0	20,1
3+000	4+500	5,2	21,1
4+500	6+000	5,8	21,5
6+000	7+500	6,0	21,6
7+500	9+000	6,4	21,8
9+000	10+500	5,8	21,5
10+500	12+000	5,8	20,9
12+000	13+500	5,2	21,1
13+500	15+000	6,4	21,8
15+000	16+500	5,6	21,7
16+500	18+000	5,6	21,0
18+000	19+500	6,4	20,4
19+500	21+000	6,2	21,6
21+000	22+500	6,0	21,4
22+500	24+000	5,6	21,8
24+000	25+500	5,2	21,2
25+500	27+000	5,6	21,0
27+000	28+500	6,0	20,7
28+500	30+000	5,2	20,2
30+000	31+500	5,4	21,2
31+500	33+000	6,0	20,0

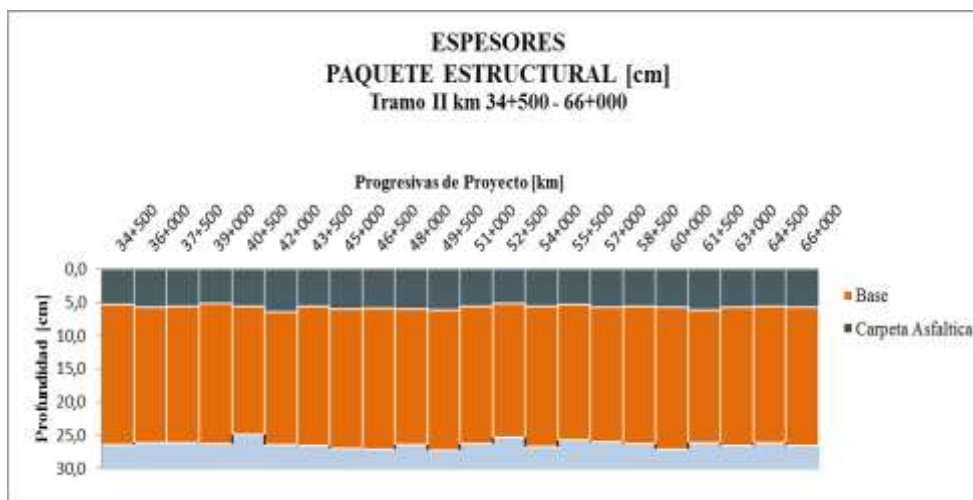


Espesores Promedio [cm]			
Tramo I			
Descripcion	Promedio	Max	Min
Carpeta Asfáltica	5,7	6,4	5,0
Base	21,1	21,8	20,0
Total [cm]	27		

Tramo: 33+000 - 66+000
 Estructura: Pavimento Flexible

Carril: Eje

Progresiva [km]		Espesores Paquete Estructural [cm]	
		Carpeta Asfáltica	Base
Desde	Hasta		
33+000	34+500	5,4	21,0
34+500	36+000	5,8	20,4
36+000	37+500	5,6	20,6
37+500	39+000	5,2	21,0
39+000	40+500	5,6	19,3
40+500	42+000	6,4	20,0
42+000	43+500	5,6	20,9
43+500	45+000	6,0	21,0
45+000	46+500	5,9	21,2
46+500	48+000	6,0	20,5
48+000	49+500	6,2	21,0
49+500	51+000	5,6	20,6
51+000	52+500	5,2	20,1
52+500	54+000	5,6	21,1
54+000	55+500	5,4	20,3
55+500	57+000	5,8	20,2
57+000	58+500	5,6	20,7
58+500	60+000	5,8	21,2
60+000	61+500	6,2	20,0
61+500	63+000	5,8	20,8
63+000	64+500	5,6	20,5
64+500	66+000	5,8	20,8

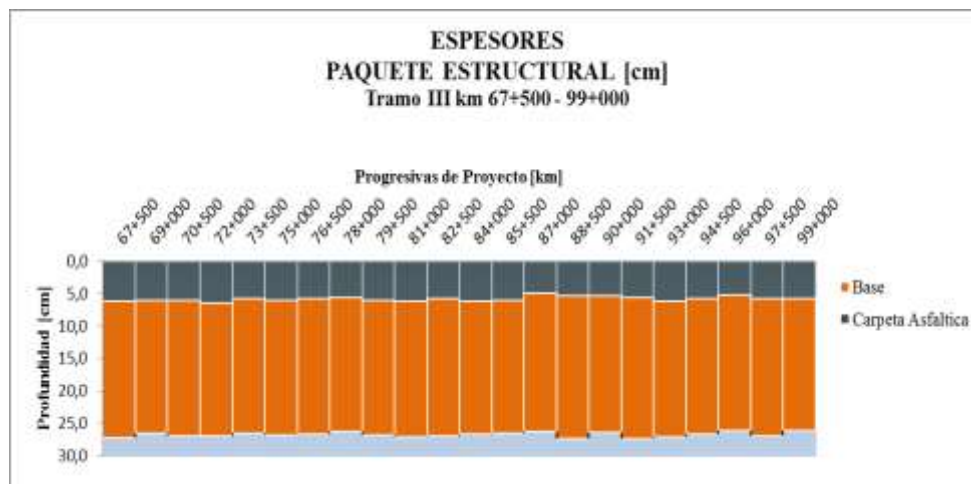


Espesores Promedio [cm]			
Tramo II			
Descripcion	Promedio	Max	Min
Carpeta Asfáltica	5,7	6,4	5,2
Base	20,6	21,2	19,3
Total [cm]	26		

Tramo: 66+000 - 99+000
 Estructura: Pavimento Flexible

Carril: Eje

Progresiva [km]		Espesores Paquete Estructural [cm]	
		Carpeta Asfáltica	Base
Desde	Hasta		
66+000	67+500	6,2	21,0
67+500	69+000	6,0	20,6
69+000	70+500	6,0	20,9
70+500	72+000	6,4	20,5
72+000	73+500	5,8	20,7
73+500	75+000	6,0	20,8
75+000	76+500	5,8	20,9
76+500	78+000	5,6	20,7
78+000	79+500	6,0	20,8
79+500	81+000	6,2	20,9
81+000	82+500	5,8	21,2
82+500	84+000	6,2	20,5
84+000	85+500	6,0	20,6
85+500	87+000	5,0	21,2
87+000	88+500	5,4	22,1
88+500	90+000	5,4	21,0
90+000	91+500	5,6	21,8
91+500	93+000	6,2	20,9
93+000	94+500	5,8	20,8
94+500	96+000	5,2	20,9
96+000	97+500	5,8	21,2
97+500	99+000	5,8	20,3

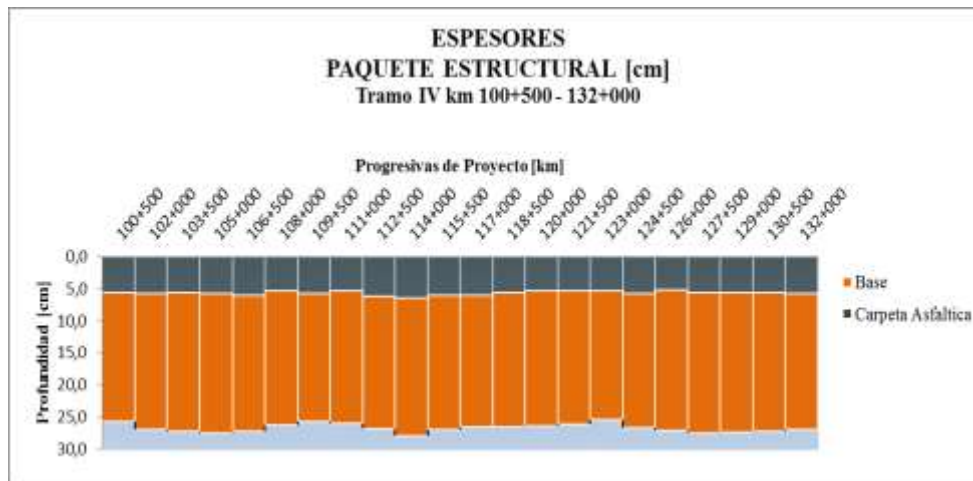


Espesores Promedio [cm]			
Tramo III			
Descripcion	Promedio	Max	Min
Carpeta Asfáltica	5,8	6,4	5,0
Base	20,9	22,1	20,3
Total [cm]	27		

Tramo: 99+000 - 132+000
 Estructura: Pavimento Flexible

Carril: Eje

Progresiva [km]		Espesores Paquete Estructural [cm]	
		Carpeta Asfáltica	Base
Desde	Hasta		
99+000	100+500	5,6	20,1
100+500	102+000	5,8	21,2
102+000	103+500	5,6	21,6
103+500	105+000	5,8	21,7
105+000	106+500	6,0	21,3
106+500	108+000	5,4	20,9
108+000	109+500	5,8	19,9
109+500	111+000	5,4	20,5
111+000	112+500	6,2	20,7
112+500	114+000	6,4	21,5
114+000	115+500	6,0	20,9
115+500	117+000	6,0	20,5
117+000	118+500	5,6	20,9
118+500	120+000	5,4	21,0
120+000	121+500	5,4	20,7
121+500	123+000	5,4	20,1
123+000	124+500	5,8	20,8
124+500	126+000	5,2	21,9
126+000	127+500	5,6	21,9
127+500	129+000	5,6	21,8
129+000	130+500	5,6	21,7
130+500	132+000	5,8	21,2

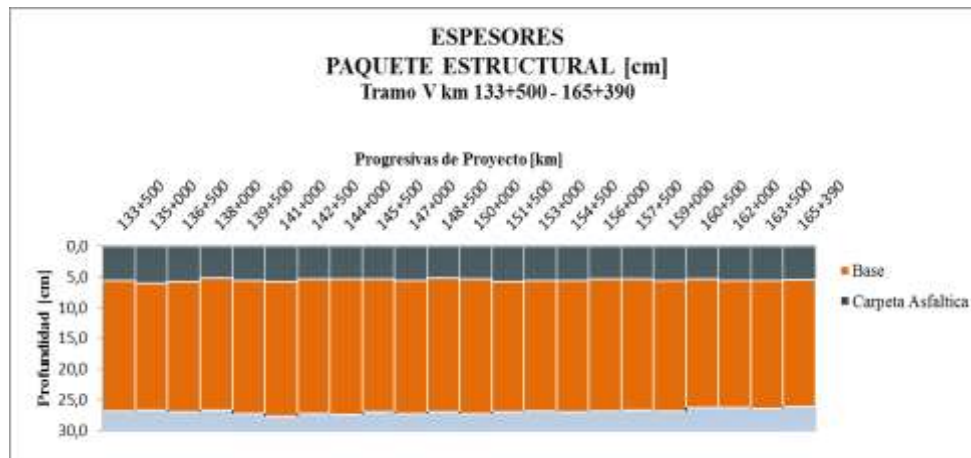


Espesores Promedio [cm]			
Tramo IV			
Descripcion	Promedio	Max	Min
Carpeta Asfáltica	5,7	6,4	5,2
Base	21,0	21,9	19,9
Total [cm]	27		

Tramo: 132+000 - 165+390
 Estructura: Pavimento Flexible

Carril: Eje

Progresiva [km]		Espesores Paquete Estructural [cm]	
		Carpeta Asfáltica	Base
Desde	Hasta		
132+000	133+500	5,6	21,2
133+500	135+000	6,0	20,6
135+000	136+500	5,8	21,2
136+500	138+000	5,2	21,5
138+000	139+500	5,6	21,6
139+500	141+000	5,8	21,8
141+000	142+500	5,4	21,9
142+500	144+000	5,4	21,9
144+000	145+500	5,4	21,5
145+500	147+000	5,6	21,6
147+000	148+500	5,2	21,8
148+500	150+000	5,4	21,9
150+000	151+500	5,8	21,2
151+500	153+000	5,6	21,2
153+000	154+500	5,6	21,4
154+500	156+000	5,4	21,4
156+000	157+500	5,4	21,3
157+500	159+000	5,6	21,2
159+000	160+500	5,4	20,8
160+500	162+000	5,6	20,6
162+000	163+500	5,6	20,8
163+500	165+390	5,5	20,6



Espesores Promedio [cm]			
Tramo V			
Descripcion	Promedio	Max	Min
Carpeta Asfáltica	5,5	6,0	5,2
Base	21,4	21,9	20,6
Total (cm)	26,9		

Fuente: Elaboración propia

4.3 PRESENTACIÓN DE LOS ESPESORES DE CARPETA ASFÁLTICA OBTENIDOS DE LOS NÚCLEOS EXTRAÍDOS

4.3.1. Determinación de espesores en laboratorio

Para la realización de este ensayo, de determinar el espesor de muestras asfálticas compactadas extraídas del pavimento, están basadas en la norma (ASTM D 3549) se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Después de haber realizado la extracción de los núcleos en el tramo estas deben ser guardadas en bolsas y se colocan en cajas de embalaje esto para evitar que se alteren sus propiedades durante al traslado al laboratorio.

Fotografía 4.2. Núcleos del tramo Uyuni – Cruce Condo K



Fuente: Elaboración propia

- Para determinar los espesores en laboratorio se debe agarrar cada núcleo y de forma muy cuidadosa procedemos a limpiar con una brocha partículas que puedan estar adheridas al mismo esto para evitar tener mediciones erróneas.
- Procedemos a colocar los núcleos en una plancha de calentamiento, la cual debe calentarse a una temperatura 60 a 80 °C, con ayuda de una cuchara o cualquier otro material procedemos a quitar parte de la capa base que posiblemente haya quedado adherida a la hora de la extracción de los núcleos, esto para determinar el espesor solo de la carpeta asfáltica.

Fotografía 4.3. Núcleo del tramo con parte de la capa base



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4.4. Calentado del núcleo en una plancha a temperaturas de 60 a 80 °C



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4.5. Desprendimiento de una parte de la capa base después del calentado



Fuente: Elaboración propia

- Se realiza 6 mediciones distancias entre ellas en toda la circunferencia, el espesor de la muestra corresponderá a la media aritmética de las 6 valores obtenidos, si con estas medidas no cumple con las especificaciones técnicas, realizamos otras 4 medidas más, también se tomó 4 mediciones del diámetro de cada núcleo respectivamente.

Fotografía 4.6. Vernier del laboratorio



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4.7. Mediciones a los núcleos con el vernier



Fuente: Elaboración propia

- Realizar trabajo de escritorio

Resultados

Después de la extracción de núcleos en laboratorio se mide las alturas de los núcleos, (muestra carpeta asfáltica), en los cuadros 4.2 y 4.3 respectivamente se tienen los resultados de esas mediciones.

Tabla 4.2. Espesores medidos a los núcleos del tramo I: Uyuni – km 80+000

GEOMETRIA DE LOS TESTIGOS DE CARPETA ASFALTICA COMPACTADA													
PROGR.	Altura "H" (cm)						Diametro "D" (cm)				Promedio		Observaciones
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4			
0+020	5,34	5,47	5,32	5,56	5,54	5,55	9,87	9,87	9,90	9,83	5,46	9,87	ok
0+120	6,13	6,04	6,10	6,16	6,20	6,18	9,94	9,93	9,94	9,40	6,14	9,80	ok
5+000	6,14	5,94	6,01	5,80	6,10	6,15	9,94	9,93	9,92	9,95	6,02	9,94	ok
5+000	5,76	5,75	5,72	5,68	5,65	5,80	9,90	9,86	9,89	9,90	5,73	9,89	ok
10+000	5,73	5,79	5,70	5,51	5,59	5,60	9,86	9,89	9,90	9,83	5,65	9,87	ok
15+000	6,18	6,09	5,92	5,12	6,34	6,14	9,91	9,87	9,96	9,95	5,97	9,92	ok
20+000	6,31	6,50	6,34	6,24	6,16	6,07	9,88	9,89	9,91	9,90	6,27	9,90	ok
25+000	6,05	6,30	5,94	6,06	6,14	6,47	9,95	9,92	9,95	9,98	6,16	9,95	ok
30+000	4,38	5,39	5,33	5,26	5,20	5,01	9,90	9,93	9,88	9,88	5,10	9,90	ok
30+000	5,28	5,55	5,28	5,37	5,52	5,61	9,90	9,93	9,96	9,92	5,44	9,93	ok
35+000	6,78	6,89	6,82	6,88	6,70	6,86	9,95	9,93	9,94	9,93	6,82	9,94	ok
40+000	5,37	5,20	5,16	5,23	5,18	5,24	9,90	9,91	9,91	9,89	5,23	9,90	ok
45+000	6,05	5,98	5,96	6,32	6,17	6,00	9,99	9,93	9,94	9,84	6,08	9,93	ok
50+000	6,16	6,03	6,08	6,02	6,43	6,50	9,88	9,87	9,88	9,90	6,20	9,88	ok
50+000	6,37	6,10	6,17	6,10	6,18	6,35	9,89	9,86	9,87	9,81	6,21	9,86	ok
55+000	5,62	5,66	5,56	5,75	5,57	5,07	9,88	9,80	9,88	9,88	5,54	9,86	ok
57+750	5,44	5,47	5,40	5,38	5,30	5,36	9,98	9,91	9,93	9,91	5,39	9,93	ok
65+000	6,24	6,33	6,20	5,98	6,20	6,25	9,91	9,93	9,92	9,93	6,20	9,92	ok
67+500	5,05	5,30	5,36	5,56	5,29	5,42	9,93	9,93	9,95	9,92	5,33	9,93	ok
70+000	6,16	6,20	6,43	6,31	6,18	6,20	9,94	9,92	9,92	9,91	6,25	9,92	ok
75+000	6,93	6,94	7,09	7,11	6,98	7,00	9,93	9,91	9,90	9,96	7,01	9,93	ok
77+500	5,84	5,81	5,78	5,74	5,77	5,77	9,95	9,95	9,96	9,96	5,79	9,96	ok
80+000	6,86	6,78	6,80	6,97	6,86	6,77	9,95	9,92	9,97	9,87	6,84	9,93	ok

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3. Espesores medidos a los núcleos del tramo II: Km 80+400 – Cruce Condo K

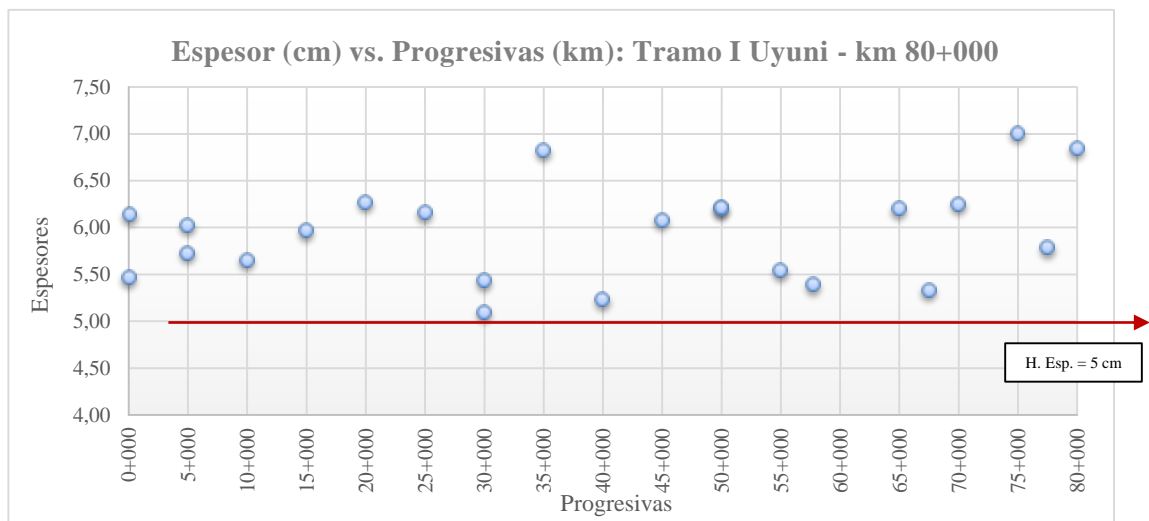
GEOMETRIA DE LOS TESTIGOS DE CARPETA ASFALTICA COMPACTADA													
PROGR.	Altura "H" (cm)						Diametro "D" (cm)				Promedio		Observaciones
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4			
80+400	5,85	5,81	5,90	5,97	5,88	5,90	9,97	9,90	9,93	9,85	5,89	9,91	ok
80+450	5,93	5,93	6,20	5,81	6,11	5,99	9,93	9,92	9,90	9,92	6,00	9,92	ok
80+500	5,61	5,59	5,53	5,61	5,79	5,60	10,00	9,98	10,10	9,96	5,62	10,01	ok
85+000	5,55	5,70	5,79	5,70	5,91	5,76	9,94	9,94	9,96	9,94	5,74	9,95	ok
90+000	4,67	5,07	4,99	4,69	4,71	4,71	9,97	9,94	9,88	9,94	4,81	9,93	NO CUMPLE
92+500	4,93	4,84	4,93	4,76	5,00	4,92	9,98	9,98	10,00	9,99	4,90	9,99	NO CUMPLE
95+000	5,69	5,66	6,18	5,99	5,52	6,20	9,92	9,94	9,84	9,96	5,87	9,92	ok
100+000	6,14	5,04	5,35	5,13	5,31	5,45	9,97	9,95	10,01	10,00	5,40	9,98	ok
105+000	5,06	5,03	5,48	5,48	5,60	5,50	9,90	9,93	9,93	9,93	5,36	9,92	ok
110+000	4,90	4,95	4,96	4,94	5,05	4,92	10,00	9,90	9,99	10,00	4,95	9,97	NO CUMPLE
115+000	6,31	6,36	6,48	6,49	6,40	6,41	9,90	9,99	9,95	9,96	6,41	9,95	ok
120+000	6,08	6,02	5,90	5,97	5,91	6,02	9,94	9,91	9,91	9,98	5,98	9,94	ok
125+000	4,72	4,74	4,82	4,84	4,74	4,85	9,93	9,92	9,91	9,97	4,79	9,93	NO CUMPLE
130+000	5,45	5,48	5,50	5,65	5,72	5,69	9,99	9,99	10,00	10,00	5,58	10,00	ok
135+000	5,82	5,86	5,87	5,91	5,90	5,89	9,91	9,92	9,99	9,89	5,88	9,93	ok
137+500	5,90	5,13	5,20	5,08	5,24	5,28	9,99	9,99	9,94	9,96	5,31	9,97	ok
145+000	5,30	5,36	5,33	5,34	5,25	5,32	9,94	9,94	9,94	9,94	5,32	9,94	ok
147+500	5,60	5,61	5,74	5,42	5,37	5,71	10,00	9,99	9,97	9,97	5,58	9,98	ok
150+000	6,10	5,90	6,13	6,08	6,18	6,10	9,97	9,99	10,00	9,99	6,08	9,99	ok
155+000	5,41	5,34	5,30	5,40	5,44	5,38	9,98	9,97	9,98	9,97	5,38	9,98	ok
160+000	5,16	5,10	5,16	5,22	5,09	5,40	9,99	9,96	9,94	9,97	5,19	9,97	ok
165+000	5,80	5,62	5,41	5,58	5,79	5,80	9,99	9,99	9,94	9,95	5,67	9,97	ok
165+100	5,77	5,47	5,55	5,50	5,64	5,57	9,98	9,96	9,95	10,01	5,58	9,98	ok

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 4.2 y 4.3 muestran los límites que los espesores deben cumplir de acuerdo a lo especificado de los diferentes tramos del Proyecto Uyuni – Cruce Condo K.

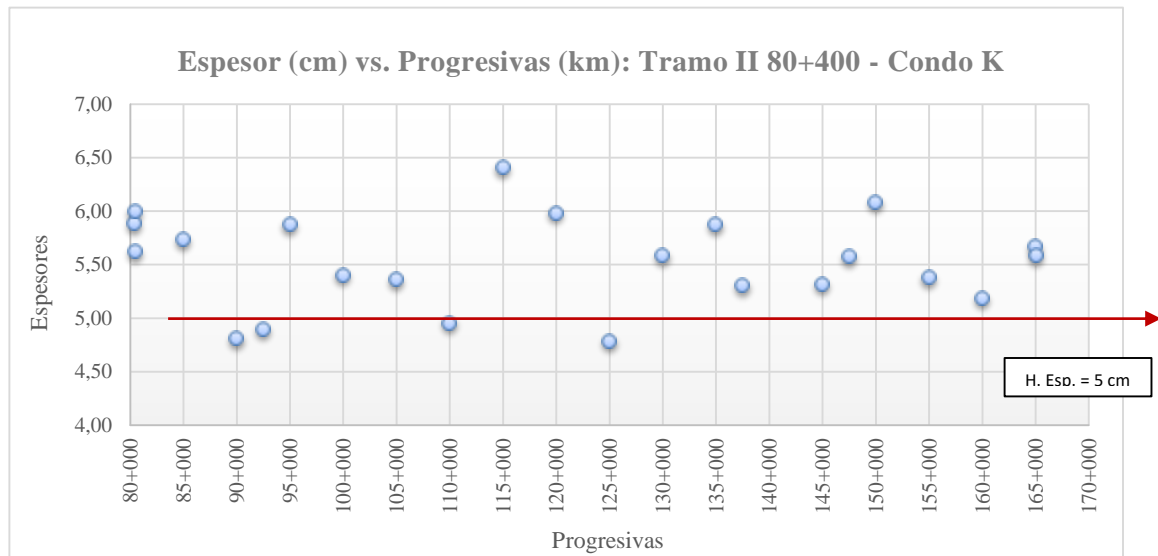
4.4 PRESENTACIÓN DE LA VARIACIÓN DE ESPESORES DE CARPETA ASFÁLTICA MEDIDOS DE LOS NÚCLEOS

Figura 4.1. Espesor promedio de la carpeta asfáltica Tramo I: Uyuni – km 80+000



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2. Espesor promedio de la carpeta asfáltica Tramo II: Km 80+400 – Condo K



Fuente: Elaboración propia

De los resultados de las figuras 4.2 y 4.3 se puede evidenciar que en 4 de los 46 núcleos extraídos, previamente medidos y analizados, presentan resultados menores a 5.0 cm de su espesor.

4.5 CORRELACIÓN ENTRE EL TIEMPO DE REFLEXIÓN (t) Y ESPESOR REAL NÚCLEO (h)

Se procede a determinar la relación que se establece entre el tiempo de reflexión y el espesor del núcleo extraído. Obviamente se espera que para espesores mayores, el tiempo de propagación sea más elevada, ya que el trayecto a recorrer es mayor.

Se presenta el resumen de resultados de tiempos medios (t) en nanosegundos correspondientes al tramo donde se ubica cada extracción de núcleo:

Tabla 4.4. Espesor real núcleo (h) y Tiempo de reflexión (t) medido en cada testigo

N°	Progresiva	Espesor real núcleo (cm)	Tiempo de onda (ns)
1	0+020	5,46	2,174
2	0+120	6,14	2,216
3	5+000	6,02	2,208
4	5+000	5,73	2,188
5	10+000	5,65	2,184
6	15+000	5,97	2,198
7	20+000	6,27	2,219
8	25+000	6,16	2,218
9	30+000	5,10	2,158
10	30+000	5,44	2,170
11	35+000	6,82	2,226
12	40+000	5,23	2,148
13	45+000	6,08	2,212
14	50+000	6,20	2,214
15	50+000	6,21	2,218
16	55+000	5,54	2,172
17	57+750	5,39	2,188
18	65+000	6,20	2,218
19	67+500	5,33	2,182
20	70+000	6,25	2,216
21	75+000	7,01	2,302

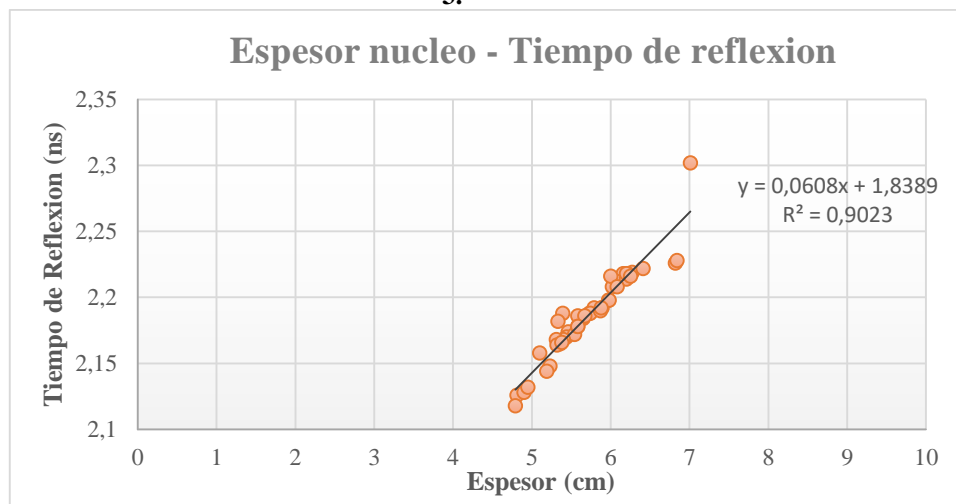
22	77+500	5,79	2,192
23	80+000	6,84	2,228
24	80+400	5,89	2,192
25	80+450	6,02	2,216
26	80+500	5,62	2,184
27	85+000	5,74	2,188
28	90+000	4,81	2,126
29	92+500	4,90	2,128
30	95+000	5,87	2,190
31	100+000	5,40	2,168
32	105+000	5,36	2,165
33	110+000	4,95	2,132
34	115+000	6,41	2,222
35	120+000	5,98	2,198
36	125+000	4,79	2,118
37	130+000	5,58	2,186
38	135+000	5,88	2,192
39	137+500	5,31	2,168
40	145+000	5,32	2,164
41	147+500	5,58	2,178
42	150+000	6,08	2,208
43	155+000	5,38	2,166
44	160+000	5,19	2,144

45	165+000	5,67	2,186
46	165+100	5,58	2,178

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta el diagrama de dispersión y la tendencia que sigue la relación entre espesor de núcleo (h) y tiempo de reflexión (t):

Figura 4.3. Diagrama de dispersión entre espesor de núcleo (h) y tiempo de reflexión (t)
3.



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico anterior se observa que el tiempo de reflexión tiende a aumentar con el espesor de la carpeta asfáltica.

El tiempo de reflexión aumenta a medida que aumenta el espesor. Además, la recta no tiene excesiva pendiente. El coeficiente de R² es elevado con lo cual se da por válida la relación entre los dos parámetros. Se corrobora la validez del georradar terrestre para medir espesores.

4.6 CORRELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (v) Y ESPESOR REAL NÚCLEO (h)

La relación entre la Velocidad de Propagación de la onda y el espesor medido en el núcleo extraído del tramo, muestra la tendencia de la velocidad a aumentar a medida que el espesor aumenta.

Es posible que este efecto sea debido por la heterogeneidad del medio, el medio estudiado (carpeta asfáltica) no es homogéneo.

Tabla 4.5. Velocidad de propagación vs Espesor medido del testigo

N°	Progresiva	Espesor real núcleo (cm)	Espesor GPR (cm)	Tiempo de onda (ns)	Velocidad de onda (cm/ns)
1	0+020	5,46	5,4	2,174	4,968
2	0+120	6,14	5,8	2,216	5,235
3	5+000	6,02	5,97	2,208	5,408
4	5+000	5,73	5,9	2,188	5,393
5	10+000	5,65	5,73	2,184	5,247
6	15+000	5,97	6,2	2,198	5,641
7	20+000	6,27	6,3	2,219	5,678
8	25+000	6,16	5,9	2,218	5,320
9	30+000	5,10	5,18	2,158	4,801
10	30+000	5,44	5,18	2,170	4,774
11	35+000	6,82	6,8	2,226	6,110
12	40+000	5,23	5,2	2,148	4,842
13	45+000	6,08	5,99	2,212	5,416
14	50+000	6,20	6,25	2,214	5,646
15	50+000	6,21	6,25	2,218	5,636
16	55+000	5,54	5,6	2,172	5,157
17	57+750	5,39	5,37	2,188	4,909

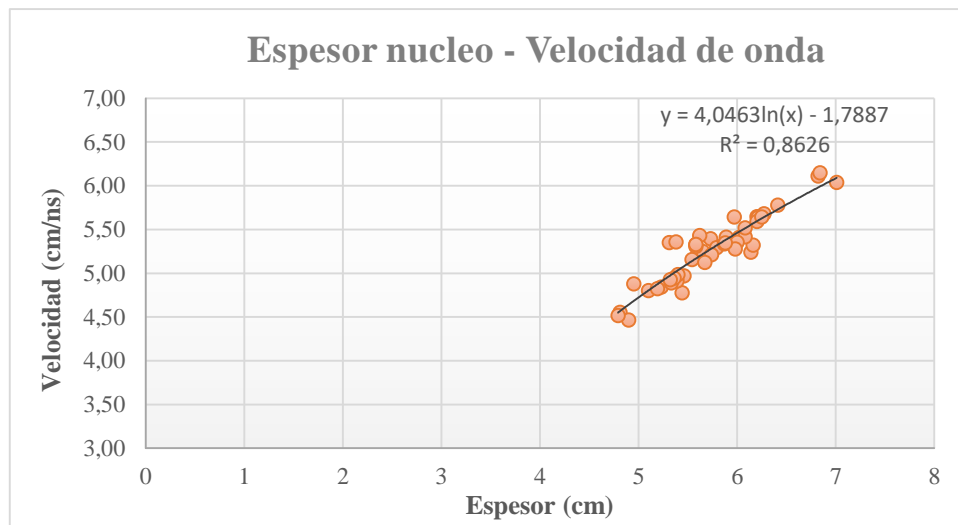
18	65+000	6,20	6,2	2,218	5,591
19	67+500	5,33	5,32	2,182	4,876
20	70+000	6,25	6,25	2,216	5,641
21	75+000	7,01	6,95	2,302	6,038
22	77+500	5,79	5,8	2,192	5,292
23	80+000	6,84	6,83	2,228	6,131
24	80+400	5,89	5,93	2,192	5,411
25	80+450	6,00	5,93	2,216	5,352
26	80+500	5,62	5,93	2,184	5,430
27	85+000	5,74	5,7	2,188	5,210
28	90+000	4,81	4,84	2,126	4,553
29	92+500	4,90	4,75	2,128	4,464
30	95+000	5,87	5,84	2,190	5,333
31	100+000	5,40	5,4	2,168	4,982
32	105+000	5,36	5,35	2,165	4,942
33	110+000	4,95	5,2	2,132	4,878
34	115+000	6,41	6,42	2,222	5,779
35	120+000	5,98	5,8	2,198	5,278
36	125+000	4,79	4,78	2,118	4,514
37	130+000	5,58	5,8	2,186	5,306
38	135+000	5,88	5,86	2,192	5,347
39	137+500	5,31	5,8	2,168	5,351
40	145+000	5,32	5,33	2,164	4,926
41	147+500	5,58	5,8	2,178	5,326

42	150+000	6,08	6,09	2,208	5,516
43	155+000	5,38	5,8	2,166	5,355
44	160+000	5,19	5,17	2,144	4,823
45	165+000	5,67	5,6	2,186	5,124
46	465+100	5,58	5,8	2,178	5,326

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4. Relación de la velocidad de propagación (cm/ns) y espesor medido del núcleo (cm)

4.



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado si se relaciona la variable velocidad de propagación (v) en función del espesor total medido (h), se observa que la velocidad de propagación tiende a aumentar a medida que el espesor aumenta. Las causas más probables para este efecto es que, aumenta la velocidad de onda debido a la heterogeneidad del medio (carpeta asfáltica), también el aumento de velocidad es debido a micro fisuras que se encuentran secas, llenas de aire dentro del núcleo el cual provoca el aumento de velocidad cuando la onda se propaga por la carpeta.

La representación gráfica de la velocidad (v) en función del espesor medido en los testigos (h), muestra una relación logarítmica esto indicaría que la velocidad de propagación medida en la carpeta asfáltica es linealmente dependiente del porcentaje de vacíos que se encuentra en los núcleos.

4.7 CÁLCULO DEL ERROR ABSOLUTO Y ERROR RELATIVO

Para el cálculo del error relativo con respecto a la profundidad real determinado con las extracciones de los núcleos, también se calculó el error absoluto. El error absoluto es la diferencia real entre los dos valores (la profundidad de la interfaz obtenida por el núcleo menos la profundidad obtenida por el GPR).

A continuación se presenta la tabla 4.1, donde se presenta el cálculo error relativo y error absoluto en la determinación de los espesores de carpeta asfáltica del tramo de estudio Uyuni – Condo K.

Tabla 4.6. Porcentaje de error en las mediciones con el GPR

Núcleo	Espesor real (cm)	Espesor verificado con GPR (cm)	Error Absoluto (cm)	Error Relativo (%)
1	5,46	5,4	0,06	1,10
2	6,14	5,8	0,34	5,54
3	6,02	5,97	0,05	0,83
4	5,73	5,9	0,17	2,97
5	5,65	5,73	0,08	1,42
6	5,97	6,2	0,23	3,85
7	6,27	6,3	0,03	0,48
8	6,16	5,9	0,26	4,22
9	5,1	5,18	0,08	1,57

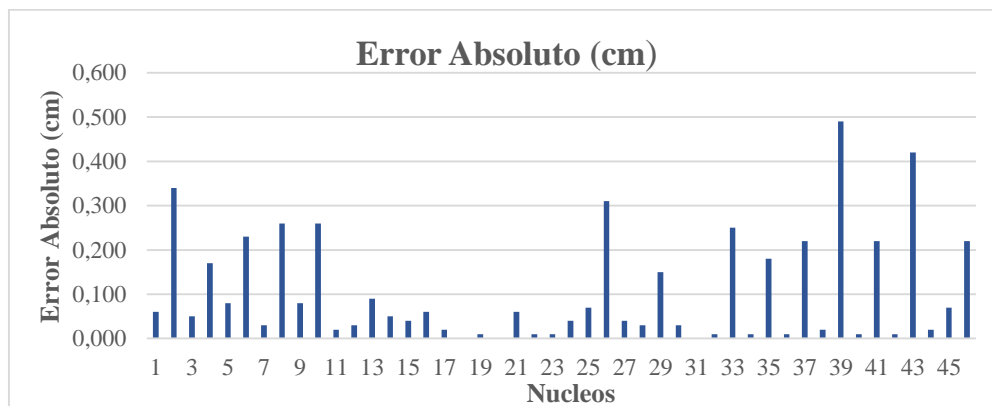
10	5,44	5,18	0,26	4,78
11	6,82	6,8	0,02	0,29
12	5,23	5,2	0,03	0,57
13	6,08	5,99	0,09	1,48
14	6,2	6,25	0,05	0,81
15	6,21	6,25	0,04	0,64
16	5,54	5,6	0,06	1,08
17	5,39	5,37	0,02	0,37
18	6,2	6,2	0,00	0,00
19	5,33	5,32	0,01	0,19
20	6,25	6,25	0,00	0,00
21	7,01	6,95	0,06	0,86
22	5,79	5,8	0,01	0,17
23	6,84	6,83	0,01	0,15
24	5,89	5,93	0,04	0,68
25	6,0	5,93	0,07	1,17
26	5,62	5,93	0,31	5,52
27	5,74	5,7	0,04	0,70
28	4,81	4,84	0,03	0,62
29	4,9	4,75	0,15	3,06
30	5,87	5,84	0,03	0,51
31	5,4	5,4	0,00	0,00
32	5,36	5,35	0,01	0,19
33	4,95	5,2	0,25	5,05
34	6,41	6,42	0,01	0,16
35	5,98	5,8	0,18	3,01

36	4,79	4,78	0,01	0,21
37	5,58	5,8	0,22	3,94
38	5,88	5,86	0,02	0,34
39	5,31	5,8	0,49	9,23
40	5,32	5,33	0,01	0,19
41	5,58	5,8	0,22	3,94
42	6,08	6,09	0,01	0,16
43	5,38	5,8	0,42	7,81
44	5,19	5,17	0,02	0,39
45	5,67	5,6	0,07	1,23
46	5,58	5,8	0,22	3,94

Fuente: Elaboración propia

Aun cuando los valores correspondientes al error relativo oscilan entre 0% y 9.2%, se observa igualmente que los valores en centímetros del error absoluto en su mayoría se encuentran entre los 0.010 y los 0.300 cm.

Figura 4.5. Grafica del error absoluto



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico anterior se agrupan los testigos (Núcleos) en donde se pudo determinar el porcentaje de error absoluto del uso de la técnica de GPR, en rangos de 0,100cm con lo cual se ha sido posible establecer que 32 de 46 puntos de extracción de núcleos evaluados (69.56%) presentan un valor de error absoluto menor a 0,100 cm, mientras que el (23.91%) de los puntos muestra valores superiores a 0,200 cm, esto indica un tolerable grado de precisión en el ámbito de la exploración indirecta con el uso del GPR.

4.8 VERIFICACIÓN DE LOS ESPESORES DE DISEÑO VS GPR, EXTRACCIONES DE NÚCLEOS

Para el estudio de caso los espesores según las especificación técnicas de la carretera el espesor de carpeta asfáltica es de 5cm a lo largo de todo el tramo de estudio.

Tabla 4.7. Comparación de espesores por medio del GPR, Núcleos extraídos del tramo y las especificaciones de diseño del tramo

Métodos	Km 5	Km 80	Km 160
Georradar GPR	5,9 cm	6,83 cm	5,17 cm
Extracción de núcleos	5,73 cm	6,84 cm	5,19 cm
Especificaciones técnicas de diseño	5 cm	5 cm	5cm

Fuente: Elaboración Propia

Estas lecturas se determinaron en tres puntos del tramo de estudio en el kilómetro 5+000, 80+000 y 160+000 mostrando el espesor del GPR, Extracción de Núcleo y Especificaciones de diseño del Tramo.

4.9 EXPOSICIÓN DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO OBTENIDOS DE LOS NÚCLEOS EXTRAÍDOS

4.9.1. Determinación del peso específico bulk

Para la realización de este ensayo del peso específico bulk basado en la norma (ASTM D 1188 – 96) para las muestras asfálticas se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Determinamos el peso de las muestras sin recubrir, realizando el pesaje al aire, para luego anotar el valor en las planillas.

Fotografía 4.8. Pesaje de los núcleos sin recubrir



Fuente: Elaboración propia

- Procedemos a cubrir toda la superficie de cada uno de los núcleos con talco, esto para evitar, que la parafina (cera) se adhiera al núcleo, cuando se lo retire la cera del núcleo.

Fotografía 4.9. Núcleo cubierto con talco



Fuente: Elaboración propia

- Luego procedemos a colocar parafina (cera) previamente derretida con ayuda de una brocha, a los núcleos, en una capa suficientemente gruesa como para que selle todos los vacíos superficiales, esto para evitar que ingrese agua a los núcleos, cuando se lo sumerja en agua, de ser así esta muestra ya no serviría.

Fotografía 4.10. Confinación del núcleo con parafina cera derretida



Fuente: Elaboración propia

- Dejar enfriar los núcleos con parafina, al aire a temperatura ambiente.

Fotografía 4.11. Colocado de la parafina a los núcleos



Fuente: Elaboración propia

- Procedemos a realizar el pesaje al aire de cada uno de los núcleos en la balanza.

Fotografía 4.12. Pesaje de los núcleos con parafina



Fuente: Elaboración propia

- Procedemos a determinar la masa de la muestra recubierta en un baño de agua a 25°C.

Fotografía 4.13. Pesaje de los núcleos sumergidos en agua



Fuente: Elaboración propia

- Realizamos trabajo de escritorio

4.9.2. Determinación de la densidad máxima de la mezcla asfáltica RICE

Para la realización de este ensayo de densidad máxima de la mezcla asfáltica RICE basado en la norma (ASTM D 2041) para muestras asfálticas se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Par realizar este ensayo debemos quitar la parafina de los núcleos, que se realizó anteriormente con mucho cuidado, evitando de no maltratar las muestras en el proceso.

Fotografía 4.14. Retirado de la parafina de los núcleos



Fuente: Elaboración propia

- Disgregar la muestra con las manos previo colocado al horno teniendo cuidado de no romper el agregado.

Fotografía 4.15. Horno para el calentado de la muestra



Fuente: Elaboración propia

- Una vez ya realizado el disgregado debemos enfriar la muestra a temperatura ambiente.

Fotografía 4.16. Núcleo disgregado



Fuente: Elaboración propia

- Seguidamente pasamos a calibrar el recipiente llenamos el picnómetro de vacío con agua para realizar el pasaje en el aire, teniendo mucho cuidado de no atrapar aire en el proceso del mismo.

Fotografía 4.17. Calibrado del picnómetro



Fuente: Elaboración propia

- Una vez calibrado el recipiente procedemos a colocar la muestra en el recipiente, para luego realizar el pesaje de la muestra.

- Después de realizar el pesaje debemos añadir agua a 25°C al recipiente para cubrir totalmente la muestra.

Fotografía 4.18. Picnómetro, con muestra sumergida



Fuente: Elaboración propia

- Colocamos la tapa al picnómetro de vacío, para luego colocar al dispositivo de agitación mecánica y sujetar adecuadamente a la superficie del aparato para comenzar la agitación.

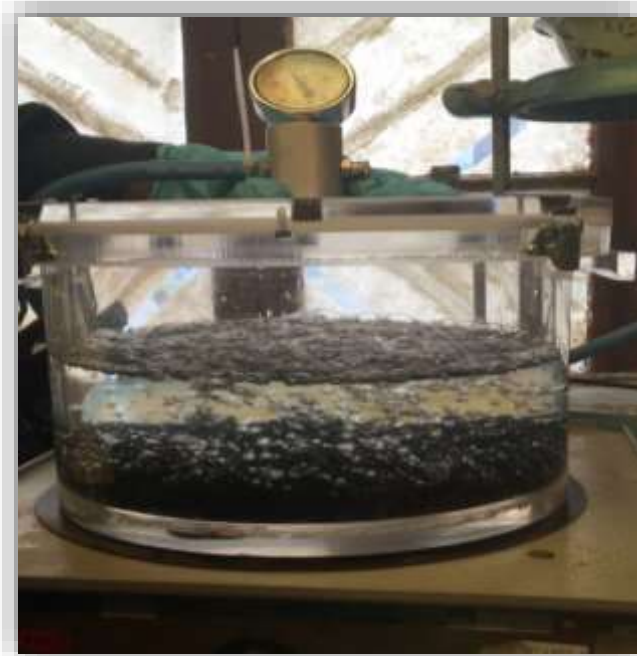
Fotografía 4.19. Proceso de agitación



Fuente: Elaboración propia

- Una vez asegura al dispositivo de agitación debemos inmediatamente eliminar el aire atrapado en la muestra aumentando gradualmente la presión de vacío hasta que el manómetro de presión residual indique $3,7 \pm 0,3$ kPa o $27,5 \pm 2,5$ mm mercurio el vacío debe lograrse alrededor de 2 min para luego liberar gradualmente la presión de vacío usando la válvula de alivio.

Fotografía 4.20. Eliminación del aire atrapado en la muestra



Fuente: Elaboración propia

- Inmediatamente después de la remoción del aire atrapado procedemos a llenar lentamente el picnómetro con agua, tratando de no introducir aire en la muestra.
- Medir la temperatura del agua en el picnómetro de vacío, retiramos el termómetro para luego llenarlo completamente de agua.
- Seguidamente procedemos a realizar el pesaje determinando la masa del contenedor, muestra y la tapa.

- Realizar el trabajo de escritorio

Resultados

Con los núcleos extraídos del asfalto, se determina el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica del tramo Uyuni – Condo K, en los cuadros 4.8 y 4.9 respectivamente se tienen los resultados de laboratorio.

Tabla 4.8. Porcentaje de vacíos de los núcleos del tramo I: Uyuni – km 80+000

PORCENTAJE DE VACIOS DE LOS NUCLEOS EXTRAIDOS				
Código	Progresiva	Gravedad Especifica Máxima Teórica	Gravedad Especificas Bulk	Porcentaje de Vacíos de la mezcla
17	0+020	2,37	2,19	7,59
12	0+120	2,36	2,18	7,63
2	5+000	2,38	2,18	8,40
18	5+000	2,39	2,21	7,53
26	10+000	2,48	2,29	7,66
14	15+000	2,44	2,24	8,20
28	20+000	2,46	2,24	8,94
29	25+000	2,39	2,18	8,79
10	30+000	2,31	2,18	5,63
43	30+000	2,34	2,18	6,84
9	35+000	2,44	2,19	10,25
15	40+000	2,32	2,18	6,03
23	45+000	2,44	2,25	7,79
7	50+000	2,46	2,24	8,94
16	50+000	2,45	2,24	8,57

11	55+000	2,33	2,18	6,44
8	57+750	2,32	2,18	6,03
4	65+000	2,45	2,24	8,57
13	67+500	2,44	2,29	6,15
39	70+000	2,45	2,23	8,98
5	75+000	2,48	2,24	9,68
21	77+500	2,42	2,23	7,85
6	80+000	2,50	2,24	10,40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9. Porcentaje de vacíos de los núcleos del tramo II: Km 80+400 – Cruce Condo K

PORCENTAJE DE VACIOS DE LOS NUCLEOS EXTRAIDOS

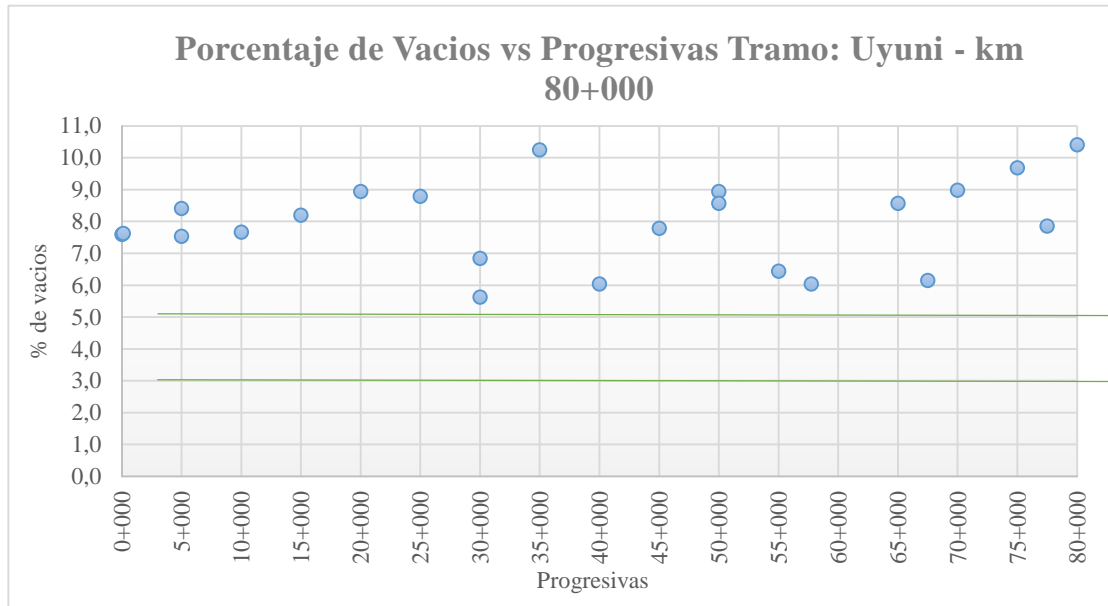
Código	Progresiva	Gravedad Especifica Máxima Teórica	Gravedad Especificas Bulk	Porcentaje de Vacíos de la mezcla
3	80+400	2,47	2,28	7,69
19	80+450	2,48	2,29	7,66
1	80+500	2,46	2,28	7,32
27	85+000	2,48	2,27	6,97
24	90+000	2,29	2,17	5,24
31	92+500	2,30	2,18	5,22
30	95+000	2,46	2,29	6,91
34	100+000	2,32	2,18	6,03
32	105+000	2,44	2,29	6,15
37	110+000	2,30	2,18	5,22
25	115+000	2,48	2,24	9,68

46	120+000	2,39	2,23	6,69
42	125+000	2,30	2,18	5,22
22	130+000	2,44	2,27	6,97
44	135+000	2,46	2,30	6,50
38	137+500	2,48	2,29	7,66
45	145+000	2,32	2,18	6,03
40	147+500	2,33	2,18	6,44
35	150+000	2,48	2,27	8,47
33	155+000	2,46	2,29	6,91
20	160+000	2,31	2,18	5,63
36	165+000	2,35	2,18	7,23
41	165+100	2,45	2,28	6,94

Fuente: Elaboración propia

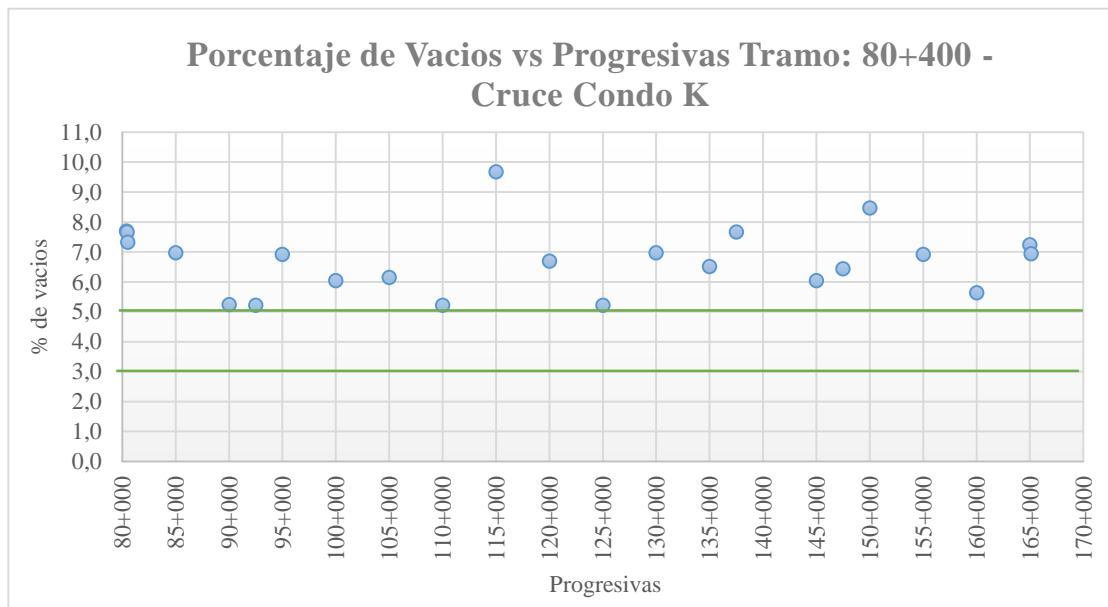
Como se muestra en las siguientes figuras 4.8 y 4.9, se muestran los límites del porcentaje de vacíos existente en la carpeta asfáltica colocada, después de la compactación debe encontrarse entre 3% y 5%

Figura 4.6. Porcentaje de vacíos, progresiva Uyuni a km 80+000



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7. Porcentaje de vacíos, progresiva km 80+400 a Cruce Condo K



Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de estas graficas se considera que no se establece límite superior, por lo que la determinación del porcentaje de vacíos se efectúa con respecto al límite inferior únicamente.

4.10 CORRELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN Y PORCENTAJE DE VACÍOS NÚCLEOS

La relación entre la Velocidad de Propagación de la onda y el porcentaje de vacíos en los núcleos, muestra la tendencia de la velocidad a aumentar y consecuentemente a una disminución de tiempo de reflexión a medida que se presentan los vacíos en los núcleos

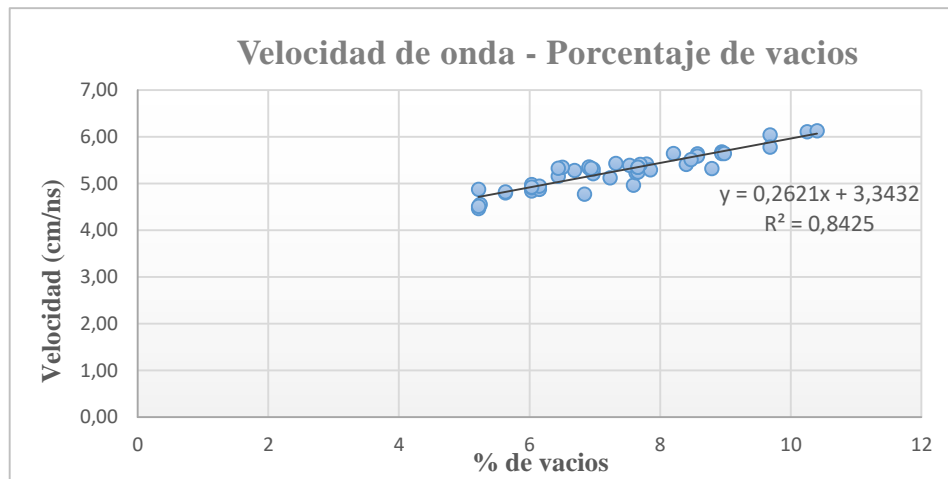
Tabla 4.10. Porcentaje de vacíos de los núcleos del tramo Uyuni – Condo K

N°	Progresiva	Porcentaje de vacios nucleos	Velocidad (cm/ns)
1	0+020	7,59	4,968
2	0+120	7,63	5,235
3	5+000	8,4	5,408
4	5+000	7,53	5,393
5	10+000	7,66	5,247
6	15+000	8,2	5,641
7	20+000	8,94	5,678
8	25+000	8,79	5,320
9	30+000	5,63	4,801
10	30+000	6,84	4,774
11	35+000	10,25	6,128
12	40+000	6,03	4,880
13	45+000	7,79	5,416
14	50+000	8,94	5,646
15	50+000	8,57	5,636
16	55+000	6,44	5,157
17	57+750	6,03	4,955
18	65+000	8,57	5,591
19	67+500	6,15	4,885
20	70+000	8,98	5,641
21	75+000	9,68	6,090
22	77+500	7,85	5,292
23	80+000	10,4	6,145
24	80+400	7,69	5,411
25	80+450	7,66	5,352
26	80+500	7,32	5,430
27	85+000	6,97	5,210
28	90+000	5,24	4,553
29	92+500	5,22	4,464
30	95+000	6,91	5,333

31	100+000	6,03	4,982
32	105+000	6,15	4,952
33	110+000	5,22	4,899
34	115+000	9,68	5,779
35	120+000	6,69	5,278
36	125+000	5,22	4,514
37	130+000	6,97	5,306
38	135+000	6,5	5,347
39	137+500	7,66	5,351
40	145+000	6,03	4,958
41	147+500	6,44	5,326
42	150+000	8,47	5,516
43	155+000	6,91	5,355
44	160+000	5,63	4,879
45	165+000	7,23	5,124
46	465+100	6,94	5,326

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.8. Diagrama de dispersión entre el % de vacíos y la velocidad de onda



Fuente: Elaboración propia

En el grafico anterior se observa que la velocidad de la onda electromagnética tiende a aumentar cuando mayor son los vacíos en los núcleos de la carpeta asfáltica.

La velocidad de la onda aumenta a medida que aumentan los vacíos determinados de los núcleos. Además, la recta no tiene excesiva pendiente. El coeficiente de R2 es elevado con lo cual se da por válida la relación entre los dos parámetros.

Se corrobora el comportamiento de la onda cuando su propagación, es por medios que contengan vacíos, ya que la presencia de vacíos en cualquier medio a estudiar, con lleva a un aumento de la velocidad de la onda y consecuentemente a una disminución del tiempo de reflexión.

4.11 VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL GEORRADAR GPR CON RESPECTO A LOS ESPEORES DE LOS NÚCLEOS Y ESPEORES DE DISEÑO DEL TRAMO DE ESTUDIO

Tabla 4.11. Tabla comparativa de los resultados

TABLA COMPARATIVA				
Nombre		Resultados Obtenidos	Valor según especificaciones técnicas	Observaciones
Espesor de Carpeta	Muestra en campo (Núcleos)	5,742 cm	> 5 cm	Cumple
	Espesor medido con el GPR	5,767 cm	> 5 cm	Cumple

Fuente: Elaboración propia

4.12 ANÁLISIS DEL GRADO DE CONFIABILIDAD EN LA DETERMINACIÓN DE ESPEORES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES UTILIZANDO EL EQUIPO GEORRADAR

4.12.1 Confiabilidad con el coeficiente de Alfa de Cronbach

Para determinar el grado de confiabilidad de los datos obtenidos entre el GPR y las extracciones de núcleos, se utilizó el Programa SPSS, introduciendo 46 lecturas para las dos variables, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4.12. Resumen de procesamientos de casos

		N	%
Casos	Válido	46	100,0

	Excluido	0,00	0,00
	Total	46	100,0

Tabla 4.13. Estadísticas de fiabilidad de ambos casos

Alfa de Cronbach	Alfa de Cronbach basada en elementos estandarizados	N de elementos
0,97	0,97	2

	Media	Mínimo	Máximo	Rango	N de elementos
Medias de elemento	5,75	5,74	5,76	0,02	2

Fuente: Elaboración Propia

4.12.2 Variable: Espesor real “Núcleos”

Tabla 4.14. Estadísticas de fiabilidad espesores núcleos

Validos	46
Perdidos	0,00
Media	5,74
Mediana	5,70
Moda	5,58
Suma	264,12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.15. Porcentaje acumulado espesores de núcleos

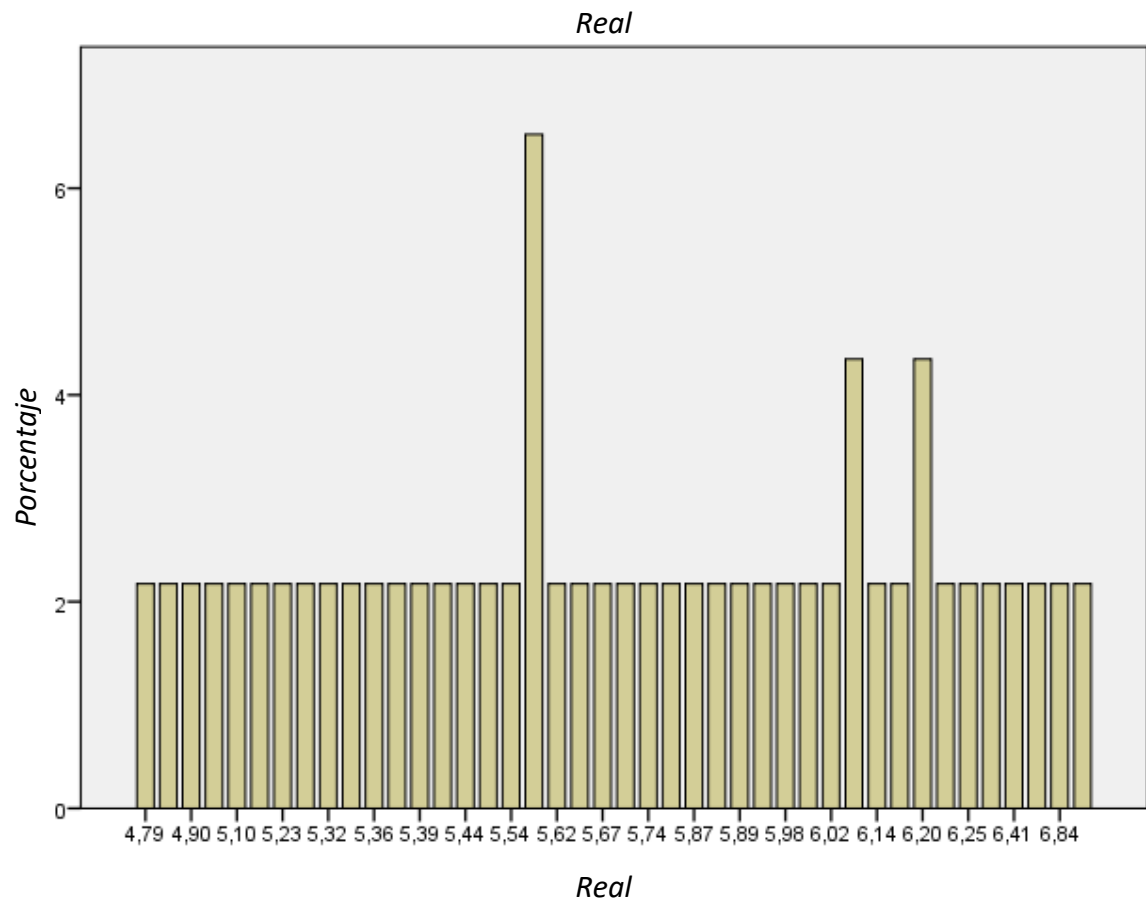
Validos	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
4,79	1	2,20	2,20	2,20
4,81	1	2,20	2,20	4,30
4,90	1	2,20	2,20	6,50

4,95	1	2,20	2,20	8,70
5,10	1	2,20	2,20	10,9
5,19	1	2,20	2,20	13,0
5,23	1	2,20	2,20	15,2
5,31	1	2,20	2,20	17,4
5,32	1	2,20	2,20	19,6
5,33	1	2,20	2,20	21,7
5,36	1	2,20	2,20	23,9
5,38	1	2,20	2,20	26,1
5,39	1	2,20	2,20	28,3
5,40	1	2,20	2,20	30,4
5,44	1	2,20	2,20	32,6
5,46	1	2,20	2,20	34,8
5,54	1	2,20	2,20	37,0
5,58	3	6,50	6,50	43,5
5,62	1	2,20	2,20	45,7
5,65	1	2,20	2,20	47,8
5,67	1	2,20	2,20	50,0
5,73	1	2,20	2,20	52,2
5,74	1	2,20	2,20	54,3
5,79	1	2,20	2,20	56,5
5,87	1	2,20	2,20	58,7
5,88	1	2,20	2,20	60,9

5,89	1	2,20	2,20	63,0
5,97	1	2,20	2,20	65,2
5,98	1	2,20	2,20	67,4
6,00	1	2,20	2,20	69,6
6,02	1	2,20	2,20	71,7
6,08	2	4,30	4,30	76,1
6,14	1	2,20	2,20	78,3
6,16	1	2,20	2,20	80,4
6,20	2	4,30	4,30	84,8
6,21	1	2,20	2,20	87,0
6,25	1	2,20	2,20	89,1
6,27	1	2,20	2,20	91,3
6,41	1	2,20	2,20	93,5
6,82	1	2,20	2,20	95,7
6,84	1	2,20	2,20	97,8
7,01	1	2,20	2,20	100,0
Total	46	100,0	100,0	

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.9. Porcentaje acumulados núcleos



Fuente: Elaboración propia

4.12.3 Variable: Espesor “GPR”

Tabla 4.16. Estadísticas de fiabilidad espesores georradar

Validos	46
Perdidos	0,00
Media	5,76
Mediana	5,80
Moda	5,80
Suma	265,29

Fuente: Elaboración propia

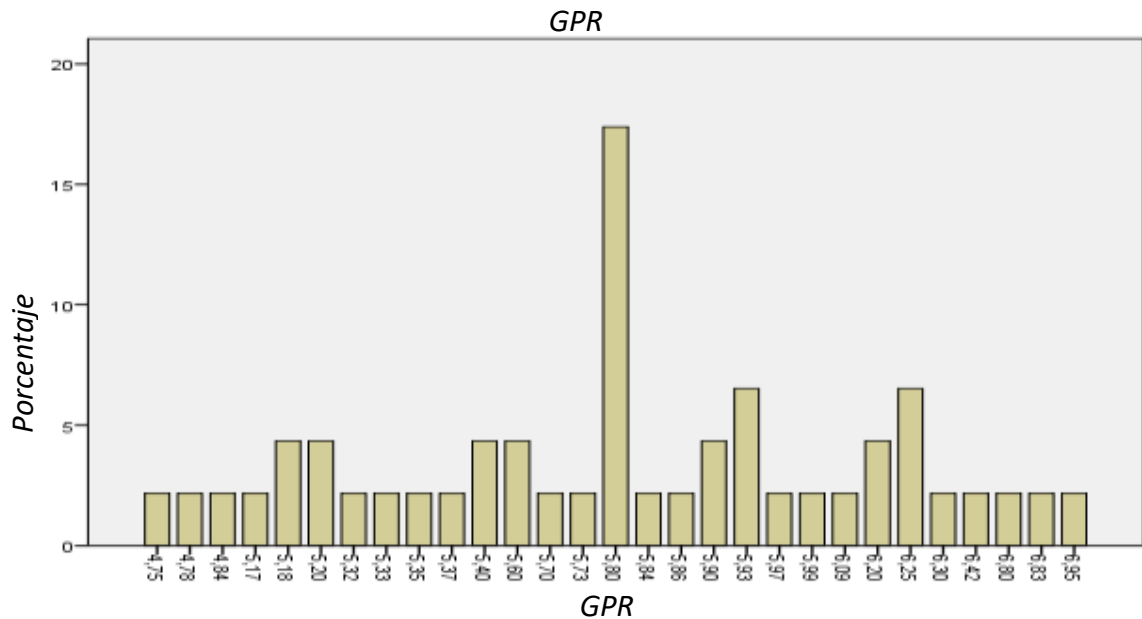
Tabla 4.17. Porcentaje acumulado georradar

Validos	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
4,75	1	2,20	2,20	2,20
4,78	1	2,20	2,20	4,30
4,84	1	2,20	2,20	6,50
5,17	1	2,20	2,20	8,70
5,18	2	4,30	4,30	13,0
5,20	2	4,30	4,30	17,4
5,32	1	2,20	2,20	19,6
5,33	1	2,20	2,20	21,7
5,35	1	2,20	2,20	23,9
5,37	1	2,20	2,20	26,1
5,40	2	4,30	4,30	30,4
5,60	2	4,30	4,30	34,8
5,70	1	2,20	2,20	37,0
5,73	1	2,20	2,20	39,1
5,80	8	17,4	17,4	56,5
5,84	1	2,20	2,20	58,7
5,86	1	2,20	2,20	60,9
5,90	2	4,30	4,30	65,2
5,93	3	6,50	6,50	71,7
5,97	1	2,20	2,20	73,9

5,99	1	2,20	2,20	76,1
6,09	1	2,20	2,20	78,3
6,20	2	4,30	4,30	82,6
6,25	3	6,50	6,50	89,1
6,30	1	2,20	2,20	91,3
6,42	1	2,20	2,20	93,5
6,80	1	2,20	2,20	95,7
6,83	1	2,20	2,20	97,8
6,95	1	2,20	2,20	100,0
Total	46	100,0	100,0	

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.10. Porcentaje acumulados georradar



Fuente: Elaboración propia

4.13 PRESUPUESTOS Y COSTOS

Con el fin de realizar la evaluación económica de los costos que con lleva el uso de cada uno de los métodos, se debe contar con la información de la mano de obra del personal y del equipo utilizado.

Por lo tanto, se calculó los precios unitarios respectivos que se necesitan para la “Determinación de Espesores de Carpeta Asfáltica en Pavimentos Flexibles en el Tramo Uyuni – Condo K” y estos son los siguientes:

- Ítem nro. 1. Lecturas de los espesores con el georradar, tenemos un costo total de 121,25 bs. Por kilómetro.
- Ítem nro. 2. Extracción de Núcleos, tenemos un costo total de 100,26 bs. Por cada extracción.
- Ítem nro. 3. Reparación de la carretera, tenemos un costo total de 74,85 bs. Por cada extracción.

Ver Anexos 11

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

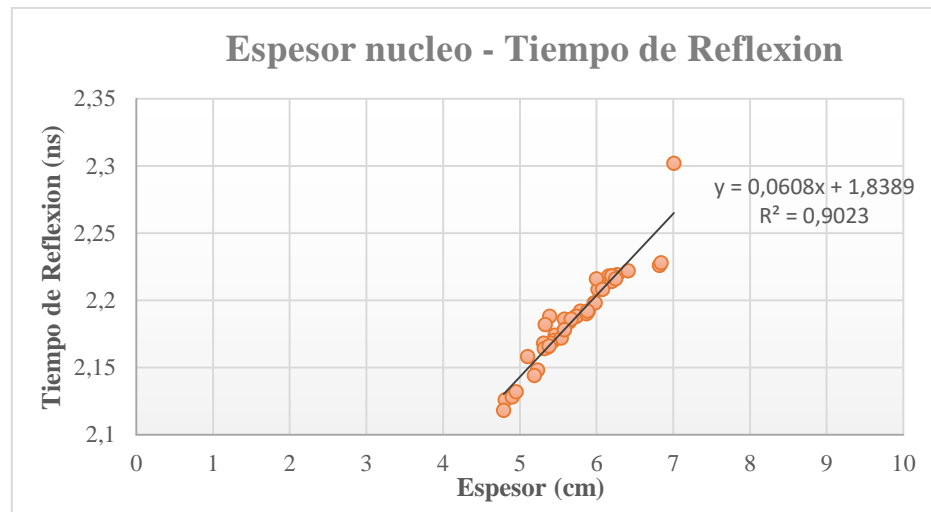
5.1 CONCLUSIONES

Con base en las actividades realizadas en el presente trabajo fue posible establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- Se logró realizar la descripción detallada de todo el ensayo de prospección con el GPR, Extractor de núcleos, en el pavimento flexible más específicamente la carpeta asfáltica, desde el armado tomando en cuenta los cuidados que se deben tener, calibrado mismo que se tomó como control de los espesores un tramo de prueba de 500m del mismo tramo antes del inicio del ensayo, montaje al vehículo el cual ha sido acondicionado para estos trabajos de auscultación y recorrido por el tramo de 165.390 km, para su almacenaje de las lecturas en el programa visual Ground Visión 2, y el procesado e interpretación final de datos en el programa Rad Explorer 1.4.
- Para hacer un análisis comparativo en la determinación de espesores se utilizó el método destructivo (Extracción de Núcleos) y el método no destructivo (GPR), es necesario realizar el procesado de datos en el programa Rad Explorer cada 1.5 km para obtener resultados más precisos. Habiendo obtenido un espesor por el método destructivo de 5,742 cm y un espesor por el método no destructivo de 5,767cm.
- La utilización del georradar GPR Mala ProEx, junto con las antenas blindadas demostró ser una herramienta no destructiva efectiva para la determinación de espesores de carpeta asfáltica en el tramo Uyuni – CondoK, es una técnica que sin la necesidad de realizar ensayos de tipo destructivo, permite disminuir considerablemente el tiempo empleado en un estudio de evaluación y su futura reconstrucción del pavimento.
- Para tener buenos resultados en la medición de espesores a la hora de realizar el procesado de datos en el programa, lo ideal es hacer uso y aplicación de filtros del programa, ya sea para eliminar el ruido de fondo, definir el cero de referencia,

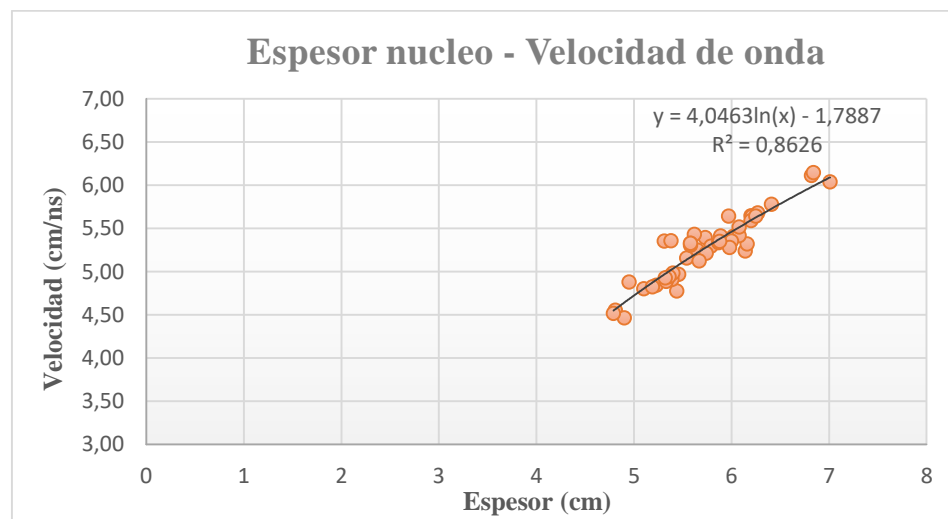
aclarar y definir la parte profunda del radargrama, de tal forma se pueda visualizar de la mejor manera los radargramas, llegando a contar con 110 radargramas evaluados en el tramo de estudio.

- El equipo GPR con las antenas de 2.3Ghz y 800Mhz correlacionado con las extracciones de núcleos es eficaz para determinar con un grado aceptable de precisión los espesores de carpeta asfáltica. Esto en virtud a que los resultados numéricos obtenidos establecen en rangos de 0.100 cm que 32 de 46 núcleos extraídos en el tramo el (69,56%) presentan un valor de error absoluto menor a 0.100 cm, mientras que el (23,91%) de los puntos muestran valores superiores a 0.200cm, esto indica un tolerable grado de precisión en el ámbito de la exploración con el uso del GPR.
- En el desarrollo del proyecto a lo largo del tramo de estudio se ha identificado 18 alcantarillas y 2 puentes, lo que demuestra que el equipo puede ser utilizado no solamente para determinar los espesores en el pavimento, sino también para hacer un inventario de drenajes referentes a alcantarillas y puentes, haciendo uso de los marcadores de referencia que cuenta el programa Ground Vision.
- Se ha podido comprobar a nivel cuantitativo la clara dependencia entre los espesores del núcleo, la velocidad de propagación, tiempo de propagación. Las conclusiones extraídas son las siguientes:
 - **Relación entre tiempo de reflexión de la onda electromagnética y espesor real del pavimento:** El tiempo de reflexión es mayor cuanto más espesor tiene la carpeta asfáltica esta condición se cumple debido a que el pavimento del tramo de estudio no se encuentra muy deteriorado es decir deflexiones elevadas, a pesar de ser una carretera relativamente nueva.



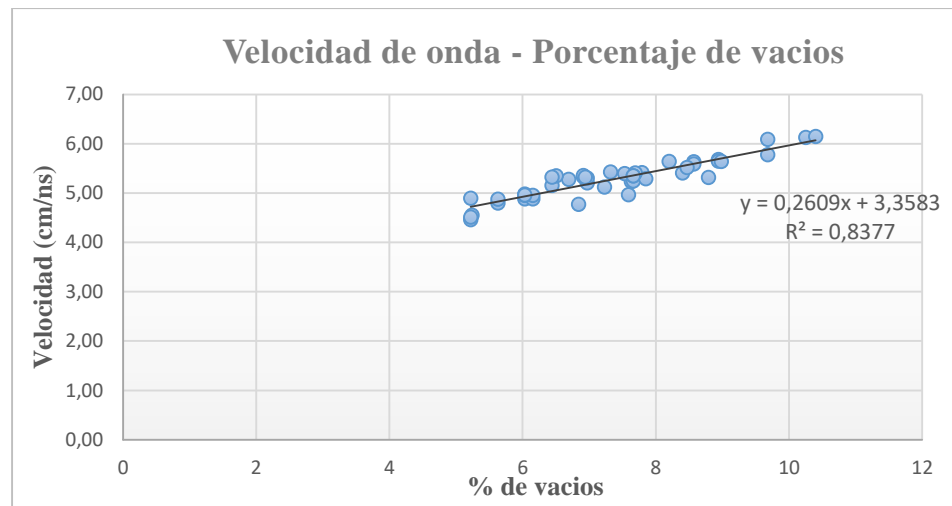
Pero en situaciones y por investigaciones realizadas suelen ocurrir lo contrario cuando en el pavimento se tiene deflexiones elevadas muestran tiempos de reflexión menores, esta disminución de tiempo de reflexión es debida a la presencia de aire en la mezcla bituminosa (micro fisuras) las cuales provocan que la velocidad de propagación sea mayor y en consecuencia se disminuya el tiempo de reflexión, esta es una de las formas de corroborar la veracidad del georradar terrestre para medir espesores del pavimento.

- **Relación entre velocidad de reflexión de la onda electromagnética y espesor real del pavimento:** La velocidad de propagación es mayor a medida que aumenta el espesor del pavimento.



Esto sea debido a la heterogeneidad del medio (carpeta asfáltica), también este aumento de velocidad es debido a micro fisuras que se encuentran secas, llenas de aire dentro del núcleo el cual provoca el aumento de la velocidad cuando la onda se propaga por la carpeta.

- Se determinó la correlación que existe entre la velocidad de propagación y porcentaje de vacíos (núcleos) determinada en laboratorio, donde se han hecho 46 ensayos de vacíos a los núcleos cuyos resultados son:



Llagando a concluir la clara tendencia de la velocidad a aumentar y consecuentemente a una disminución del tiempo de reflexión a medida que se presentan mayor porcentaje de vacíos en los núcleos.

- Por otro lado, el conocimiento de los espesores en cada punto de la carretera es crucial para poder establecer como se encuentra estructuralmente (no basta con el espesor de diseño del proyecto, ya que este no es el que hay en todos los puntos de la carretera y el mismo margen de construcción de la misma hace variar considerablemente los resultados) para no tener que extraer testigos (núcleos) de la carretera que se quiera estudiar se propone hacer el uso del georradar.
- Para determinar el grado de confiabilidad de los datos entre el GPR y extracción de núcleos, se utilizó el programa SPSS introduciendo 46 datos obtenidos para las

dos variables, determinando así por el Alfa de Cronbach con un 97,5 del 95 % del grado de confiabilidad del uso del georradar.

- Con la realización de los precios unitarios y presupuesto general de las actividades que con lleva realizar la determinación de espesores por los dos métodos se pudo estimar el costo aproximado que significaría realizar la determinación de los espesores en el tramo de estudio, por el método directo (Extracción de núcleos) el costo determinado es 8.055,06 bs y el método indirecto (no destructivo) georradar es 20.053,54 bs, con la diferencia que con el georradar yo obtengo los espesores de todo el tramo carretero, en comparación al otro método que determina el espesor de manera puntual.

5.2 RECOMENDACIONES

Se realizará las recomendaciones pertinentes del proyecto de investigación aplicada, éstas se detallan a continuación:

- Se recomienda el uso del georradar porque es un ensayo no destructivo que nos permite tener una lectura continua de los espesores analizados, que como es un ensayo indirecto necesariamente se tiene que extraer algunos núcleos para la verificación y así como para la calibración del equipo.
- Durante la interpretación de los registros en el programa RadExplorer se debe ser cuidadoso en el análisis de las señales. La aplicación incorrecta de los filtros en este programa puede llevar a interpretaciones erróneas y un mal manejo de estos programas.
- El trabajo de campo y sus anotaciones realizadas en el programa Ground Vision 2 al momento del recorrido por el tramo, es la etapa de mayor cuidado que debemos tener en el momento de utilizar el Georradar.
- La técnica del Georradar al igual que la mayoría de los ensayos geofísicos, necesitan tener un nivel de información alto de la zona a medir, esto para poder descartar efectos o ruidos indeseables a la hora de realizar el procesado de los radargramas en el programa.

- Cuando se utilizan antenas en estudios de prospección es importante que la mayor parte de la energía radiada lo haga en la dirección al medio a estudiar. Esto permite mejorar la señal – ruido, permitiendo obtener registros nítidos con un rango más elevado.
- En caso de que se presente condiciones de relámpago o de lluvia durante la medición, se deberá proteger el equipo con una cubierta impermeable para poder continuar el proceso de trabajo en campo. Dado que las lluvias fuertes pueden saturar el suelo, afectando negativamente las señales del GPR y pueden causar fallas en el equipo y en la confiabilidad de los resultados, dado que un contenido de humedad en el terreno o en este caso la carretera, puede dar lugar a mediciones de profundidad inexactas.
- Al momento del montaje y armado del equipo se debe tener cuidado a la hora de realizar la conexión de la fibra óptica al módulo de interface “modulo óptico”, porque de conectar mal podemos quemar el equipo, estos cables están marcados por las siglas T (Trasmisor), R (Receptor), y D (Datos) se debe verificar que las conexiones se realice en las mismas iniciales respetando el nombre de los cables es decir T-T, R-R y D-D.
- Se recomienda que los equipos utilizados para la realización de los ensayos involucrados en la elaboración del proyecto deberán ser calibrados periódicamente a fin de que la ejecución y los resultados obtenidos por los mismos sean los certeros posibles.
- Se recomienda en un futuro trabajo que se pueda hacer en la universidad, una comparación del Georradar con el Deflectometro de Impacto, para que se pueda tener las diferencias del uso de estos dos métodos, ya que en mi trabajo se ha hecho con un método no destructivo y el cual se ha visto los beneficios que son positivos.