

**GUÍA METODOLÓGICA PARA LA DETERMINACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES  
DE MATERIALES USADOS PARA LA CONFORMACIÓN DE CARRETERAS EN  
COLOMBIA**

**LAURA CECILIA ARDILA ACUÑA  
JEISSY DOMINGA FRAGOZO DURÁN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA-SANTANDER**

**2021**

**GUÍA METODOLÓGICA PARA LA DETERMINACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES  
DE MATERIALES USADOS PARA LA CONFORMACIÓN DE CARRETERAS EN  
COLOMBIA**

**LAURA CECILIA ARDILA ACUÑA  
JEISSY DOMINGA FRAGOZO DURÁN**

**TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TITULO  
DE INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR  
ING. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA-SANTANDER**

**2021**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bucaramanga, 8 de Marzo 2021

## **DEDICATORIA**

Principalmente a Dios creador de todas las cosas, quien estuvo conmigo en todo el camino, ayudándome a concluir con este proyecto el cual me conduce a nuestra vida profesional.

A mis padres quienes con sus esfuerzos y compromisos me brindaron la oportunidad de salir a delante estudiando una carrera profesional, siendo ellos el motor de mi desempeño, logros y triunfos, dedicándome su apoyo en momentos de dificultad.

**Jeissy Fragozo**

Primero a Dios por permitirme el haber llegado hasta el final de la carrera y seguido a mis padres, hermanos y familiares cercanos por brindarme todo el apoyo necesario para poder culminar cada uno de los pasos que son requeridos para iniciar mi vida profesional.

**Laura Ardila**

## **AGRADECIMIENTOS**

Damos gracias a Dios padre de todo lo que existe en este mundo, quien con su misericordia divina nos brindó sabiduría y entendimiento para afrontar todas las adversidades que se presentaron a lo largo de nuestra carrera concluyéndola de manera exitosa.

Agradecemos a nuestros padres y hermanos quienes nos brindaron su apoyo incondicional en momentos de dificultad donde se presentaban pruebas y obstáculos que teníamos que superar, gracias por confiar y creer en que lograríamos cumplir nuestros sueños y metas propuestas, y por estar con nosotras a lo largo de nuestra carrera.

Por último, agradecemos a nuestro director de proyecto de grado el ingeniero Julián André Galvis Flórez, por sus recomendaciones y apoyo durante el proceso.

Laura Ardila – Jeissy Fragozo

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURA.....	7
LISTA DE ILUSTRACIONES .....	7
LISTA DE TABLAS .....	7
LISTA DE ECUACIONES .....	8
LISTA DE GRAFICA .....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. Objetivo general .....	12
2.2. Objetivos específicos .....	12
3. JUSTIFICACIÓN.....	13
4. ALCANCE.....	14
5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA .....	15
6. ANTECEDENTES.....	16
7. MARCO TEÓRICO .....	19
7.1. Módulo resiliente .....	19
7.2. Pavimento .....	20
7.3. Capas de un pavimento .....	20
7.4. Base granular.....	20
7.5. Subbase granular.....	21
7.6. Subrasante.....	22
8. METODOLOGÍA.....	23
8.1. INFORMACIÓN DE BUSQUEDA.....	24
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	27
9.1. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE.....	27
9.2. CATEGORIZACIÓN DE LOS MÉTODOS.....	27
9.3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS.....	28
9.3.1. MÉTODO DCP .....	28
9.3.2. MÉTODO UNIVERSAL .....	30
9.3.3. MÉTODO SHELL .....	31
9.3.4. MÉTODO AASHTO 1993.....	32

9.3.5. MÉTODO INV E-156-13 ENSAYO DE TRIAXIAL .....	36
9.3.6. MÉTODO DE RETROCÁLCULO AASHTO 1993.....	37
9.4. ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS .....	38
9.5. RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS .....	39
10. CONCLUSIONES.....	42
11. RECOMENDACIONES .....	43
12. BIBLIOGRAFÍA .....	44

### LISTA DE FIGURA

<i>Figura 1. Estructura de pavimentos flexibles.....</i>	21
--	----

### LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Variación de coeficiente <math>a_3</math> con diferentes parámetros de resistencia de la subbase granular .....</i>	34
<i>Ilustración 2. Variación de coeficientes <math>a_2</math> con diferentes parámetros de resistencia de la base granular .....</i>	35

### LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Listado de documentos de las metodologías .....</i>	24
<i>Tabla 2. Documentos de aplicación de las metodologías .....</i>	25
<i>Tabla 3. Lista de base de datos .....</i>	26
<i>Tabla 4. Categorización de métodos.....</i>	28
<i>Tabla 5. Resultados de documentos de las metodologías .....</i>	40

## LISTA DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Módulo resiliente DCP</i> .....	29
<i>Ecuación 2. Módulo resiliente Universal</i> .....	30
<i>Ecuación 3. Invariante de esfuerzo</i> .....	30
<i>Ecuación 4. Esfuerzo de corte octaédrico</i> .....	30
<i>Ecuación 5. Módulo resiliente base Shell</i> .....	32
<i>Ecuación 6. Módulo resiliente subrasante Shell</i> .....	32
<i>Ecuación 7. Módulo resiliente suelos finos subrasante AASHTO</i> .....	33
<i>Ecuación 8. Módulo resiliente suelos granulares subrasantes AASHTO</i> .....	33
<i>Ecuación 9. Módulo resiliente ensayo triaxial</i> .....	36
<i>Ecuación 10. Deformación unitaria axial</i> .....	36
<i>Ecuación 11. Esfuerzo axial repetido</i> .....	36
<i>Ecuación 12. Módulo resiliente retrocalculado</i> .....	37

## LISTA DE GRAFICA

<i>Grafica 1. Diferencias porcentuales</i> .....	41
--	----

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** GUÍA METODOLÓGICA PARA LA DETERMINACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES DE MATERIALES USADOS PARA LA CONFORMACIÓN DE CARRETERAS EN COLOMBIA

**AUTOR(ES):** Laura Cecilia Ardila Acuña - Jeissy Dominga Fragozo Durán

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Ing. MSc. Julián André Galvis Flórez

### RESUMEN

Este proyecto de investigación consta de la elaboración de una guía metodológica para determinar los diferentes módulos resilientes de materiales que se emplean para la constitución de estructuras de pavimento flexible en Colombia. de igual forma, se describieron seis metodologías que permite obtener el cálculo del módulo resiliente que fueron la INV E-156 cámara triaxial, Shell, AASHTO 1993, DCP, retrocálculo y universal, las cuales se obtuvieron por las distintas fuentes de información que fueron Normas, guías, libros y artículos. Por otra parte, los seis métodos fueron explicados mediante su concepto, ecuaciones y ensayo con sus respectivas normas.

### PALABRAS CLAVE:

Módulo resiliente, Pavimento

## **GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** METHODOLOGICAL GUIDE FOR THE DETERMINATION OF RESILIENT MODULES OF MATERIALS USED FOR THE CONFORMATION OF ROADS IN COLOMBIA

**AUTHOR(S):** Laura Cecilia Ardila Acuña - Jeissy Dominga Fragozo Durán

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Ing. MSc. Julián André Galvis Flórez

### **ABSTRACT**

This research project consists of the development of a methodological guide to determine the different resilient modules of materials that are used for the constitution of flexible pavement structures in Colombia. Similarly, six methodologies were described that allow to obtain the calculation of the resilient modulus, which were the INV E156 triaxial chamber, Shell, AASHTO 1993, DCP, retrocalculation and universal, which were obtained by the different sources of information that were Standards, guides, books and articles. On the other hand, the six methods were explained through their concept, equations and testing with their respective standards.

### **KEYWORDS:**

Resilient module, Pavement

# 1. INTRODUCCIÓN

El pavimento es una estructura conformada por un conjunto de capas, que facilita a las personas el traslado seguro y confortable de un lugar a otro, por esta razón es necesario verificar que los parámetros de los materiales de dicha estructura se determinen correctamente.

Por consiguiente, uno de estos parámetros es el llamado módulo resiliente, el cual tiene gran importancia al momento de entender cómo se producen las grietas en las superficies asfálticas, debido a que su comportamiento se ve afectado por varios factores. Por tal motivo el objetivo principal de este proyecto es elaborar una guía metodológica que tiene como propósito de dar a conocer varios métodos que tendrán consigo su concepto, caracterización, ecuaciones y ensayos con sus respectivas normas que pueden ser utilizados para la determinación del parámetro ya mencionado.

Así mismo, dicha guía presentará resultados de la implementación de los métodos, los cuales ayudaran a entender la variación de este e igualmente permitiéndole a los docentes, alumnos, ingenieros y público en general que necesite de su información interpretar con facilidad lo explicado en este proyecto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

- ✓ Elaborar una guía metodológica para la determinación de los módulos resilientes de materiales que se emplean para la constitución de estructuras de pavimentos en Colombia.

### **2.2. Objetivos específicos**

- ✓ Identificar y establecer los métodos de determinación de los módulos resilientes de suelos empleados en la conformación de estructuras de pavimentos, con el propósito de exponer otros métodos adicionales a los establecidos por el manual de diseño de pavimentos flexibles INVIAS.
- ✓ Categorizar los diferentes métodos de los módulos resilientes dependiendo de la metodología de determinación, con la finalidad de saber si el método es utilizado en el laboratorio, campo o teórico y en que capa de la estructura de pavimento se puede emplear.
- ✓ Describir los diferentes métodos utilizados para la determinación de los módulos resilientes de suelos empleados en la conformación de estructuras de pavimentos, con el propósito de conocer su concepto, ecuaciones y ensayos con sus respectivas normas.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

En efecto, el proyecto permite establecer las diferentes metodologías para la determinación del parámetro fundamental llamado módulo resiliente, el cual es requerido como elemento para el diseño de una malla vial en Colombia; esto genera a las empresas y al instituto nacional de Vías (INVIAS) una calidad en el desarrollo de esta.

Por consiguiente, en Colombia a través del manual de diseño pavimento flexible implementado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) que tiene como referente American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO 93), se observa un menoscabo en la determinación del módulo resiliente; por ende, se exponen otras metodologías que puedan ser utilizadas para la obtención del mismo y que a su vez el desarrollo de ellas dependan de la aplicabilidad de otros ensayos que pueden ser usados en estructuras de pavimentos conformadas o en una inexistente.

## **4. ALCANCE**

Este proyecto busca presentar una guía con las diferentes metodologías utilizadas para la determinación de los módulos resilientes de suelos empleados en la conformación de estructuras de pavimentos. Dichos métodos serán categorizados en sus diferentes aplicaciones, es decir en campo, teórico y laboratorio los cuales se obtendrán a través de una investigación y serán adicionales a los establecidos por el manual de diseño de pavimentos flexibles INVIAS

## **5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA**

El presente trabajo de grado se llevará a cabo en el área metropolitana de Bucaramanga, en el cual se efectuará una guía con algunos métodos utilizados para la determinación de los módulos resilientes de las bases, subbases y subrasantes.

El resultado final del proyecto beneficiara a los estudiantes e ingenieros civiles que realicen diseños de pavimentos, ya que tendrían en un documento los métodos detallados. La culminación dependerá exclusivamente del cumplimiento total del objetivo principal establecido desde el inicio del proyecto.

## 6. ANTECEDENTES

TITULO	AUTOR (es)	RESUMEN	TIPO DE DOCUMENTO
<p>Análisis del impacto generado por la selección de correlaciones para cálculo del módulo resiliente en el diseño de estructuras de pavimentos flexibles.</p>	<p>Luis Felipe cueva lozano, Laura Lucia Eusse Cáceres</p>	<p>Este proyecto buscaba evaluar el resultado del módulo resiliente a través de cuatro correlaciones para diseñar un pavimento flexible por medio del método AASHTO-93, como punto de partida para un buen diseño se tiene en cuenta el CBR y poder seleccionar la correlación más acertada. [1]</p>	<p>Trabajo de grado de la Universidad de la Costa (CUC) de barranquilla 2017</p>
<p>Estudio de la variación del módulo resiliente de bases granulares para pavimento flexibles en el área metropolitana de Bucaramanga</p>	<p>Andrés Felipe Meza Mesa, Suley Viviana Quitian Cuesta</p>	<p>El trabajo de grado buscaba determinar la variación del módulo resiliente y de la ecuación constitutiva del módulo resiliente utilizando material de base granular de la ciudad de Bucaramanga siendo sometidas a cargas dinámicas. A dichos materiales se les realizaron ensayos de</p>	<p>Trabajo de grado de la Universidad Industrial de Santander 2018</p>

		granulometría, Proctor modificado y módulo resiliente. Con los resultados obtenidos concluyeron que no es factible diseñar pavimentos en Bucaramanga con los valores sugeridos por la guía AASTHO. [2]	
Comparación entre el módulo resiliente de la subrasante determinado en el laboratorio y el retrocálculo, factor de ajuste C	Edwin Antonio Guzmán Suárez, Carlos Hernando Higuera Sandoval	La investigación consistió en retrocalcular el módulo resiliente calculado mediante los métodos AASTHO 1993, Gustav T. Rohde con el encontrado en el ensayo del laboratorio utilizando suelos de subrasante. Igualmente realizaron ensayos de caracterización por medio de los ensayos de granulometría, límite líquido, plástico e índice de plasticidad, humedad natural, densidad y CBR inalterado e inmersión. Finalizada la obtención de resultados concluyeron que las dos	Revista Universidad Santo Tomas Tunja 2016

		aplicaciones de obtención de módulo resiliente presentaron una igualdad en sus resultados. [3]	
Evaluación de la degradación por compactación de materiales granulares tipo subbase	<p>Allex Eduardo Álvarez Lugo, Leidy Vanessa Espinosa Ruiz, Paola Andra Ortiz Rivera, Marlon David Hurtado Robayo, Leonel Eduardo Cotes De la Hoz, Yenis Margarita López Esalas</p>	<p>En la investigación implementaron cuatro subbases granulares las cuales son de los departamentos Magdalena, Bolívar y la Guajira, a estos le realizaron los ensayos de caracterización y evaluación de la calidad de los materiales. Con los resultados obtenidos concluyeron que los materiales estudiados presentaron una degradación por compactación sucesiva y los cambios evidenciados lo asociaron a una modificación de la estructura interna adquiridos al aplicar energía mecánica Sucesivamente. [4]</p>	<p>Revista Universidad EIA 2019</p>

## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1. Módulo resiliente

Es un parámetro de diseño de pavimentos flexibles el cual indica la magnitud de la recuperación de las deformaciones generadas por un esfuerzo, el módulo depende de varios factores para el caso de materiales granulares dice:

- Que a mayor esfuerzo mayor módulo resiliente.
- A mayor presencia de agua se tiene un menor módulo resiliente debido a que la saturación no permite la trabazón de corriente entre las partículas.
- En la Granulometría es importante no tener contenidos de fino y mantener angularidad en la cara de las partículas.
- A mayor densidad se obtienen un mayor módulo resiliente debido al mayor acomodamiento entre partícula. [1]

Además, el módulo resiliente cuenta con unos factores que lo afectan como lo es la influencia de: esfuerzo, contenido de agua, densidad, granulometría, tamaño máximo, cantidad de finos, forma de partícula, frecuencia de carga e historia de esfuerzo, tipo de ensayo y anisotropía. [5]

El módulo resiliente se puede determinar por medio de ensayos triaxiales por presión de confinamiento constante y ensayos triaxiales por presión de confinamiento variables, como también por correlaciones empíricas en las cuales se tienen diferentes métodos, una de los más utilizado es el método AASHTO-93. [1]

## **7.2. Pavimento**

El pavimento es una estructura que se encuentra conformada por un conjunto de capas, comprendida desde la superficie asfáltica o de rodamiento y la parte superior de la subrasante; tiene como función reducir y distribuir de mejor manera los esfuerzos aplicados por las cargas del tránsito, como también, la comunicación vehicular entre de dos puntos. [6]

## **7.3. Capas de un pavimento**

La estructura de pavimento se encuentra compuesta por varias capas que son: la superficie de rodadura, base granular, subbase granular y la subrasante. Las capas superiores reciben los esfuerzos del tránsito vehicular y se encargan de transmitir de una manera eficiente esos esfuerzos a las capas inferiores, además las capas superiores son de mejor calidad y con mayor capacidad de soporte estructuras que las capas inferiores. [7] [8]

## **7.4. Base granular**

La capa de base granular se encuentra debajo de la superficie de rodamiento y por encima de la capa de subbase granular, esta tiene como objetivo recibir y transmitir uniformemente los esfuerzos que genera el tránsito vehicular a las capas inferiores las cuales son: capa de subbase granular y subrasante y también debe ayudar con el drenaje interno de la estructura de pavimento. La base tiene como material granular agregados duros y durables compuestos por roca, grava y arena triturada. Además, si en algún caso

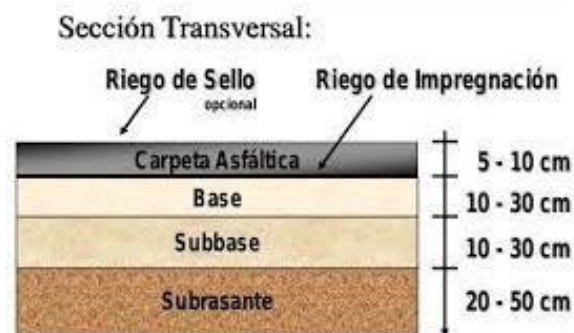
el diseño de la base granular tiene los espesores muy elevados o la capacidad no es buena, y se requiere estabilizar la base, se puede hacer con cal, cemento, asfaltos aditivos. [7] [8]

## 7.5. Subbase granular

La subbase es una capa empleada en la construcción de pavimentos de estructuras viales, la cual se encuentra ubicada entre la base y la subrasante, la primera estando por encima de la subbase y la segunda por debajo, como se muestra en la siguiente.

[9]

Figura 1. Estructura de pavimentos flexibles



Fuente: Universidad Católica de Colombia

La capa de subbase es granular, este material granular es grueso y se compone de triturados, arenas; resiste a la erosión y permite drenar el agua que se puede filtrar por la superficie de la estructura, ayuda a que no se produzcan deformaciones permanentes mejorando la manera de recibir las cargas de los vehículos. El espesor de la capa depende de las características que tengan los materiales que lo conforman y del diseño de pavimento, tiene una variación entre diez y cincuenta centímetros. [9] [10]

La subbase granular debe cumplir con unos requisitos de calidad para los agregados los cuales son ensayos de laboratorios, estos tienen como Características dureza, durabilidad, limpieza, y resistencia del material. [11]

El ensayo de granulometría se ejecuta para conocer y obtener la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados finos y gruesos por el método tamizado. [11]

El material de la subbase debe ser transportado en vehículos apropiados para la circulación en las vías, de acuerdo con el ministro de transporte este deberá cumplir con la reglamentación vigente en cuanto a sus dimensiones y pesos requeridos, incluyendo las normas de protección ambiental, teniendo en cuenta lo expedido por la entidad de la jurisdicción en la que se encuentre el proyecto. [11]

## **7.6. Subrasante**

Es la capa en la cual se apoya la estructura de pavimento, es el suelo natural ósea in situ, ésta no debe llevar material orgánico y ninguna clase de vegetación. La función de la subrasante es soportar las cargas que le transmite el pavimento, se dice que es la cimentación de este y entre mejor calidad tenga el espesor del pavimento puede variar y ser reducido ayudando a que la estructura sea más económica. [12]

## **8. METODOLOGÍA**

Inicialmente se llevó a cabo una búsqueda en diferentes fuentes de información de los métodos que son aplicados por organizaciones investigativas para el cálculo del módulo resiliente de materiales usados para la conformación de la estructura de un pavimento. De igual forma, la elección de los métodos se basó en tres factores que son: su año de creación, su uso en la actualidad y la implementación de algunas variables del suelo que afectan el comportamiento del módulo resiliente.

De esta manera, se procedió a realizar una descripción de la estructura de cada uno de los métodos, es decir, el concepto, la ecuación y los ensayos con sus respectivas normativas. Al mismo tiempo, se expone su categorización implementando tres áreas que son; el campo, el laboratorio y la teoría.

Finalmente, se efectuó una búsqueda de proyectos investigativos que aplicaron los métodos de módulos resilientes; que sus resultados permitieron realizar una comparación en la variabilidad de los métodos.

## 8.1. INFORMACIÓN DE BUSQUEDA

A continuación, se presentará por medio de tablas los documentos utilizados para la extracción de la información.

La *Tabla 1* y *Tabla 2* indicaran los nombres de los documentos utilizados para obtención de la información y de igual forma el tipo y el año de publicación.

*Tabla 1. Listado de documentos de las metodologías*

Nº	NOMBRE	TIPO	AÑO
1	Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from Dynamic cone penetrometer test parameters [13]	Articulo	2007
2	AASHTO guide for designo for pavement structures [14]	Guía	1993
3	Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras Vol. 2 [15]	Libro	2011
4	Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de transito [16]	Manual	2015
5	Norma de ensayo de materiales para carreteras [17]	Norma	2013

*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 2. Documentos de aplicación de las metodologías

Nº	NOMBRE	TIPO	AÑO
1	Evaluación del módulo resiliente y deformación permanente en material arcilloso con presencia de material friccionante.	Trabajo de grado	2014
2	Comparación de valores de módulo resiliente en suelos de subrasante obtenidos por ensayos de campo y laboratorio	Trabajo de grado	2017
3	Evaluación del módulo resiliente fundamentado en la deflectometría y la geotecnia para optimizar diseños y costos en pavimentos reciclados de la carretera Yanango-Puente Herrería	Trabajo de grado	2020
4	Comparación del módulo resiliente de la subrasante obtenido a partir de deflexiones de impacto y mediante ensayo de laboratorio en un proyecto vial del departamento de Cundinamarca	Especialización	2010
5	Determinación del módulo resiliente de diseño de pavimentos mediante criterios AASHTO 1993 y 2002	Maestría	2014
6	Diseño de pavimento flexible de la carrera 8 entre calles 64 y 67 barrio Parrales-Torremolinos en el municipio de Ibagué, mediante el uso del método Shell	Especialización	2013
7	Evaluación de pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso	Artículo	2015
8	Análisis del comportamiento de una estructura de pavimento flexible en una vía de tráfico pesado, caso particular vía urbana en la ciudad de Bogotá barrio Santa Catalina	Trabajo de grado	2016
9	Determinación del comportamiento del módulo resiliente en bases granulares utilizadas en la ciudad de Bucaramanga	Trabajo de grado	2018
10	Determinación de la ecuación constitutiva del módulo resiliente de bases granulares empleadas en Bucaramanga	Trabajo de grado	2017

Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 3* se presenta las fuentes de búsqueda utilizados para la obtención de la información expuesta en las *Tabla 1* y *Tabla 2*. De igual manera se observará los

siguientes datos que son: nombre, ubicación de la universidad y cantidad de documentos que fueron usados para la investigación

*Tabla 3. Lista de base de datos*

N°	NOMBRE	UBICACIÓN	CANTIDAD
1	Repositorio Universidad Nueva Granada	Bogotá	1
2	Repositorio Pontificia Universidad Javeriana	Bogotá	1
3	Repositorio Universidad de Piura	Lima (Perú)	1
4	Repositorio Universidad San Ignacio de Loyola	Lima (Perú)	1
5	Repositorio Universidad Católica de Colombia	Bogotá	1
6	Repositorio Universidad de Costa rica	Montes de Oca (Costa Rica)	1
7	Repositorio Universidad la Gran Colombia	Bogotá	1
8	Repositorio Universidad industrial de Santander	Bucaramanga	2
9	Universidad de cuenca revista Maskana	Cuenca (Ecuador)	1
10	American Society of Civil Engineering	Estados Unidos	1
11	Portal Instituto Nacional de Vías	Colombia	2
12	American Association of State Highway and Transportation Officials	Estados Unidos	1

*Fuente: Elaboración propia*

## **9. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **9.1. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE**

- ❖ Método DCP
- ❖ Método Universal
- ❖ Método Shell
- ❖ Método AASHTO 1993
- ❖ Método INV E-156-13 ensayo triaxial
- ❖ Método de retrocálculo AASHTO 1993

### **9.2. CATEGORIZACIÓN DE LOS MÉTODOS**

En la siguiente tabla se mostrará la categorización y en la capa de pavimento que se aplica cada una de las metodologías de la determinación del módulo resiliente.

Tabla 4. Categorización de métodos

MÉTODOS	CATEGORIZACIÓN	CAPA DE PAVIMENTO
Método DCP	Campo -Teórico	Subrasante
Método Universal	Teórico	Base Subbase Subrasante
Método Shell	Teórico	Subrasante Base Subbase
Método AASHTO 1993	Teórico	Subrasante Subbase Base
Método INV E-156-13 ensayo triaxial	Laboratorio	Subrasante Subbase Base
Método de retrocálculo AASHTO 1993	Campo-teórico	Subrasante

*Fuente: Elaboración propia*

### 9.3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS

#### 9.3.1. MÉTODO DCP

##### CONCEPTO

Es un modelo diseñado para suelos cohesivos, a partir del desarrollo de pruebas de penetración de cono dinámico de acuerdo con la guía D6951 ASTM 2005 de la Sociedad Americana y módulo de resiliencia según la norma AASHTO T294-94, en las cuales se implementaron suelos A-4, A-6, A-7-5 y A-7-6 de 31 sitios de la ciudad Louisiana. [13]

## FORMULA

$$M_r = 165.5 * \left( \frac{1}{DCPI^{1.147}} \right) + 0.0966 * \left( \frac{\gamma_d}{\%W} \right)$$

*Ecuación 1. Módulo resiliente DCP*

%W = Contenido de humedad

$\gamma_d$  = Densidad seca

DCPI = Índice de penetración de cono dinámico (profundidad / N° golpes).

## ENSAYOS Y NORMA

- Humedad

Contenido de humedad INV E-122-13

- Densidad seca

Proctor modificado INV E-142-13

- Penetración cono dinámico

Uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicación de pavimentos a poca profundidad

INV E-172-13

### 9.3.2. MÉTODO UNIVERSAL

#### CONCEPTO

Modelo propuesto por la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) en el project 1-37-A. El proyecto indica que dicho modelo es no lineal y es desarrollado para cualquier tipo de material. [18]

#### FORMULA

$$M_r = K_1 * P_a * \left[ \frac{\Theta}{P_a} \right]^{K_2} * \left[ \frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{K_3}$$

*Ecuación 2. Módulo resiliente Universal*

$$\Theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

*Ecuación 3. Invariante de esfuerzo*

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

*Ecuación 4. Esfuerzo de corte octaédrico*

$\Theta$  = Invariante de esfuerzo

$\sigma_1$  = Esfuerzo principal mayor

$\sigma_2$  = Esfuerzo principal intermedio

$\sigma_3$  = Esfuerzo principal menor

$P_a$  = Presión atmosférica

$\tau_{oct}$  = Esfuerzo de corte octaédrico

$K_1, K_2, K_3$  = Constantes de regresión del material

## ENSAYOS Y NORMA

- Esfuerzos principales mayor, intermedio, menor

Ensayo de compresión triaxial sobre suelos cohesivos INV E-153-13

- Constantes de regresión del material

Módulo resiliente de suelos y agregados INV E-156-13

### 9.3.3. MÉTODO SHELL

#### CONCEPTO

El método es aplicado al diseño del pavimento flexible, considerándolo un sistema tricapas y asumiendo que los materiales son homogéneos, isotrópicos y linealmente elásticos. Así mismo uno de los parámetros fundamentales para la creación de las cartas de diseño fue el módulo de la subrasante. Por otra parte, el método tiene una gran ventaja, ya que genero un sistema de cómputo que facilita el cálculo de un gran número de variables como podrían ser: las deformaciones, esfuerzos y deflexiones de cualquier lugar de la estructura. [15]

#### FORMULA

- ✓ **Subbase**

$$M_r = 0.206 * h^{0.45} * M_{rsbt}$$

*Ecuación. Módulo resiliente de subbase Shell*

✓ **Base**

$$M_r = 0.206 * h^{0.45} * M_{rsbg}$$

*Ecuación 5. Módulo resiliente base Shell*

✓ **Subrasante**

$$M_r \text{ (Psi)} = 1500 * \text{CBR}$$

*Ecuación 6. Módulo resiliente subrasante Shell*

$M_{rsbg}$  = módulo resiliente de la subbase granular

$M_{rsbt}$  = Módulo resiliente de la subrasante

$h$  = espesor de la capa

## **ENSAYOS Y NORMAS**

- Relación de soporte de california del suelo CBR

CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada INV E-148-13

### **9.3.4. MÉTODO AASHTO 1993**

#### **CONCEPTO**

Es un método empírico basado únicamente en datos experimentales obtenido por medio de un ensayo a escala real, en la cual se utilizaron pistas de pruebas y teniendo en cuenta

condiciones climáticas, serviciabilidad, material, magnitud de carga, entre otras; dando como resultado correlaciones. [19]

Por otra parte, define el módulo resiliente como el factor principal de los materiales a utilizar en la formación de la estructura del pavimento. El cual es afectado por la humedad y el número de ciclos. Igualmente permite la determinación del módulo resiliente de base tratadas con asfalto y cemento por medio de gráficas. [20]

## **FORMULA**

### **✓ Subrasante**

#### **Suelos finos**

$$M_r = 1500 * CBR, \text{ para CBR menor a } 7.2\%$$

*Ecuación 7. Módulo resiliente suelos finos subrasante AASHTO*

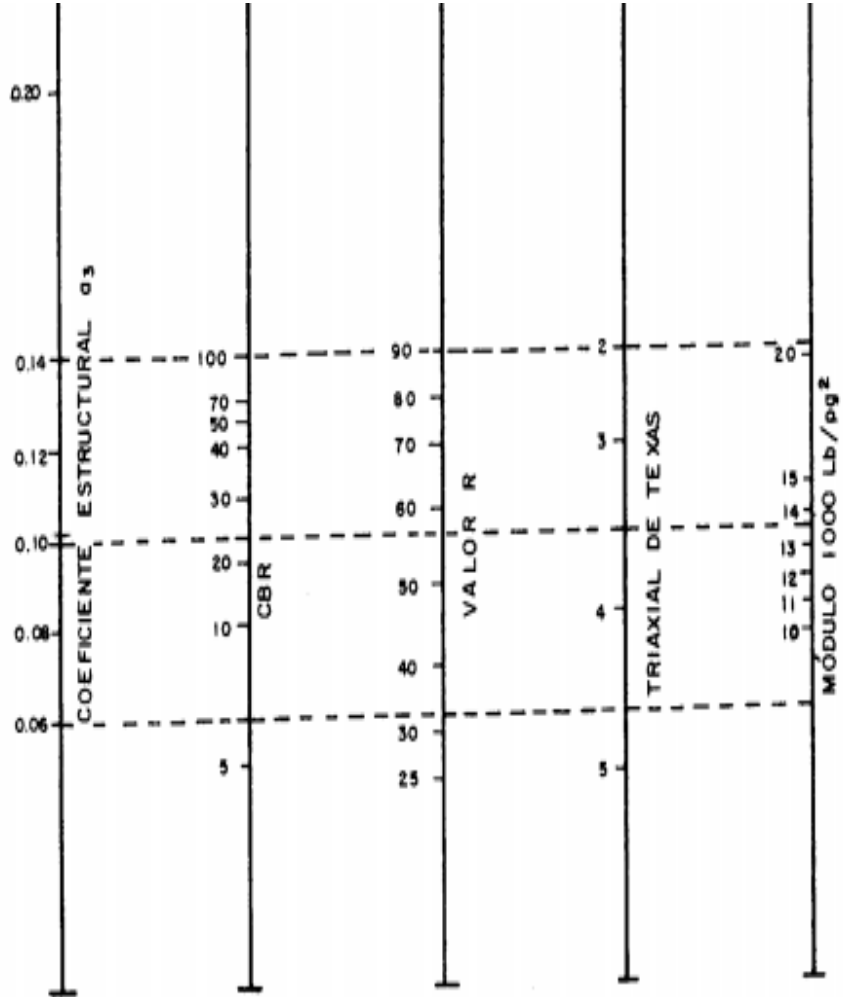
#### **Suelos granulares**

$$M_r = 4326 * \ln(CBR) + 241$$

*Ecuación 8. Módulo resiliente suelos granulares subrasantes AASHTO*

✓ Subbase

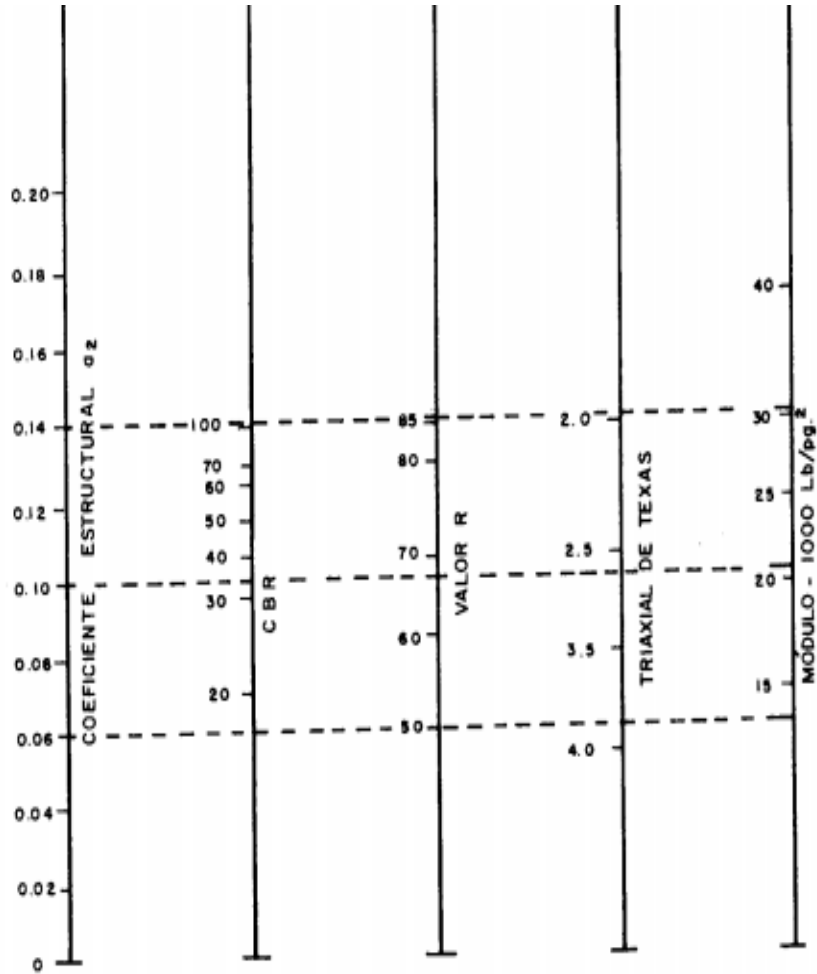
Ilustración 1. Variación de coeficiente a3 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase granular



Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. Pp. 273

✓ Base

Ilustración 2. Variación de coeficientes a2 con diferentes parámetros de resistencia de la base granular



Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. Pp. 269

## ENSAYOS Y NORMAS

- Relación de soporte de california del suelo CBR

CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada INV E-148-13

### 9.3.5. MÉTODO INV E-156-13 ENSAYO DE TRIAXIAL

#### CONCEPTO

Prueba en la cual se somete un espécimen a la aplicación de esfuerzos axiales cíclicos, con secuencias y tamaños definidos por el tipo de material, es decir, subrasante, base o subbase.

Por otra parte, el equipo utilizado en el desarrollo de dicha prueba es una cámara de compresión triaxial que permite la implementación de muestras alteradas e inalteradas en la conformación de los especímenes. [17]

#### FORMULA

$$M_r = \frac{S_{\text{cíclico}}}{\epsilon_r}$$

*Ecuación 9. Módulo resiliente ensayo triaxial*

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r}{L}$$

*Ecuación 10. Deformación unitaria axial*

$$S_{\text{cíclico}} = \frac{P_{\text{cíclico}}}{A}$$

*Ecuación 11. Esfuerzo axial repetido*

$S_{\text{cíclico}}$  = Esfuerzo axial repetido

$\epsilon_r$  = Deformación unitaria axial

$\epsilon_r$  = Deformación axial resiliente

$P_{\text{cíclico}}$  = Carga cíclica

A = Sección transversal inicial del espécimen

L = Longitud inicial de la muestra del ensayo

### 9.3.6. MÉTODO DE RETROCÁLCULO AASHTO 1993

#### CONCEPTO

Es un modelo que estableció la estructura del pavimento como bicapas, es decir la subrasante conforma la primera y las capas por encima de ella la segunda, su diseño fue obtenido por medio del ensayo de Deflectómetro de impacto (FWD).

Dicho ensayo es no destructivo, descrito en la norma INV E-798 y consiste en la aplicación de una carga similar a la de un vehículo, la cual arroja como resultado las variables de deflexión vertical, carga y distancia. [14]

#### FORMULA

$$M_r = C \frac{0.24 * P}{D_r * r}$$

*Ecuación 12. Módulo resiliente retrocalculado*

C = 0.33

P = Carga aplicada

r = Distancia desde el centro de la carga

D<sub>r</sub> = Deflexión a la distancia r desde el centro del plato de carga

## **ENSAYOS Y NORMAS**

- Carga aplicada, distancia desde el centro de la carga y deflexión

Método para medir deflexiones mediante Deflectómetro de impacto (FWD) INV E- 798 -  
13

### **9.4. ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS**

De acuerdo con la investigación realizada se puede analizar que las metodologías se diferencian en cuanto a sus ensayos, es decir, cada uno de ellos evalúa una propiedad específica del material.

- El módulo resiliente de la AASHTO-93 se sujeta únicamente del valor del esfuerzo cortante CBR a comparación de la Shell que no solo depende de esta variable, sino que también tiene en cuenta el espesor de la capa y que implícitamente se complementa con el diseño del tránsito y la temperatura.
- El método de INV E-156-13 ensayo triaxial y el de retrocálculo se asemejan en una parte de su aplicación, debido que para su desarrollo simulan una carga similar a un vehículo pesado, no obstante, se diferencian en que el segundo método llega hacer no destructivo, es decir no necesita dañar la muestra para la obtención del resultado del módulo resiliente.

- La metodología DCP tiene en cuenta las propiedades del suelo que son la humedad, la densidad seca y la resistencia, esta última es hallada por medio del penetrómetro de cono dinámico para el cálculo del módulo resiliente. Al mismo tiempo, el equipo sirve como acompañamiento para la determinación del CBR en campo utilizando correlaciones donde sus resultados pueden ser usados en los métodos de AASHTO-93 y Shell.
- El método universal permite la evaluación del módulo resiliente de las tres capas de un pavimento flexible, teniendo cuenta el peso del aire, los esfuerzos de corte y propiedades del material (ensayo cámara triaxial).

## **9.5. RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS**

Con relación a los documentos enumerados cuatro, seis, nueve y diez que están mencionados en la *Tabla 2*, se observa una similitud del material utilizado para su desarrollo, es decir comparten la clasificación de un mismo suelo; de igual forma esto permite analizar la diferencia porcentual de las metodologías que son: retrocálculo, universal, Shell y triaxial. Con base a lo mencionado en la *Tabla 5* se indicarán los resultados y una breve información de los diferentes documentos seleccionado.

Tabla 5. Resultados de documentos de las metodologías

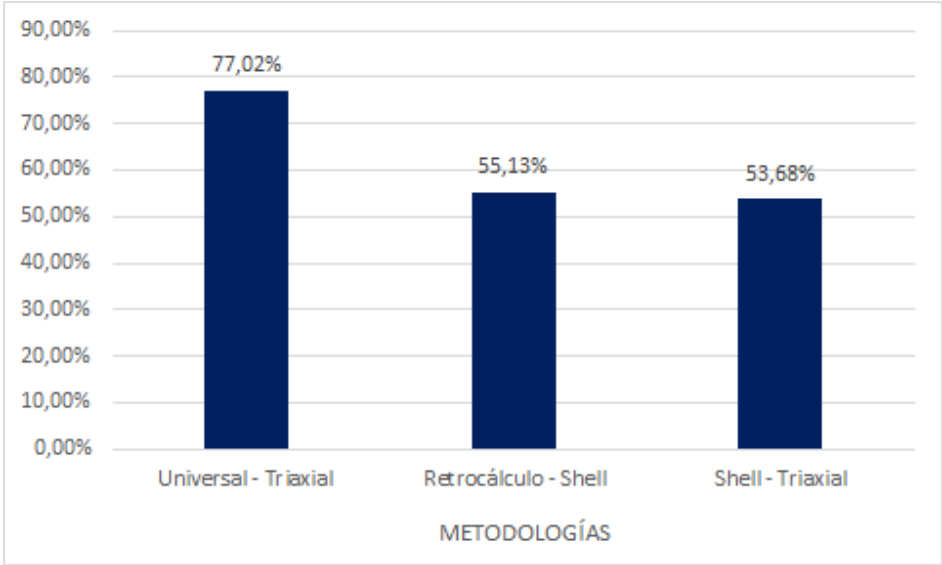
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>UBICACIÓN</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>MR (PSI)</b>
<i>Evaluación y diagnóstico de la carretera El portal – El Antojó</i>	Retrocálculo	Cundinamarca Colombia	Arcilla de alta plasticidad	11313
	Triaxial			10958
<i>Diseño de un pavimento flexible de la carrera 8 entre calles 64 y 67 barrio Parrales – Torremolinos</i>	Shell	Tolima - Ibagué Colombia	Arcilla de alta plasticidad	5076
<i>Determinación del módulo resiliente, muestra del río Tona en condición de humedad óptima.</i>	Universal	Bucaramanga Santander Colombia	Base granular	14956
<i>Determinación del módulo resiliente en condiciones de humedad optima y saturada, usando dos muestras del río Chicamocha con diferentes gradaciones</i>	Triaxial	Bucaramanga Santander Colombia	Base granular	65076

Fuente: Elaboración propia

En definitiva, de la investigación se pudo analizar que cuando el valor del módulo resiliente de un material es alto se obtiene un menor espesor de las capas, esto permite establecer que el material presenta buenas propiedades, sin duda alguna, esto representara un bajo costo para el desarrollo de un pavimento. Es así como, de los resultados indicados en la *Tabla 3* se infiere que el material de arcilla de alta plasticidad de Cundinamarca y la base granular de Santander presentan una buena calidad a comparación del departamento del Tolima

Por otra parte, los resultados mostraron que el material de base granular empleado en las metodologías universal y triaxial presento un mayor porcentaje de diferencia con un 77.02% a comparación del material de arcilla de alta plasticidad con retrocálculo y Shell del 55.13 % y Shell con triaxial del 53.68%.

Grafica 1. Diferencias porcentuales



Fuente: Elaboración propia

## 10. CONCLUSIONES

Se observó que existen diferentes métodos como lo es la de retrocálculo, DCP y Shell, que permiten ser implementados para la determinación del módulo resiliente ( $M_r$ ); sin embargo, no son tenidas en cuenta en el manual de diseño de pavimentos flexibles INVIAS. Por otra parte, la metodología universal es mencionada en el manual, aunque esta técnica es muy poco utilizada para el cálculo del  $M_r$ .

Se estableció que los seis métodos investigados solo el de INV E-156 cámara triaxial es aplicado en el laboratorio y las metodologías de Shell, AASHTO 1993 y la universal son utilizados de forma teórica, las cuales se implementan para todas las capas de la estructura del pavimento flexible. Por otra parte, la metodología de DCP y retrocálculo se usa en áreas de campo para la capa subrasante.

Esta investigación ayudo a establecer que en Colombia el ensayo más utilizado para hallar el módulo resiliente es el CBR, por ende, esta prueba permite tener en cuenta la propiedad principal del material que es la humedad; sin embargo, también se analizó que las pruebas de penetrómetro de cono dinámico y Deflectómetro de impacto pueden ser usadas para calcular el módulo resiliente, de igual manera, se implementada in-situ y dan a conocer otras propiedades de los suelos.

## 11. RECOMENDACIONES

Se propone para nuevas investigaciones el uso de las metodologías de Shell, retrocálculo y DCP; con el fin de analizar y comparar que modelos presentan una alta eficiencia en el resultado de módulo resiliente y sea anexado al manual de diseño de pavimentos flexibles del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Fomentar por medio de las universidades el desarrollo de futuras investigaciones de modulo resiliente (Mr) utilizando los siguientes métodos que son: Shell, Retrocálculo, INV E-156 cámara triaxial, AASHTO 1993, universal y el DCP empleando en su desarrollo el mismo tipo de suelo, con el fin de poder realizar comparaciones de las metodologías. Al mismo tiempo, empleando otros métodos existentes para el cálculo del Mr.

Se sugiere la aplicación de los métodos mencionados en el documento para el cálculo de modulo resiliente en el diseño de un pavimento flexible por parte de los ingenieros civiles, con el propósito de obtener varias alternativas de presupuesto.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Luis Felipe Cueva Lozano, Laura Lucia Eusse Cáceres, «Análisis del impacto generado por la selección de correlaciones para cálculo del módulo resiliente en el diseño de estructuras de pavimentos flexibles,» Universidad de la Costa CUC, Barranquilla, 2017.
- [2] Andrés Felipe Meza Mesa, Suley Viviana Quitian Cuesta , «Estudio de la variación del módulo resiliente de bases granulares para pavimentos flexibles en el area metropolitana de Bucaramanga,» Universidad Industrial de Santander , Bucaramanga , 2018.
- [3] Edwin Antonio Guzmán Suárez, Carlos Hernando Higuera Sandoval , «Comparación entre el módulo resiliente de la subrasante determinado en el laboratorio y el retrocálculo, factor de ajuste C,» Universidad Santo Tomas , Tunja , 2016.
- [4] Alex Álvarez, Leidy Espinosa, Paola Ortiz, Marlon Hurtado, Leonel Cotes, Yenis López, «Evaluación de la degradación por compactación de materiales granulares tipo subbase,» *EIA*, vol. 16, nº 31, pp. 13-25, 2019.
- [5] Hugo Alexander Rondón Quintana , «Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento,» *Ingenierías Universidad de Medellin* , vol. 6, nº 11, p. 26, 2007.
- [6] Edwin Barjas Reina, Brandon Esneider Buitrago Martinez , «Análisis comparativo del sistema de gestión de los pavimentos o mantenimiento vial de la ciudad de Bogota con la ciudad de Sao Paulo,» Universidad Católica de Colombia , Bogotá, 2017.

- [7] Ana María Vélasquez Buritica, Edwin Jordy Fernández Bautista , «Análisis de la resistencia de una base granular reemplazando su material fino por ceniza de cascarilla de arroz,» Universidad Piloto de Colombia , Cundinamarca , 2020.
- [8] Lizeth Carolina Plata Bohórguez, Johana Liceth Díaz Osorio, «Verificación de parámetros en los materiales de base y subbase granulae en el área metropolitana de Bucaramanga,» Bucaramanga , 2019.
- [9] Farfán, Raymunfo Pierre, «Uso de concha de abanico triturada para mejoramiento de subrasante arenosa,» Universidad de Pirua, Pirua, 2015.
- [10] Cemex, «Cemex,» 10 12 2018. [En línea]. Available: <https://www.cemexcolombia.com/productos/agregados/sub-base-granular>. [Último acceso: 20 09 2019].
- [11] U. I. Desarrollo, *Especificación técnica: capas granulares de base y subbase*, Bogotá, 2005.
- [12] Jennifer Duque Saldarriaga, Brayan Stiven Vásquez Cadena, José Fernando Orrego Cardoza, «Mejoramiento de subrasante en vías de tercer orden,» Pereira, 219.
- [13] Louay Mohammad, Kevin Gaspard, Murad Abu-Farsakh, Ravindra Gudishala, «Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters,» *Materiales en ingeniería civil* , vol. 19, nº 11, p. 9, 2007.
- [14] American Association of State highway and Transportation Officials , «AASHTO guide for design of pavement structures,» 1993.

- [15] C. H. H. Sandoval, Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras, Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia , 2011.
- [16] I. n. d. v. (INVIAS), «Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito,» Colombia , 2015.
- [17] I. N. d. Vías, «Especificaciones generales de construcción de carreteras,» Colombia, 2013.
- [18] I. M. J. Acuña, «Implementación del ensayo de módulo resiliente en bases granulares para pavimentos,» Universidad de Costa Rica , San Jose , 2009.
- [19] E. Caporal, «Academia.edu,» [En línea]. Available: [https://www.academia.edu/34103801/DISENO\\_DE\\_PAVIMENTO\\_METODO\\_AASHTO\\_93\\_ESPANOL\\_1\\_](https://www.academia.edu/34103801/DISENO_DE_PAVIMENTO_METODO_AASHTO_93_ESPANOL_1_). [Último acceso: 25 01 2021].
- [20] O. F. A. Alfonso, «Diseño de la estructura de un pavimento flexible aplicando el método AASHTO-93, para el corredor vial comprendido entre la diagonal 65- cai Boston- cruce vía Yuma en Barrancabermeja, Santander,» Universidad Militar Nueva Granada , Bogotá, 2019.