

**Erosión Superficial Hídrica En Capas De Revestimiento En Vías Terciarias De  
Piedecuesta - Santander**

**Paula Andrea Ruiz Montenegro**

**Rocio Molina Muñoz**

**Universidad Pontificia Bolivariana**

**Escuela De Ingenierías**

**Facultad De Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2019**

**Erosión Superficial Hídrica En Capas De Revestimiento En Vías Terciarias De  
Piedecuesta - Santander**

**Paula Andrea Ruiz Montenegro**

**Rocio Molina Muñoz**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero civil**

**Director:**

**Ing. José Luis Rodríguez Brochero**

**Universidad Pontificia Bolivariana**

**Escuela De Ingenierías**

**Facultad De Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2019**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

## **Agradecimientos**

En primer lugar, le dedico y agradezco a Dios, por ser mi guía a lo largo de mi formación personal y profesional, por ser mi fortaleza y permitirme vivir y disfrutar de cada uno de mis logros.

A mis padres que con su amor y ejemplo me han brindado su apoyo incondicional, contribuyendo a lograr mis metas e impulsándome a seguir cumpliendo cada uno de mis sueños.

A mis hermanos y demás personas que me acompañaron y aportaron su conocimiento el cual fue valioso y de gran importancia para la culminación de este proceso exitoso.

**Rocio Molina Muñoz.**

Dedico este proyecto de grado principalmente a Dios, por permitirme vivir cada día de este proceso de aprendizaje.

A mis padres, por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, quienes, con sus consejos, amor y paciencia, me han concedido llegar a cumplir hoy uno de mis sueños. Por ser ese ejemplo de valentía y esfuerzo que hacen de mí una mejor persona.

A mis hermanos por su cariño y apoyo incondicional durante toda mi vida y finalmente a todas esas personas que hicieron parte importante en el desarrollo de mis objetivos.

**Paula Andrea Ruiz Montenegro.**

## Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Justificación</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Objetivos</b>	<b>13</b>
1.2.1 Objetivo General	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
<b>1.3 Alcance</b>	<b>14</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Antecedentes</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Clasificación de las carreteras</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Afirmado</b>	<b>18</b>
<b>2.4 Erosión</b>	<b>19</b>
2.4.1 Proceso erosivo.	20
2.4.2 Tipos de Erosión.	21
2.4.3 Erosión hídrica.	23
<b>2.5 Simuladores de lluvia</b>	<b>23</b>
2.5.1 Características de un simulador de lluvia	23
2.5.2 Tipos de simuladores de lluvia	24
<b>3. Metodología</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Programa experimental</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Micro simulador de lluvia</b>	<b>26</b>
3.2.1 Caracterización climática de la región de estudio	27
3.2.2 Diseño y Construcción de micro simulador	28

3.2.3 Calibración de micro simulador .....	30
3.2.4 Diseño y construcción de moldes para material de afirmado .....	31
<b>3.3 Medición de la erosión superficial hídrica .....</b>	<b>32</b>
<b>3.4 Procedimiento de simulaciones .....</b>	<b>33</b>
<b>4. Resultados .....</b>	<b>34</b>
4.1 Granulometría.....	34
4.2 Limite de Atterberg.....	35
4.3 Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales.....	36
4.4 Contracción lineal .....	36
4.5 Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos. ....	37
4.6 Desgaste de la máquina de los ángeles.....	38
4.7 Ensayo Modificado de compactación (Proctor). ....	39
4.8 Relación de soporte del suelo (CBR). ....	40
4.9 Medición de la erosión superficial hídrica .....	43
<b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>48</b>
<b>6. Bibliografía.....</b>	<b>49</b>

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Clasificación según el tipo de terreno.....	17
<b>Tabla 2.</b> Requisitos de los agregados para afirmados .....	18
<b>Tabla 3.</b> Franjas granulométricas del material de afirmado .....	19
<b>Tabla 4.</b> Relaciones que debe cumplir el material de afirmado.....	19
<b>Tabla 5.</b> Tipos de erosión .....	21
<b>Tabla 6.</b> Programa experimental. ....	26
<b>Tabla 7.</b> Valores de precipitación para tormentas de 3 horas en cada subcuenca. ....	28
<b>Tabla 8.</b> Simulaciones para calibración de micro simulador.....	30
<b>Tabla 9.</b> Masa de los moldes compactados.....	32
<b>Tabla 10.</b> Programa experimental para medición de la erosión superficial hídrica. ....	32
<b>Tabla 11.</b> Datos de granulometría. ....	34
<b>Tabla 12.</b> Datos de Limite líquido.....	35
<b>Tabla 13.</b> Datos Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales. ....	36
<b>Tabla 14.</b> Datos de ensayo Contracción lineal.....	36
<b>Tabla 15.</b> Datos de Porcentaje de pérdida de solidez en sulfatos. ....	37
<b>Tabla 16.</b> Ensayo de Desgaste de la máquina de los ángeles. ....	38
<b>Tabla 17.</b> Datos del ensayo relación de soporte del suelo CBR. ....	40
<b>Tabla 18.</b> Expansión del material.....	40
<b>Tabla 19.</b> Control de cumplimiento de los ensayos establecidos en la norma. ....	42
<b>Tabla 20.</b> Datos de simulación de la erosión hídrica. ....	43
<b>Tabla 21.</b> Promedio del Proctor al 90% y 95%.....	45

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Desprendimiento y arrastre de partículas .....	20
<b>Figura 2.</b> Erosión por el viento. ....	21
<b>Figura 3.</b> Erosión por gotas de lluvia. ....	21
<b>Figura 4.</b> Erosión laminar. ....	21
<b>Figura 5.</b> Erosión en surcos. ....	22
<b>Figura 6.</b> Erosión de cárcavas. ....	22
<b>Figura 7.</b> Simulador de lluvia por goteo. ....	24
<b>Figura 8.</b> Simulador de lluvia por aspersión. ....	25
<b>Figura 9.</b> Proceso de diseño, construcción y calibración de microsimulador de lluvia. ....	27
<b>Figura 10.</b> Partes del micro simulador .....	29
<b>Figura 11.</b> Gotero del simulador .....	30
<b>Figura 12.</b> Molde de madera para simulaciones .....	31
<b>Figura 13.</b> Estructura de simulación, montaje final. ....	33
<b>Figura 14.</b> Grafica de la Curva Granulométrica. ....	35
<b>Figura 15.</b> Grafica de Proctor Modificado. ....	39
<b>Figura 16.</b> Penetración - Esfuerzo.....	41
<b>Figura 17.</b> Curva Densidad seca – CBR.....	41
<b>Figura 18.</b> Ensayo de los datos tabulados para un grado de compactación del 90%. ....	44
<b>Figura 19.</b> Ensayo de los datos tabulados para un grado de compactación del 95%. ....	45
<b>Figura 20.</b> Promedio del Proctor al 90% y 95% .....	46



## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** Erosión Superficial Hídrica En Capas De Revestimiento En Vías Terciarias De Piedecuesta - Santander

**AUTOR(ES):** Paula Andrea Ruiz Montenegro  
Rocio Molina Muñoz

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** José Luis Rodríguez Brochero

### RESUMEN

El presente proyecto de grado presenta la medición de la erosión superficial hídrica en capas de revestimiento en vías terciarias de Piedecuesta - Santander, con el fin de comparar la influencia que tiene la pendiente de la capa de revestimiento y su grado de compactación. Para la realización del proyecto se llevó a cabo la caracterización del material usado con el fin de simular la capa de revestimiento de una vía en afirmado, además de diseñar y construir un micro simulador de lluvia que permitiera generar precipitaciones dadas en la zona de estudio con la intención de recrear el proceso de erosión, el cual es habitual en obra. Este se midió a través de la recolección de material erosionado, el cual arrojó datos que permitieron hacer un análisis de la importancia que tienen estos dos factores a la hora de diseñar y construir vías terciarias en afirmado, debido a que a mayor pendiente y menor grado de compactación, se generara mayor erosión.

### PALABRAS CLAVE:

Micro simulador, Afirmado, Erosión

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

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

**TITLE:** Water Surface Erosion in Coating Layers in Tertiary Roads of Piedecuesta - Santander

**AUTHOR(S):** Paula Andrea Ruiz Montenegro  
Rocio Molina Muñoz

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** José Luis Rodríguez Brochero

### **ABSTRACT**

This degree project presents the measurement of water surface erosion in coating layers in tertiary roads of Piedecuesta - Santander, in order to compare the influence of the slope of the coating layer and its degree of compaction. For the realization of the project, the characterization of the material used was carried out in order to simulate the lining layer of a road-surfacing, in addition to designing and constructing a micro rain simulator that allows generating rainfall given in the study area with the intention of recreating the erosion process, which is common in the work. This was measured through the collection of eroded material, which yielded data that allowed an analysis of the importance of these factors when designing and constructing tertiary roads-surfacing, due to the greater slope and lower degree of compaction, greater erosion will be generated.

### **KEYWORDS:**

Micro simulator, roads-surfacing, erosion

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## **1. Introducción**

En la actualidad el desarrollo de la infraestructura vial, la logística y el transporte son factores determinantes para el progreso económico y social de este, permitiendo el traslado de personas, mercancías, maquinarias e insumos a diferentes zonas y poblaciones, además de conectar las zonas más aisladas.

El crecimiento económico de los países actualmente es evaluado por el Foro Económico Mundial (WEF), donde presenta el informe de Competitividad Global (ICG), teniendo en cuenta varios aspectos del cual uno está conformado por la infraestructura. Colombia padece un déficit alto en cuanto a infraestructura vial, evidenciando que se presentan diversas desventajas como la carencia de buenas autopistas y mejoramiento de estas, tanto en las grandes ciudades y a nivel rural; es común observar la difícil intercomunicación terrestre de la población rural ya que los de 142.284 kilómetros que la conforman solo el 25% se encuentra en buen estado. Las vías terciarias representan aproximadamente el 69,1 % total de la malla vial del país de los cuales el Departamento Nacional de planeación estima que solo el 6% son vías pavimentadas, un 24% en tierra y un 70% de vías en afirmado, de las cuales estas dos últimas presentan mayores porcentajes de vías en mal estado que en su gran mayoría se deben a problemas de erosión (DNP, 2016).

Así mismo uno de los procesos que provocan una disminución a la capacidad mecánica del suelo se denomina erosión hídrica, proceso de desprendimiento y arrastre de material, siendo este de gran complejidad. El cual es generado por la acción del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo (INTA, 2017). Con el fin de generar un estudio con base a esta problemática se estableció determinar la influencia que tiene el grado de compactación del suelo y de la pendiente de la capa

de revestimiento en material de afirmado, usado en vías terciarias, que sirva para dejar un precedente para futuros estudios.

## **1.1 Justificación**

En Colombia se ha venido presentando un déficit en cuanto a infraestructura vial, el cual se ve reflejado en la intercomunicación terrestre que afecta directamente la población debido a que las vías se encuentran intransitables y deficientes de mantenimiento. También se ven manifestados en las limitaciones de volúmenes de tránsito, menor calidad en niveles de servicio, trancones y retardos en los recorridos que a su vez generan aumento de los tiempos de viaje y baja comercialización de sus productos. Ocasionando un incremento monetario en los largos recorridos. (DNP, 2019). Y aunque a nivel nacional se han planteado proyectos para la intervención de estas, hace falta más disposición de las partes gubernamentales.

Por consiguiente, la inversión vial se vería reflejada en el sector transporte que constituye para el país uno de los pilares fundamentales para el desarrollo entre municipios, generando cambios y mejorando directamente sus condiciones dinámicas comerciales, por lo que es necesario emprender y contribuir con estudios para el aprovechamiento de estos.

Razón que motiva a desarrollar un estudio claro y conciso, que de manera experimental sean simuladas las condiciones de lluvia dadas en el área de Piedecuesta – Santander y las usadas en la capa de revestimiento en vías terciarias, donde se pueda obtener datos que ayuden a determinar la influencia que tiene el grado de compactación y la pendiente en la capa de revestimiento en afirmados, dado que una de las mayores problemáticas que contribuyen al mal estado de las vías se deben a la erosión hídrica.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Simular las condiciones pluviométricas cercanas al municipio de Piedecuesta Santander con el fin de determinar la erosión superficial hídrica en capas de revestimiento de vías terciarias.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar la caracterización geotécnica de material usado como revestimiento de vías terciarias de acuerdo con las especificaciones de la norma
- Diseñar y construir un micro simulador de lluvia que reproduzca las condiciones de precipitación en la región.
- Comparar la influencia de la pendiente de la capa de revestimiento en la erosión superficial hídrica en las vías terciarias en Piedecuesta- Santander.
- Comparar la influencia del grado de compactación de la capa de revestimiento en la erosión superficial hídrica en las vías terciarias en Piedecuesta- Santander

### **1.3 Alcance**

El presente proyecto busca determinar la influencia del grado de compactación de un suelo y de la pendiente de la capa de revestimiento en material de afirmado usados en vías terciarias con los valores de erosión superficial hídrica, teniendo en cuenta las especificaciones dadas en (INVIAS I. N., 2012), además de las condiciones pluviométricas del municipio de Piedecuesta – Santander. Estas condiciones pluviométricas serán reproducidas con un micro simulador de lluvias, el cual será diseñado y construido en el desarrollo del proyecto.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Antecedentes

Un primer estudio realizado por Aoki, A. M., y Sereno R., (2006) se denomina “Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsumilador”, trabajo que tuvo como objetivo: evaluar comparativamente la infiltración, mediante el uso de un microsumilador de lluvia, además de comparar y seleccionar la mejor ecuación que describiera el proceso de infiltración.

Bajo la necesidad de reproducir condiciones similares a la de la lluvia y en especial el impacto de las gotas sobre las propiedades físicas del suelo usado, seleccionan el esquema básico del microsumilador de lluvia (de Ururtia y Mon, 1994) que se constituye un simulador por goteo conformado por un marco de hierro y paredes rompeviento en acrílico que permite sostener la caja porta goteros y esta misma conectada a través de una manguera al reservorio de agua, utilizando moldes para la conformación del suelo un Haplustol típico de textura limosa de la ciudad de Córdoba- Argentina. Seleccionadas las condiciones para la simulación, como la intensidad que va de 15 a 130 mmh durante un tiempo de 1 a 2 horas, se desarrolla el ensayo donde miden gravimétricamente la humedad del suelo antes y después de cada medición, describiendo el proceso de infiltración basados en dos ecuaciones (Horton, 1940 ; Philip, 1957) y con un análisis estadístico y de las variables de cada ecuación pudieron concluir que la velocidad final de infiltración del agua en el suelo se comportó como indicador de calidad de suelo valido para detectar diferencias significativas en las propiedades físicas y químicas del mismo.

Un segundo trabajo corresponde a Wang, L., Dalabay, N., Lu, P., Wu, F., (2017), quienes realizaron la investigación sobre: “Efectos de las prácticas de labranza y la pendiente en la escorrentía y la erosión del suelo de la meseta de Loess, China, sometidas a lluvias simuladas.”, investigación que se centró en determinar los efectos de la práctica de labranza en la escorrentía y la pérdida de sedimentos en parcelas durante el periodo (M. Martínez-Mena, 2011) (M.J.M. Romkens, 2001) de barbecho, que consiste en una técnica de la agricultura en la cual la tierra se deja sin sembrar durante uno o varios ciclos vegetativos, allí se había identificado una amenaza para el desarrollo de la agricultura debido a que aproximadamente el 60% de la cantidad de escorrentía y sedimentos se derivaba de tierra agrícola en pendiente que se veía afectada por la poca fertilidad del suelo y el deterioro del crecimiento económico y bienestar agroecológico.

Para el desarrollo se utilizaron 4 parcelas (moldes) de dimensiones 4.0x1.0x0.6 [m] con una abertura en forma de vertedero en uno de sus lados, utilizando como material para la simulación suelo proveniente de las tierras de cultivo de Yangling, para la simulación fue necesario dejar el suelo durante varios años bajo diferentes procesos, para la restauración de las propiedades del suelo similares a las condiciones naturales. El sistema de simulación de lluvia portátil fue diseñado por el Instituto de conservación de suelos y Aguas, CAS & MWR, el tipo de sistema de simulación fue por aspersión el cual está comprendido por una bomba, tuberías de entrada, válvulas, manómetros y dos generadores de gotas de lluvias.

Bajo condiciones diferentes como la pendiente (5, 10 y 15) y cuatro prácticas de labranza como excavación artificial (EA), azada artificial (AA), arado de contorno (AC) y arado tradicional (AT), fueron las utilizadas para la simulación durante un periodo de intensidad de 90 mmh durante 40 minutos en los cuales se tomaron datos para evaluar dos índices, los beneficios de reducción de escorrentía y los beneficios de reducción de sedimento, investigación que demostró que EA, AA



y AC pueden adoptarse como una práctica beneficiosa de labranza para el control de la erosión durante el periodo de barbecho donde se disminuyó la escorrentía y los sedimentos aumentando la infiltración en los suelos, por otro lado los datos de beneficio de escorrentía y reducción de sedimentos mostraron que la efectividad para controlarlas difirió entre las prácticas de labranza, obteniendo que la práctica de labranza fue más efectiva para la reducción de sedimentos que para la misma reducción de escorrentía.

## 2.2 Clasificación de las carreteras

Tal como lo expresa (INVIAS, Instituto Nacional de Vias, 2013) las carreteras se clasifican según su funcionalidad y el tipo de terreno.

Según su funcionalidad:

- Primarias: son troncales, transversales y accesos a capitales.
- Secundarias: unen cabeceras municipales y conectan a primarias
- Terciarias: son aquellas que unen las cabeceras municipales con sus veredas o entre sí, y estas deben ser construidas comúnmente en afirmado.

También se pueden clasificar según el tipo de terreno, determinada por la topografía predominante en el tramo de estudio.

**Tabla 1.** Clasificación según el tipo de terreno

Tipo de terreno	Pendiente Transversal	Pendiente Longitudinal
<b>Plano</b>	< 5°	< 3%
<b>Ondulado</b>	(6° - 13°)	(3% - 6%)
<b>Montañoso</b>	(13° - 40°)	(6% - 8%)
<b>Escarpado</b>	> 40°	> 8%

*Fuente:* (INVIAS, Instituto Nacional de Vias, 2013)

## 2.3 Afirmado

Capaz que soportar directamente las cargas y esfuerzos del tránsito, siendo esta una capa de material granular natural o procesado, según (INVIAS, Instituto Nacional de Vias, 2013) los agregados para la construcción del afirmado deben cumplir con diferentes requisitos de calidad los cuales se ilustraran en la Tabla 2, 3 y 4.

**Tabla 2.** Requisitos de los agregados para afirmados

<b>Características</b>	<b>Normas de ensayo Invias</b>	<b>Requisito</b>
<b>Dureza (o)</b>		
Desgaste en la máquina de los ángeles (Gradación A), máximo (%)	E- 218	50
500 revoluciones		
<b>Durabilidad (o)</b>		
Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E-220	
sulfato de sodio		12
sulfato de magnesio		18
<b>Limpieza (F)</b>		
Limite líquido, máximo (%)	E-125	40
Índice de plasticidad (%)	E-125 y E-126	(4 - 9)
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable máximo (%)	E-211	2
Contracción lineal	E-127 o E-129	Tabla 311-3
<b>Resistencia del material (F)</b>		
CBR (%) porcentaje asociado del grado de compactación mínimo especificado (numeral 311.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión	E-148	> = 15

*Fuente:* Cap. 3-311-1 (INVIAS, Instituto Nacional de Vias, 2013)

**Tabla 3.** Franjas granulométricas del material de afirmado

	TAMIZ (mm/U.S.Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
Tipo de Gradación	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No 4	No 10	No 40	No 200
	%PASA							
A-38	100		80-10	60-85	40-65	30-50	13-30	sep-18
A-25		100	90-100	65-90	45-70	35-55	15-35	oct-20
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (+/-)	0%		7%			6%		3%

Fuente: Cap. 3-311- (INVIAS, Instituto Nacional de Vias, 2013)

**Tabla 4.** Relaciones que debe cumplir el material de afirmado

Relación	Requisito
% pasa tamiz No 200	0.20 A 0.45
% pasa tamiz No 10	
% pasa tamiz No 200	$\leq 2/3$
% pasa tamiz No 40	
$\{(\% \text{ pasa tamiz de } 1'') - (\% \text{ pasa tamiz No } 10)\} \times \{\% \text{ pasa tamiz No } 4\}$	16 a 34
$(\% \text{ de contracción lineal}) \times (\% \text{ pasa tamiz No } 40)$	100 a 240

Fuente: Cap. 3-311-3 (INVIAS, Instituto Nacional de Vias, 2013)

## 2.4 Erosión

la erosión es un proceso de degradación del suelo producido por varios factores externos como el clima y actividades de ingeniería relacionados a la construcción de terraplenes y adecuación de terrenos para su construcción entre otras. Generando una disminución a la eficacia del suelo como elemento funcional dentro del área ingenieril (Escobar D. E., 2016).

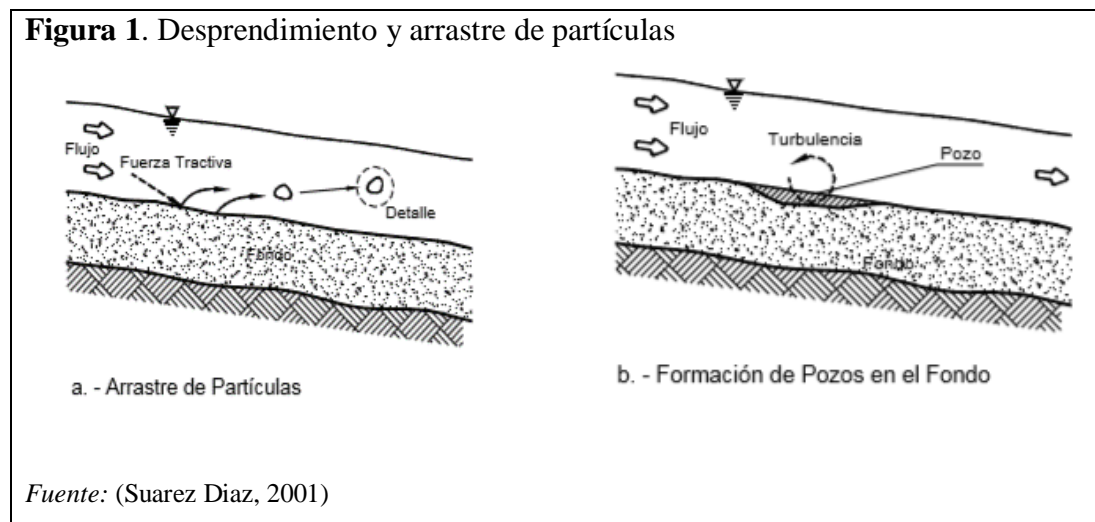
De acuerdo (SIAC, Sistema de información Ambiental, 2015) la segregación y pérdida de la productividad del suelo, es un proceso físico-mecánico denominado erosión; Siendo este

innato de la naturaleza o antrópico, que en ciertos casos originan devastación total del componente ambiental. Generando consecuencias no solo en el ámbito geológico si no también en el aspecto social, cultural y económico donde este tenga afectación.

#### 2.4.1 Proceso erosivo.

El proceso erosivo tal como lo da a conocer SUAREZ (2001), comprende el desprendimiento o segregación de las partículas individuales del suelo, así mismo su transporte y por último la sedimentación como se observa en la figura 1. En las tres etapas del proceso erosivo se producen daños importantes donde primeramente se altera la estructura superficial del suelo seguido de la completa pérdida de las partículas individuales debido al transporte de material generado por la lluvia o agentes externos producidos por el hombre y obteniendo por último la sedimentación, donde se da el depósito de material que llega a destruir cultivos, dañar infraestructuras y reducir la capacidad mecánica de los suelos.

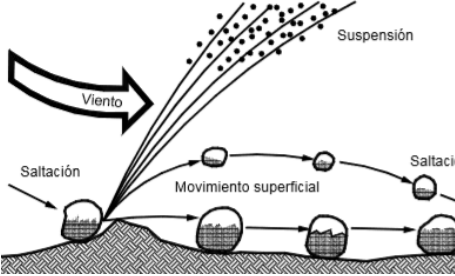
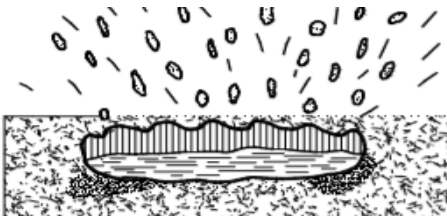
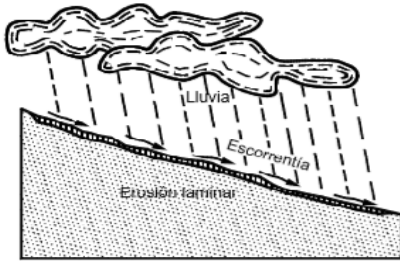
Por consiguiente, cabe mencionar que las fuerzas actuantes en dicho proceso están directamente afectadas por la velocidad del agua, su turbulencia, caudal, rugosidad de la superficie y la resistencia del suelo a la fuerza tractiva



### 2.4.2 Tipos de Erosión.

Según DIAZ (2001) existen diversos fenómenos que ocasionan la erosión de un suelo. Entre los fenómenos más comunes se encuentran la erosión por el viento, por gotas de lluvia, laminar, entre otras. De acuerdo con la Tabla 5, la cual fue adaptada.

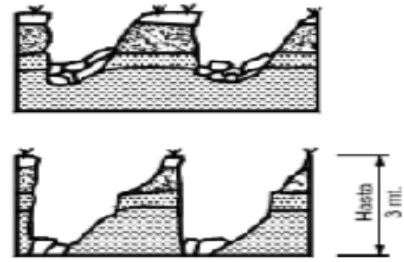
**Tabla 5.** Tipos de erosión

Tipos de erosión	Concepto	Ilustraciones
<b>Erosión por el viento</b>	Este tipo de erosión ocurre cuando los suelos desnudos (sin vegetación) son expuestos a grandes velocidades de vientos, generando desprendimiento de las partículas, transportándolas y depositándolas.	<p><b>Figura 2.</b> Erosión por el viento.</p>  <p>El diagrama ilustra el proceso de erosión eólica. Un viento fuerte, representado por una flecha curva, levanta partículas del suelo. Estas partículas se transportan de tres maneras: 'Suspensión' (partículas muy finas que flotan en el aire), 'Saltación' (partículas que saltan en trayectorias parabólicas) y 'Movimiento superficial' (partículas que se deslizan o ruedan sobre la superficie del suelo).</p>
<b>Erosión por gotas de lluvia</b>	Es generada por el impacto constante de las gotas de agua sobre la superficie desprotegida, donde se produce desprendimiento y remoción de capas de suelo.	<p><b>Figura 3.</b> Erosión por gotas de lluvia.</p>  <p>Este diagrama muestra gotas de lluvia cayendo directamente sobre una superficie irregular. El impacto de las gotas crea una zona de acumulación de agua, representada por un charco, lo que ilustra cómo la energía cinética de las gotas puede remover partículas del suelo.</p>
<b>Erosión laminar</b>	La escorrentía es la encargada de generar desprendimiento y transporte de las capas más superficiales ocasionando pérdida de forma imperceptible.	<p><b>Figura 4.</b> Erosión laminar.</p>  <p>El diagrama muestra un terreno inclinado donde la lluvia cae y se convierte en escorrentía que fluye hacia abajo. Este flujo de agua genera 'Erosión laminar', que es la pérdida gradual y uniforme de la capa superficial del suelo.</p>

**Erosión en surcos**

La concentración del flujo superficial se retiene en pequeños canales formando una serie de surcos, al realizar este fenómeno la fuerza tractiva de la corriente ocasiona erosión.

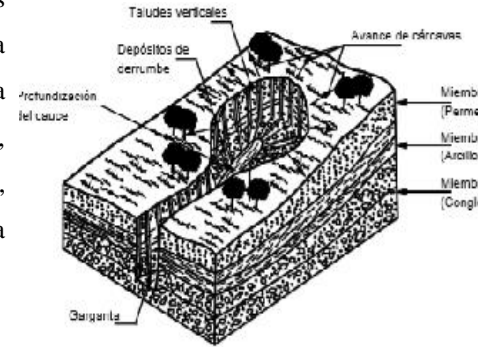
**Figura 5.** Erosión en surcos.



**Erosión de cárcavas**

La pérdida desmedida de volúmenes de suelo generada en los surcos por la concentración de corriente de agua ocasiona canales largos y profundos llamados cárcavas, siendo este un proceso de difícil recuperación, originando altas limitaciones en el uso de la tierra.

**Figura 6.** Erosión de cárcavas.



**Erosión por afloramiento de agua**

Este tipo de erosión es generada por la afloración de agua subterránea a la superficie, ocasionando desprendimiento de las partículas y formación a su vez de cárcavas o cavernas.

**Erosión interna**

La formación de cavernas internas dentro de la tierra por medio del transporte de partículas finas ocasionadas por el flujo de agua

**Erosión en cauces de agua**

El desprendimiento, transporte y depositario de las partículas de sedimentos es provocada por las corrientes de agua, siendo estos de alta complejidad.

**Erosión por oleaje**

Debido al empuje de propagación de las olas por una superficie es provocado el desprendimiento y transporte de partículas.

**Erosión en masa (deslizamientos)**

La remoción en masas relaciona desprendimiento, transporte y deposición de grandes masas de suelo por la fuerza de ciertas cantidades de agua, llamados también deslizamientos.

Fuente: (Suarez Diaz, 2001)

### **2.4.3 Erosión hídrica.**

La erosión hídrica es un proceso complejo donde se presenta la separación del material en partículas individuales como arcilla, limo y arena además de otros pequeños agregados por la acción de la gota que impacta con el suelo. El material desprendido es arrastrado pendiente abajo por el escurrimiento superficial, factores que a su vez generan la erosión hídrica donde su agente principal es el agua.

## **2.5 Simuladores de lluvia**

Es una herramienta de investigación diseñada para simular diferentes episodios pluviométricos de diferente intensidad, la cual permite obtener fácilmente datos de erosión, infiltración, escorrentía superficial, transporte de sedimentos, aunque cabe resaltar que es necesario tener en cuenta un buen manejo en la interpretación de resultados, para así obtener una información fiable tal como afirma la (Benito, Santiago, & Varela, 2001).

### **2.5.1 Características de un simulador de lluvia**

Las características de la lluvia natural que se deben obtener en los simuladores de lluvia son las siguientes (R. Lal, 1994).

- La distribución del tamaño de gota debe ser parecido al de la lluvia natural. La lluvia natural tiene un amplio rango de tamaños de gota desde cerca a cero hasta siete mm de diámetro. La medida del diámetro de la gota esta entre uno y tres mm y tiene tendencia a incrementar con la intensidad de la lluvia.
- La velocidad del impacto debe ser similar al de las gotas de lluvia natural. La gota de lluvia natural cae a distintas velocidades, desde valores cercanos a cero como la gota de niebla hasta valores de 9m/seg para las gotas más grandes. Las gotas de lluvia de 2 mm de diámetro caen a velocidades entre 6m/seg y 7m/seg.

- El tamaño de área de investigación debe ser bastante representativo de las condiciones que serán evaluadas.
- Las características de la gota e intensidad deben mantenerse uniformes a lo largo del área de estudio.
- El simulador deberá contar con la capacidad para replicar repetidas veces las mismas precipitaciones.
- El equipo debe ser portable para facilitar su traslado a otra área de investigación.
- Energía cinética similar a la de lluvia natural.
- Lluvia uniforme y distribución aleatoria de las gotas.

### 2.5.2 Tipos de simuladores de lluvia

Existen dos grupos de simuladores:

**2.5.2.1 Simuladores por goteo:** Este consiste en la formación de gotas de manera individual y dejarla precipitar por gravedad a determinadas alturas, como se muestra en la figura 7.

**Figura 7.** Simulador de lluvia por goteo.

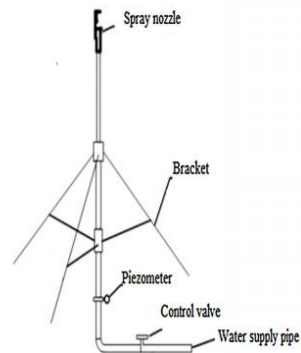


*Fuente.* (Monje Jeremías & Aguilar Pereira, 2008)



**2.5.2.2 Simuladores por aspersión:** Este sistema de simulación se compone por boquillas pulverizadoras que producen gotas de agua a presión, estas boquillas al expulsar el agua generan velocidades de gotas y valores de energía cinética apropiadas en alturas de caída más bajas que las de lluvia natural, como se evidencia en la figura 8.

**Figura 8.** Simulador de lluvia por aspersión.



Fuente. (Linhua Wang, 2017)

### 3. Metodología

#### 3.1 Programa experimental

A continuación, se describen los métodos de ensayos empleados para el desarrollo de este trabajo de grado, se resalta que se siguió la metodología propuesta en la Normal INVIAS capítulo 3-311 sobre Afirmados, permitiendo obtener información básica de las características del suelo, expuestos en la tabla 6.

**Tabla 6.** Programa experimental.

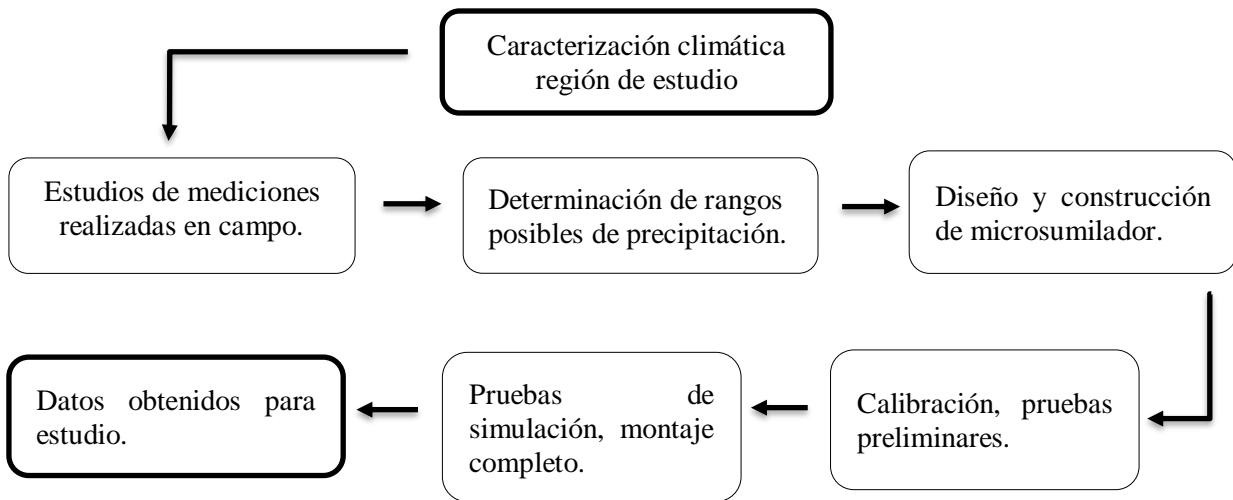
<b>Ensayos</b>	<b>Norma</b>	<b>No. de ensayos</b>
<b>Granulometría</b>	INV E 123-13	1
<b>límites de Atterberg.</b>	INV E 125 Y E 126-13	3
<b>Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable.</b>	INV E 211-13	1
<b>Contracción lineal.</b>	INV E 127-13	1
<b>Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos.</b>	INV E 220-13	1
<b>Resistencia al desgaste (Maquina de los Ángeles).</b>	INV E 218-13	1
<b>Ensayo modificado de compactación (Proctor).</b>	INV E 142-13	1
<b>Relación de soporte del suelo (CBR).</b>	INV E 148-13	1
<b>Medición de la erosión superficial hídrica.</b>		6

*Fuente:* (INVIAS I. N., 2012)

#### 3.2 Micro simulador de lluvia

Con el fin de establecer características similares a la de la lluvia, se realizó una búsqueda de información climatológica sobre el área de estudio que sería Piedecuesta, relevantes para la determinación de los valores de precipitación que se considerarían pertinentes para simular de alguna manera el comportamiento del proceso erosivo en un determinado tiempo.

**Figura 9.** Proceso de diseño, construcción y calibración de microsumilador de lluvia.



*Fuente. Autores del proyecto*

Las condiciones climáticas de Piedecuesta- Santander, fueron de vital importancia para el diseño, construcción y calibración del micro simulador de lluvia. Como se explica al detalle entre los ítems, 3.2.1 y 3.2.3.

### **3.2.1 Caracterización climática de la región de estudio**

De acuerdo con Arguello y Torres (UIS, 2009), quienes determinaron unas precipitaciones totales para tormentas de 3 horas en cada subcuenta de río frío en la región de Piedecuesta mostradas en la tabla 7.

**Tabla 7.** Valores de precipitación para tormentas de 3 horas en cada subcuenca.

Subcuenca	Precipitación(mm)					
	TR2.33	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100
Q. Guayana	70,4	83,77	96,9	117,46	135,87	220,35
Q. La Ronda	70,4	82,97	95,97	116,33	134,56	218,23
Q. Mensulí Alta	69,52	83,4	96,47	116,94	135,26	219,37
Q. Mensulí Baja- La estancia	68,41	79,82	92,32	111,91	129,45	209,94
Q. Mensulí Media	69,87	82,9	95,89	116,24	134,45	218,06
Q. Palmira alta	67,7	82,14	95,01	115,17	133,21	216,05
Q. Palmira Baja	67,43	81,79	94,61	114,68	132,65	215,13

*Fuente.* Componente hidrológico subcuenca de las quebradas Mensulí y Palmira.

Basándonos en los periodos de diseños para vías primarias las cuales son de 20 años como se muestra en la norma (INVIAS, Instituto Nacional de Vías, 2013). En el proyecto se asumió un periodo de retorno de 25 años abarcando el mayor tiempo posible de duración de una vía terciaria antes de su primer mejoramiento, obteniendo una precipitación promedio de 19,254 mm para una duración de lluvia de 30 minutos. Como se muestra en los siguientes cálculos.

Precipitación promedio=  $(117,46 + 116,33 + 116,94 + 111,91 + 116,17 + 115,17 + 114,68) / 7$

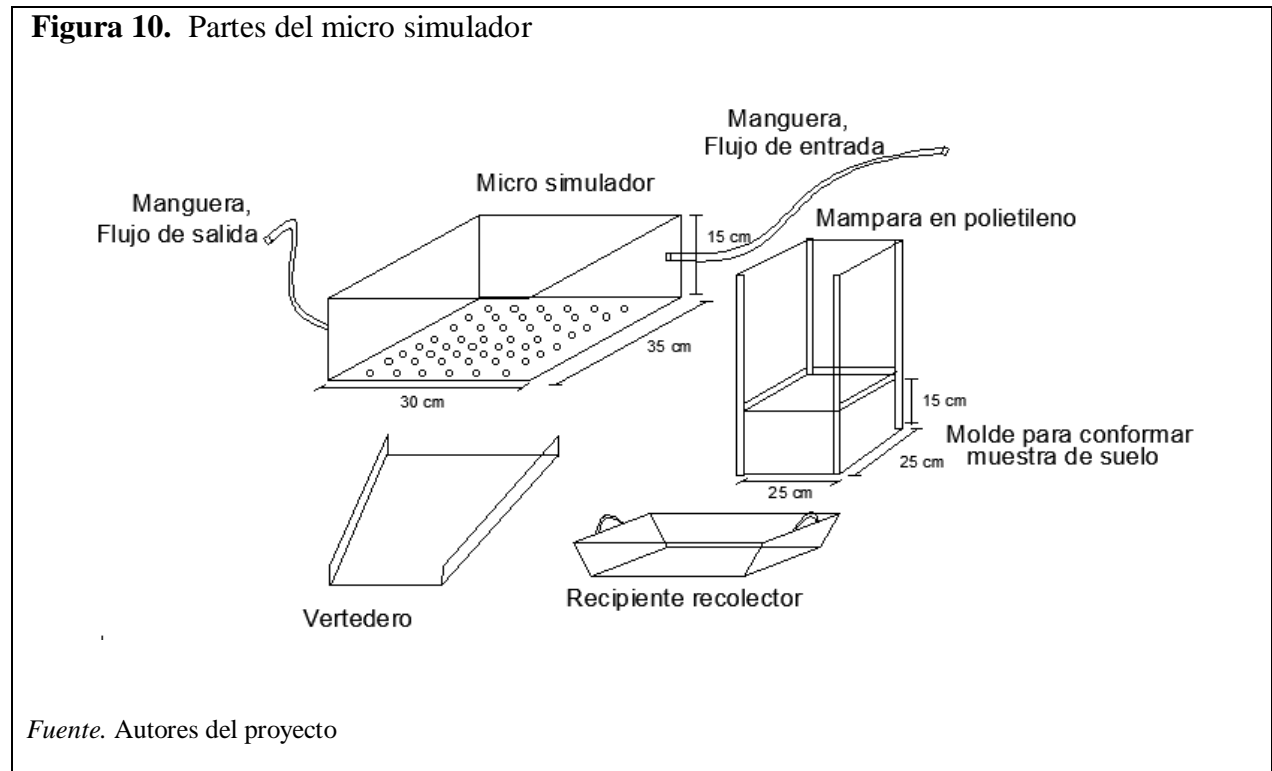
Precipitación Final para media hora =  $\frac{115,527}{6} = 19,254\text{mm}$

### 3.2.2 Diseño y Construcción de micro simulador

Para el diseño y construcción del micro simulador fue necesario conocer la precipitación promedio de la región en estudio.

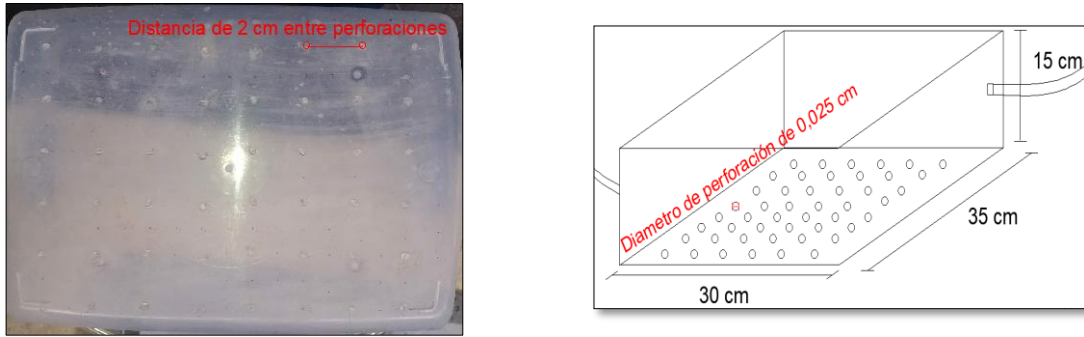
La forma básica del micro simulador es un prisma rectangular de 35\*30\*15 cm, hecho de polietileno, ubicado a 150 cm sobre el suelo. En su base se realizaron 48 perforaciones cada 2 cm,

inicialmente con diámetros de 1/8” y 5/64”, este a su vez está conectado a través de dos mangueras una de entrada y otra de salida con el fin de mantener una lámina de agua constante como se muestra en la figura 10.



Finalmente, después de varios ensayos se logró determinar el diámetro de las 48 perforaciones y dar cumplimiento a la precipitación promedio deseada. Donde fue necesario la adición de silicona y posteriormente la perforación con aguja de diámetro de 0.025 cm para la formación de gota, ver figura 11. Con el fin de reducir el tamaño de la gota debido a que se adherían a la base del micro simulador aumentando su diámetro debido a la acumulación de agua que posteriormente caía por el peso de la gota.

**Figura 11.** Gotero del simulador



Fuente. Autores del proyecto

### 3.2.3 Calibración de micro simulador

Para obtener y simular la precipitación calculada en el ítem 3.2.1, fue necesario calibrar el micro simulador debiendo establecer la altura de lámina de agua en el tanque, flujo de entrada y flujo salida. Para determinar esta precipitación, fueron realizadas tres medidas utilizando un pluviómetro en diferentes puntos debajo del micro simulador. Con un pluviómetro de 143.138 cm<sup>2</sup> de área, se determinó que, para llegar a la precipitación de 19,254 mm en 30 minutos, se debe recolectar un volumen de agua igual a 275,52 cm<sup>3</sup>. En la tabla 8 se muestra los datos para la calibración del simulador, donde finalmente se obtuvo la precipitación deseada.

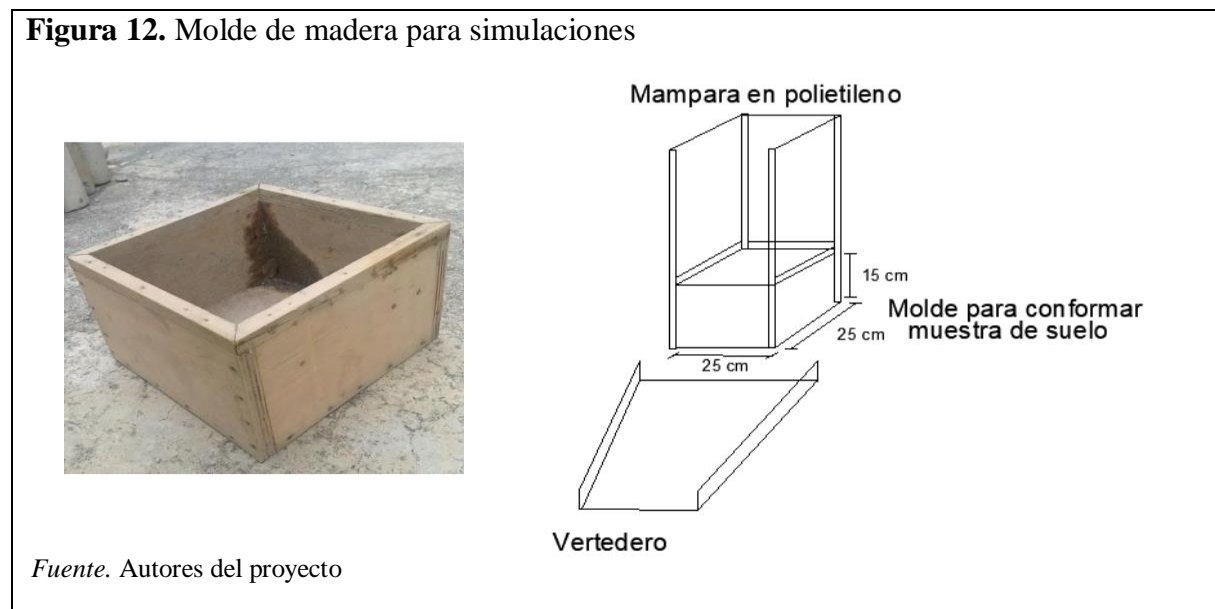
**Tabla 8.** Simulaciones para calibración de micro simulador

<b>Diámetro de perforación (mm)</b>	<b>Altura sobre el suelo (cm)</b>	<b>Lámina de agua (cm)</b>	<b>Precipitación (mm)</b>
0,25	150	13	25,3
0,25	150	10	24,2
0,25	150	8	23,5
0,25	150	7	19,3
0,25	150	7	19,4
0,25	150	7	19,25

Fuente. Autores del proyecto

### 3.2.4 Diseño y construcción de moldes para material de afirmado

La forma del molde es un prisma cuadrado de 25\*25\*15cm, hecho de madera con espesor de 2 cm. Por unos de los costados, se adaptó con puntillas de acero una lámina de zinc con ancho de 29cm y largo de 8cm, la cual cumple la función de vertedero, transportando el material desprendido a un recipiente. En los 3 costados restantes se instalaron tres palos de balsa con un largo de 60cm, desde la base del molde cubiertos con una bolsa de polipropileno, la cual evita el desperdicio de material al momento del impacto de la gota sobre la superficie del suelo compactado. Ver figura 12.



Se hicieron compactaciones del 90% y 95%, se utilizaron el porcentaje de humedad y densidad del material de acuerdo con el ensayo del Proctor modificado mostrado en el ítem 4.1.7 en la tabla 9 se ilustra la masa de los moldes ya compactados.

**Humedad óptima: 5,2%**

**Volumen del molde: 9375cm<sup>3</sup>**

**Densidad máxima seca,  $\gamma_{max}$ : 2,288 g/ cm<sup>3</sup>**

**Tabla 9.** Masa de los moldes compactados.

	<b>Compactación del 90%</b>	<b>Compactación del 95%</b>
<b>Densidad <math>\gamma</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,06	2,17
<b>Masa (gr)</b>	19312,5	20343,75
<b>Masa seca (gr)</b>	18357,89	19338,17
<b>Agua (gr)</b>	954,61	1005,58

*Fuente: Autores del proyecto*

Por lo tanto, para que tuviera una compactación del 90%:

Peso de la caja + material = 21762.5gr y del 95% Peso de la caja + material = 22793.75gr

Al momento de la compactación se realizó en 3 capas y en promedio 50 golpes por capa, para lograr la altura deseada para la capa de revestimiento.

### **3.3 Medición de la erosión superficial hídrica**

Se realizaron 6 simulaciones a diferentes pendientes y compactaciones como se muestra en la tabla 10, manteniendo siempre la densidad para 90 y 95 por ciento con sus respectivas densidades.

**Tabla 10.** Programa experimental para medición de la erosión superficial hídrica.

<b>Proctor</b>	<b>Peso del material compactado</b>		
	<b>Pendiente 7%</b>	<b>Pendiente 10%</b>	<b>Pendiente 14%</b>
<b>90%</b>	19312,5 gr	19312,5 gr	19312,5 gr
<b>95%</b>	20343,75	20343,75	20343,75

*Fuente: Autores del proyecto*



### 3.4 Procedimiento de simulaciones

- Se realiza la compactación del molde al 90% o 95% de acuerdo con el ensayo, ver tabla 9.
- Se instala el simulador a la altura ya calibrada anteriormente (150cm) sobre el suelo, corroborando que se encuentre completamente nivelado.
- Se ubica el molde de madera ya compactado con su estructura completa (vertedero y mampara en polietileno) a la pendiente deseada, garantizando que este sea cubierto completamente por el simulador.
- Se sitúa el recipiente recolector al final del vertedero.
- Seguido a esto se abre el grifo dejando llenar el micro simulador hasta la altura de 7 cm manteniendo su nivel constante.
- Se empieza el ensayo cronometrando 30 minutos, desde que el micro simulador tenga la altura de agua ya calibrada.
- Desmante del ensayo.
- Al momento de retirar el material del molde es necesario recolectar una porción de suelo para obtener la humedad después del ensayo.
- Recolección y pesado del material desprendido por el impacto de la gota.
- se ingresa el material recogido al horno por 24 horas a una temperatura de 100 a 150 ° Celsius.
- Finalmente se pesa y tamiza el material seco.

**Figura 13.** Estructura de simulación, montaje final.



*Fuente.* Autores del proyecto

## 4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los laboratorios realizados para establecer las diferentes características y parámetros de los suelos que componen el material usado.

### 4.1 Granulometría

Durante la realización del ensayo, se logró la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas del suelo, el cual se realizó cumpliendo con lo establecido en la norma INV E 123-13, tal como se muestra en la tabla 11.

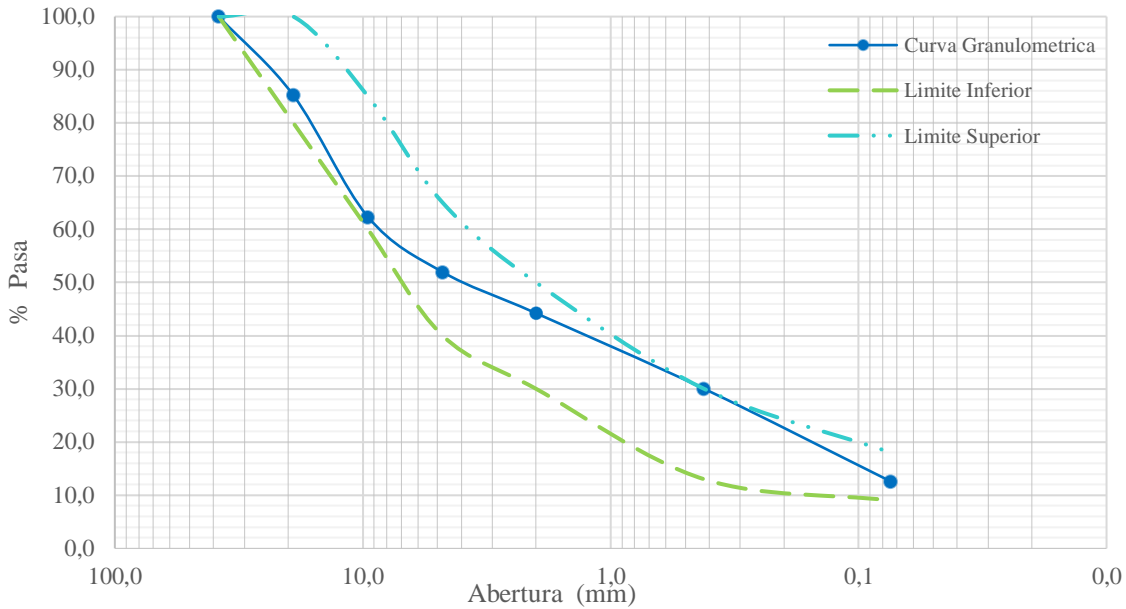
**Tabla 11.** Datos de granulometría.

Granulometría						
<b>Peso de muestra seca</b>			15130,0			
<b>Peso de muestra lavada</b>			14010,0			
Tamices	Abertura	Peso	%Retenido	%Retenido	% que	Limites
ASTM	en mm.	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	
<b>1 1/2"</b>	38,100	0,00	0,0	0,0	100,0	100 - 100
<b>3/4"</b>	19,050	2240,00	14,8	14,8	85,2	80 - 100
<b>3/8"</b>	9,525	3460,00	22,9	37,7	62,3	60 - 85
<b>No 4</b>	4,760	1570,00	10,4	48,1	51,9	40 - 65
<b>No 10</b>	2,000	1170,00	7,7	55,8	44,2	30 - 50
<b>No 40</b>	0,420	2150,00	14,2	70,0	30,0	13 - 30
<b>No 200</b>	0,074	2640,00	17,4	87,4	12,6	9 - 18
<b>Pasa 200</b>		1900,00	12,6	100,0	0,0	
<b>Σ</b>		15130,00	100,0		100,0	

*Fuente.* Autores del proyecto

Se realizó una curva granulométrica figura 14, con el fin de ilustrar gráficamente que el material usado, se encuentra entre los límites granulométricos, donde podemos inferir que cumple con los parámetros establecidos para su granulometría.

**Figura 14.** Grafica de la Curva Granulométrica.



Fuente. Autores del proyecto.

Finalmente, luego del análisis de resultados se logró determinar que el suelo está constituido por un 48,1 % de material grueso y 51,9% de material fino.

#### 4.2 Limite de Atterberg

**Tabla 12.** Datos de Limite líquido.

No. Prueba	Capsula	No. de golpes	Limite Liquido					Contenido de Agua %
			Peso de Capsula + Suelo húmedo (gr)	Peso capsula + suelo seco (gr)	Peso del agua	Peso de la capsula	Peso del suelo seco	
1	52	6	24,8	22,4	2,4	11	11,4	21,05%
2	5	10	22,3	20,8	1,5	14	6,8	22,06%
3	19	14	45	40,4	4,6	21	19,4	23,71%

Fuente. Autores del proyecto.

De acuerdo con la norma INV E 125 Y E 126-13, si el número requerido de golpes para cerrar la ranura es siempre menor de veinticinco, se dice que no es posible determinar el límite líquido y que el suelo es no plástico (NP). Por tanto, no es necesario realizar el ensayo de límite plástico.

#### 4.3 Contenido de terrones de arcilla y partículas delezables.

El agregado para este ensayo se debió separar en diferentes tamaños, empleando los tamices y las masas que se indican en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Datos Contenido de terrones de arcilla y partículas delezables.

<b>Agregado Grueso</b>				
<b>Tamaño de las partículas entre los tamices</b>		<b>Masa de la Muestra (g)</b>	<b>Masa partículas Retenidas (g)</b>	<b>%</b>
<b>No. 4"</b>	3/8"	1000	993,00	<b>0,70%</b>
<b>3/8"</b>	3/4"	2000	1994,00	<b>0,30%</b>
<b>3/4"</b>	1 1/2"	3000	2997,00	<b>0,10%</b>
<b>Agregado fino</b>				
<b>No. 16 "</b>		100	98,60	<b>1%</b>

*Fuente.* Autores del proyecto

Según lo establecido en la norma INV E 211-13 se calcula el porcentaje de terrones de arcilla y partículas delezables entre los diferentes agregados de forma individual tal como se muestra en la Tabla 13, obteniendo en cada una un porcentaje no mayor al 1%, el cual está dentro del requisito establecido para afirmados.

#### 4.4 Contracción lineal

**Tabla 14.** Datos de ensayo Contracción lineal.

	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>
<b>Suelo húmedo + capsula (g)</b>	58,12	50,21
<b>capsula (g)</b>	29,65	19,18
<b>Masa húmeda (g)</b>	28,47	31,03
<b>Suelo seco + capsula (g)</b>	52,95	44,97
<b>Masa seca (g)</b>	23,3	25,79

Contenido de agua	22,19	20,32
Masa mercurio	217,23	233,73
Volumen suelo húmedo	16,03	17,25
Masa mercurio desplazada	163,61	184,84
Volumen suelo seco	12,07	13,64
Límite de contracción	5,21	6,33
Relación de contracción	1,93	1,89
Cambio volumétrico	32,77	26,45
Contracción Lineal %	9,02	7,52
Relación (% de contracción lineal) x (% pasa tamiz No 40)	270,5	225,7
<b>Promedio Contracción lineal %</b>		<b>248,11</b>

Fuente. Autores del proyecto.

Teniendo en cuenta la **Tabla 4**, Relaciones que debe cumplir el material de afirmado se debió relacionar el porcentaje que pasa en el tamiz No 4 y el porcentaje de contracción lineal, como se observa en la **Tabla 15**, dejando una relación de 248,11 %, que de acuerdo con los requisitos este no cumple, debido a que supera el máximo permitido 240 en un 8,11%.

#### 4.5 Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos.

Durante la realización de este procedimiento se obtuvo información útil, la cual nos ayuda a determinar la resistencia del agregado sometido a inmersión en soluciones saladas de magnesio, donde esta debe tener una gravedad específica entre 1.295 y 1.308, con el fin de mayor precisión en sus resultados, mostrados en la tabla 15.

**Tabla 15.** Datos de Porcentaje de perdida de solidez en sulfatos.

Ensayo de solidez sobre el agregado grueso					
Pasa	Retenido	Peso fracción ensayada (g)	Tamiz para determinar perdida	Peso final Retenido (g)	% Perdida
1 1/2"	1"	1000	1 1/4"	999	0,1%
1"	3/4"	500	5/8"	500	0,0%
3/4"	1/2"	670	5/16"	670	0,0%
1/2"	3/8"	330	No 5	322	2,4%
3/8"	No 4	100	No 4	98	2,0%

<b>Ensayo de solidez sobre el agregado fino</b>					
<b>No 4</b>	No 8	100	No 8	95	5,0%
<b>No 8</b>	No 16	100	No 16	92	8,0%
<b>No 16</b>	No 30	100	No 30	94	6,0%
<b>No 30</b>	No 50	100	No 50	88	12,0%
<b>Promedio ponderado de % de pérdida de solidez</b>					<b>3,9%</b>

*Fuente.* Autores del proyecto

Luego de tabulados los datos obtenidos del ensayo de solidez de sulfato se obtiene un promedio de pérdida del 3,9% que de acuerdo con la norma en la Tabla 2, dice que como requisito para sulfatos de magnesio su máximo permitido es de 18%, por lo cual indica que cumple con el requisito puesto se encuentra por debajo del máximo.

#### **4.6 Desgaste de la máquina de los ángeles**

Para la realización del ensayo fue necesario escoger el método indicado, donde la muestra sea lo más parecida granulométricamente a la que se desea usar en obra. Para este caso las fracciones más indicadas fueron debidamente separadas como se muestra en la siguiente Tabla 16.

**Tabla 16.** Ensayo de Desgaste de la máquina de los ángeles.

<b>Resistencia al desgaste (Maquina de los Ángeles)</b>		
<b>Método A</b>		
<b>Abertura del Tamiz</b>		<b>Peso de las fracciones (g)</b>
<b>Pasa</b>	<b>Retenido</b>	
1 1/2	1	1250
1	3/4	1250
3/4	1/2	1250
1/2	3/8	1250
<b>Peso Inicial</b>		<b>5000</b>
<b>Peso Final</b>		<b>3709</b>
<b>%</b>		<b>25,82</b>

*Fuente.* Autores del proyecto

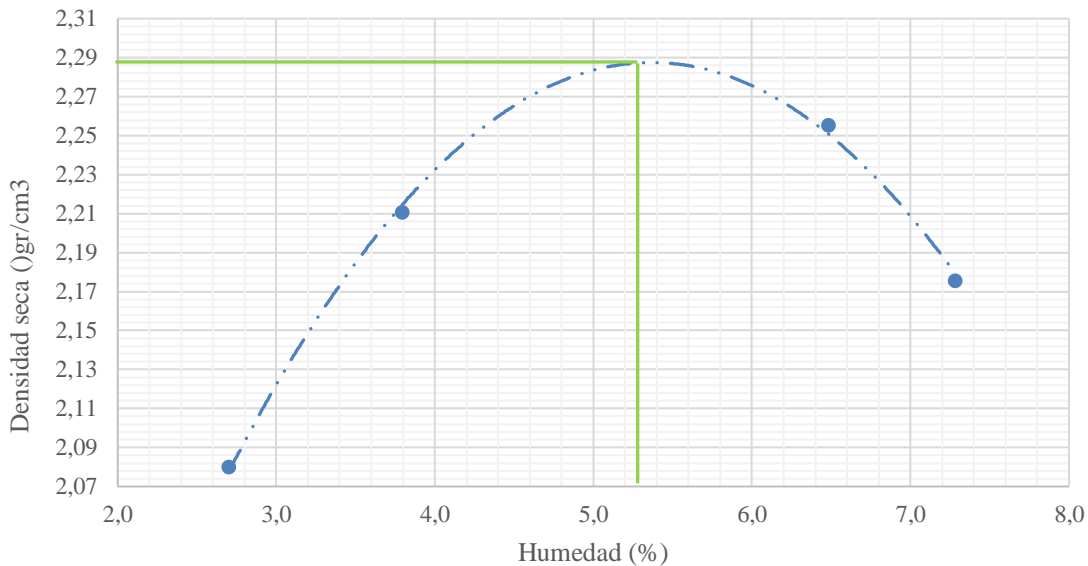
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el laboratorio, se puede concluir que se cuenta con un agregado de alta resistencia al desgaste puesto que se obtuvo un 25,82%. Cumpliendo con lo establecido en la norma.

#### 4.7 Ensayo Modificado de compactación (Proctor).

Compactación				
Prueba No.	1	2	3	4
Numero de capas	5	5	5	5
Numero de golpes	56	56	56	56
Peso suelo + molde (gr.)	10601	10937	11164	11021
Peso molde (gr.)	6067	6067	6067	6067
Peso suelo compactado (gr.)	4534	4870	5097	4954
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	2122	2122	2122	2122
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	2,14	2,29	2,40	2,33
Humedad (%)				
Tara No.	27	3	15	5
Tara + suelo húmedo (gr.)	100	96	100	113
Tara + suelo seco (gr.)	98,21	93,66	95,19	107,16
Peso de agua (gr.)	1,79	2,34	4,81	5,84
Peso de tara (gr.)	32,00	32,00	21,00	27,00
Peso de suelo seco (gr.)	66,21	61,66	74,19	80,16
Humedad (%)	2,7	3,8	6,5	7,3
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2,08	2,21	2,26	2,18
Máxima Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> ):				<b>2,288</b>
Óptimo Contenido de Humedad (%):				<b>5,2</b>

Fuente. Autores del proyecto.

Figura 15. Grafica de Proctor Modificado.



Fuente. Autores del proyecto

Para la obtención de la relación de soporte del suelo, fue necesario la realización del ensayo modificado de compactación donde se conocería la máxima densidad seca y su óptimo contenido de humedad.

#### 4.8 Relación de soporte del suelo (CBR).

**Tabla 17.** Datos del ensayo relación de soporte del suelo CBR.

Penetración (in)	Penetración (mm)	Aplicación de Carga						
		Esfuerzo Estándar (Mpa)	Molde III		Molde II		Molde I	
			Carga (Lb)	Esfuerzo (Mpa)	Carga (Lb)	Esfuerzo (Mpa)	Carga (Lb)	Esfuerzo (Mpa)
0,005	0,127		98	0,023	6	0,00	34	0,01
0,025	0,635		470	0,110	143	0,03	85	0,02
0,050	1,27		935	0,219	502	0,12	139	0,03
0,075	1,905		1305	0,306	911	0,21	188	0,04
0,100	2,54	6,9	1638	0,384	1285	0,30	240	0,06
0,125	3,175		2037	0,478	1639	0,38	257	0,06
0,150	3,81		2513	0,589	1973	0,46	313	0,07
0,175	4,445		3028	0,710	2296	0,54	368	0,09
0,200	5,08	10,3	3461	0,811	2566	0,60	415	0,10
0,250	6,35		4460	1,045	3098	0,73	513	0,12
0,300	7,62		5254	1,232	3608	0,85	592	0,14
0,400	10,16		6774	1,588	4614	1,08	789	0,18
0,500	12,7		8251	1,934	5314	1,25	987	0,23

Fuente. Autores del proyecto

**Tabla 18.** Expansión del material

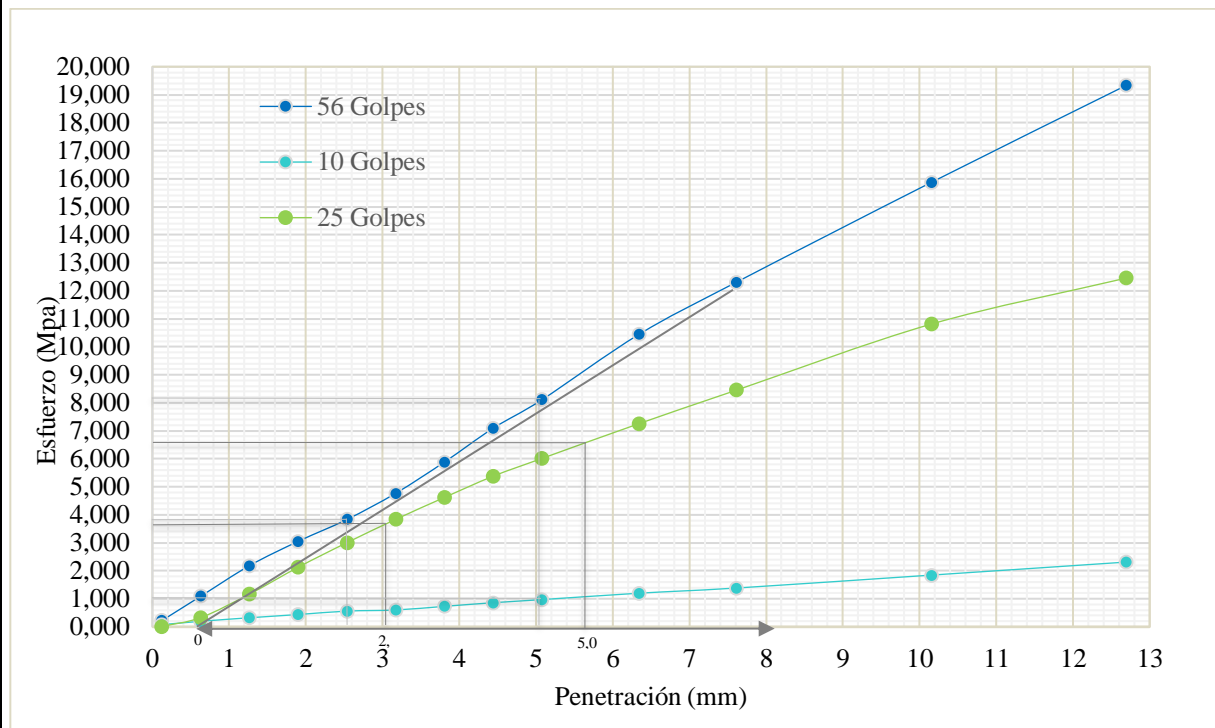
Fecha	Expansión		
	Molde III	Molde II	Molde I
08/05/19	0,000	0,000	0,000
09/05/19	250,000	25,000	184,000
10/05/19	252,000	25,000	186,000
11/05/19	256,000	27,000	187,000
12/05/19	260,000	28,000	189,000

Fuente. Autores del proyecto

Cumpliendo con lo establecido en la norma INV E 148-13, Fue necesario realizar corrección a la grafica para 25 golpes en la **Figura 15**.



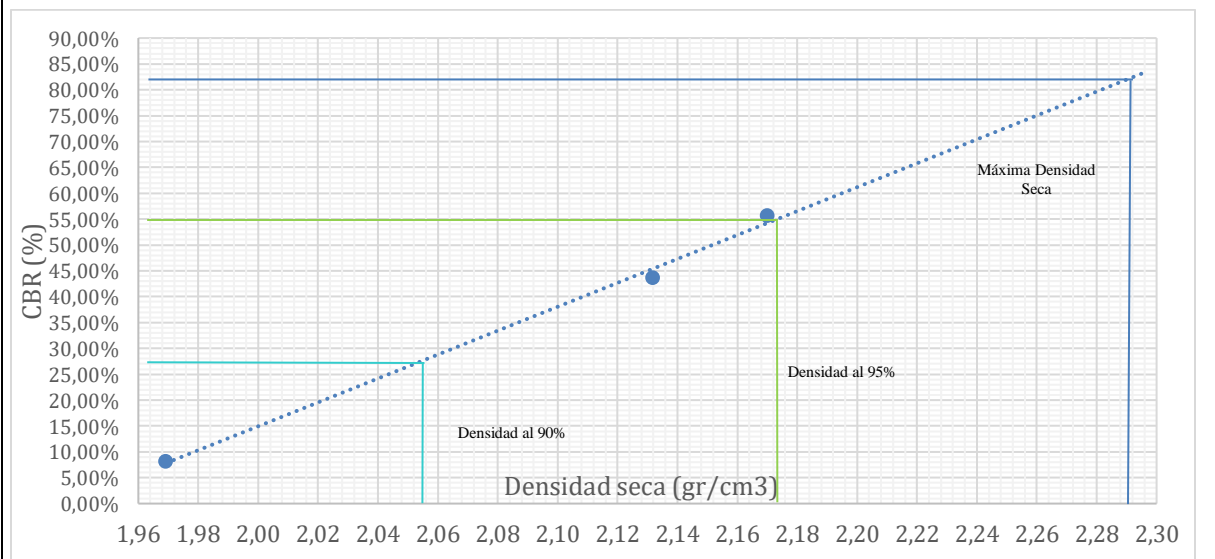
**Figura 16.** Penetración - Esfuerzo



Fuente. Autores del proyecto

Analizada y Corregida la curva Penetración - esfuerzo, se toman los esfuerzos corregidos para el cálculo de los CBR correspondientes con base a los esfuerzos de referencia de 6,9 y 10,3 Mpa.

**Figura 17.** Curva Densidad seca – CBR



Fuente. Autores del proyecto

De la figura 17. Curva densidad seca – CBR, se obtuvo los valores de relación de soporte del suelo para los siguientes grados de compactación:

- Compactación al 90% con un CBR del 27%.
- Compactación para el 95% un CBR de 54,9%.
- Obteniendo para la densidad máxima seca un CBR del 82%

**Tabla 19.** Control de cumplimiento de los ensayos establecidos en la norma.

Características	Requisito	Obtenidos	Cumplimiento
Dureza (o)			
Desgaste en la máquina de los ángeles (Gradación A), máximo (%)	50	25,82	Cumple
Durabilidad (o)			
Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	18	3,9	Cumple
Limpieza (F)			
Limite líquido, máximo (%)	40	NP	No Cumple
Índice de plasticidad (%)	(4 - 9)		
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales máximo (%)	2	1	Cumple
Contracción lineal	(100-240)	248,11	No Cumple
Resistencia del material (F)			
CBR (%) porcentaje asociado del grado de compactación mínimo especificado (numeral 311.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión	$\geq 15$	54,9	Cumple

*Fuente.* Autores del proyecto

#### 4.9 Medición de la erosión superficial hídrica

En la ejecución del ensayo se realizaron 6 simulaciones variando las pendientes y su grado de compactación, además se registraron datos como el del material recolectado en la simulación.

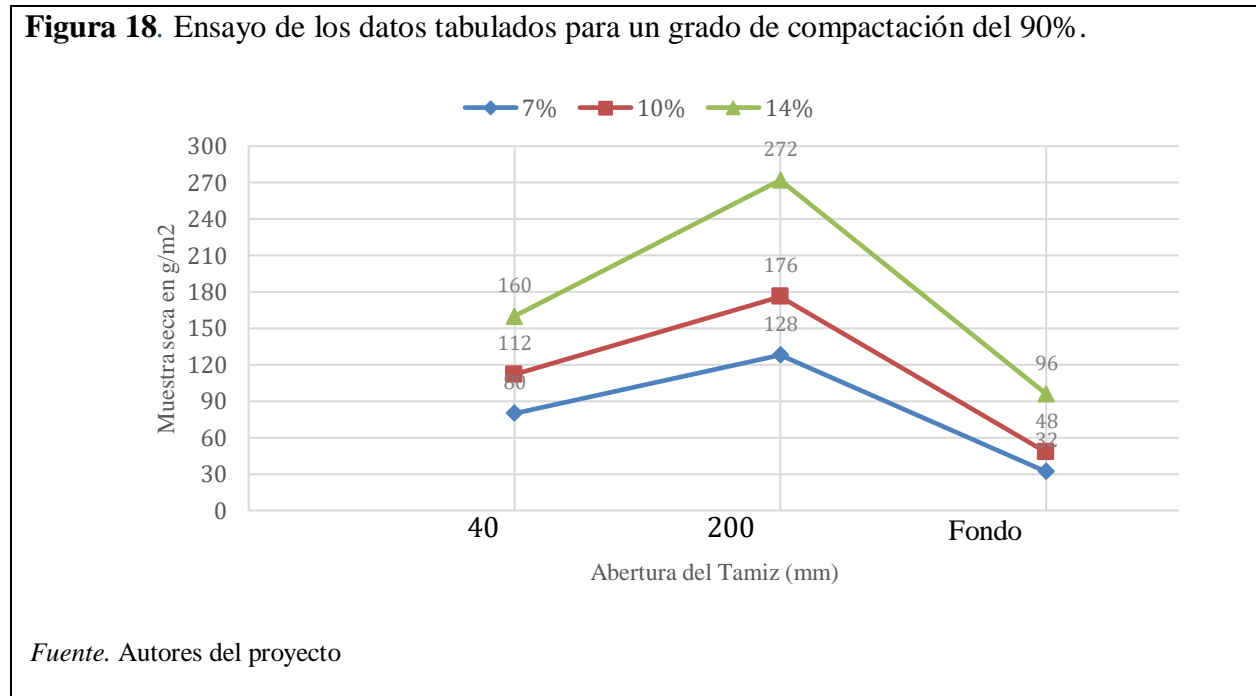
**Tabla 20.** Datos de simulación de la erosión hídrica.

<b>Proctor 90%</b>						
	<b>Ensayo 1</b>		<b>Ensayo 2</b>		<b>Ensayo 3</b>	
	<b>Pendiente 7%</b>		<b>Pendiente 10%</b>		<b>Pendiente 14%</b>	
<b>Material recolectado seco</b>	15g		21g		33g	
<b>Cap. Material húmedo</b>	64g		44g		133,6g	
<b>Cap. Material seco</b>	60g		40g		129g	
<b>Tamices</b>	<b>g</b>	<b>m2</b>	<b>g</b>	<b>m2</b>	<b>g</b>	<b>m2</b>
<b>40</b>	5	80	7	112	10	160
<b>200</b>	8	128	11	176	17	272
<b>Fondo</b>	2	32	3	48	6	96
<b>Proctor 95%</b>						
	<b>Ensayo 1</b>		<b>Ensayo 2</b>		<b>Ensayo 3</b>	
	<b>Pendiente 7%</b>		<b>Pendiente 10%</b>		<b>Pendiente 14%</b>	
<b>Material recolectado seco</b>	11g		17g		28g	
<b>Cap. Material húmedo</b>	80g		44g		84g	
<b>Cap. Material seco</b>	73g		41g		80g	
<b>Tamices</b>	<b>g</b>	<b>m2</b>	<b>g</b>	<b>m2</b>	<b>g</b>	<b>m2</b>
<b>40</b>	3	48	5	80	8	128
<b>200</b>	7	112	9	144	15	240
<b>Fondo</b>	1	16	3	48	5	80

*Fuente.* Autores del proyecto

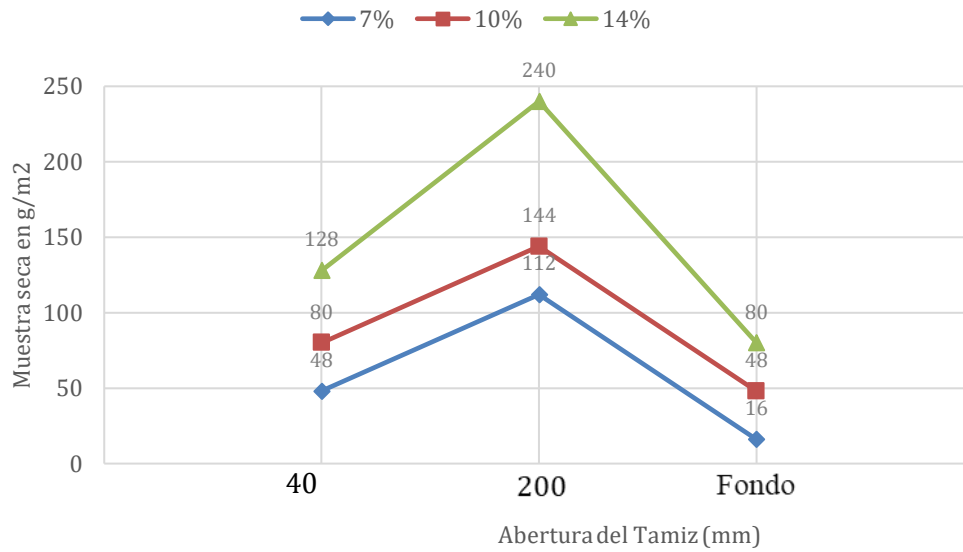
En la tabla 10 se muestran los datos obtenidos en las 6 simulaciones con sus respectivas pendientes y compactaciones establecidas, tomando el material recolectado se logró observar que, durante los 15 primeros minutos de ensayo el impacto de la gota contra el suelo ocasiona los mayores cambios en las propiedades superficiales, generando un desprendimiento del suelo fino, siendo este un proceso notorio por la suciedad del agua, mientras que, en los 15 minutos restantes a la simulación, se determina que las partículas con un diámetro mayor al No 10

quedan al descubierto. La rapidez de estos cambios es un indicativo de la vulnerabilidad de dichos suelos a las precipitaciones produciendo así la erosión superficial.



En la figura 18 se realizó un gráfico de la cantidad de material según cada tamiz vs el material erosionado por metro cuadrado a una compactación de 90%. En la cual se observa que para las pendientes de 14 % se adquieren mayores porcentajes de erosión en el tamiz 40:  $160\text{gr}/\text{m}^2$ , tamiz 200:  $272\text{ gr}/\text{m}^2$  y  $96\text{ gr}/\text{m}^2$  para el fondo, mientras que la pendiente del 7% mostro menor grado de erosión en el tamiz 40:  $80\text{ gr}/\text{m}^2$  tamiz 200:  $128\text{ gr}/\text{m}^2$  y  $32\text{ gr}/\text{m}^2$  para el fondo.

**Figura 19.** Ensayo de los datos tabulados para un grado de compactación del 95%.



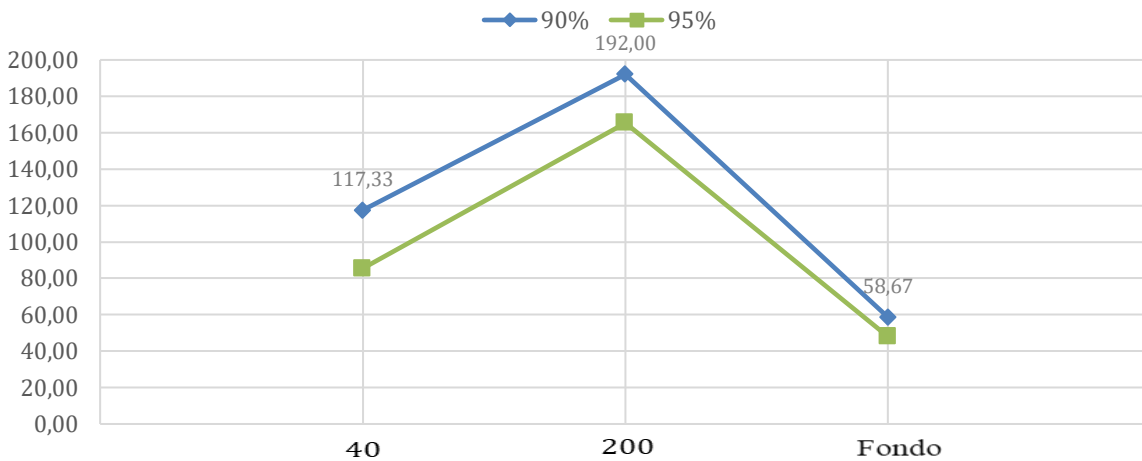
*Fuente. Autores del proyecto*

Se observa la misma tendencia en la figura 19 para un grado de compactación de 95%, es importante mencionar que a mayor pendiente y menor grado de compactación más material se desprendía al momento de ser impactado por la gota como se muestran en las figuras 18 y 19.

**Tabla 21.** Promedio del Proctor al 90% y 95%.

No. Tamices	Proctor 90%		Proctor 95%	
	g	m2	g	m2
<b>40</b>	7,33	117,33	5,33	85,33
<b>200</b>	12	192	10,33	165,33
<b>Fondo</b>	3,67	58,67	3	48

**Figura 20.** Promedio del Proctor al 90% y 95%



*Fuente. Autores del proyecto*

De acuerdo con la erosión superficial hídrica se produce la dispersión de agregados, que para este análisis se vio la influencia del grado de compactación en la capa de revestimiento de una vía terciaria, para la cual el grado de compactación del 90% obtuvo un mayor desprendimiento de material superando al grado de compactación del 95% con un aproximado del 20% de más material fino desprendido por metro cuadrado. Además, se establece que hay una pequeña diferencia marcante entre el porcentaje de lo que se erosiona de acuerdo con el grado de compactación del 90% y 95%. Analizándose de forma general o individual, se obtiene que para el tamiz #40 hay una pérdida entre el (28% y 32%), para el tamiz 200 entre el (52% y 56%) y para el fondo entre el (15% y 17%) de material erosionado.

Conforme a las simulaciones y a los resultados obtenidos se puede establecer que el material más erosionable fue el presentado en el agregado fino especialmente el del tamiz #40, #200 y Fondo, superando el material del tamiz #200 el cual presenta una tendencia de mayor

perdida en todas las simulaciones continuando con el del tamiz #40 y por último el del fondo el cual se consideraría que debía ser el de mayor erosionabilidad puesto que es el material más fino, el cual puede deberse a un factor error debido a la recolección de material o más específicamente al impacto de la gota con el material se pudo perder el agregado fino.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

- Se realizó la caracterización geotécnica de material usado en el proyecto como revestimiento de vías terciarias de acuerdo con las especificaciones de la norma determinando que en su mayoría las condiciones que establece la norma se cumplieron de acuerdo con la Tabla 22. Control de cumplimiento de los ensayos establecidos en la norma.
- Se diseñó y construyó un micro simulador de lluvia simulando las condiciones encontradas en Piedecuesta Santander con una precipitación promedio de 19,254 mm para una duración de lluvia de 30 minutos.
- El factor pendiente presento evidencias claras, puesto que se obtuvo un efecto importante en los niveles de pérdida del suelo para estas mediciones, debido a que se obtuvo mayor material recolectado de la capa de revestimiento con pendiente del 14% continuando con la del 10% y 7%.
- Se percibió que entre menos grado de compactación tenga el suelo mayor es el grado de desprendimiento de material, se obtiene mayor grado de erosión hídrica superficial por metro cuadrado.
- En nuestro estudio previo pretendíamos utilizar un aditivo llamado comercialmente Landlock para mejorar la cohesión de las partículas en las vías, con base a esto recomendamos que para próximos estudios similares a este, sea utilizado este polímero con el fin de conocer la influencia que este tiene en la erosión.



## 6. Bibliografía

- Aoki, A., & Sereno, R. (2006). Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvia. *AGRISCIENTIA*.
- Benito, E., Santiago, J., & Varela, M. (2001). Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvias de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo. (X. d. Lave, Ed.) *Cadernos Lab. Xéoloxico de Laxe*.
- Booth, E.L.J., Byrne, J.M. (2011). *Climatic Changes in western north america*. Canada.
- Braja, M. D. (2001). *Principios de ingeniería de cimentaciones*. Sacramento- California: Thompson Learning.
- C, P., & J, G. (2001). *Diagnóstico sobre el estado de degradación del recurso del suelo en el país* (15 ed.). Santiago de Chile : Boletín INIA .
- DNP. (25 de Mayo de 2019). *Departamento Nacional de Planeación*. Obtenido de <https://www.dnp.gov.co/DNPN/Paginas/default.aspx>
- Escobar, C. E. (SEPTIEMBRE de 2016). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA*. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co>
- Fuentes, A. Y. (2009). *Determinación de tormentas de diseño a partir de datos pluviográficos en zona media en la cuenca de río frío*. Bucaramanga : UIS .
- HINCAPIE G.E. . (2002). *Uso de simuladores de lluvias en estudios de la erosión del suelo* . Chinchina: Ceniface.
- INTA, C. N. (2017). *Estimación de la Pérdida del Suelo por Erosión Hídrica En La República de Argentina*. Buenos Aires: INTA.

- INVIAS, I. N. (2012). *Especificaciones generales de construcción de carreteras cap 3*. bogota.
- INVIAS, Instituto Nacional de Vias. (2013). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Colombia.
- Linhua Wang, N. D. (2017). Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil the loess plateau, China, subject to simulated rainfall. *ELSEVIER*.
- M. Martínez-Mena, R. A. (2011). Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. *C & G*.
- M.J.M. Romkens, K. H. (2001). Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *CATENA*.
- Monje Jeremías, R., & Aguilar Pereira, J. F. (2008). *Manual de operación del simulador de lluvia para la cuantificación de la infiltración, escorrentia y erosión de suelos*. San José- Costa Rica: INTA.
- MURTHY, V. (s.f.). *Principles and practices of soli Mechanics and Foundation Engineering*.
- R. Lal, E. (1994). *Soil erosion research methods*. R. Lal.
- SIAC. (15 de Mayo de 2019). *Degradación de suelos*. (SIAC, Ed.) Obtenido de Sistema de información Ambiental: <http://www.siac.gov.co/>
- Suarez Diaz, J. (2001). *Control de Erosion en Zonas Tropicales*. Bucaramnaga: Division editorial y de publicaciones universidad industrial de santander.
- Wang, L. D. (2017). Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall. *Soil & Tillage Research*.