

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**ANALISIS DEL EFECTO WASHBORD MEDIANTE FOTOGRAMETRIA Y  
CARACTERIZACION DE SUELOS.**

**Juan Daniel Vivas Silva**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito

para la obtención del título de

Ingeniería Civil

Quito, 08 de Enero de 2024

**Universidad San Francisco de Quito USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**ANALISIS DEL EFECTO WASHBORD MEDIANTE FOTOGRAMETRIA Y  
CARACTERIZACION DE SUELOS.**

**Juan Daniel Vivas Silva**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Juan Pablo Villacreses, PhD, Ing.**

Quito, 08 de Enero de 2024

**© DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Juan Daniel Vivas Silva

Código: 00206114

Cédula de identidad: 0503890592

Lugar y fecha: Quito, 08 de enero de 2024

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

Las vías no pavimentadas representan una parte importante dentro de la estructura vial nacional, en su mayoría son vías que no reciben el cuidado y el mantenimiento que requieren para mantener su serviciabilidad por lo que estas se vuelven inseguras para los usuarios, el constante flujo de vehículos desgasta el suelo generando ondas que hacen que las llantas de los vehículos se separen de la superficie ocasionando que se vuelva peligroso circular por ellas, este efecto de ondas se lo conoce como “*washboard*” este efecto genera ondas transversales en la vía, para analizar este fenómeno se realizara fotogrametría con drones para hacer un levantamiento de la superficie y generar un perfil con el fin de analizar el fenómeno y realizar una caracterización de los suelos mediante ensayos de granulometría, Proctor y CBR para conocer las características de los suelos donde ocurre el fenómeno, además se analizara el tipo de trafico de la zona y la velocidad a la que estos circulan para realizar el análisis de los factores de carga y velocidad que se cree que son los que más afectan a este fenómeno.

**Palabras clave:** Vías no pavimentadas, serviciabilidad, fotogrametría, granulometría, Proctor, CBR, tipo de tráfico.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCION</b> .....	9
<b>2. MATERIALES Y METODOS</b> .....	10
<b>3. RESULTADOS</b> .....	12
3.1 Compactaciones .....	12
3.2 CBR .....	13
3.3 Perfiles .....	14
3.4 Velocidades y densidades .....	15
3.5 Amplitud y longitud media .....	17
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	18
<b>5. REFERENCIAS</b> .....	20

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Vuelo del dron sobre la vía .....	11
Figura 2.	Vuelo del dron a 45° .....	11
Figura 3.	Granulometrías .....	12
Figura 4.	Curvas de compactación .....	13
Figura 5.	Resultados de ensayo CBR.....	14
Figura 6.	Perfiles de las vías .....	15
Figura 7.	Caja y bigotes de velocidades.....	16
Figura 8.	Amplitud de onda.....	17
Figura 9.	Longitud de onda .....	18

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.	Coordenadas GWS 84 .....	10
Tabla 2.	Densidades y volumen de vacíos.....	16

## 1. INTRODUCCION

Las vías no pavimentadas en el Ecuador representan un 31% de la red vial que en su mayoría son de caminos terciarios y vecinales, debido al crecimiento poblacional de los últimos años y el desarrollo en la industria automotriz las vías no pavimentadas se han vuelto más transitadas y con esto se ha observado la formación de ondas transversales, este fenómeno se conoce como “washboard”, se conoce que este fenómeno se encuentra presente en suelos no cohesivos es decir se encuentra presente en suelos granulares. El efecto del washboard Los factores que tienen un mayor impacto en la formación de este fenómeno son los siguientes: la velocidad a la que transitan los vehículos, la masa del vehículo es decir el tipo de vehículos que transiten por las vías y las propiedades del suelo en cuanto al tamaño de partículas y como estas se encuentren distribuidas (Mather, 1967). Es por esto por lo que se analizará si los factores mencionados anteriormente tienen relación con este fenómeno y como estos han influenciado en las vías no pavimentadas,

Para poder analizar este efecto con los distintos factores es necesario generar la superficie que se va a analizar, en este caso se analizarán cuatro vías no pavimentadas que presentan esta problemática y para generar la superficie de cada una de estas se realizará mediante fotogrametría a partir de drones para recopilar las fotografías y procesarlas mediante un software para poder obtener la amplitud de las ondas y la distancia a la que se encuentra una de la otra, además se realizará un análisis de tráfico vehicular que transita por estas zonas para conocer de forma aproximada las cargas a las que se encuentra sometida, junto al análisis de tráfico se realizará mediciones en las velocidades de los vehículos para determinar el efecto que tiene en el fenómeno del washboard.

Finalmente se realizarán ensayos de laboratorio como una granulometría del suelo de cada una de las vías que se analizarán con el fin de conocer la composición del tamaño de partículas que conforman el suelo del lugar, se realizarán otros ensayos de laboratorio como son los

ensayos Proctor y CBR, estos con el fin de conocer algunas de las propiedades de estos suelos como la humedad óptima, densidad, y el esfuerzo necesario para penetrar el suelo, de igual forma se comparará las densidades obtenidas en campo con las que se obtengan en los ensayos de laboratorio, finalmente se realizara una comparación entre los resultados obtenidos en la fotogrametría, velocidad de los vehículos, tipo de vehículo y los ensayos de laboratorio realizados.

## 2. MATERIALES Y METODOS

Para realizar este estudio se localizarán vías donde se encuentre el efecto washbord, en este caso se han localizado cuatro vías.

Tabla 1. Coordenadas GWS 84

Lugar	Zona	Abscisa	Norte/Sur
Malchingui 1	17 M	794285.85 m E	9998878.15 m S
Malchingui 2	17 N	793290.87 m E	2839.00 m N
Malchingui 3	17 N	791683.00 m E	2816.00 m N
Checa	17 M	797441.00 m E	9986946.00 m S

En la tabla anterior se muestran las coordenadas donde se encuentran las vías con esta problemática, todas estas se encuentran en la provincia de Pichincha.

Una vez que se localizó las vías se realizó el vuelo de drones como se observa en la figura 1 con la finalidad de realizar una fotogrametría para generar el terreno y poder analizar las ondas que se encuentran presentes.



Figura 1. Vuelo del dron sobre la vía

Para el vuelo del dron se tomaron imágenes cada 0.5s, para lograr una correcta generación de la superficie de la vía se realizaron cinco vuelos a lo largo de la vía, la primera el vuelo se lo realiza por encima de la superficie donde se coloca una cinta métrica, el siguiente vuelo se lo realiza con la cámara a  $90^\circ$  respecto al eje de la vía, y otro vuelo con un ángulo de  $45^\circ$  estas pasadas se requieren de ambos lados con la finalidad de recopilar suficiente información.



Figura 2. Vuelo del dron a  $45^\circ$

En la figura 2 se observa el vuelo del dron con la inclinación de  $45^\circ$  de las diferentes vías que se estudiaron, en las imágenes también se observa la presencia del fenómeno de washboard.

Para la caracterización de suelos se realizaron las granulometrías de los suelos donde se obtuvo la siguiente gráfica:

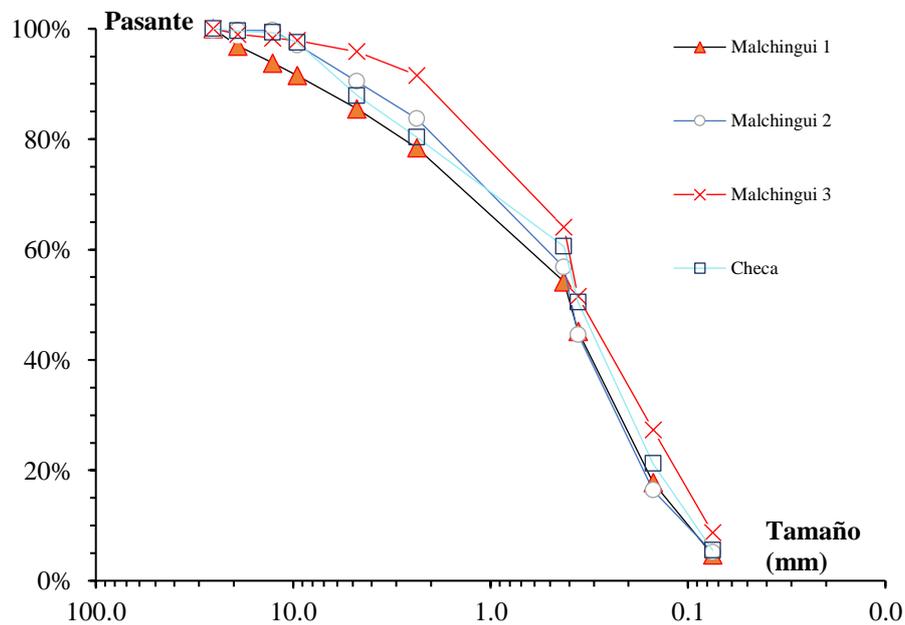


Figura 3. Granulometrías

En la figura 3 se observan las granulometrías de cada una de las vías donde se observa que tienen un comportamiento similar lo que nos indica que el fenómeno se da en un mismo tipo de suelo, como se mencionó anteriormente es un fenómeno que se encuentra presente en suelos no cohesivos, al realizar el análisis de las curvas granulométricas se obtiene que estamos en presencia de una arena.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Compactaciones

Dentro de la caracterización de suelos de igual manera se realizó un ensayo de compactaciones para encontrar el porcentaje de humedad óptimo y la densidad, para el ensayo

se realiza moldes con diferentes contenidos de humedad para obtener la curva que se observa en la figura 4, estos ensayos de compactación se realizan bajo la normativa ASTM D-1557 que nos indica la cantidad de energía de compactación que se requiere para cada uno de los métodos.

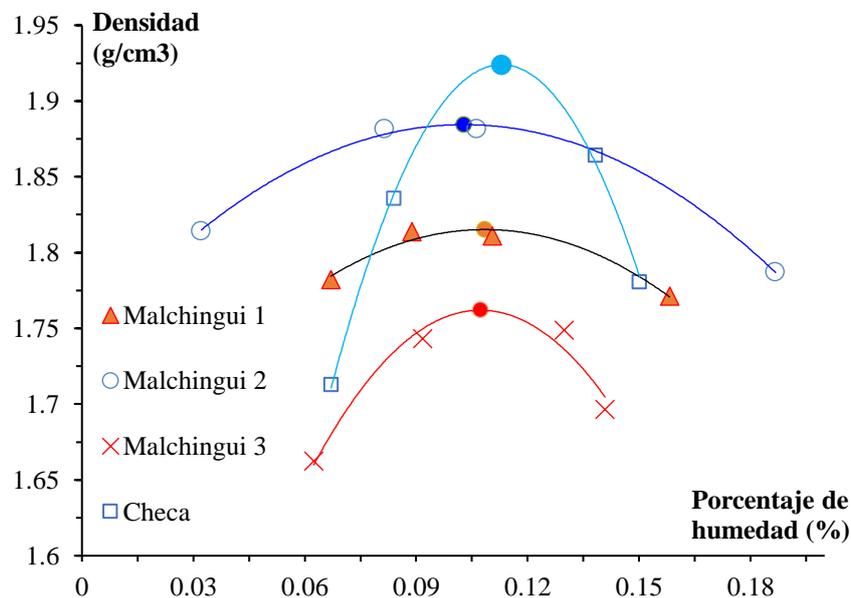


Figura 4. Curvas de compactación

Como se observa en la gráfica anterior se obtuvo que el suelo de Checa tiene una mayor densidad y el porcentaje de humedad de todas las vías a estudiar es similar lo que nos indica de igual manera que estamos en presencia de un mismo tipo de material que se definió como arena.

### 3.2 CBR

Otro parámetro dentro de la caracterización de suelos es conocer la resistencia a corte del material, en este caso al trabajar con material que se encuentra en vías es importante realizar un ensayo de CBR ya que este nos permite conocer la calidad del material que se tiene, esto es útil ya que al tratarse de una vía esta estará expuesta a tráfico pesado.

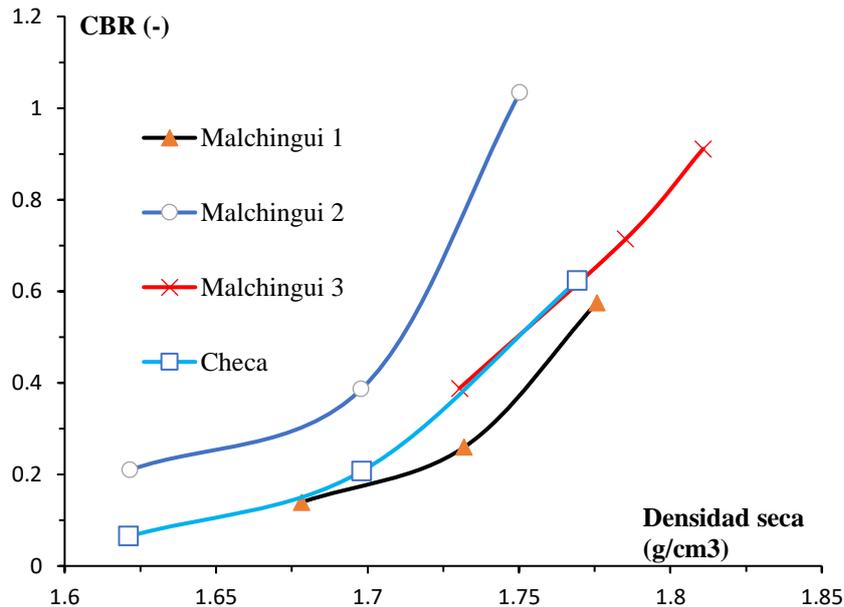


Figura 5. Resultados de ensayo CBR

Para el ensayo de CBR que se muestra en la gráfica anterior se observa que a pesar de ser el mismo tipo de suelo en el caso de Malchingui 1 se requiere menor cantidad de energía para obtener una compactación mayor que en el caso de Checa que requiere una mayor cantidad de energía para obtener la misma compactación.

### 3.3 Perfiles

Una vez realizada la fotogrametría y procesada la información de Agisoft se extrae los puntos de la superficie del terreno y se corrige la pendiente para obtener el perfil del terreno, en la figura 6 se encuentran los perfiles de cada una de las vías donde se ha tomado una distancia igual con el fin de comparar el comportamiento del fenómeno en cada una de las vías.

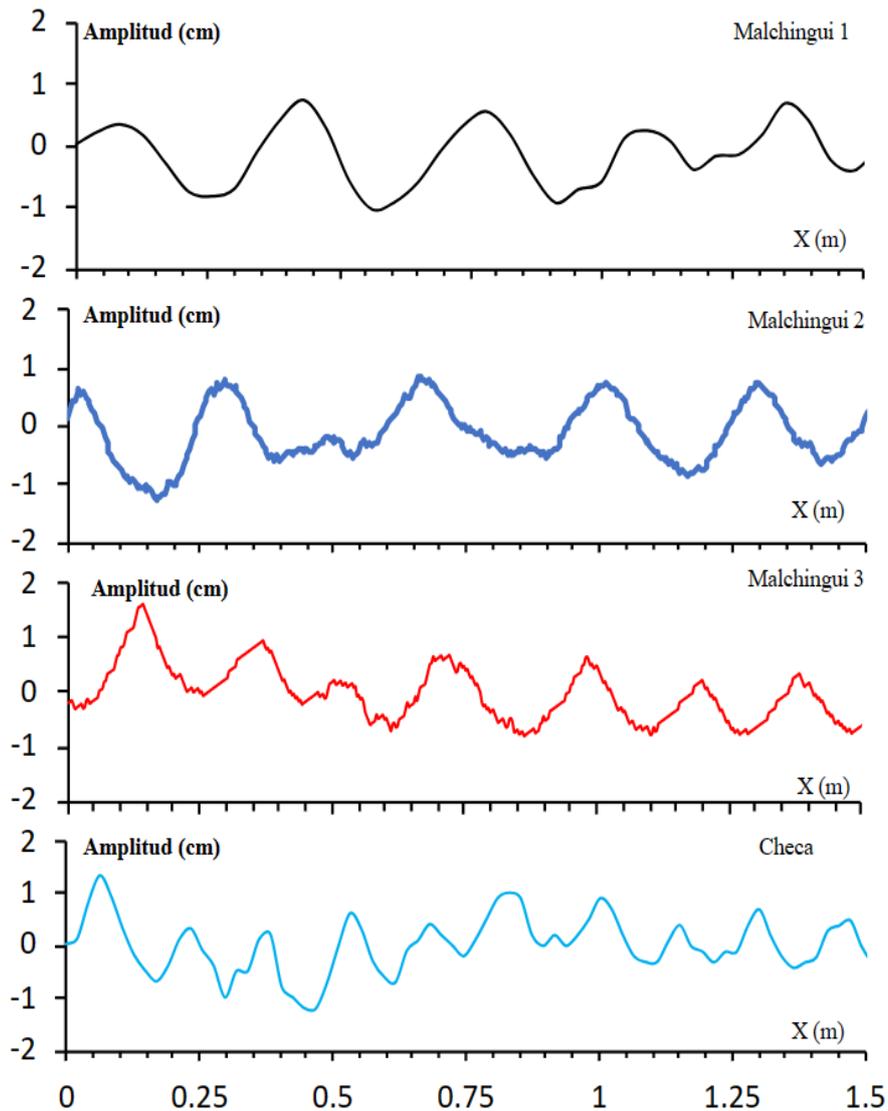


Figura 6. Perfiles de las vías

En la gráfica anterior se observa que en los perfiles que se realizaron para malchingui 1 y 2 se tiene cinco picos mientras que en malchingui 2 hay un pico más en la misma distancia, por otro lado, en el perfil de Checa los picos se encuentran a menor longitud por lo que este presenta una mayor cantidad de picos.

### 3.4 Velocidades y densidades

Con el propósito de analizar la relación que tiene la velocidad en el efecto washboard se recopiló información sobre la velocidad a los vehículos que transitan en la vía y se realizó un diagrama de caja y bigotes como se muestra en la figura 7.

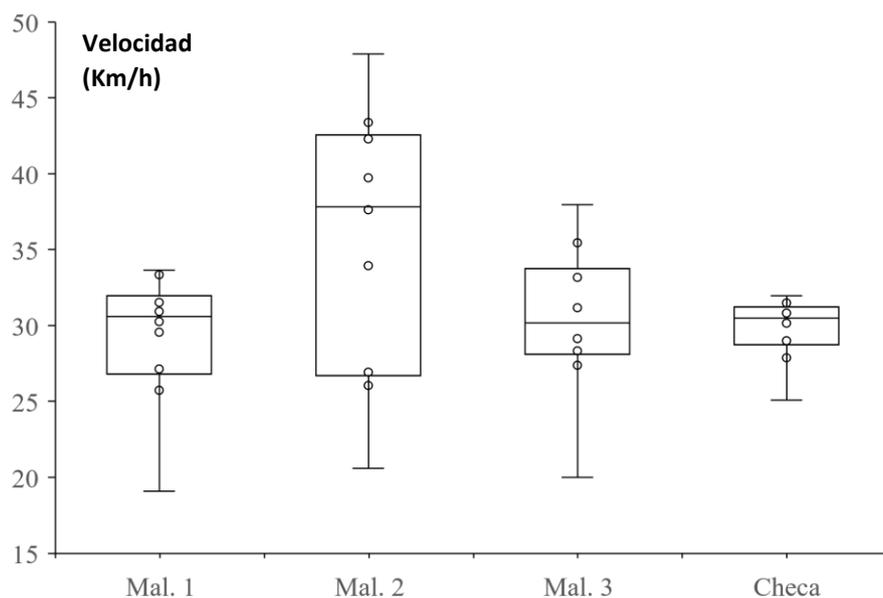


Figura 7. Caja y bigotes de velocidades

En la figura anterior se observa que el rango de velocidades en el caso de Checa tiene una desviación menor es decir los vehículos transitan en velocidades similares, en los casos de Malchungui 1 y 3 las velocidades son diferentes, pero tienen un rango similar, cosa que en Malchungui 2 es diferente ya que el rango de velocidades en esta vía es amplio.

Tabla 2. Densidades y volumen de vacíos

Vía	Densidad bulk (kg/m <sup>3</sup> )	% humedad	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	e
Malchungui 1	1989.51	8.38%	1835.71	0.39
Malchungui 2	1945.22	4.77%	1856.67	0.38
Malchungui 3	1988.96	6.14%	1873.95	0.37
Checa	1919.31	2.55%	1871.52	0.37

En base a la tabla 2 se observó que la densidad bulk en cada una de las vías es similar, para obtener la densidad seca es necesario mantener la humedad de la muestra en campo, una vez obtenida la densidad seca se observa que el suelo con mayor densidad es la vía de Checa,

de igual manera esta vía presenta menor volumen de vacíos y por esto tiene una mayor compactación y densidad.

### 3.5 Amplitud y longitud media

Para poder realizar un análisis de los perfiles se analiza la amplitud y longitud de las ondas que se encuentran presentes en cada una de las vías, para esto se realizó un diagrama de caja y bigotes de la amplitud y longitud de onda que presentan las vías.

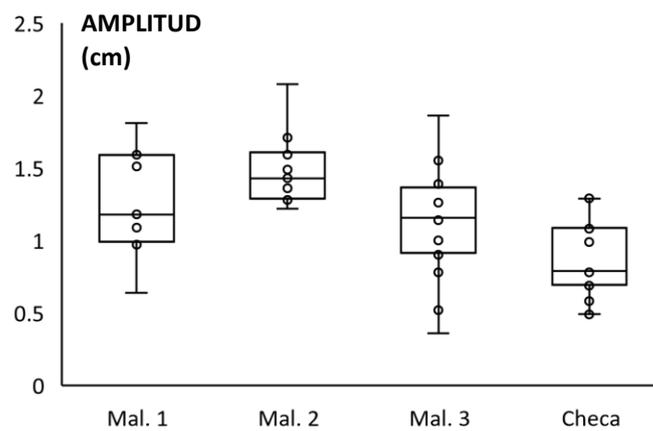


Figura 8. Amplitud de onda

En la figura 8 se encuentran las amplitudes de las ondas donde se observa que Checa tiene amplitudes de onda menores, esto se debe a que en los perfiles se apreciaban ondas de menor amplitud, caso contrario al que se observa en los casos de Malchingui 1,2 y 3, también se observa que en el caso de Malchingui 2 las ondas tienen menor variación en la amplitud de sus ondas.

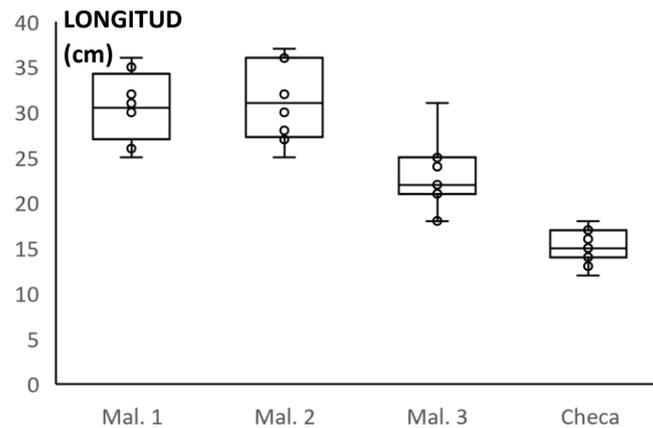


Figura 9. Longitud de onda

En la figura 9 se tiene las longitudes de onda donde se evidencia claramente que Checa tiene una longitud de onda menor a las demás, esto se evidenciaba de igual forma en los perfiles ya que en la misma distancia esta tenía mayor cantidad de ondas que las demás vías de estudio, de igual manera se observa que la vía con mayor amplitud de onda es la de Malchingui 2

#### 4. CONCLUSIONES

Después de realizar la caracterización de suelos y la fotogrametría se concluye que la densidad del material es un factor que influye en la formación del efecto del washbord ya que una vez analizada al información de los suelos se observa que en las vía de checa que tiene una densidad mayor la vía presenta amplitudes y longitudes de onda menores como es el cacho de Checa que es la vía con mayor densidad y esta tiene un mayor número de ondas lo que nos da una longitud menor y la amplitud es menor.

También se analizó la granulometría de cada una de las vías y mediante un análisis de suelos y se encontró que la granulometría de estos lugares corresponde a una arena y esto concuerda con la teoría de este fenómeno que nos dice que el efecto washboard se encuentra en suelos no cohesivos por lo que una de las soluciones a esta problemática en las vías es cambiar la granulometría del lugar agregando material fino y de esta forma agregar cohesión a los suelos con esta problemática para mejorar la calidad en la red vial no pavimentada del país.

Además, se encontró que la relación de vacíos es un parámetro para tomar en cuenta ya que cuando esta es menor como en el caso de Checa el suelo se puede compactar más y de esta forma tener una densidad mayor, por lo que otra forma de mejorar las vías no pavimentadas es añadiendo materiales más resistentes o densos, de igual forma se puede utilizar una metodología combinada donde se agregue tanto material con mayor resistencia como material cohesivo.

Finalmente se encontró que la forma en la que se presenta este fenómeno tiene relación directa con la velocidad ya que después de analizar la fotogrametría y haber encontrado los perfiles y analizar la amplitud y longitud de las ondas se encontró que si la velocidad tiene menor variación las ondas tienen menor amplitud y longitud como es el caso de checa mientras que si tienen una variación mayor como en el caso de Malchingui 2 presentaran una mayor amplitud y longitud de onda.

## 5. REFERENCIAS

- ASTM International. D1557: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup>(2,700kN-m/m<sup>3</sup>)), D1557 (12). 2012
- ASTMD International. D1883: Standard test method for bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. ASTM International, D1883 (16). 2016.
- ASTM International. D2487: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system), D2487 (11). 2011.
- ASTM International. D6913: Standard test methods for particle-size distribution (Gradation) of soils using sieve analysis. ASTM International, D6913 (17). 2017.
- Ibagón, L., Caicedo, B., Villacreses, J. P., & Yépez, F. (2023). Modelling of washboard effect on unpaved roads experimental evidence on non-cohesive materials. *Transportation Geotechnics*, 41(101015), 101015. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101015>
- Mather, K. B. (1963). WHY DO ROADS CORRUGATE? *Scientific American*, 208(1), 128–137. <http://www.jstor.org/stable/24936433>