

**UNIVERSIDAD DEL BÍO- BÍO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**PROFESOR PATROCINANTE:**

**SERGIO VARGAS TEJEDA**

**EVALUACIÓN DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA  
MODIFICADA PARA SU UTILIZACIÓN EN  
CAMINOS NO PAVIMENTADOS COMO MÉTODO  
SUPRESOR DE POLVO.**

**PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**RODOLFO ALEJANDRO PÉREZ TORRES**

**Concepción, Marzo de 2018**

## **DEDICATORIA**

*A mi madre, hermano y a mi padre, que desde el cielo guía cada uno de mis pasos...*

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar agradeciendo a mi familia, que en todo este arduo camino, han sido un pilar fundamental. A mi madre por alentarme y apoyarme en cada decisión tomada. A mi padre, que si bien no está presente para esta etapa de mi vida, sé que desde el cielo me acompaña como una de mis estrellas protectoras. Y finalmente a mi hermano, por el apoyo técnico en esta investigación.

Me gustaría también agradecer a Maryorie Jara. Mi amiga, compañera de aventuras y por sobre todo amor incondicional, quien me acompañó en los altos y bajos de esta investigación, convirtiéndose en un apoyo incondicional para cerrar este ciclo.

Además, agradecer a Asfaltos Clasa S.A. por darme la posibilidad de trabajar en su laboratorio brindándome los recursos técnicos para generar este trabajo. Al señor Marco Aránguiz, subgerente de Operaciones, quien siempre estuvo dispuesto a resolver mis dudas, al igual que Javier Vargas, jefe de laboratorio.

Junto con lo anterior, agradecer al Ministerio de Obras Públicas a través de la Dirección de Vialidad de la Región del Biobío mediante el Departamento de Conservación Vial, por confiar en la investigación y apoyarme con los recursos técnicos necesarios. Al Señor Carlos Rivas Labrín, en ese entonces Jefe de Conservación Vial, por ser el nexo con las distintas empresas del rubro.

Finalmente al Profesor Sergio Vargas, por ayudarme a cerrar este tortuoso ciclo y al profesor Miguel Orellana, por aconsejarme y apoyarme en el proceso de laboratorio.

# EVALUACIÓN DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA PARA SU UTILIZACIÓN EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS COMO MÉTODO SUPRESOR DE POLVO.

Rodolfo Pérez Torres

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío  
[rodperez@alumnos.ubiobio.cl](mailto:rodperez@alumnos.ubiobio.cl)

Sergio Vargas Tejeda

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío  
[svargas@ubiobio.cl](mailto:svargas@ubiobio.cl)

## RESUMEN

En la actualidad, el problema de la emisión de material particulado, producto del tránsito de vehículos en caminos secundarios de carpeta granular, es enfrentado por medio de la aplicación de “supresores de polvo”, en su mayoría a base de soluciones salinas, con el objetivo de controlar los niveles de polución emitidos a la atmósfera y de esta forma brindar una mejor calidad de vida a los habitantes. Sin embargo, este tipo de tratamiento implementado en zonas lluviosas disminuye notablemente su durabilidad y a su vez genera un aumento en los costos de mantenimiento, dado el comportamiento higroscópico de las sales al contacto con las lluvias, y a su vez presentan diferentes riesgos para la población aledaña, el medio ambiente y la seguridad vial. Siendo estos factores a considerar a la hora de analizar la viabilidad de la utilización de este tipo de tratamiento supresor de polvo. En relación a este contexto, se plantea la idea de llevar a cabo la siguiente investigación, cuyo principal objetivo es evaluar física y químicamente una emulsión asfáltica modificada que pueda ser utilizada sobre caminos no pavimentados con el fin de mitigar las emisiones de partículas generadas por el tránsito de vehículos. Para lograr esto, se trabajó sobre una emulsión asfáltica (CSS-1H), modificando su dosificación y pH con el propósito de otorgarle características que se adapten al objetivo de estudio. Para generar dichos cambios se adoptó una metodología de ensayos de dos etapas. La primera centró sus estudios en determinar la disolución óptima de la emulsión asfáltica con objetivo de aumentar el rendimiento y disminuir los costos de producción, y la segunda etapa se llevó a cabo con el objetivo de analizar cómo la variación de pH del agente emulsificante influye en el comportamiento final de la emulsión. Obteniendo como resultado de dichas pruebas, un producto adecuado para su implementación en terreno, gracias a sus propiedades tanto de rendimiento como de adhesión con el árido intervenido.

**Palabras claves:** Supresor de polvo; Emulsión asfáltica; Camino no pavimentado; daño medioambiental; conservación vial.

6832 + 20 Figuras/Tablas\*250 = 11.832 Palabras Totales

## EVALUATION OF A MODIFIED ASPHALT EMULSION FOR ITS USE ON UNPAVED ROADS AS A DUST SUPPRESSANT METHOD.

Rodolfo Pérez Torres

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío  
[rodperez@alumnos.ubiobio.cl](mailto:rodperez@alumnos.ubiobio.cl)

Sergio Vargas Tejeda

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío  
[svargas@ubiobio.cl](mailto:svargas@ubiobio.cl)

### ABSTRACT

At present, the problem of particulate material emissions, produced by vehicular traffic on secondary roads of granular pavement, is confronted by the application of "dust suppressants", mostly based on salt solutions, in order to control pollution levels emitted into the atmosphere and thus provide better living standards for inhabitants. However, this type of treatment is implemented in rainy areas, greatly decreasing its durability and at the same time, generates an increase in maintenance costs, given the hygroscopic behaviour of the salts in contact with the rains and consequently, presents different risks to the surrounding population, the environment and road safety. Being these factors relevant at the moment of analyse the feasibility of using this type of dust suppressant treatment. According to this context, arises the idea of carrying out the following investigation, whose main objective is to evaluate a modified asphalt emulsion physically and chemically. With the purpose of using it on unpaved roads in order to mitigate particulate emissions generated by the vehicle traffic. To achieve this, was necessary to work on an asphalt emulsion (CSS-1H), modifying its dosage and pH with the intention that give characteristics to suit the aim of the study. To generate such changes a testing methodology was adopted and it was divided into two stages. The first focused its studies on determine the optimal dissolution of the asphalt emulsion with the aim to increase performance and reduce production costs, and the second stage was carried out to analyse how pH variation of the emulsifying agent had influenced in the last behaviour of the emulsion, obtaining as a result, a suitable product for its implementation in the ground, thanks to its properties as in performance as in adhesion with the treated sand and gravel.

**Keywords:** Dust suppressant; asphalt emulsion; unpaved road; environmental damage; road maintenance.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1	ANTECEDENTES .....	1
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.3.1	<i>Objetivo general.</i> .....	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	3
<b>2</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>4</b>
2.1	MATERIALES.....	4
2.2	ETAPAS DE DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
2.3	ETAPA UNO: IDENTIFICACIÓN DE LA DISOLUCIÓN APROPIADA Y APLICACIÓN EN TERRENO.....	9
2.3.1	<i>Preparación de disoluciones con variación en el porcentaje de concentración.</i> .....	9
2.3.2	<i>Aplicación de las disoluciones obtenidas en terreno.</i> .....	9
2.3.3	<i>Procesamiento digital de imágenes para la obtención del porcentaje de quiebre del residuo asfáltico.</i> .....	10
2.4	ETAPA DOS: CONFECCIÓN DE ENSAYOS PROCTOR E INCIDENCIA DE LA VARIACIÓN DE PH SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA.....	13
2.4.1	<i>Ensayo proctor modificado para la obtención de densidad máxima.</i> .....	14
2.4.2	<i>Periodo de secado de las muestras previa imprimación.</i> .....	15
2.4.3	<i>Imprimación de las muestras y medición del tiempo de quiebre del residuo.</i> .....	16
2.4.4	<i>Análisis del comportamiento de la emulsión asfáltica.</i> .....	17
2.4.5	<i>Cálculo de la capacidad de infiltración de la superficie imprimada</i> .....	18
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>26</b>

<b>5</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>29</b>

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de la emulsión CSS-1H (fuente: ASFALTOS CLASA S.A). .....	4
Tabla 2. Granulometría base estabilizada utilizada para la elaboración de ensayos en laboratorio, según banda granulométrica TM-50b. ....	7
Tabla 3. Etapas de desarrollo de la investigación. ....	8
Tabla 4. Disolución de muestras para ensayo en terreno. ....	9
Tabla 5. Tabla resumen del cálculo del quiebre promedio del residuo asfáltico para cada disolución ensayada. ....	19

## **INDICE DE FIGURAS**

Fig. 1. Mecanismo de estabilización de una emulsión asfáltica .....	6
Fig. 2 Mecanismo de coalescencia de una emulsión asfáltica al contacto con un agregado granular. ....	6
Fig. 3. Ensayo en terreno fiscal MOP, sector enlace Penco-Autopista del Itata: (a) Dimensiones de la plataforma de ensayo, y (b) muestras con variación de disolución aplicadas en terreno. ....	10
Fig. 4. Imagen Procesada en Adobe Photoshop CC2015® con el objetivo de mejorar su calidad. (a) Imagen original, y (b) imagen procesada. ....	11
Fig. 5. Algoritmo para transformación de imagen.....	11
Fig. 6. Ejemplo de imagen original e imagen binarizada en MatLab® para el cálculo del porcentaje de quiebre con umbral de color quince. ....	12
Fig. 7. Ejemplo de histograma de color tras procesamiento con Adobe Photoshop CC2015® para la muestra correspondiente a la emulsión original diluida con el 75% de agua de proceso y con umbral quince. ....	13
Fig. 8. Proceso de secado de las muestras post-compactación. ....	16

Fig. 9. Procedimiento de imprimación. (a) Delimitación del Área de Imprimación, (b) Probetas Imprimadas. ....	17
Fig. 10. Resultado del ensayo de disolución, por el método del valor umbral para el cálculo de quiebre del residuo asfáltico .....	20
Fig. 11. Gráfico densidad compactada seca en función del porcentaje de humedad. ....	21
Fig. 12. Gráfico pérdida de humedad para los moldes Proctor. ....	22
Fig. 13. Gráfico tiempo de quiebre del residuo asfáltico para cada pH estudiado .....	23
Fig. 14. Gráfico estabilización de la emulsión en el tiempo según pH. ....	24
Fig. 15. Grafico tiempo de infiltración de agua sobre la superficie según pH. ....	25



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

Según la Dirección de Vialidad, del Ministerio de Obras Públicas, la red vial nacional está compuesta por 80.584 Km, de los cuales aproximadamente el 24,6% se encuentran pavimentados, con este antecedente nos damos cuenta que un gran porcentaje de la red vial nacional está construida por carpetas de rodado granulares, ya sea ripio o tierra. Es así como solo unos 400 a 500 km al año van siendo mejorados en cuanto a trazado, ancho, estructura, drenaje, etc. lo que a su vez acarrea grandes inversiones que van desde los 300 a 500 millones de pesos por Km. (Vialidad, 2016). Los caminos no pavimentados son, en la mayoría de los casos, caminos de bajo volumen de tránsito, pues un camino será económica y socialmente conveniente de ser pavimentado, toda vez que exceda cierto volumen diario de tránsito. A nivel nacional, el criterio para pavimentar un camino consiste en la superación de un umbral de TMDA de 300 vehículos diarios. Ante este panorama, los denominados caminos básicos (caminos rurales o no pavimentados) deben ser tratados por medio de obras de ripiadura, reperfilados, recibos de material granular, etc. No obstante, para una óptima implementación, éste tipo de tratamiento requiere “mejorar las propiedades físicas y/o mecánicas del suelo que conforma la carpeta de rodado, mediante la utilización de la técnica de estabilización química del suelo y/o la aplicación de Supresores de Polvo” (Bellolio, 2005) para eliminar las variables que puedan causar impacto en la población aledaña y usuarios. Dentro de los impactos más significativos, está la generación de polvo producto del tránsito de vehículos, problema que será analizado en la presente investigación.

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversas investigaciones, con el propósito de buscar alternativas viables y de bajo costo que contribuyan a prolongar la vida útil de este tipo de carpetas de rodadura. Según estadísticas, "por cada vehículo que viaja una milla de la carretera sin pavimentar una vez al día, todos los días durante un año, una tonelada de polvo se deposita a lo largo de un corredor de 1,000 pies centrados en el camino" (USDA Forest Service, 1983). En Europa, “estudios han demostrado que el polvo provoca la misma cantidad de muertes que los accidentes carreteros, esto es igual a una reducción de 2 años en la esperanza de vida” (AFP, 2004). El polvo afecta la salud de las personas, provocando enfermedades respiratorias, alergias y la fiebre del heno, siendo también un transportador de otras enfermedades, según el estudio realizado por la Naciones Unidas, por otro lado, se establece que el material particulado

respirable o PM-10 en el caso del polvo en suspensión en los caminos rurales, es acumulado en el sistema respiratorio alojándose en la parte más interna de los pulmones y a su vez causando una serie de enfermedades asociadas (OMS, 2005). Es por ello que, “El control de polvo del camino es un reto importante en las zonas urbanas, y también en otros ámbitos con altos niveles de tráfico de vehículos en caminos no sellados, tales como minas y vertederos de basura” (Malkoç et al., 2010). De los resultados de las investigaciones previas se han establecido como método de tratamiento las capas asfálticas de baja densidad (tratamiento superficial simple TSS) o estabilizadores y/o supresores de polvo. Los Supresores de Polvo utilizados son derivados de la lignina, cloruro de calcio, cloruro de magnesio, cloruro de sodio, el tejido de carreteras, adhesivos resinosos, agua, etc. La selección de un determinado inhibidor depende no sólo de sus características actuales, sino también del tipo y volumen del tráfico, la condición de la carretera y el costo del producto para lograr el nivel deseado de control de polvo. Estos tratamientos, si bien no mejoran la geometría de las rutas, si logran un mayor confort sobre la superficie de suelo y a su vez, disminuyen ostensiblemente los daños colaterales de las ripiaduras tradicionales (Colorado Centro de Información de Transporte, 1989; Fuenzalida et al., 2009).

En Chile, el tratamiento supresor de polvo mayormente utilizado es el Cloruro de Magnesio (MgCl), también llamado “Bischofita”. La bischofita es un compuesto químico natural (sales de magnesio) que facilita la captación y retención de agua en zonas semi-desérticas (propiedades higroscópicas), logrando un mejoramiento sustantivo de las capas de rodadura, eliminando las calaminas, el polvo y las deformaciones, reduciendo la conservación rutinaria a un mínimo (Hinrichsen, 2005). Si bien éste tratamiento ha dado resultados positivos, esto no quiere decir que sean 100% confiables y/o rentable en zonas donde la humedad ambiente sobrepasa el umbral aceptable para su correcta implementación.

Es por esto que la presente investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento de una emulsión asfáltica modificada para la supresión de polvo en caminos no pavimentados, a modo de establecer su efectividad para la conservación de caminos básicos en la región y a lo largo del país.

## 1.2 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general.

- Evaluar física y químicamente una emulsión asfáltica modificada que pueda ser utilizada sobre caminos no pavimentados con el fin de mitigar las emisiones de partículas generadas por el tránsito de vehículos.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Revisar la literatura existente relacionadas al estudio de emulsiones asfálticas y supresores de polvo a modo de definir el marco teórico de la investigación.
- Determinar la proporción óptima de agua emulsionante frente a una emulsión asfáltica para conseguir un rendimiento y comportamiento apropiado para su utilización como método supresor de polvo.
- Determinar el porcentaje de quiebre del residuo asfáltico mediante el procesamiento digital de imágenes por medio de la binarización de las mismas.
- Establecer un pH apropiado para la generación de un mayor tiempo de quiebre del residuo asfáltico que aumente a su vez el tiempo de interacción y por consiguiente la penetración en la carpeta granular.
- Medir el tiempo de absorción de una determinada cantidad de agua potable sobre la superficie imprimada a modo de evaluar la capacidad de infiltración de ésta.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Materiales

En esta investigación se utilizó una emulsión asfáltica de rotura lenta. Las emulsiones de Rotura Lenta (SS) son diseñadas para un tiempo máximo de mezcla con los agregados. Su largo tiempo para la manipulación asegura buen cubrimiento con grados densos, de agregados con un alto contenido de finos. Su aplicación se extiende, además de la pavimentación, a otros usos industriales. Para tales propósitos, la viscosidad de las emulsiones es baja y puede ser reducida aún más con la adición de agua (Mercado et al., 2008). Por estos motivos se ha trabajado con una mezcla asfáltica del tipo catiónica de rotura lenta y residuo duro, denominada CSS-1H, la que se describe como una emulsión de color café, compuesta en base a 64% de asfalto y 36% de agua más agentes emulsificantes y aditivos, la cual posee una densidad promedio de 1012g/L según la composición estudiada en laboratorio. Además presenta una excelente durabilidad, adherencia a áridos y no contamina (ver Tabla 1). En su estado original esta emulsión se utiliza como riego de ligas, lechada asfáltica y mezcla en función de la concentración y los agregados con los cuales se combine. (Boletín CSS-1H, ASFALTOS CLASA S.A). En esta investigación se trabajó sobre la emulsión mencionada, modificando la dosificación y el pH con el objetivo de otorgarle características especiales, que se adapten al propósito de estudio. Dentro de las características intervenidas están: trabajabilidad, tiempo de quiebre del residuo, penetración en superficie y capacidad de infiltración de la superficie tratada. Para lograr dichos cambios se adoptó una metodología de ensayos a fin de testear empíricamente su comportamiento y así determinar cómo las variaciones de sus cualidades físico-químicas afectan el comportamiento final de la emulsión.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de la emulsión CSS-1H (fuente: ASFALTOS CLASA S.A)

PROPIEDADES	VALORES		
	MIN	MAX	VALOR MEDIDO
Viscosidad a 25°C	20	100	29
Estabilidad Almacenamiento, 1 día, (%)	—	1	No medido
Carga de Partículas			Positiva
Mezcla con Cemento, (%)	—	2	No medido
Ensayo de Tamizado, (%)	—	0.1	No medido
Residuo	57		64
Penetración a 25°C, 100gr., 5s., 0,1mm	40	90	66
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	40	—	150
Solubilidad en tricloroetileno (%)	97.5	—	99.5
Ensayo de Mancha Hep./Xilol, (%)	—	25	20

Por otro lado se puede mencionar también la importancia del agua emulsificante en esta investigación, la que intervino como agente diluyente para los ensayos posteriores. Esta importancia radica en la posibilidad de lograr una dilución estable, y a su vez, mantener la interacción agua-asfalto uniforme. El emulsificante está conformado una parte por cadenas de hidrocarburos que son solubles en medios orgánicos como el asfalto y otra parte con carga eléctrica que es soluble en medios acuosos. Es por esta razón que a pesar de que el emulsificante es el componente en menor cantidad dentro de una emulsión, es quien provee las propiedades principales a la emulsión, le brinda estabilidad y determina finalmente qué tipo de emulsión asfáltica se obtendrá (Ulloa, 2008).

Asimismo, el proceso de rompimiento de una emulsión asfáltica se puede explicar por medio del mecanismo de acción del surfactante (componente emulsificante) el cual se torna complejo. Esto se puede explicar mediante la repulsión que se produce entre los glóbulos de asfalto dispersados, la cual permite el control de los fenómenos de ruptura de la emulsión.

El surfactante se absorbe en la superficie de las gotas, con la parte lipofílica en el asfalto y el grupo polar en la fase acuosa; los iones disociados permanecen en la fase acuosa en la proximidad de la gota, dando como resultado que, las gotas posean una carga superficial y al acercarse dos gotas se produzca una fuerza de repulsión electrostática que las mantiene a cierta distancia (fig 1-1)

Por otro lado, al acercarse dos gotas, se drena la película de la fase intergota, el fluido arrastra los iones y por lo tanto se produce un desbalance en la electroneutralidad del sistema. De esta manera se crea un campo eléctrico intenso que retarda la coalescencia de las gotas y contribuye a la estabilidad de la emulsión ya que tiende a oponerse al drenaje de la partícula. Tal proceso se llama electroviscoso (fig.1-2)

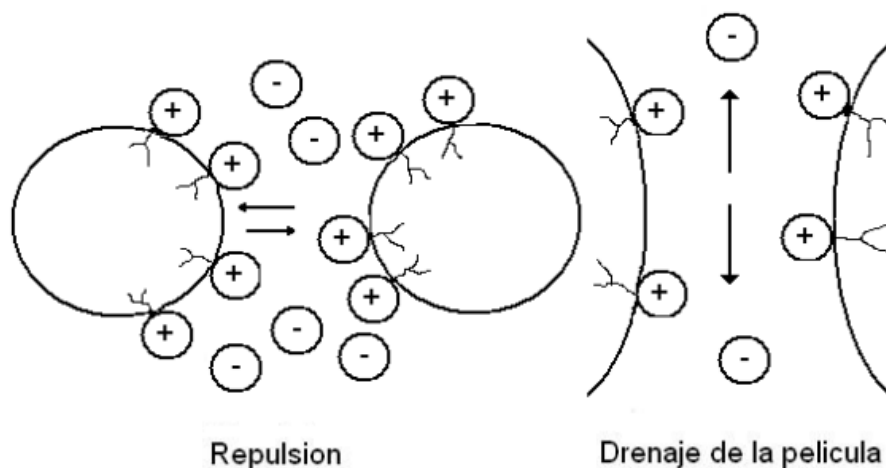


Fig. 1. Mecanismo de estabilización de una emulsión asfáltica

Cuando se pone en contacto una mezcla asfáltica con un material agregado que tiene afinidad con el tipo de emulsión, esta se rompe. El mecanismo de ruptura de la emulsión asfáltica por este proceso se indica en la figura 2. En presencia del material granular, el emulsificante migra desde la interfase agua/asfalto hacia la interfase agua/sólido, absorbiéndose sobre el sólido (etapa 1 y 2)

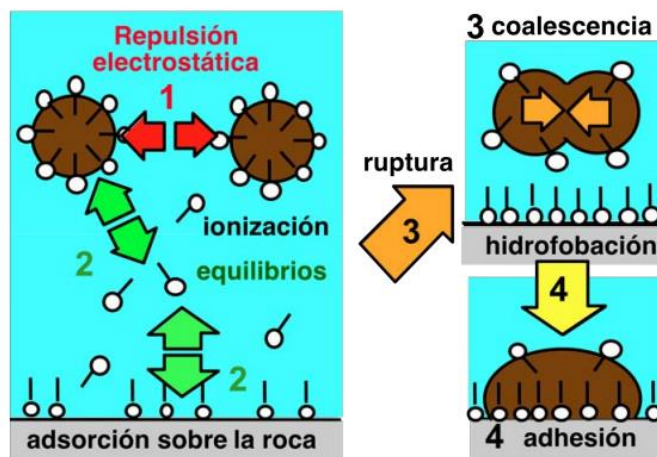


Fig. 2 Mecanismo de coalescencia de una emulsión asfáltica al contacto con un agregado granular.

La disminución de la cantidad de agente emulsificante en la interfase agua/asfalto, produce una disminución de la repulsión electrostática entre las gotas dispersadas, comenzando entonces la coalescencia de las gotas (etapa 3) y la ruptura de la emulsión.

Las moléculas de emulsificante cubren el sólido con su parte polar, permaneciendo la parte alquil libre (etapa 4), con lo cual se obtiene una superficie hidrófoba. La hidrofobación del sólido mejora la adherencia del asfalto sobre la carpeta granular (etapa 4). Así, de esta forma, se da pie al rompimiento de la emulsión asfáltica sobre la carpeta granular intervenida.

Ahora bien, como árido, en su fase de laboratorio se ha usado además base granular, cuya composición emula al material presente en los caminos básicos de nuestro país. Su componente principal son agregados pétreos y finos naturales, los cuales en su conjunto brindan una gran resistencia a la deformación gracias a la interacción de la fracción gruesa con la fina. La base estabilizada fue sometida a ensayos, para verificar sobre qué tipo de banda granulométrica se regirán los próximos ensayos a realizar, corroborando de esta forma que los áridos analizados se encasillan en la especificación impuesta para las bases estabilizadas normadas por el Manual de Carreteras Volumen 8 sección 8.101.1, en este caso en particular la banda granulométrica que se ajusta al estudio es la TM-50b (ver Tabla 2).

Tabla 2. Granulometría base estabilizada utilizada para la elaboración de ensayos en laboratorio, según banda granulométrica TM-50b.

<b>Fracción sobre 5 mm</b>					
Peso muestra total seca a tamizar		16935 gr			
Peso seco inicial retenido 5mm		9832 gr			
Peso seco lavado retenido 5mm		9817 gr			
Tamaño del tamiz (mm)	Tamaño del tamiz U.S.	Peso retenido (gr)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)	Especificación TM-50b %
150	(6")				
100	(4")				
80	(3")				
63	(2 1/2")				
50	(2")				100
40	(1 1/2")	—	—	100	70-100
25	(1")	2618	15.5	84.5	55-85
20	(3/4")	2583	15.3	69.3	45-75
10	(3/8")	3040	18.0	51.3	35-65
5	(Nº4)	1480	8.7	42.6	25-55
<b>Fracción bajo 5 mm</b>					
Peso seco inicial pasa 5mm		710.3 gr.			
Peso seco cuarteo pasa 5mm		699 gr.			
Peso seco cuarteo lavado 5mm		577.4 gr.			
Tamaño del tamiz (mm)	Tamaño del tamiz U.S.	Peso retenido (gr)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)	Especificación TM-50b %
2	Nº10	109.7	7.1	35.5	15-45
0.5	Nº40	285	18.6	17	5-25
0.08	Nº200	178.2	11.6	5.3	0-10

## 2.2 Etapas de desarrollo de la investigación.

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo en dos etapas (ver Tabla 3) las que serán analizadas a continuación.

Tabla 3. Etapas de desarrollo de la investigación.

Etapa	Tipo de Ensayo	Lugar de Ensayo	Objetivo de Ensayo
1°	cualitativo	Base estabilizada previamente compactada, Terreno Fiscal MOP	Determinar la disolución óptima de la emulsión asfáltica con objetivo de aumentar el rendimiento y disminuir los costos de producción.
2°	cualitativo/cuatitativo	Laboratorio de Mecánica de Suelos, Universidad del Bío-Bío	Determinar cómo la variación de pH influye en el comportamiento final de la emulsión, y analizar si dicha variación contribuye para su utilización como supresor de polvo.

La primera etapa de este proceso tuvo como objetivo identificar la dosificación apropiada que se obtendrá entre la mezcla de una emulsión asfáltica, en este caso CSS-1H, y el agente emulsificante, el que actuará como solución diluyente, con el fin de generar un rendimiento óptimo a modo de implementarse como supresor de polvo. Todo esto con motivo de reducir costos de fabricación, y a su vez, volver el producto más competitivo dentro del mercado de los supresores de polvo que se comercializan actualmente por las distintas empresas del rubro de la conservación vial.

La segunda etapa de la investigación se llevó a cabo ya teniendo definida la disolución óptima resultante de la primera. Ésta centró sus estudios en determinar como la variación de ciertas propiedades físico-químicas, influyeron en la relación de la emulsión modificada con los agregados pétreos. El parámetro analizado y modificado dentro de esta etapa fue el grado de acidez presente en el agua emulsificante, utilizada para diluir la emulsión. Teniendo como hipótesis de este proceso que al disminuir el pH global de la emulsión resultante, el tiempo de quiebre del residuo asfáltico presente aumentaría, mejorando así el tiempo de interacción emulsión-árido. Por otro lado, con esta alteración se buscó optimizar la penetración de la emulsión asfáltica y además mantener una permeabilidad adecuada que no afectara las características de drenaje de la plataforma tratada.

A continuación se describe la metodología utilizada en cada una de las etapas descrita anteriormente.



## 2.3 Etapa uno: Identificación de la disolución apropiada y aplicación en terreno.

### 2.3.1 Preparación de disoluciones con variación en el porcentaje de concentración.

Como primer paso a la identificación, fue necesario extraer desde la línea principal de producción cinco litros de CSS-1H, de ahora en adelante llamada emulsión original, y cinco litro de agua emulsificante, las que fueron utilizadas para fabricar las distintas disoluciones con diferentes porcentajes de concentración. Con la ayuda de una probeta graduada, se calcularon los volúmenes de cada componente de la emulsión modificada. Se prepararon tres muestras con distintas concentraciones de CSS-1H, (ver tabla 4). Además, se añadió una cuarta muestra compuesta de emulsión asfáltica original, del tipo CSS-1H y agua potable. Esta última, correspondiente a la solución utilizada por diversas empresas como riego supresor de polvo para caminos de bajo volumen de tránsito, la que finalmente debería actuar como agente comparativo. Cabe señalar que se consideró una quinta muestra compuesta por la emulsión asfáltica en estado puro, sin ningún solvente, participando solo como referencia al estudio.

Tabla 4. Disolución de muestras para ensayo en terreno.

	Disolución				
	opción 1	opción 2	opción 3	opción 4	opción 5
Agente Disolvente	Agua Emulsificante	Agua Emulsificante	Agua Emulsificante	Agua Potable	—
CSS-1H ml (%)	750 (75%)	500 (50%)	250 (25%)	250 (25%)	1000 (100%)
Agente disolvente ml (%)	250 (25%)	500 (50%)	750 (75%)	750 (75%)	0

### 2.3.2 Aplicación de las disoluciones obtenidas en terreno.

Teniendo los volúmenes de solución para cada muestra definidos, estas fueron llevadas a terreno para comprobar in situ su comportamiento y cómo la disolución afecta la relación con el árido.

Una vez en terreno y sobre una cancha preparada en el recinto fiscal del Ministerio de Obras Públicas (MOP), ubicado en el enlace Penco – Autopista del Itata, se confeccionaron los cinco escenarios cada uno con un área delimitada de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  por cada muestra, sobre una carpeta granular previamente compactada la que contó con características similares a las que presentan los caminos rurales de nuestra región y sobre los cuales se enfocó este estudio. La dosificación utilizada para cada sección fue de  $1 \text{ l/m}^2$ , entre los que tenemos: Emulsión original diluida con 75% de agua de proceso (agua con emulsionante) (Fig. 1-b-1), emulsión original diluida con 50% de agua de proceso (Fig. 1-b-2), emulsión original diluida con 25% de agua de proceso (Fig. 1-b-3), emulsión original diluida con 75% de agua potable (Fig. 1-b-4) y emulsión CSS-1H en estado puro (Fig. 1-b-5).

Para precisar la simbología asociada durante el desarrollo de la investigación, se definieron las muestras modificadas con agua del proceso como AAM (agua acidificada modificada) y a su vez la muestra modificada con agua potable se definirá como ACM (agua común modificada)

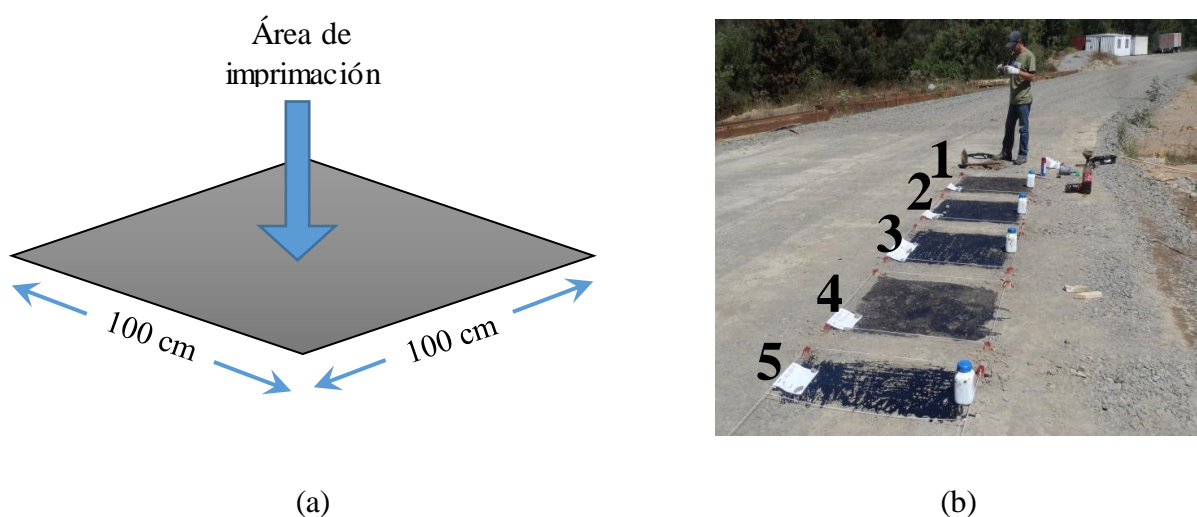


Fig. 3. Ensayo en terreno fiscal MOP, sector enlace Penco-Autopista del Itata: (a) Dimensiones de la plataforma de ensayo, y (b) muestras con variación de disolución aplicadas en terreno.

Esta prueba se desarrolló con el fin de determinar la relación óptima entre emulsión original y agua emulsificante, la cual debía generar un comportamiento homogéneo sobre la superficie estudiada y a su vez un menor quiebre del residuo asfáltico, que asegure una mayor penetración del producto sobre la carpeta de rodado, aumentando así la vida útil del tratamiento. Luego de la imprimación y extracción de conclusiones sobre el comportamiento de cada sección estudiada, se tomaron fotografías a cada una de ellas con el propósito de estudiarlas posteriormente, es así como estos resultados fueron analizados mediante el procesamiento digital de imágenes lo que permitió caracterizar y comparar con datos reales el comportamiento de cada disolución estudiada.

### 2.3.3 Procesamiento digital de imágenes para la obtención del porcentaje de quiebre del residuo asfáltico.

En terreno, tal como se expuso en la etapa anterior, se aplicó la emulsión asfáltica en cuatro áreas de prueba, cada una de éstas con distinto porcentaje de disolución. Luego de seis horas en las que se dejó actuar la solución sobre la base estabilizada, se fotografió cada una de las áreas

estudiadas. Las fotografías fueron procesadas en primera instancia a través del software Adobe Photoshop CC2015®, con el fin de modificar el contraste y la exposición de éstas, mejorando su nitidez y eliminando brillos que alterarían su posterior análisis (Fig. 2).

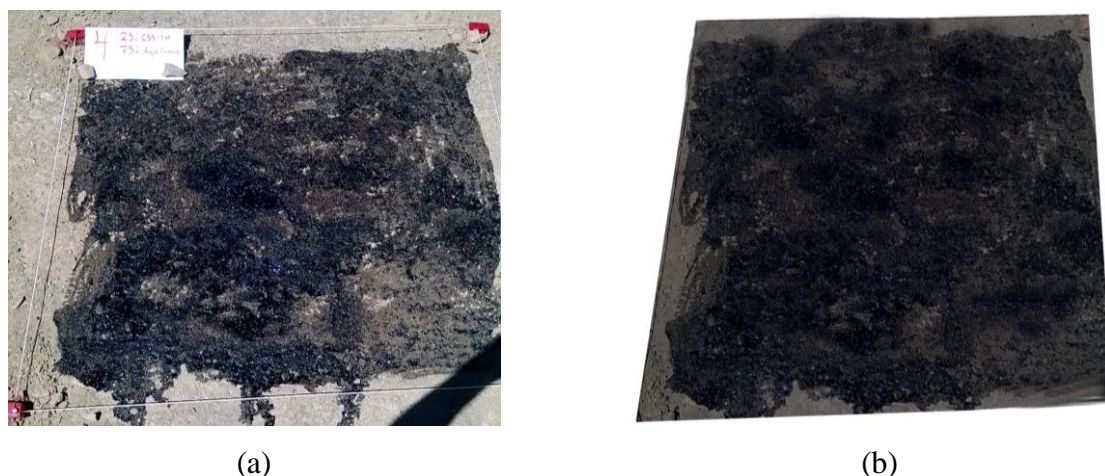


Fig. 4. Imagen Procesada en Adobe Photoshop CC2015® con el objetivo de mejorar su calidad. (a) Imagen original, y (b) imagen procesada.

Teniendo editadas ya las imágenes fue necesario diseñar en MatLab® (Matrix Laboratory) un algoritmo capaz de procesar las fotografías en formato de color RGB de 8 bits (Fig. 3).

```
i=imread('iamgen.jpg');
g=rgb2gray(i);
b=binarizar(g,30);
imshow(i)
imshow(b);
subplot(1,2,1), subimage(i), title('Imagen Original');
subplot(1,2,2), subimage(b), title('Imagen Binarizada');
imwrite(b,'imagen binarizada.jpg')
```

Fig. 5. Algoritmo para transformación de imagen.

Cabe mencionar que el espacio del color RGB es el modelo más conocido y utilizado. En modelo RGB cada color está representado por tres valores de rojo (R), verde (G) y azul (B), situados a lo largo de los ejes del sistema de coordenadas cartesianas sobre un cubo.

Los valores de RGB van en un rango de [0,1] o de [0, 255]. De esta manera el negro se representa como (0, 0, 0), el blanco como (1, 1, 1) o (255, 255, 255). El color negro y el blanco están representados por dos esquinas opuestas del cubo que se pueden definir por los ejes de R, G, B, del sistema de coordenadas cartesianas. Las otras puntas del cubo representan el rojo, el verde, el

azul, el cian, el magenta y el amarillo. Los colores en escala de grises se representan con componentes idénticas de R, G, B (Ardila et al., 2011).

Habiendo transformado la imagen a escala de grises mediante RGB se le asignó a ésta un “valor umbral” el que definió desde qué niveles de gris el píxel forma parte del color negro y desde cual otro se encuentra en los rangos de blanco, creando de esta forma una imagen binarizada, esto es, transformar la fotografía original, en este caso la procesada ya en RGB, en una imagen en blanco y negro que nos permita determinar las zonas donde el componente asfáltico de la emulsión quedó en la superficie del área imprimada (Fig. 4). Este proceso ayudó a discriminar qué sectores de las imágenes presentaron quiebres en superficie para así, de esta manera, decidir qué dosificación es la que fomentó mayormente la penetración de la emulsión asfáltica sobre la carpeta granular.

Cabe mencionar que, la imagen binarizada en escala de grises es un arreglo matricial en dos dimensiones que aporta información de la intensidad de luz para cada punto de la imagen.

Para este proceso se definieron seis umbrales diferentes, desde el cinco hasta el treinta en intervalos de cinco unidades, a modo de obtener un promedio representativo del quiebre de la emulsión asfáltica sobre la base estabilizada. Esta variación umbral se realizó para cada una de las cuatro dosificaciones estudiadas.

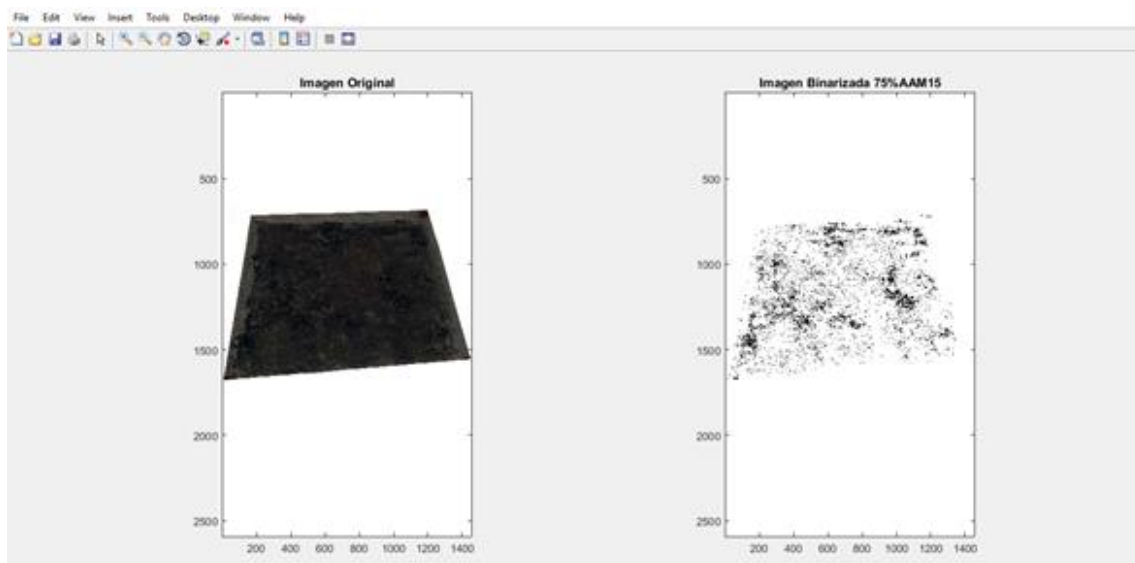


Fig. 6. Ejemplo de imagen original e imagen binarizada en MatLab® para el cálculo del porcentaje de quiebre con umbral de color quince.

Como siguiente paso, la imagen binarizada fue analizada nuevamente en Adobe Photoshop CC2015® con el objetivo de cuantificar la cantidad de píxeles tanto negros como blancos, a través del histograma de color (Fig. 5). Este cálculo se realizó en relación a la cantidad total de

pixeles contenidos en la imagen. Este porcentaje contribuyó a discriminar y cuantificar cuál de las disoluciones estudiadas presentó un menor quiebre del residuo asfáltico en la superficie de la base estabilizada. Este proceso fue necesario repetirlo en seis umbrales distintos para, de esta forma, obtener un rango de quiebre del residuo representativo y con menor margen de error.

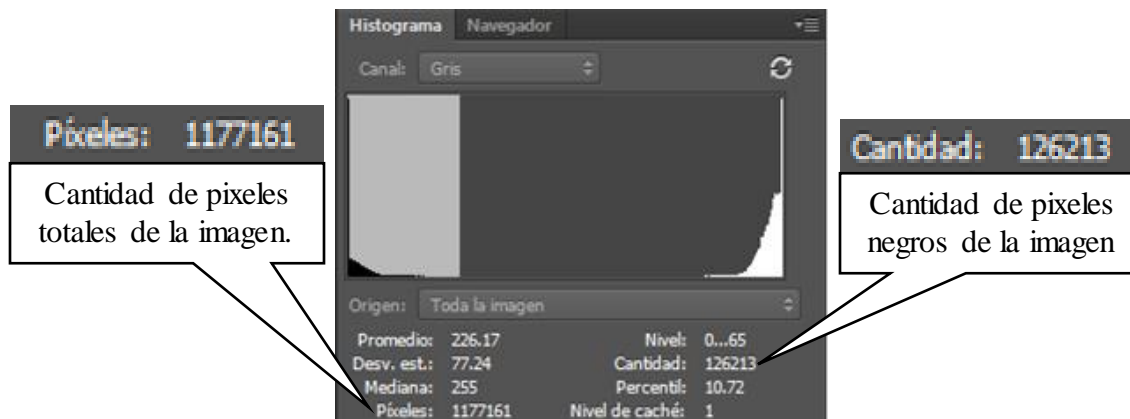


Fig. 7. Ejemplo de histograma de color tras procesamiento con Adobe Photoshop CC2015® para la muestra correspondiente a la emulsión original diluida con el 75% de agua de proceso y con umbral quince.

Por lo anteriormente expuesto, se consideró esta técnica como la más idónea para ser utilizada en este estudio, ya que actuó sobre las imágenes resaltando las zonas que presentaron un mayor contenido de asfalto sobre la superficie tratada. Esto permitió cuantificar de manera efectiva el nivel de absorción del mismo.

#### **2.4 Etapa dos: Confección de ensayos Proctor e incidencia de la variación de pH sobre el comportamiento de la emulsión asfáltica modificada.**

En esta segunda etapa se analizó la influencia del pH del agua emulsificante en el comportamiento general de la emulsión asfáltica modificada, y a su vez, el tiempo de quiebre del residuo asfáltico, la capacidad de infiltración de la superficie post tratamiento y tiempo de estabilización del producto tras su aplicación.

Una vez definido el porcentaje óptimo de dilución de la muestra de emulsión asfáltica, fue necesario preparar en laboratorio tres soluciones con diferentes niveles de potencial de hidrógeno (pH) de 0.8, 1 y 1.2 respectivamente, con las cuales se procedió a diluir la emulsión original según el resultado de dosificación obtenido en la primera etapa. El desarrollo de esta etapa se efectuó en primera instancia seleccionando el material apropiado. Para este caso se utilizó una base estabilizada proveniente del centro de acopio dispuesto por el Ministerio de Obras Públicas

(MOP) ubicado en enlace Penco – Autopista Del Itata, Octava región del Biobío. Materia prima que fue escogida por sus características similares a la de los caminos rurales presentes en la región. Consecutivo a la selección y ya en laboratorio, se realizó el cuarteo de la muestra, con el objetivo de reducirla a un tamaño apropiado para los ensayos posteriores, a modo que ésta no perdiera sus proporciones granulométricas de origen.

#### *2.4.1 Ensayo proctor modificado para la obtención de densidad máxima.*

Para realizar el estudio del muestreo, se empleó el método de compactación en laboratorio Proctor Modificado. Este método consistió en aplicar una cantidad de humedad en aumento y una determinada energía de compactación, cuyo objetivo fue reordenar las partículas del suelo para disminuir el volumen de poros y aumentar la densidad. Como consecuencia se consiguió mayor resistencia o capacidad de soporte y menor permeabilidad. Es un proceso fundamental en la ejecución de obras para terraplenes de caminos o carreteras, porque si los materiales no se compactan adecuadamente, la resistencia disminuye, por ende, existe mayor probabilidad que se produzcan fallas. En este método el agua actúa como lubricante entre las partículas de suelo, incrementando la densidad del mismo, hasta cierto punto en el cual al seguir añadiendo agua, la densidad empieza a disminuir, el agua deja de desplazar aire y comienza a movilizar las partículas de suelo, incrementado el volumen y disminuyendo la densidad. Para cada suelo existe una humedad que proporciona la densidad máxima compactada seca. Este contenido de humedad es conocido como el óptimo que se debe utilizar en obra, cuando se va a compactar un suelo. Esto es lo que se pretendió obtener con las muestras llevadas a laboratorio. Se buscó establecer la humedad óptima requerida y a su vez la densidad máxima para trabajar así con el resto de las muestras en las etapas posteriores.

Para poner en marcha el experimento, fue necesario retirar desde el terreno fiscal perteneciente al MOP, ubicado en el enlace Penco – Autopista Del Itata, una muestra de material granular representativa, la que fue llevada a laboratorio para proceder a realizar los ensayos granulométricos que aportarían información del tipo de base estabilizada presente y además sobre que banda granulométrica se trabajarían los ensayos. Posteriormente a ello se realizaron cinco ensayos de compactación, cada uno de los cuales con un contenido de humedad distinto, para determinar el comportamiento del material granular estudiado y su respuesta frente a dichas variaciones. Luego de ello se desarrolló en Microsoft Excel 2010® un gráfico que representaría los datos obtenidos en laboratorio, con el fin de determinar la humedad óptima con la cual se obtendría una mayor densidad del material. Esta humedad fue la utilizada en el resto de los

ensayos llevados a cabo en la fase de laboratorio, puesto que fue la condición más desfavorable de la base estabilizada estudiada.

Luego de tener definida la humedad óptima, se desarrollaron tres moldes Proctor con dicha humedad. Estos moldes fueron ensayados durante un periodo de dos semanas, en los que se incluyó siete días para el secado de los moldes. Una vez con los moldes secos, se procedió a imprimirlos con la dosificación propuesta en la etapa uno pero con tres niveles de pH diferentes y medir el tiempo de quiebre del residuo. En los siete días restantes se analizó el comportamiento de la emulsión, para finalizar midiendo el tiempo de infiltración de 5 ml. de agua sobre la superficie tratada. Este proceso se replicó tres veces más, con el objetivo de obtener un tamaño muestral más representativo y de esta manera tener un análisis estadístico fidedigno de los ensayos realizados.

#### *2.4.2 Periodo de secado de las muestras previa imprimación.*

El proceso de secado de los moldes compactados mediante el protocolo proctor se realizó por medio de la utilización de luz infrarroja irradiada de forma directa sobre las muestras, a modo de poder acelerar la pérdida de humedad, con el objetivo de prepararlas para el posterior estudio de la emulsión asfáltica con sus distintas variaciones de pH (Fig. 6). El tiempo definido para el secado de los moldes proctor fue determinado mediante la metodología de medición diaria de los pesos de cada una de las muestras. Con este registro fue posible generar un historial de pesos, el que se utilizó como herramienta para determinar el día específico en que se estabilizó, dando como resultado una muestra seca. Una vez que las muestras se encontraron estables en su peso se procedió a imprimirlas y analizar el comportamiento del residuo asfáltico sobre la superficie.



Fig. 8. Proceso de secado de las muestras post-compactación.

#### 2.4.3 Imprimación de las muestras y medición del tiempo de quiebre del residuo.

Luego de tener las muestras secas se procedió a desarrollar una metodología para la imprimación y la medición del tiempo de quiebre del residuo asfáltico en la superficie. Esta etapa se inició definiendo la dosificación, en este caso la utilizada en terreno, que propone un litro por metro cuadrado. Para llevar a cabo esto en laboratorio fue necesario determinar el área superior de los moldes en los cuales se realizó los ensayos de imprimación. Con el área y la dosificación ya determinada, se estableció la cantidad de emulsión asfáltica modificada necesaria para cubrir dicha superficie. Teniendo conocimiento de la cantidad de emulsión utilizada en terreno se calculó la proporción equivalente para el área de las probetas proctor, esto quiere decir que, si en terreno fue necesario utilizar una dosificación de un litro de emulsión asfáltica sobre un área de un metro cuadrado, en laboratorio se calculó el volumen de emulsión para el área de la probeta proctor. Teniendo precisado el volumen de emulsión asfáltica necesaria para cubrir el área del molde proctor, se procedió a calcular el peso en gramos de dicho volumen de emulsión, este proceso se realizó teniendo conocimiento que el peso específico de la emulsión asfáltica es de 1012 g/L. Posterior a esto, se instaló el molde proctor ya seco sobre una balanza, la cual se calibró en “cero” con el objetivo de medir, en gramos, la cantidad de emulsión adicionada para mantener correctamente la dosificación. Además se delimitó el área superficial para certificar que la cantidad medida de emulsión imprimada fuese sólo la que cubre el área de imprimación (Fig. 7(a)).



Una vez imprimadas las tres probetas con la emulsión asfáltica diluida al 75% con agua de proceso, cada una de ellas con distinto potencial de hidrogeno (pH 0.8, pH 1, pH 1.2 respectivamente) se calculó el tiempo de quiebre del residuo por medio de un cronómetro, teniendo como conocimiento que la emulsión asfáltica tiene en promedio un tiempo de quiebre de seis horas desde el momento de su aplicación. El análisis físico de la superficie estudiada se realizó teniendo como base el cambio de coloración de ésta, esto sobre la premisa de que la emulsión asfáltica quiebra en superficie cuando se torna de color café homogénea (fig. 7(b)). Posteriormente a ello se procedió a analizar cómo se comportaba la emulsión asfáltica con el transcurso de los días.

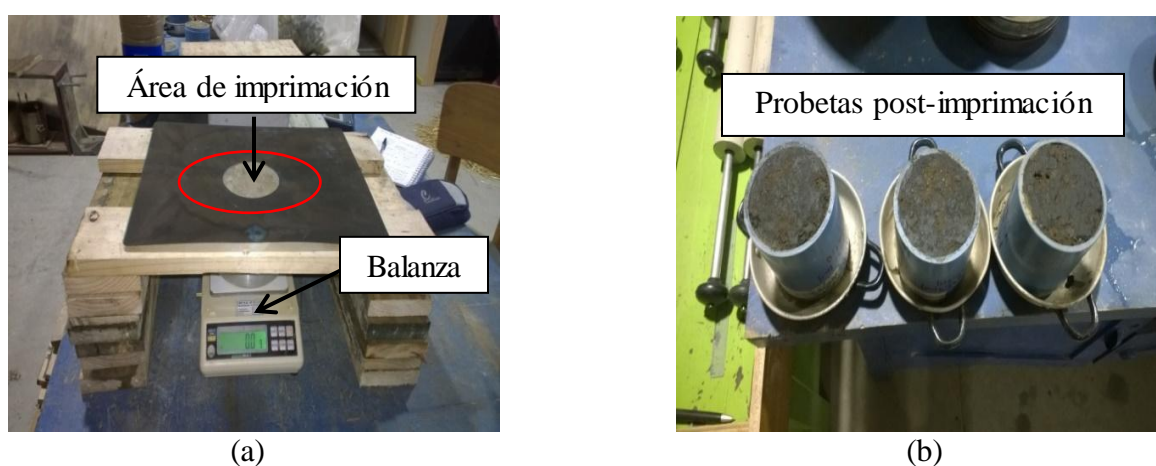


Fig. 9. Procedimiento de imprimación. (a) Delimitación del Área de Imprimación, (b) Probetas Imprimadas.

#### 2.4.4 Análisis del comportamiento de la emulsión asfáltica.

El análisis del comportamiento de la emulsión asfáltica tiene como objetivo determinar la conducta de ésta en función del tiempo de interacción con la base estabilizada sobre la cual fue aplicada, con el fin de poder establecer una relación entre la evaporación de la fase acuosa de la emulsión y la cantidad de residuo asfáltico efectivo que quedó sobre la carpeta de rodado. Para ello fue necesario medir la pérdida de peso diario de los moldes imprimado con el fin de determinar el número de días para los cuales las probetas no presentarían un diferencial de peso significativo respecto al día anterior. Esta medición sobre los moldes se realizó diariamente, estableciendo un patrón de 24 horas entre mediciones, a modo de obtener una medición homogénea en los resultados y, como se mencionó anteriormente, culminó el día en el que dicha variación de peso no fue relevante respecto a la medición día anterior.

#### *2.4.5 Cálculo de la capacidad de infiltración de la superficie imprimada*

Uno de los parámetros relevantes para la implementación de una emulsión asfáltica modificada como método supresor de polvo, es la capacidad de infiltración de la base estabilizada post imprimación, debido a que este parámetro regularía el comportamiento de la carpeta de rodado tratada frente a la acción de lluvias que pudiesen afectarla. Es por ello que dentro de los análisis efectuados a los moldes evaluados en laboratorio se implementó dicha medición.

Una vez teniendo las probetas con su peso estable, y por ende sin pérdida de su fase acuosa por evaporación, se procedió a aplicar 5 ml de agua potable sobre su superficie, para posteriormente medir el tiempo empleado por la base estabilizada para absorber dicha cantidad de agua en su totalidad.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se da a conocer cada uno de los resultados obtenidos a lo largo de este estudio, tanto en la ejecución en terreno, como el análisis en laboratorio. Estos resultados serán expresados por medio de gráficos y tablas, cuyas cifras serán interpretadas a continuación.

Tabla 5. Tabla resumen del cálculo del quiebre promedio del residuo asfáltico para cada disolución ensayada.

<b>ENSAYO</b>	<b>Píxeles totales promedio</b>	<b>Píxeles negros promedio</b>	<b>Quiebre Promedio %</b>
<b>25%AAM</b>	<b>1269435</b>	<b>484732</b>	<b>38.2%</b>
<b>50%AAM</b>	<b>1169786</b>	<b>610103</b>	<b>52.2%</b>
<b>75%AAM</b>	<b>1177161</b>	<b>228321</b>	<b>19.4%</b>
<b>75%ACM</b>	<b>1500088</b>	<b>456043</b>	<b>30.4%</b>

En la tabla 5 se ha resumido el número píxeles totales y el número de píxeles negros obtenidos en el análisis de fotografías, por medio del proceso de binarización de imágenes (ver Anexo A). En esta tabla, se presenta los quiebres promedio que surgieron como resultado del análisis de los seis umbrales escogidos de la escala de grises, y además se pudo observar su variación, a medida que se modificó el porcentaje de disolución.

De la tabla se desprende que la muestra diluida con 75% de agua de proceso presentó un quiebre en superficie de 19.4%, mejorando de esta manera la relación con el árido y a su vez, la penetración del componente asfáltico sobre la misma. Esto se desprende al compararla con la muestra diluida en la misma proporción pero con agua potable. Que, dicho sea de paso, presenta un quiebre promedio del 30.4%. Este resultado reflejó que, al diluir la emulsión con 75% de agua que contenga agentes emulsificantes se mantiene la estabilidad original de la mezcla, favoreciendo la interacción con el árido y de esta forma brindando un mejor desempeño al momento de ser implementado como método alternativo de supresión de material particulado en caminos rurales.

Estos valores pueden ser reflejados, a su vez, en el gráfico de la fig. 8 que representa el quiebre del residuo para cada disolución estudiada, conjuntamente con los valores umbrales definidos para el estudio y que se desglosa a continuación.

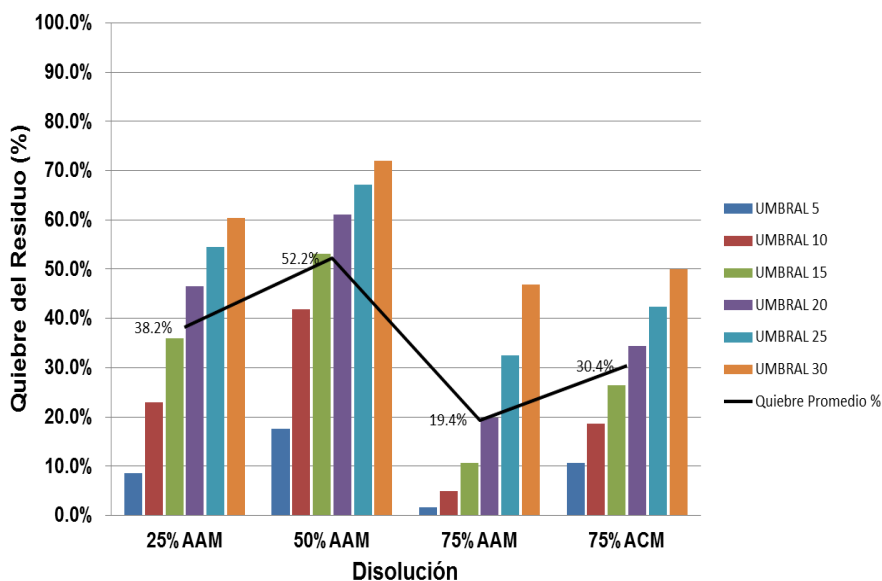


Fig. 10. Resultado del ensayo de disolución, por el método del valor umbral para el cálculo de quiebre del residuo asfáltico

La figura número 8, representa el porcentaje de quiebre de cada disolución analizado por el método de valor umbral definido en la metodología y a su vez representa la línea de tendencia promedio que tiene por objetivo el dar a conocer cuál de las muestras ensayadas presentó un menor quiebre en la superficie. De esta forma, del gráfico se desprende que la muestra diluida con el 75%AAM presentó un sobresaliente resultado si se compara con la muestra diluida en la misma proporción, pero con agua potable (75%ACM), disminuyendo el quiebre en superficie de un 30,4% a un 19,4% sirviendo esto como información adicional para reafirmar los valores presentados en la tabla número 5.

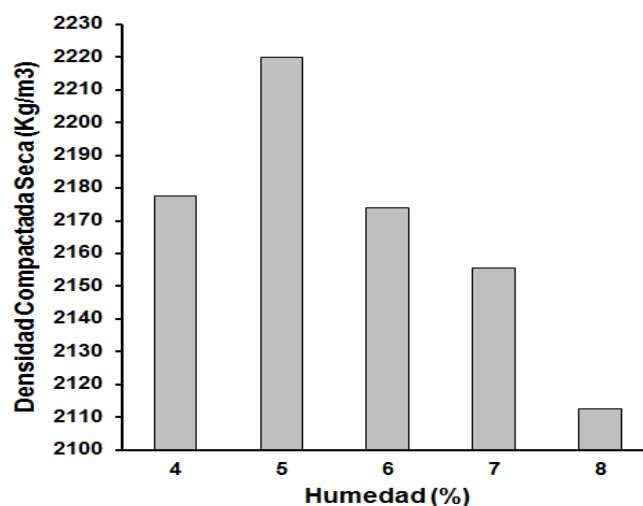


Fig. 11. Gráfico densidad compactada seca en función del porcentaje de humedad.

La fig. 9 muestra el gráfico densidad compactada seca en función de la humedad, resultado del ensayo Proctor modificado desarrollado en laboratorio. En este gráfico se puede observar que la máxima densidad obtenida se produjo cuando la humedad alcanzó un 5%, teniendo en este punto una densidad compactada seca de  $2220 \text{ kg/m}^3$ , mientras que para las humedades del 4%, 6%, 7% y 8% presentaron valores de densidad por debajo del rango ( $2178 \text{ kg/m}^3$ ,  $2174 \text{ kg/m}^3$ ,  $2156 \text{ kg/m}^3$  y  $2112 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente). Con estos datos se puede definir la humedad óptima a utilizarse en el proceso de imprimación y cálculo del potencial de hidrogeno de moldes en laboratorio. Para más detalles del ensayo ver Anexo C

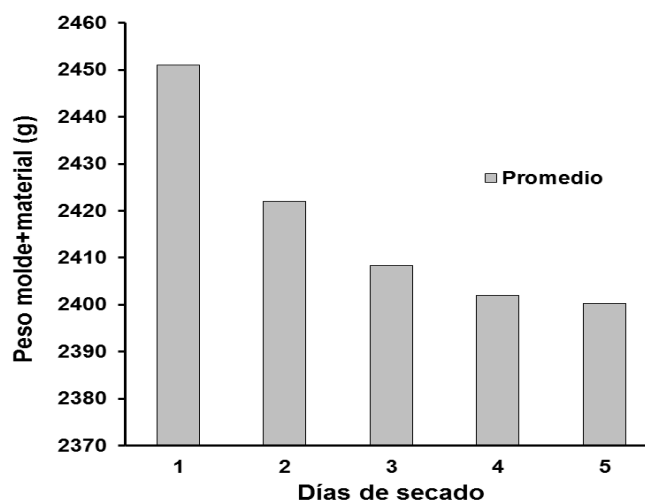


Fig. 12. Gráfico pérdida de humedad para los moldes Proctor.

La fig. 10 representa la interacción entre los días de secado de los moldes Proctor sometidos a luz infrarroja y la variación o pérdida de peso de los mismos. Estableciendo que al quinto día las muestras no presentaron variación significativa de peso respecto al día anterior, lo que aseguró que los moldes ya no tuvieran humedad retenida que pudiese interferir en el resultado de los ensayos posteriores. La pérdida de humedad promedio de los moldes estudiados fue de 2,1% de agua. Este resultado fue menor a la cantidad de agua adicionada para cada molde en el proceso de compactación para la obtención de la densidad máxima (5% de humedad). Esto se debió a que la luz infrarroja incidió sólo en la cara superior, sobre la cual se realizaría el ensayo de imprimación de la emulsión asfáltica con la variación de pH. Tabla de análisis de datos Anexo D.

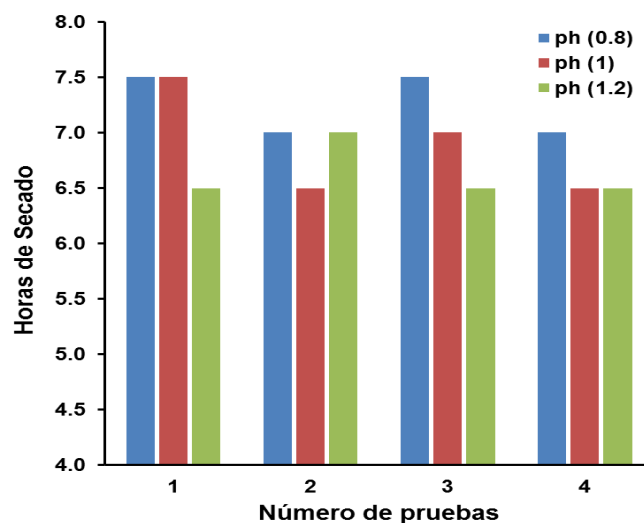


Fig. 13. Gráfico tiempo de quiebre del residuo asfáltico para cada pH estudiado

La fig. 11 representa el comportamiento de la emulsión asfáltica diluida, sometida a variación del potencial de hidrogeno. Para cada disolución se propuso un pH del agua emulsificante de 0,8, 1 y 1.2 respectivamente. Como resultado de este ensayo se obtuvo que la muestra diluida con agua de proceso de pH 0.8 obtuvo un promedio de tiempo de quiebre de 7.3 horas por encima del tiempo obtenido por las muestras que están disueltas con pH 1 y 1.2. Las cuales promediaron un tiempo de quiebre de 6.9 y de 6.6 horas respectivamente.

Este aumento en el tiempo de secado de la emulsión asfáltica aseguró un mayor tiempo de interacción de ésta con la carpeta granulada tratada. Es por este motivo que dicho parámetro estudiado favoreció a la penetración del residuo asfáltico sobre la base estabilizada.

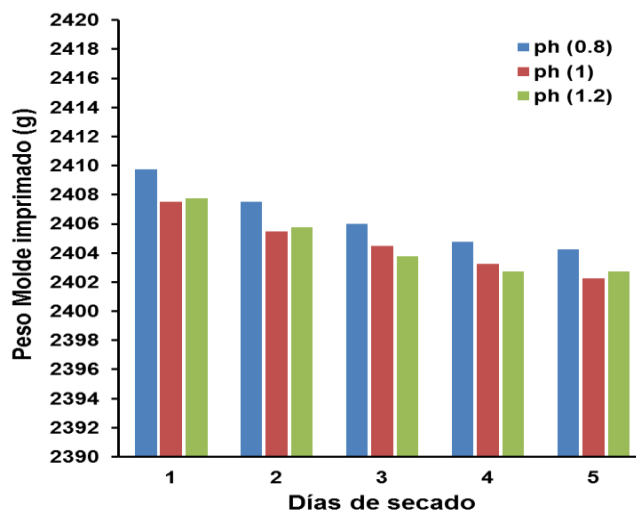


Fig. 14. Gráfico estabilización de la emulsión en el tiempo según pH.

En este gráfico se representa el tiempo (días) que demoró cada muestra imprimada con la emulsión asfáltica en estabilizar su peso, medido en gramos. Pérdida de peso que se asoció a la pérdida del componente volátil presente en las muestras, que está compuesto por agua más agentes emulsificantes.

Las muestras contaron con una pérdida de peso promedio diferente entre sí, que corresponden a 5.5, 5.25 y 5 gramos con pH 0.8, 1 y 1.2 respectivamente. Para obtener los resultados esperados, el muestreo fue sometido a secado a temperatura ambiente y posterior pesaje diario por medio de una balanza.

Tras el testeo, se obtuvo que son necesarios cinco días para la pérdida del componente volátil presente en las muestras, donde el porcentaje promedio de emulsión retenida es de un 31% para la muestra diluida con pH 0.8; un 34% para el pH 1 y 38% para la muestra con pH 1.2. Estos rangos permitieron determinar la cantidad de asfalto que permanece en la superficie. Además de los días exactos en que la emulsión dejaría de sufrir variaciones para estabilizarse de manera definitiva sobre la carpeta de rodado. Para más detalles del ensayo, ver Anexo E.



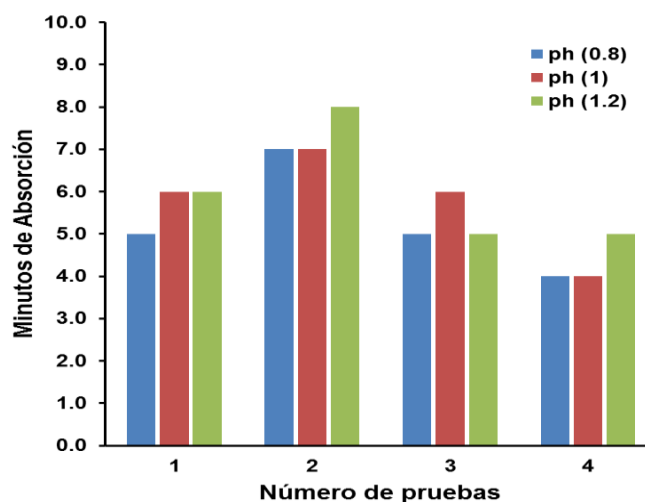


Fig. 15. Grafico tiempo de infiltración de agua sobre la superficie según pH.

Este grafico representa el tiempo de absorción de un determinado volumen de agua en una muestra de base estabilizada con variación de pH. Cabe señalar que estas muestras fueron previamente imprimadas con la emulsión asfáltica modificada.

En este proceso se realizaron cuatro pruebas, con tres muestras cada una. Estas muestras tuvieron una variación de pH de 0.8, 1 y 1.2 respectivamente. Dentro del análisis realizado, se obtuvo que las muestras que contenían pH 0.8 fueron las que favorecieron la permeabilidad de la superficie en un rango más acotado de tiempo. Cabe destacar que entre las cuatro muestras con potencial de hidrogeno 0.8, se promedió un tiempo de absorción de agua de 5.3 minutos. Esto arrojó como resultado que a menor pH del agua emulsificante, menor es el tiempo de absorción, por lo que hace relevante este valor para su utilización como método supresor de polvo en zonas donde las lluvias en periodos estivales también se hacen presentes, ayudando a drenar de mejor manera el agua depositada sobre la carpeta de rodado.

#### 4 CONCLUSIONES

La siguiente investigación centró su objetivo en evaluar física y químicamente una emulsión asfáltica modificada que pueda ser utilizada sobre caminos no pavimentados, con el fin de mitigar las emisiones de partículas generadas por el tránsito de vehículos sobre caminos rurales. Para lograr el objetivo anteriormente planteado, fue necesario realizar una serie de estudios tanto en terreno como en laboratorio, donde se reflejaron diversas cifras relevantes para llevar a cabo la evaluación. Estas cifras se relacionaron con el porcentaje de quiebre de la emulsión en la superficie, la influencia del pH en el comportamiento de la emulsión al interactuar con el árido y la penetración de la emulsión sobre la carpeta de rodado. De este modo, y en base al análisis de los resultados, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Luego de comparar diversas muestras con variación en porcentaje de disolución de agua acidificada y posterior análisis a través del procesamiento digital de imágenes o binarización, se obtiene que el menor porcentaje de quiebre de residuo asfáltico, fue de 19.4%, de ser diluido en un 75% de agua acidificada, consiguiendo un rendimiento y comportamiento apropiado para su utilización como método supresor de polvo.
- El nivel de pH apropiado para generar un mayor tiempo de quiebre del residuo asfáltico y que, a su vez, aumenta el tiempo de interacción y penetración en la carpeta granular, es el más bajo estudiado, que en cifras numéricas, se expresa como 0.8, alcanzando un tiempo de interacción con la superficie de la probeta compactada igual a 7.3 hrs.
- En el estudio de la permeabilidad de los suelos imprimados (muestras) se obtiene que la muestra tratada con pH 0.8 (pH apropiado) fue la que promedió el menor tiempo (5.3 minutos) de infiltración de agua en comparación a las otras muestras analizadas. Esto determina que dicho pH se adapta de mejor manera al objetivo de estudio.

Tras la caracterización física de la emulsión asfáltica alternativa, se concluye que modificando su dosificación y el grado de acidez del agua emulsificante, se puede elaborar un producto cuyas características y comportamiento lo vuelvan propicio para ser implementado sobre caminos no pavimentados, con el fin de mitigar las emisiones de partículas producto del tránsito de vehículos. Cabe señalar que el estudio fue realizado solo a nivel explorativo, con la finalidad de permitir que los datos obtenidos puedan utilizarse en investigaciones futuras y por qué no, ejecutar su uso en terreno.

## 5 REFERENCIAS

- AFP. 2004. "Deadly dust reduces life expectancy by up to two years in Europe: study". Ginebra. Agence France-Presse. (Disponible en: <http://www.terraily.com/2004/041129185850.09hw5iw6.html>. Consultado el: 25 de abril del 2017)
- ARDILA W, CORTÉS J, MENDOZA J. 2011. "Técnica alternativa para la conversión de imágenes a color a escala de grises en el tratamiento digital de imágenes". Vol. 1. Núm. 47. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Risaralda, Colombia.
- BELLOLIO J. 2005. "Metodología para la medición de polvo generado por vehículos en caminos pavimentados". CIIV, Dictuc, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- COLORADO TRANSPORTATION INFORMATION CENTER. 1989. "Road Dust Suppressants". Bulletin #3. Dept. of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins Co, March. (Original no consultado, citado por: SANDERS T.; J. ADDO. 1993. Literature review. En su: Effectiveness and Environmental impact of Road dust suppressants. 1ª Ed. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft. Collins, CO 80523. Pp: 4-10).
- FUENZALIDA C, HERRERA M, TUDELA A. 2009. Programa de Caminos Básicos. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- HINRICHSEN N. 2005. "Estudio de Comportamiento de Suelo Estabilizado con Sal: Frente a la Acción del Agua, para Distintas Mezclas". Tesis Universidad Austral de Chile, Fac. Cien. Ing. 115p.
- MALKOÇ S.; B. YAZICI; M. ALTAN; A. KOPARAL. 2010. "Street dust pollution of some metals along Eskisehir urban roads, Turkey". ICENV. Abril. Malezya-Pp: 13-15.
- MERCADO R, BRACHO C, AVENDAÑO J. 2008. Emulsiones Asfálticas, Usos y Rompimiento. Versión 1. Laboratorio FIRP. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. 44p
- OMS. 2005. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Editorial OMS. 20 Avenue Appia, 1211 Ginebra 27, Suiza. 25p

RED VIAL NACIONAL. 2016. Dimensionamientos y características. Departamento gestión vial, subdirección de desarrollo. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Editado en Agosto de 2016.

ULLOA A. 2012. Preparación de emulsiones asfálticas en laboratorio, materiales y métodos. Vol. 2. Laboratorio de Mezclas Bituminosas, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. 18p.

USDA FOREST SERVICE. 1983. What the Forest Service Does. Slightly rev. May 1983. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Washington, D.C. 16p.

## 6 ANEXOS

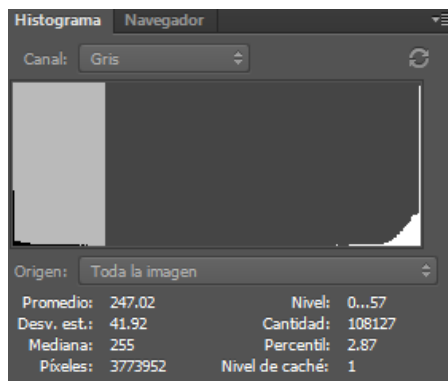
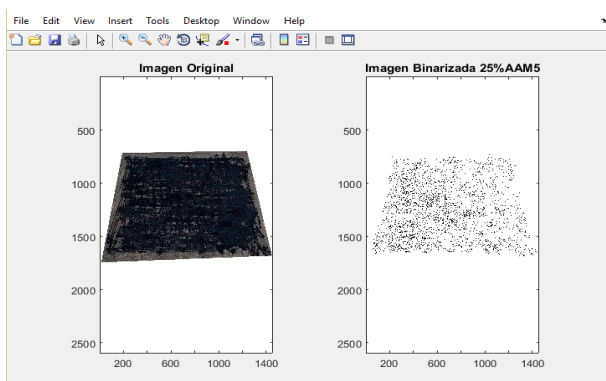
### INDICE DE CONTENIDOS

<b>ANEXO A:</b> Resultado del procesamiento digital de imágenes para el cálculo del porcentaje de quiebre del residuo asfáltico en superficie, por el método del valor umbral. ....	30
<b>ANEXO B:</b> Cuadro de datos sobre porcentaje de quiebre por medio de pixeles totales y pixeles negros para cada disolución analizada por valores umbrales. ....	38
<b>ANEXO C:</b> Resultado ensayo Proctor sobre la base estabilizada para la obtención de la humedad óptima. ....	39
<b>ANEXO D:</b> Resultado del proceso de secado de las muestras por medio de luz infrarroja previo a la imprimación. ....	40
<b>ANEXO E:</b> Resultado de estabilización de peso luego del proceso de imprimación. ....	41

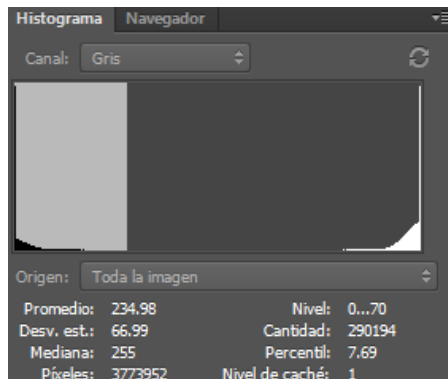
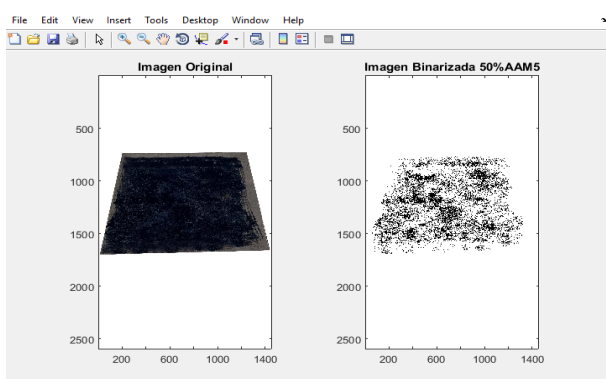
**ANEXO A:** Resultado del procesamiento digital de imágenes para el cálculo del porcentaje de quiebre del residuo asfáltico en superficie, por el método del valor umbral.

## UMBRAL 5

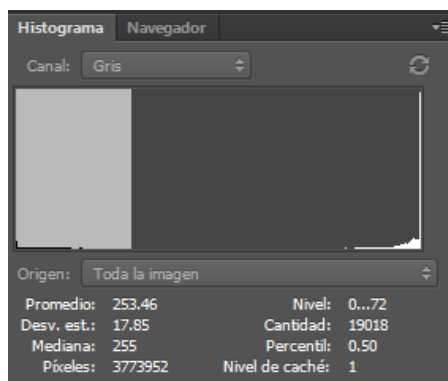
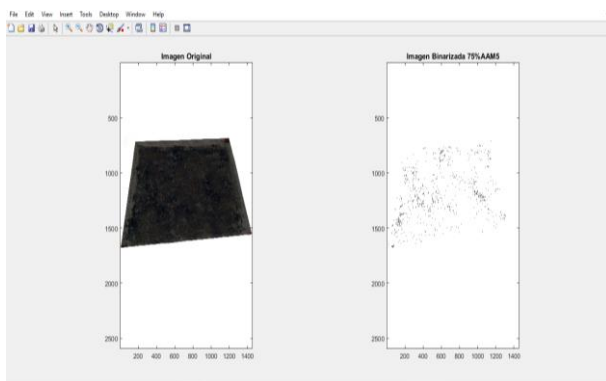
### 25%AAM



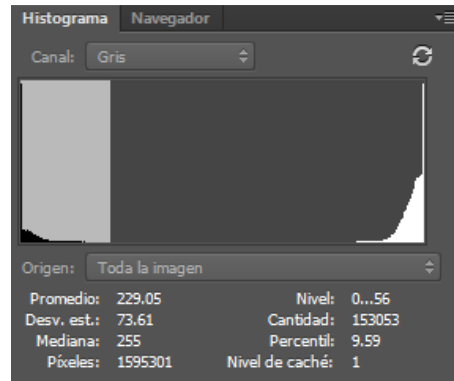
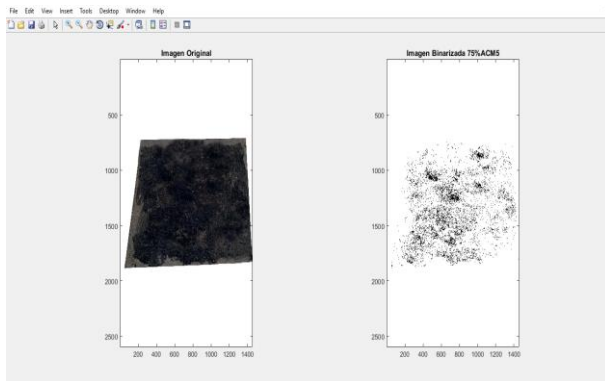
### 50%AAM



### 75%AAM

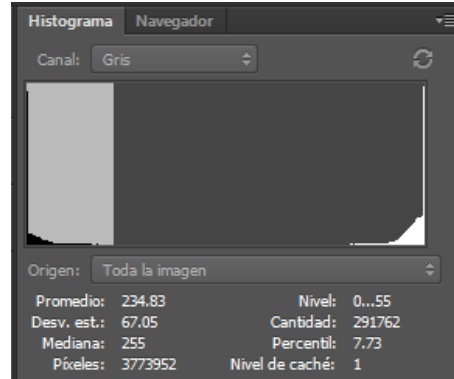
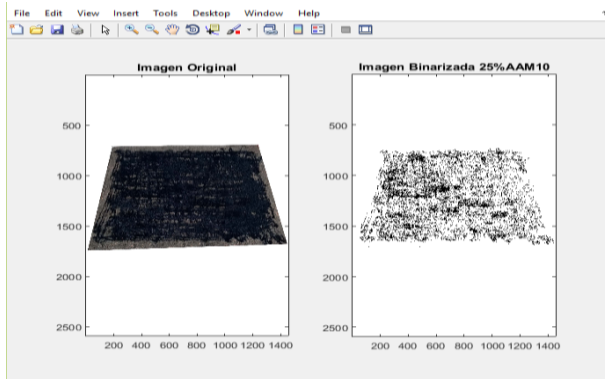


### 75%ACM

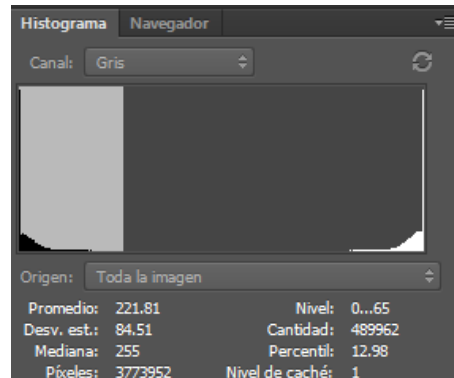
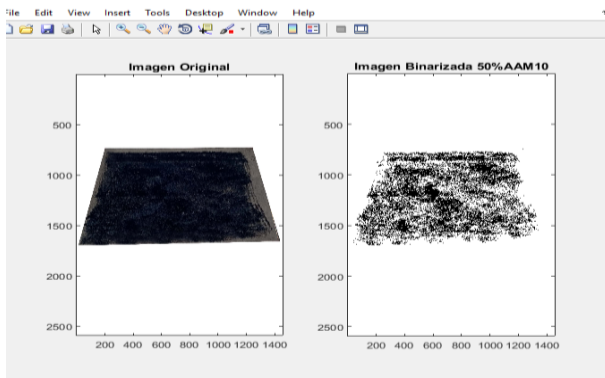


### UMBRAL 10

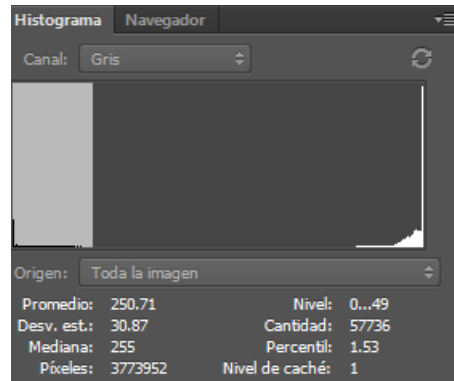
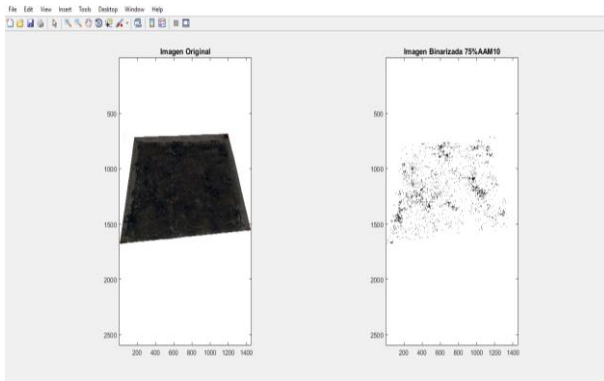
### 25%AAM



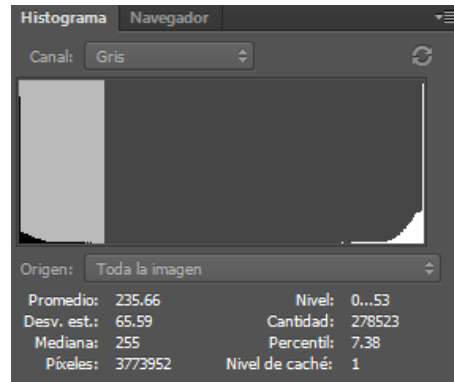
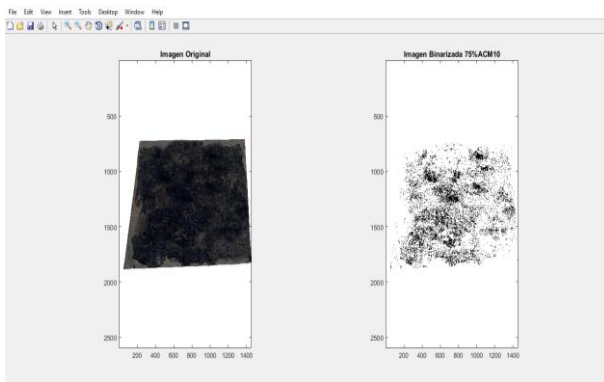
### 50%AAM



### 75%AAM

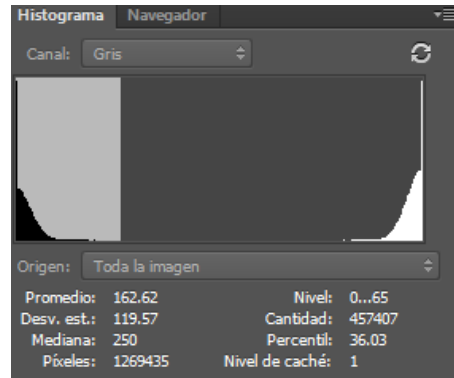
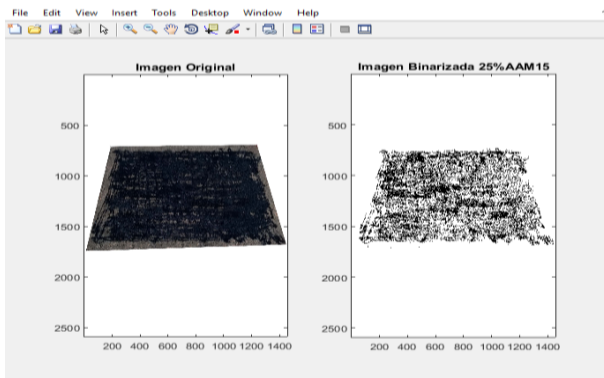


### 75%ACM



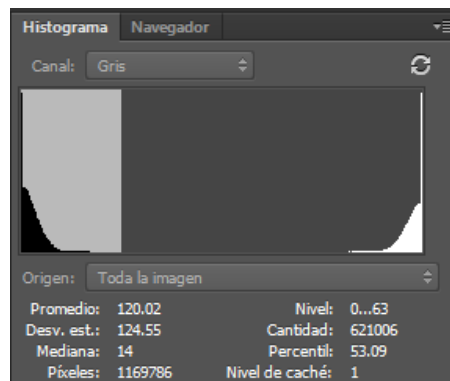
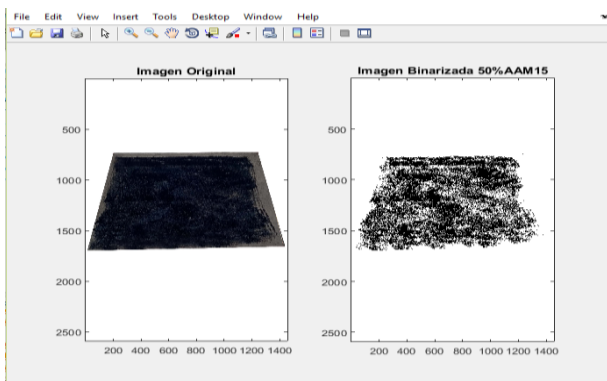
### UMBRAL 15

### 25%AAM

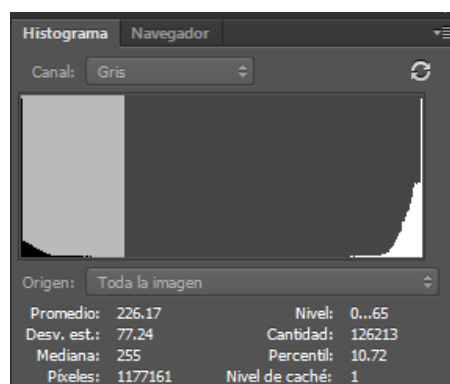
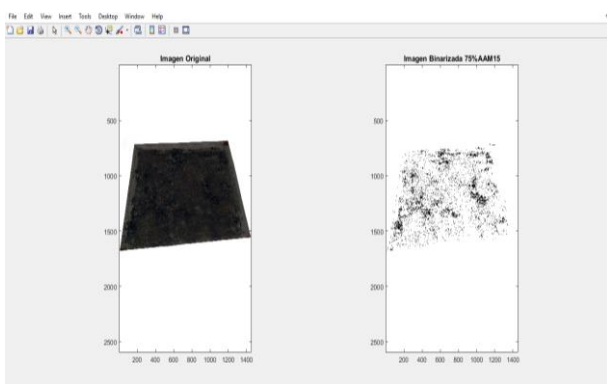




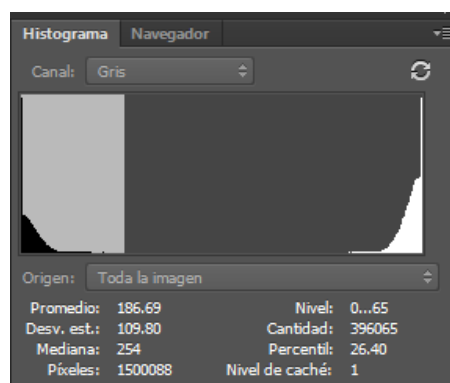
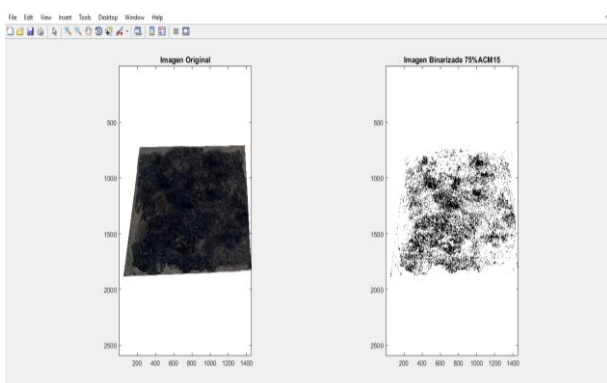
### 50%AAM



### 75%AAM

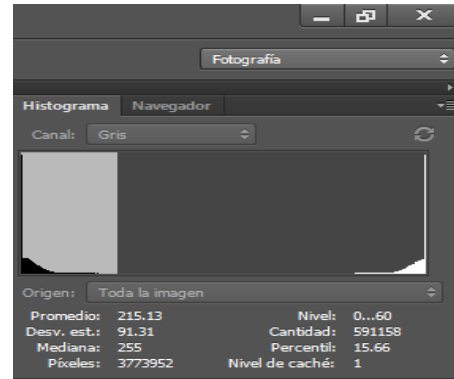
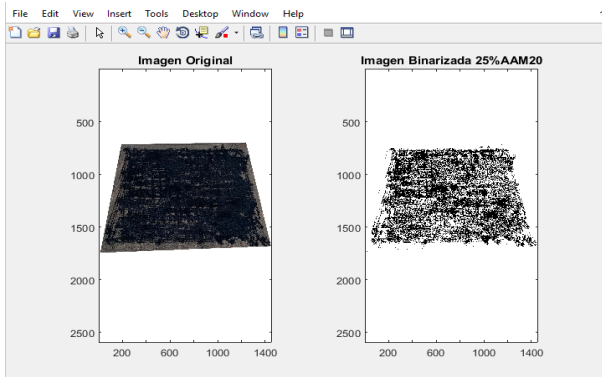


### 75%ACM

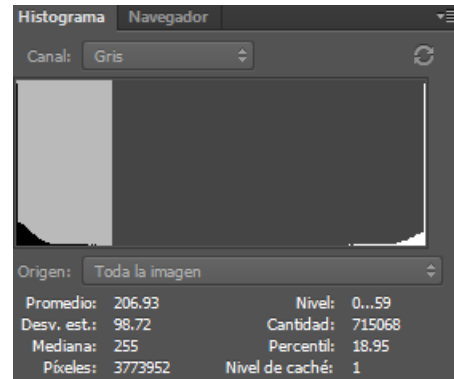
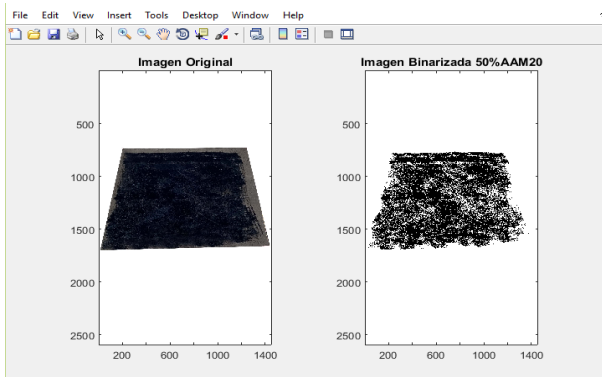


## UMBRAL 20

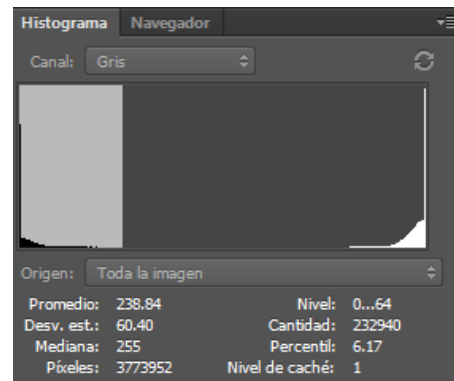
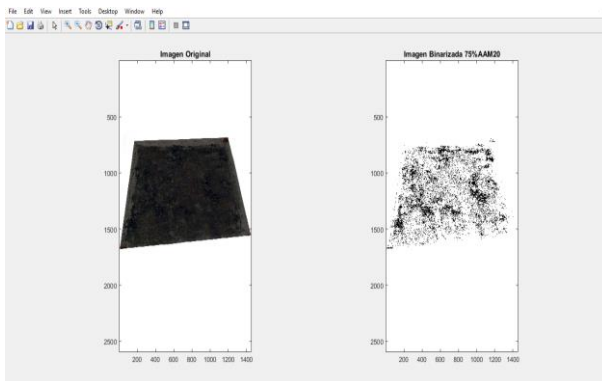
### 25%AAM



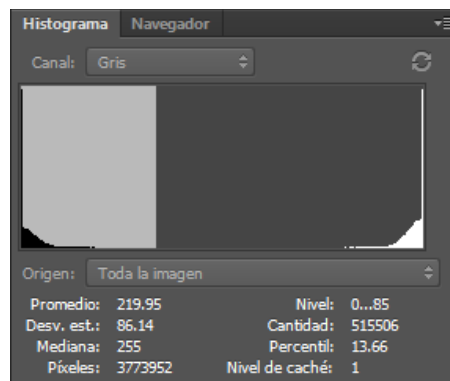
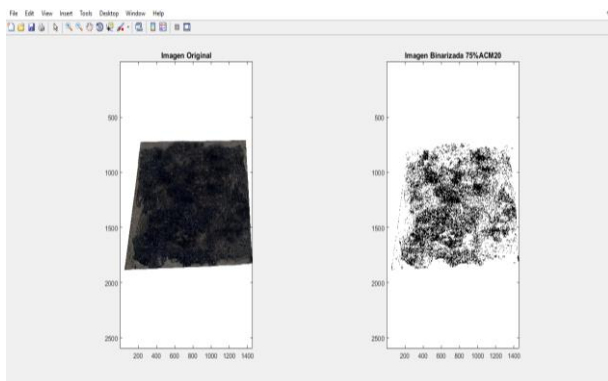
### 50%AAM



### 75%AAM

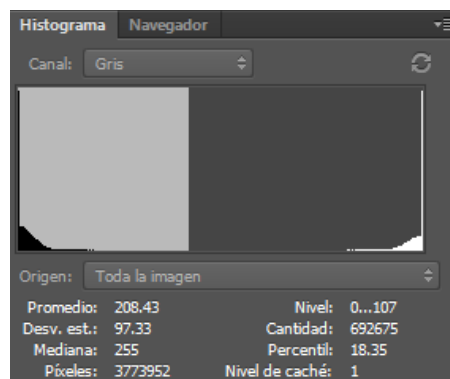
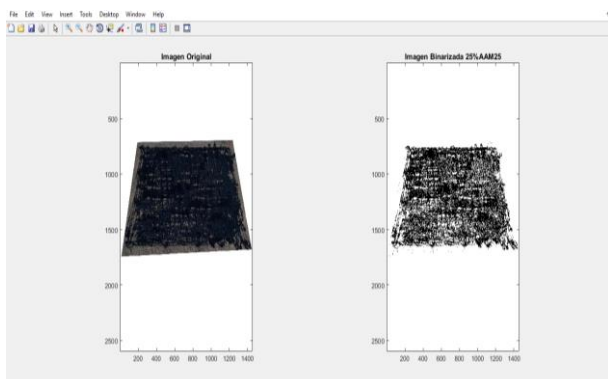


### 75%ACM

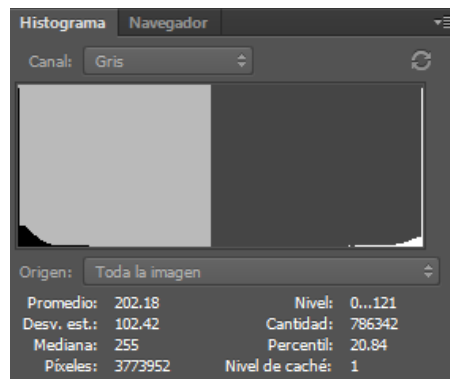
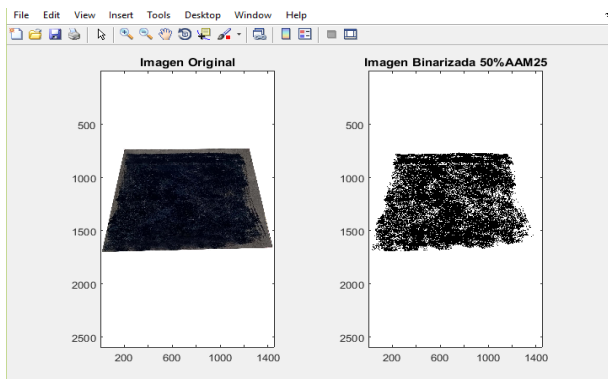


### UMBRAL 25

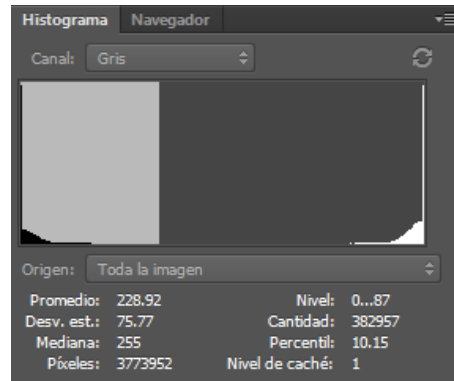
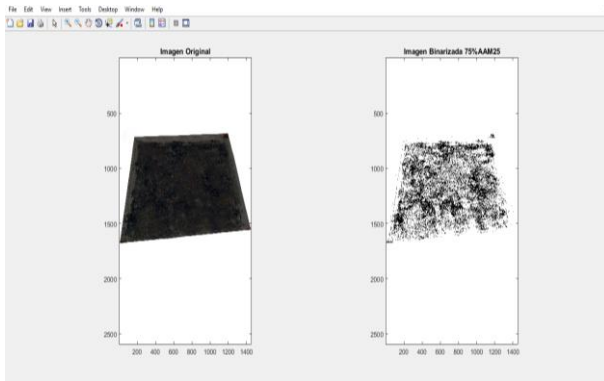
### 25%AAM



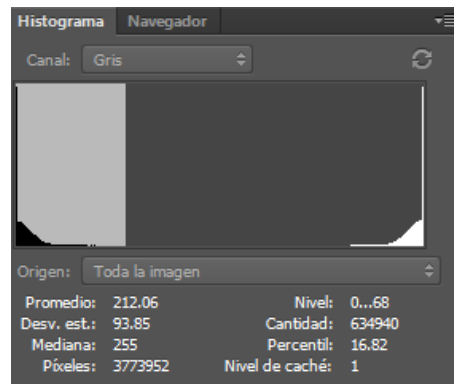
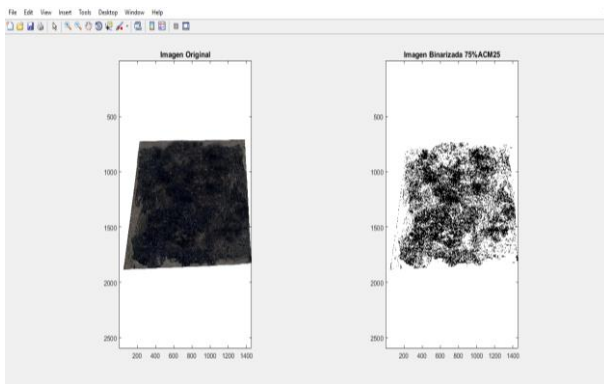
### 50%AAM



### 75%AAM

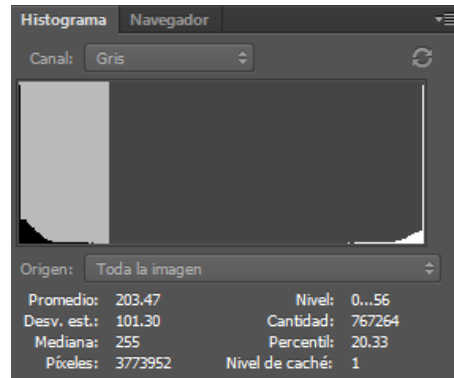
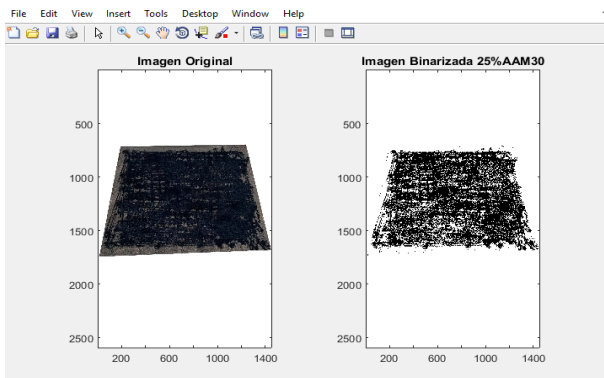


### 75%ACM

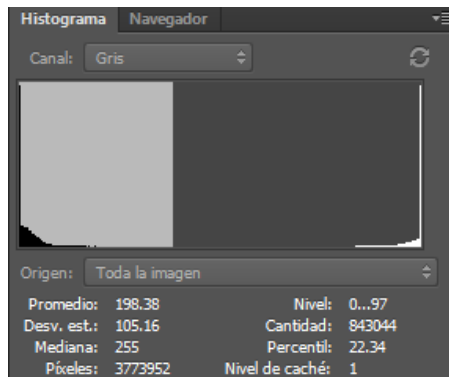
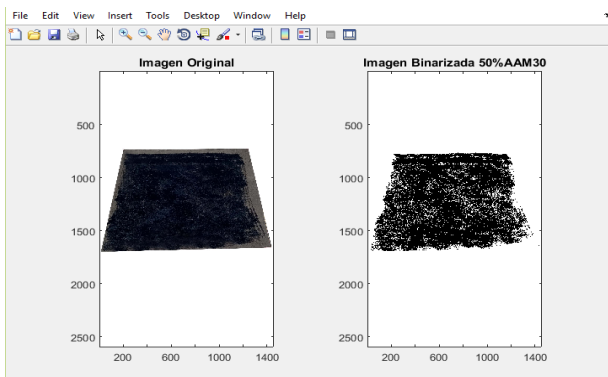


### UMBRAL 30

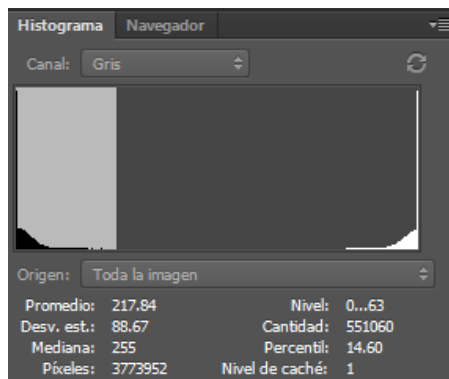
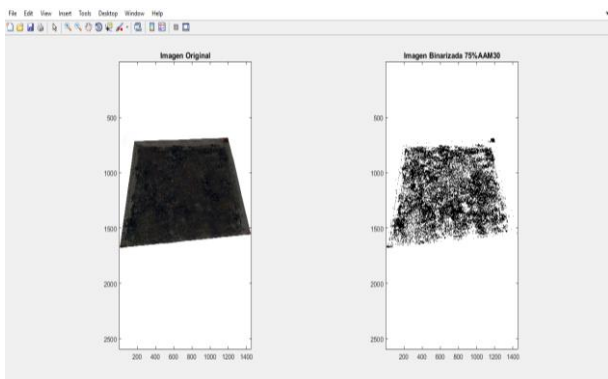
### 25%AAM



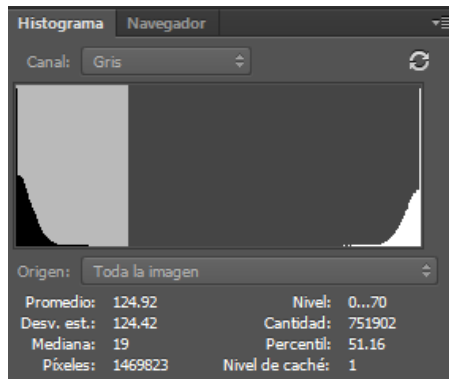
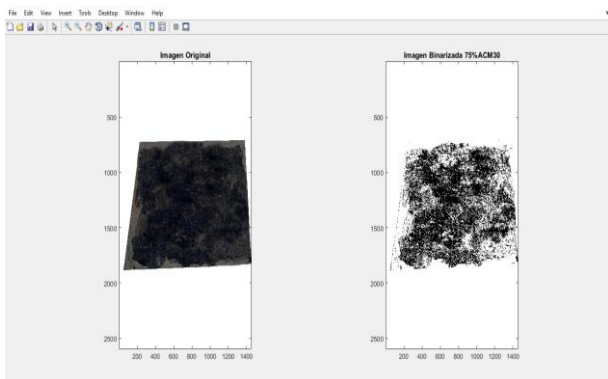
### 50%AAM



### 75%AAM



### 75%ACM



**ANEXO B:** Cuadro de datos sobre porcentaje de quiebre por medio de pixeles totales y pixeles negros para cada disolución analizada por valores umbrales.

<b>UMBRAL 5</b>			
<b>ENSAYO</b>	<b>Pixeles totales</b>	<b>Pixeles negros</b>	<b>% Quiebre</b>
<b>25%AAM</b>	1269435	108127	8.5%
<b>50%AAM</b>	1169786	205194	17.5%
<b>75%AAM</b>	1177161	19018	1.6%
<b>75%ACM</b>	1500088	160229	10.7%
<b>UMBRAL 10</b>			
<b>ENSAYO</b>	<b>Pixeles totales</b>	<b>Pixeles negros</b>	<b>% Quiebre</b>
<b>25%AAM</b>	1269435	291762	23.0%
<b>50%AAM</b>	1169786	489962	41.9%
<b>75%AAM</b>	1177161	57736	4.9%
<b>75%ACM</b>	1500088	278523	18.6%
<b>UMBRAL 15</b>			
<b>ENSAYO</b>	<b>Pixeles totales</b>	<b>Pixeles negros</b>	<b>% Quiebre</b>
<b>25%AAM</b>	1269435	457407	36.0%
<b>50%AAM</b>	1169786	621006	53.1%
<b>75%AAM</b>	1177161	126213	10.7%
<b>75%ACM</b>	1500088	396065	26.4%
<b>UMBRAL 20</b>			
<b>ENSAYO</b>	<b>Pixeles totales</b>	<b>Pixeles negros</b>	<b>% Quiebre</b>
<b>25%AAM</b>	1269435	591158	46.6%
<b>50%AAM</b>	1169786	715068	61.1%
<b>75%AAM</b>	1177161	232940	19.8%
<b>75%ACM</b>	1500088	515506	34.4%
<b>UMBRAL 25</b>			
<b>ENSAYO</b>	<b>Pixeles totales</b>	<b>Pixeles negros</b>	<b>% Quiebre</b>
<b>25%AAM</b>	1269435	692675	54.6%
<b>50%AAM</b>	1169786	786342	67.2%
<b>75%AAM</b>	1177161	382957	32.5%
<b>75%ACM</b>	1500088	634940	42.3%
<b>UMBRAL 30</b>			
<b>ENSAYO</b>	<b>Pixeles totales</b>	<b>Pixeles negros</b>	<b>% Quiebre</b>
<b>25%AAM</b>	1269435	767264	60.4%
<b>50%AAM</b>	1169786	843044	72.1%
<b>75%AAM</b>	1177161	551060	46.8%
<b>75%ACM</b>	1500088	750993	50.1%

ANEXO C: Resultado ensayo Proctor sobre la base estabilizada para la obtención de la humedad óptima.

N° MUESTRA	1	2	3	4	5
DESCRIPCION PAILA	CE-18	RM-14	JM-2	RM-22	RM-20
CANTIDAD DE AGUA (CC.)	120	150	180	210	240
HUMEDAD %	4	5	6	7	8
PESO MOLDE+MATERIAL (g)	3719	3783	3761	3759	3736
PESO PAILA (g)	96.9	100.2	77.3	100.3	99.4
PESO PAILA+MUESTRA HUMEDA (g)	502.4	361.3	515	567.1	586.7
PESO PAILA+MUESTRA SECA (g)	486.7	348.6	489.2	536.3	550.2
HUMEDAD REAL %	4.03	5.11	6.26	7.06	8.10
DENSIDAD COMPACTADA HUMEDA (g/cm <sup>3</sup> )	2.265	2.333	2.310	2.308	2.283
DENSIDAD COMPACTADA SECA (g/cm <sup>3</sup> )	2.178	2.220	2.174	2.156	2.112
DENSIDAD COMPACTADA HUMEDA (kg/m <sup>3</sup> )	2265	2333	2310	2308	2283
DENSIDAD COMPACTADA SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	2178	2220	2174	2156	2112

PESO MOLDE (g)	1585
VOLUMEN MOLDE (cm <sup>3</sup> )	942

**ANEXO D:** Resultado del proceso de secado de las muestras por medio de luz infrarroja previo a la imprimación.

	Muestra	1	2	3	4	5	diferencia	%perdida agua
etapa 1	M-1 (gr)	2440	2415	2400	2393	2392	48	1.97%
	M-2 (gr)	2447	2420	2404	2400	2398	49	2.00%
	M-3 (gr)	2449	2422	2411	2402	2399	50	2.04%
etapa 2	M-4 (gr)	2445	2424	2404	2399	2398	47	1.92%
	M-5 (gr)	2454	2425	2412	2405	2403	51	2.08%
	M-6 (gr)	2460	2422	2415	2406	2405	55	2.24%
etapa 3	M-7 (gr)	2443	2410	2398	2389	2388	55	2.25%
	M-8 (gr)	2450	2418	2404	2402	2402	48	1.96%
	M-9 (gr)	2451	2422	2410	2404	2399	52	2.12%
etapa 4	M-10 (gr)	2450	2431	2407	2402	2401	49	2.00%
	M-11 (gr)	2459	2431	2418	2410	2408	51	2.07%
	M-12 (gr)	2464	2425	2418	2411	2411	53	2.15%
	Promedio	2451	2422	2408	2402	2400	51	2.07%
	desv. Est.	7.2	6.0	6.7	6.3	6.3		



**ANEXO E:** Resultado de estabilización de peso luego del proceso de imprimación.

	Ph	1	2	3	4	5	Δ emulsión	% E. retenido
Etapa 1	0.8	2420	2417	2416	2414	2414	6	25%
	1	2413	2412	2411	2409	2408	5	38%
	1.2	2415	2413	2412	2410	2410	5	38%
Etapa 2	0.8	2399	2398	2396	2394	2394	5	38%
	1	2405	2403	2403	2401	2400	5	38%
	1.2	2406	2404	2402	2402	2402	4	50%
Etapa 3	0.8	2412	2410	2409	2408	2406	6	25%
	1	2408	2405	2404	2404	2403	5	38%
	1.2	2403	2401	2398	2397	2397	6	25%
Etapa 4	0.8	2408	2405	2403	2403	2403	5	38%
	1	2404	2402	2400	2399	2398	6	25%
	1.2	2407	2405	2403	2402	2402	5	38%
Promedio	0.8	2409.75	2407.5	2406	2404.75	2404.25	5.5	31%
	1	2407.5	2405.5	2404.5	2403.25	2402.25	5.25	34%
	1.2	2407.75	2405.75	2403.75	2402.75	2402.75	5	38%
desv.est.	0.8	8.7	8.0	8.5	8.5	8.3		
	1	4.0	4.5	4.7	4.3	4.3		
	1.2	5.1	5.1	5.9	5.4	5.4		