

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL**



“Evaluación del reciclado de pavimentos asfálticos (RAP) para uso en pavimentos expuestos”.

Proyecto de graduación para optar por el grado profesional de

Maestría en Ingeniería Vial

Realizado por:

Ing. Pablo Camacho Salazar

Profesor Tutor:

Ing. Sergio Fernández Cerdas, MSc.

Cartago, Agosto del 2016

## **DEDICATORIA**

A mi esposa quien siempre estuvo a mi lado con su apoyo incondicional y me motivó a seguir luchando hasta el final.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a mis compañeros de trabajo que colaboraron con la recopilación de la información para elaboración de este proyecto, a mi profesor tutor por su colaboración y accesibilidad y a mi esposa que siempre estuvo conmigo apoyándome en todo momento.

## **EPÍGRAFE**

"Sólo se ha perdido cuando se deja de luchar". Toro Belisario

## INDICE

<b>1.</b>	<b>CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.</b>	<b>19</b>
1.1.	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	19
1.2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	21
1.3.	OBJETIVOS.	21
1.3.1.	Objetivo General.	21
1.3.2.	Objetivos Específicos.	21
1.4.	ALCANCE Y LIMITACIONES.	22
1.4.1.	Alcance.	22
1.4.2.	Limitaciones.	22
<b>2.</b>	<b>CAPÍTULO II: MARCO CONCEPTUAL.</b>	<b>23</b>
2.1.	Generalidades del material producto del Reciclado de Pavimentos Asfálticos	23
2.2.	Requerimientos para materiales a ser usados como superficie de ruedo expuestas	25
2.2.1.	Especificaciones y requerimientos nacionales para superficies de ruedo expuestas	28
2.3.	Propiedades y comportamiento esperado del RAP	31
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.</b>	<b>34</b>
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.	34
3.2.	FUENTES Y SUJETOS DE INFORMACIÓN.	34
3.2.1.	Fuentes.	34
3.2.2.	Sujetos de información.	35
3.3.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.	35
3.3.1.	Consulta personal.	35
3.3.2.	Revisión documental.	35
3.3.3.	Definición de los sitios de muestreo	35
3.3.4.	Ensayos de laboratorio.	35
3.3.4.1.	Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.	35
3.3.4.2.	Análisis granulométrico.	36
3.3.4.3.	Densidad máxima y humedad óptima.	37
3.3.4.4.	Índice de soporte de California (CBR)	37
3.3.4.5.	Caras fracturadas.	38
3.3.4.6.	Abrasión de Los Ángeles.	39
3.3.4.7.	Índice de durabilidad (grueso y fino).	39
3.3.4.8.	Pérdida de sanidad en sulfato de sodio (grueso y fino).	40
3.3.5.	Matriz de ensayos.	40
3.3.6.	Comunicación personal.	42
3.3.7.	Análisis de contenido	42
3.3.8.	Análisis estadístico.	42
3.4.	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.	42
3.4.1.	Procesamiento y análisis de datos en el objetivo 1.	42
3.4.2.	Procesamiento y análisis de datos en el objetivo 2.	43
3.4.3.	Procesamiento y análisis de datos en el objetivo 3.	44
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS</b>	<b>46</b>
4.1.	OBJETIVO 1	46
4.1.1.	Ubicación de las fuentes de material de RAP y MGV a muestrear.	46
4.1.2.	Resultados de los ensayos de los materiales muestreados	52
4.2.	OBJETIVO 2	57
4.2.1.	Evaluación de los límites líquido e índice plástico.	57
4.2.2.	Evaluación de cumplimiento por análisis granulométrico	57
4.2.3.	Evaluación de densidad máxima y humedad óptima	61

4.2.4.	Evaluación del índice de soporte de california (CBR).....	65
4.2.5.	Evaluación de caras fracturadas .....	66
4.2.6.	Evaluación de abrasión con la máquina de Los Ángeles .....	67
4.2.7.	Evaluación de índice de durabilidad.....	67
4.2.8.	Evaluación de pérdida de sanidad en sulfato de sodio .....	69
4.2.9.	Evaluación general del RAP para uso como sustituto al MGV en caminos de lastre	70
4.3.	OBJETIVO 3.....	73
4.3.1.	Comparación de las propiedades de los materiales fuente de MGV y RAP.....	75
4.3.2.	Evaluación de los límites líquido e índice plástico para las combinaciones de RAP y MGV.....	84
4.3.3.	Evaluación del análisis granulométrico para las combinaciones de RAP y MGV.	86
4.3.4.	Evaluación de densidad máxima y humedad óptima para las combinaciones de RAP y MGV.....	95
4.3.5.	Evaluación del índice de soporte de California (CBR).....	98
4.3.6.	Evaluación de caras fracturadas para las combinaciones de RAP y MGV. ....	100
4.3.7.	Evaluación de abrasión con la máquina de Los Ángeles para las combinaciones de RAP y MGV.....	101
4.3.8.	Evaluación del índice de durabilidad para las combinaciones de RAP y MGV.	103
4.3.9.	Evaluación de pérdida de sanidad en sulfato de sodio para las combinaciones de RAP y MGV.....	106
4.3.10.	Evaluación general del desempeño de las combinaciones de RAP y MGV para uso en pavimentos expuestos.....	109
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>112</b>
5.1.1.	Conclusiones .....	112
5.1.2.	Recomendaciones.....	114
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>115</b>
<b>7.</b>	<b>APÉNDICES. ....</b>	<b>117</b>
7.1.	Resultados obtenidos para muestreo de material granular virgen (MGV) y reciclado de pavimentos asfálticos (RAP). ....	117
7.2.	Resultados obtenidos para muestreo de las combinaciones de material granular virgen (MGV) y reciclado de pavimentos asfálticos (RAP). ....	121
7.3.	Análisis estadístico mediante prueba t de “Student” para las fuentes de RAP-01 Dota y RAP-02 Cartago.....	125
7.4.	Análisis estadístico de ANOVA de un factor y prueba de Tukey para las fuentes de MGV-y RAP. ....	142
7.5.	Análisis estadístico de ANOVA de un factor y prueba de Tukey para las combinaciones de MGV-y RAP. ....	182
<b>8.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>222</b>

## INDICE DE CUADROS.

Cuadro 1.1. Estadísticas de reciclaje de asfalto en países europeos. ....	20
Cuadro 2.1. Graduación especial para la especificación de capas de rodadura. ....	28
Cuadro 2.2. Bandas granulométricas para subbases, bases y capas de rodadura por porcentaje por peso la malla. ....	29
Cuadro 2.3. Granulometrías para subbases y bases por porcentaje por peso la malla. ....	30
Cuadro 2.4. Parámetros de cumplimiento para material selecto para capa de rodadura. ....	30
Cuadro 3.1 Muestra de la Matriz experimental para evaluación de los materiales individuales y combinados. ....	41
Cuadro 3.2. Número de muestras para RAP y material granular virgen. ....	43
Cuadro 3.3. Proporción a evaluar y procedencia de los materiales ....	44
Cuadro 4.1. Materiales muestreados por tipo de fuente. ....	46
Cuadro 4.2. Comparativa de los resultados de granulometría, límite líquido e índice plástico para los tajos Mejía y Cervantes. ....	50
Cuadro 4.3. Clasificación de los materiales según AASHTO. ....	52
Cuadro 4.4. Resultados de los ensayos para el material RAP-01 proveniente del plantel MOPT de Dota. ....	53
Cuadro 4.5. Resultados de los ensayos para el material RAP-02 proveniente del plantel MOPT de Cartago. ....	54
Cuadro 4.6. Resultados de los ensayos para el material MGV-01 proveniente del plantel del Tajo de Ujarrás. ....	55
Cuadro 4.7. Resultados de los ensayos para el material MGV-02 proveniente del plantel del Tajo de Caracol. ....	56
Cuadro 4.8. Evaluación de límite líquido e índice plástico para RAP. ....	57
Cuadro 4.9. Cumplimiento de graduaciones granulométricas para RAP. ....	61
Cuadro 4.10. Evaluación de cumplimiento general de las muestras de RAP como material para caminos de lastre. ....	70
Cuadro 4.11. Combinaciones empleadas de material granular virgen y perfilado de pavimento asfálticos. ....	73
Cuadro 4.12. Resultados de límite líquido e índice plástico para las fuentes de MGV muestreadas. ....	75
Cuadro 4.13. Cumplimiento de graduaciones granulométricas para MGV. ....	78
Cuadro 4.14. Evaluación de cumplimiento general de las muestras de MGV como material para caminos de lastre. ....	83
Cuadro 4.15. Resultados de límite líquido e índice plástico para las combinaciones de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol. ....	84
Cuadro 4.16. Resultados de los porcentajes pasando para distintas aberturas de tamiz para las combinaciones de RAP y MGV. ....	87
Cuadro 4.17. Cumplimiento de graduaciones granulométricas para las combinaciones de RAP y MGV. ....	94
Cuadro 4.18. Resultados de densidad máxima y humedad óptima para la combinación RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol. ....	95
Cuadro 4.19. Resultados de densidad máxima y humedad óptima para la combinación RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás. ....	95
Cuadro 4.20. Resultados de Índice de Soporte de California (CBR) para las combinaciones de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol. ....	98
Cuadro 4.21. Resultados de Índice de Soporte de California (CBR) para las combinaciones de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás. ....	98
Cuadro 4.22. Resultados de porcentaje de caras fracturadas para la combinación de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol. ....	100
Cuadro 4.23. Resultados de porcentaje de caras fracturadas para la combinación de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás. ....	100

Cuadro 4.24. Resultados de porcentaje de abrasión en la máquina de Los Ángeles para la combinación de RAP-01 Dota y MGv-02 Caracol.....	102
Cuadro 4.25. Resultados de porcentaje de abrasión en la máquina de Los Ángeles para la combinación de RAP-02 Cartago y MGv-01 Ujarrás.....	102
Cuadro 4.26. Resultados de porcentaje de Índice de Durabilidad para agregado fino y grueso para la combinación de RAP-01 Dota y MGv-02 Caracol.....	104
Cuadro 4.27. Resultados de porcentaje de Índice de Durabilidad para agregado fino y grueso para la combinación de RAP-02 Cartago y MGv-01 Ujarrás.....	104
Cuadro 4.28. Resultados de porcentaje de pérdida por sanidad en sulfato de sodio para agregado fino y grueso para la combinación de RAP-01 Dota y MGv-02 Caracol.....	107
Cuadro 4.29. Resultados de porcentaje de pérdida por sanidad en sulfato de sodio para agregado fino y grueso para la combinación de RAP-02 Cartago y MGv-01 Ujarrás.....	107
Cuadro 4.30. Resumen general del cumplimiento de las mezclas de RAP y MGv conforme a las especificaciones técnicas. ....	110

## INDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1. Costos promedio de materiales para caminos de lastre. ....	24
Figura 2.2. Tipos de revestimiento con agregados más comunes para caminos de lastre. ....	25
Figura 2.3. Paquete estructural más adecuado para caminos con superficie de rueda expuesta. ....	26
Figura 2.4. Propiedades físicas de mezclas de agregados y suelos. ....	27
Figura 3.1. Ejemplo de una curva producto de un ensayo de análisis granulométrico.....	36
Figura 3.2. Muestra del proceso de compactación de la muestra para la Prueba de Proctor Modificado. .	37
Figura 3.3. Muestra del aparato para medición de la expansión en la prueba de CBR. ....	38
Figura 3.4. Esquema de una partícula con cara fracturada. ....	39
Figura 3.5. Mapa de ubicación de fuentes de material cercanos a la ruta nacional 30703.....	44
Figura 4.1. Ubicación del Plantel del MOPT de Santa María de Dota para muestreo de RAP procedente de proyectos de perfilado de ruta nacional No. 2 en sector Cerro de la Muerte. ....	47
Figura 4.2. Ubicación del Tajo Caracol en La Lima de Cartago para muestreo de MGv de cantera. ....	47
Figura 4.3. Ubicación del Plantel del MOPT Cartago para muestreo de RAP procedente de proyectos de perfilado de las rutas nacionales No. 251 y No. 202. ....	48
Figura 4.4. Ubicación del Tajo Ujarrás en Ujarrás de Cartago para muestreo de MGv de río.....	48
Figura 4.5. Ubicación del Tajo Cervantes en Cervantes de Cartago. ....	49
Figura 4.6. Ubicación del Tajo Mejía en Cervantes de Cartago. ....	49
Figura 4.7. Curva granulométrica del material granular virgen extraído de los Tajos Mejía y Cervantes. ....	51
Figura 4.7. Comparativa para curva granulométrica de una Base Graduación C, conforme a la sección 301 del CR 2010. ....	58
Figura 4.8. Comparativa para curva granulométrica de una Subbase Graduación A, conforme a la sección 301 del CR 2010. ....	59
Figura 4.9. Comparativa para curva granulométrica de una Subbase Graduación B, conforme a la sección 301 del CR 2010. ....	59
Figura 4.10. Comparativa para curva granulométrica de una Capa Granular de Rodadura graduación TM-40b modificada, conforme a la sección 311 del CR 2010. ....	60
Figura 4.11. Comparativa para curva granulométrica de un Material Selecto para capa superficial, conforme a la sección 204 del CR 2010.....	60
Figura 4.12. Comparación de densidades máximas promedio obtenidas para RAP y MGv. ....	62
Figura 4.13. Comparación de humedades óptimas promedio obtenidas para RAP y MGv. ....	62
Figura 4.14. Muestra del método de homogenización mecánica mediante retroexcavador. ....	64
Figura 4.15. Vista de los apilamientos de RAP de Planteles de Santa María de Dota (izq.) y Cartago (der.). ....	64
Figura 4.16. Comparación de CBR obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO. ....	65

Figura 4.17. Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) de caras fracturadas obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO. ....	66
Figura 4.18. Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) abrasión con la máquina de Los Ángeles obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO. ....	67
Figura 4.19. Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) índice de durabilidad para agregado fino obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO. ....	68
Figura 4.20. Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) índice de durabilidad para agregado grueso obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO. ....	68
Figura 4.21. Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) índice de durabilidad para agregado grueso obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO. ....	69
Figura 4.22. Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) índice de durabilidad para agregado grueso obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO. ....	69
Figura 4.23. Vista de la mezcla del material de 75% MGV-02 Caracol y 25% RAP-01 Dota. ....	74
Figura 4.24. Vista de la mezcla del material de 50% MGV-02 Caracol y 50% RAP-01 Dota. ....	74
Figura 4.25. Vista de la mezcla del material de 25% MGV-02 Caracol y 75% RAP-01 Dota. ....	74
Figura 4.26. Comparativa para la curva granulométrica de una Base Graduación C para MGV de las muestras de Ujarrás y Caracol. ....	76
Figura 4.27. Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación A para MGV de las muestras de Ujarrás y Caracol. ....	76
Figura 4.28. Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación B para MGV de las muestras de Ujarrás y Caracol. ....	77
Figura 4.29. Comparativa para la curva granulométrica de Capa Granular de Rodadura Graduación TM-40b para MGV de las muestras de Ujarrás y Caracol. ....	77
Figura 4.30. Comparativa para la curva granulométrica de Material Selecto para Capa Superficial de la Vías para MGV de las muestras de Ujarrás y Caracol. ....	78
Figura 4.31. Comparación de CBR obtenidos para los materiales fuente MGV y RAP. ....	79
Figura 4.32. Comparación de porcentaje de caras fracturadas obtenidos para los materiales fuente MGV y RAP. ....	80
Figura 4.33. Comparación de Abrasión en Máquina de los Ángeles para los materiales fuente MGV y RAP. ....	80
Figura 4.34. Comparación de Índice de Durabilidad (Fino) para los materiales fuente MGV y RAP. ....	81
Figura 4.35. Comparación de Índice de Durabilidad (Grueso) para los materiales fuente MGV y RAP. ....	81
Figura 4.36. Comparación de Pérdida de Sanidad (Fino) para los materiales fuente MGV y RAP. ....	82
Figura 4.37. Comparación de Pérdida de Sanidad (Grueso) para los materiales fuente MGV y RAP. ....	82
Figura 4.38. Variación del límite líquido de la combinación RAP-01 Dota y MGV-02. ....	85
Figura 4.39. Variación del índice plástico de la combinación RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol. ....	85
Figura 4.40. Comparativa para la curva granulométrica de una Base Graduación C para la mezcla de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol. ....	88
Figura 4.41. Comparativa para la curva granulométrica de una Base Graduación C para la mezcla de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás. ....	88
Figura 4.42. Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación A para la mezcla de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol. ....	89
Figura 4.43. Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación A para la mezcla de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás. ....	89
Figura 4.44. Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación B para la mezcla de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol. ....	90
Figura 4.45. Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación B para la mezcla de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás. ....	90
Figura 4.46. Comparativa para la curva granulométrica de una Capa Granular de Rodadura graduación TM-40b modificada para la mezcla de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol. ....	91

Figura 4.47. Comparativa para la curva granulométrica de una Capa Granular de Rodadura graduación TM-40b modificada para la mezcla de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás.....	91
Figura 4.48. Comparativa para la curva granulométrica de un Material Selecto para Capa Superficial de Rodadura para la mezcla de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol. ....	92
Figura 4.49. Comparativa para la curva granulométrica de Material Selecto para Capa Superficial de Rodadura para la mezcla de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás. ....	92
Figura 4.50. Comparativa de la variación de la Densidad Máxima para las combinaciones de RAP y MGV.....	96
Figura 4.51. Comparativa de la variación de la Humedad Óptima obtenida para las combinaciones de RAP y MGV.....	97
Figura 4.52. Comparativa de la variación del CBR para las combinaciones de RAP y MGV.....	99
Figura 4.53. Comparativa de la variación del porcentaje de Caras Fracturadas para las combinaciones de RAP y MGV.....	101
Figura 4.54. Comparativa de la variación del porcentaje de Abrasión en la Máquina de Los Ángeles para las combinaciones de RAP y MGV.....	103
Figura 4.55. Comparativa de la variación del Índice de Durabilidad (Finos) para las combinaciones de RAP y MGV.....	105
Figura 4.56. Comparativa de la variación del Índice de Durabilidad (Gruesos) para las combinaciones de RAP y MGV.....	105
Figura 4.57. Comparativa de la variación de Pérdida de Sanidad en Sulfato de Sodio (Finos) para las combinaciones de RAP y MGV.....	108
Figura 4.58. Comparativa de la variación de Pérdida de Sanidad en Sulfato de Sodio (Gruesos) para las combinaciones de RAP y MGV.....	108

## GLOSARIO

**Abrasión de Los Ángeles:** Es un ensayo en laboratorio que mide la degradación de los agregados resultante de la combinación de varias acciones como abrasión, impacto y fricción de las esferas de acero dentro de la máquina de Los Ángeles, el número de esferas varía según la graduación del material a ser ensayado. Esta prueba brinda un indicador de la calidad mecánica (durabilidad) de los agregados.

**Agregado:** Material granular duro de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria o la roca triturada para ser mezclado en diferentes tamaños.

**Agregado Fino:** De acuerdo al manual CR-2010 se define como el agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (No. 4).

**Agregado Grueso:** De acuerdo al manual CR-2010 se define como el agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm (No. 4).

**Análisis granulométrico:** Es un ensayo en laboratorio que tiene como finalidad obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo o agregado. Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente.

**Asfalto:** Un material cementante, de color entre café oscuro y negro, en el cual los constituyentes predominantes son bitúmenes que aparecen en la naturaleza o se obtienen en el procesamiento del petróleo. El asfalto es un constituyente, en proporciones variables, de la mayoría de petróleos crudos.

**Base:** Material constituido por partículas duras y durables que se encuentra inmediatamente debajo de la capa superficial o la capa intermedia. Puede estar compuesta de escoria triturada, roca triturada, grava y arena triturada o cualquier combinación de estos materiales, que cumple con la normativa vigente. Pueden ser tratadas con ligantes bituminosos o aditivos químicos.

**Calzada:** Parte de la carretera reservada para la circulación de vehículos.

**Capa:** Cualquier riego continuo de material que recibe, en las operaciones de colocación y compactación de suelos o agregados, el mismo esfuerzo de compactación en toda su extensión.

**Capacidad estructural:** Capacidad de las vías de resistir las cargas vehiculares producto del volumen y peso de los vehículos, identificando y calificando la estructura de los pavimentos de acuerdo con un nivel de desempeño esperado, necesario para decidir sobre niveles de intervención como mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción de las secciones. La capacidad estructural es la que define los espesores de las capas de materiales que se van a colocar en el pavimento.

**Capacidad funcional:** Capacidad que tiene la vía de brindar un servicio al usuario, considerando aspectos de confort, seguridad vial, costos de operación vehicular o deterioro de los vehículos por irregularidad de las vías, velocidad de circulación, niveles de congestión, contaminación ambiental por gases o por ruido.

**Compactar:** Proceso mecánico con el fin de comprimir un volumen dado de un material en un área confinada determinada, que se logra usando rodillos o compactadoras especiales según sea el tipo de obra y la etapa del proceso constructivo.

**Concreto asfáltico:** Mezcla en caliente, muy bien controlada, de cemento asfáltico (de alta calidad) y agregado bien graduado (también de alta calidad), compactada para formar una capa densa y uniforme todo según especificaciones vigentes.

**Conformar:** Construir los perfiles transversales y longitudinales, así como las elevaciones de una carretera, de conformidad con las especificaciones geométricas requeridas por el proyecto.

**Conservación vial:** Conjunto de actividades destinadas a preservar, en forma continua y sostenida, el buen estado de las vías, de modo que se garantice un servicio óptimo al usuario. La conservación comprende actividades tales como; el mantenimiento rutinario y periódico, la rehabilitación y el refuerzo de la superficie de ruedo, así como el mantenimiento y la rehabilitación de las estructuras de puentes. La conservación vial no comprende la construcción de vías nuevas ni partes de ellas; tampoco, la reconstrucción ni el mejoramiento de vías.

**Desprendimientos de agregados:** Desprendimientos de las partículas gruesas de agregado por cargas aplicadas por el tránsito y exceso de humedad. Las cargas aplicadas desplazan las partículas desprendidas, de manera que se forman apilamientos en las zonas menos transitadas y en los bordes de la calzada; o bien, provocan pérdida de finos, que genera alta permeabilidad y desmoronamiento del material.

**Disgregación:** Consiste en la separación de un material heterogéneo en sus componentes.

**Escarificar:** Consiste en la disgregación de la superficie del camino existente, efectuado por medios mecánicos (“ripper”).

**Espaldón:** La parte de la carretera contigua a los carriles de tráfico, necesaria para el acomodo de los vehículos que se detienen, para uso en emergencias y para el soporte lateral de la estructura del pavimento.

**Estructura de pavimento:** La combinación de la sub-base, base y superficie de rodamiento, colocadas sobre una sub-rasante para soportar y distribuir las cargas del tránsito sobre la sub-rasante de la carretera.

**Homogenizar:** Proceso mecánico por medio del cual se obtiene una mezcla uniforme de varios materiales, para las cuales la composición granulométrica es la misma en todo el material homogenizado, sin presentar segregaciones.

**Lastre:** Material granular clasificado, que se coloca sobre una sub-rasante o capa granular terminada de una carretera, con el fin de protegerla y que funcione como una superficie de ruedo expuesta. Puede ser material de tajo, río o préstamo.

**Mantenimiento rutinario:** Conjunto de labores de limpieza de drenajes, control de vegetación, reparaciones menores y localizadas del pavimento y la restitución de la demarcación, que deben efectuarse de manera continua y sostenida a través del tiempo, para preservar la condición operativa el nivel de servicio y seguridad de las vías. Incluye también la limpieza y las reparaciones menores y localizadas, de las estructuras de los puentes.

**Mantenimiento periódico:** Conjunto de actividades programables cada cierto período, tendientes a renovar la condición original de los pavimentos, mediante la aplicación de capas adicionales de lastre, grava, tratamientos superficiales o recarpeteos asfálticos o de secciones de concreto, según el caso, sin alterar la estructura de las capas del pavimento subyacente. El mantenimiento periódico de los puentes incluye la limpieza, pintura y reparación o cambio de elementos estructurales dañados.

**Mejoramiento:** Mejoras o modificaciones de estándar, horizontal o vertical, de los caminos, relacionadas con el ancho, el alineamiento, la curvatura o la pendiente longitudinal; a fin de incrementar la capacidad de la vía, la velocidad de circulación y aumentar la seguridad de los vehículos. También se incluyen dentro de esta categoría, la ampliación de la calzada, la elevación del estándar del tipo de superficie de tierra a lastre o de lastre a asfalto; y la construcción de estructuras tales como alcantarillas grandes, puentes o intersecciones.

**Módulo resiliente:** Está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión tri-axial entre la deformación axial recuperable.

**Obras nuevas:** Construcción de todas las obras viales que se incorporen a la red nacional existente, de acuerdo con la ley 7798.

**Pavimento:** Estructura constituida por un conjunto de capas superpuestas, de diferentes materiales, adecuadamente compactados, que se construyen sobre la subrasante de la vía con el objeto de soportar las cargas del tránsito durante un período de varios años, brindando una superficie de rodamiento uniforme, cómoda y segura.

**Perfilado (fresado):** El perfilado en pavimentos asfálticos consiste en la obtención de un nuevo perfil longitudinal y transversal de un pavimento asfáltico existente, mediante el fresado en frío parcial o total de las capas asfálticas.

**Plasticidad:** Es la propiedad que presentan algunos suelos de modificar su consistencia (su resistencia al corte) en función de la humedad. Se debe destacar que existe una correspondencia entre la plasticidad de un suelo y su cohesión, donde la plasticidad es una propiedad exclusiva de los suelos finos (arcillas y limos), siendo que son producto de las relaciones electroquímicas que se establecen entre las superficies de los elementos que forman el agregado que compone el suelo (limos o arcillas). Los suelos granulares, formados exclusivamente por elementos de granulometría gruesa (arena o gravas) no presentan plasticidad.

**Préstamo seleccionado:** Material de corte procedente de excavaciones hechas generalmente fuera del trazo de la carretera o camino, con características definidas en cuanto a graduación, índice de soporte y plasticidad, el que se coloca como una capa en las partes inferiores del pavimento para mejorar la subrasante u obra básica del camino, tanto en los cortes como en los terraplenes, ya sea como refuerzo del pavimento o para acabado de la subrasante.

**Proyecto:** Esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único.

**RAP:** Material obtenido producto de la actividad de perfilado de pavimentos asfálticos.

**Reconstrucción:** Renovación completa de la estructura del camino, con previa demolición parcial o total de la estructura del pavimento o las estructuras del puente.

**Red vial nacional:** Conjunto de carreteras nacionales determinadas por el Consejo Nacional de Vialidad, la cual está compuesta de rutas primarias, secundarias, terciarias y de travesía.

**Rehabilitación:** Reparación selectiva y refuerzo del pavimento de la calzada, previa demolición parcial de la estructura existente, con el objeto de restablecer la solidez estructural y la calidad de ruedo originales. Además, por una sola vez, podrá incluir la construcción o reconstrucción del sistema de drenaje, que no implique construir puentes o alcantarillas mayores. Antes de cualquier actividad de rehabilitación en la superficie de ruedo, deberá verificarse que el sistema de drenaje funcione bien.

**Reacondicionar:** Consiste en escarificar, homogenizar, humedecer (si corresponde), uniformizar, reconformar, perfilar y compactar una superficie de rodamiento existente, para adecuarla a las elevaciones, perfiles transversales y longitudinales, originales de la ruta o requeridas por la Administración.

**Roderas:** Depresiones en las huellas causadas por las cargas aplicadas por los vehículos, paralelas a la línea de centro. Deformación permanente en cualquiera de las capas del camino o la subrasante, asociadas con las cargas aplicadas por el tránsito y favorecidas por deficiencia en la capacidad de soporte o en el proceso constructivo.

**Rutas primarias:** Red de rutas troncales, para servir de corredores, caracterizados por volúmenes de tránsito relativamente altos y con una alta proporción de viajes internacionales, interprovinciales o de larga distancia.

**Rutas secundarias:** Rutas que conecten cabeceras cantonales importantes no servidas por carreteras primarias, así como otros centros de población, producción o turismo, que generen una cantidad considerable de viajes interregionales o intercantonales.

**Rutas terciarias:** Rutas que sirven de colectoras del tránsito para las carreteras primarias y secundarias, y que constituyen las vías principales para los viajes dentro de una región, o entre distritos importantes.

**Rutas de travesía:** Conjunto de carreteras públicas nacionales que atraviesan el cuadrante de un área urbana o de calles que unen dos secciones de carretera nacional en el área referida, de conformidad con el artículo 3 de la Ley General de Caminos Públicos.

**Seguridad vial:** Conjunto de acciones orientadas a prevenir o evitar los riesgos de accidentes de los usuarios de las vías y reducir los impactos sociales negativos por causa de la accidentalidad.

**Sub-base:** La capa o capas de material colocado sobre una subrasante o material selecto para soportar la base o superficie de un pavimento.

**Sub-rasante:** Superficie del terreno, ya sea en corte o relleno, sobre la que se colocan las diferentes capas de material que constituyen el pavimento de una carretera.

**Superficie de rodamiento o ruedo:** La capa superior de la estructura de un pavimento, diseñada para soportar las cargas del tránsito, resistir el deslizamiento de los vehículos y la abrasión que ellos producen, así como el intemperismo.

**Transitabilidad:** Condición física de la vía que permite la circulación vehicular.

**Tránsito:** Conjunto de desplazamientos de personas, vehículos y animales por las vías terrestres de uso público.

**Uniformizar:** Proceso mecánico por medio del cual se asegura que una capa de material tratada presente una condición similar a lo largo de la longitud intervenida.

## **ABREVIATURAS**

**AASHTO:** American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes).

**ASCE:** American Society of Civil Engineers. (Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles).

**CBR:** California Bearing Ratio. (Índice de Soporte de California).

**CONAVI:** Consejo Nacional de Vialidad.

**ECA:** Ente Costarricense de Acreditación.

**LANAMME:** Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales.

**MGV:** Material Granular Virgen.

**MOPT:** Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

**NCHRP:** National Cooperative Highway Research Program. (Programa Nacional Cooperativo para la Investigación de Carreteras).

**RAP:** Recycled Asphalt Pavement. (Reciclado de Pavimentos Asfálticos).

**RCA:** Recycled Concrete Aggregate. (Reciclado de Concreto hidráulico).

## **RESUMEN**

De acuerdo con la Dirección de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), se estima que en Costa Rica existen 26.966 km de red comúnmente denominada en lastre, es decir caminos con superficie de ruedo expuesta, esto versus 9.142 km que se encuentran pavimentados (ya sea en concreto hidráulico o concreto asfáltico). Realizando una comparación en longitud, la extensión de la red lastre es significativa, esto se traduce en que se requieran de proporciones importantes de materiales para su conservación, por lo que optimizar con fuentes de agregados alternas como las recicladas en lugar de usar materiales pétreos vírgenes, puede ayudar a optimizar dicho uso de materiales y a su vez con llevaría a un potencial ahorro en los costos de mantenimiento vial.

La durabilidad de un camino con superficie de ruedo expuesta depende de las propiedades físico-mecánicas del material, por lo que surge la necesidad de evaluar las condiciones del material para ejecutar un diseño adecuado de la estructura de pavimento a usar. No obstante, al no hacerse esto, en ocasiones, se presentan deterioros acelerados de la superficie de ruedo, con el agravante, de que el material granular es por lo general el elemento de mayor costo dentro de un proyecto de atención de caminos con pavimentos expuestos.

En Costa Rica, a pesar de que se han dado soluciones de intervención en este tipo de rutas mediante la colocación del Reciclado de Pavimentos Asfálticos (RAP) producto de la actividad de perfilado (fresado) de las capas asfálticas en los proyectos de mantenimiento periódico, el uso de este material ha tenido resultados variables puesto que la definición de espesores y su colocación han sido realizados por medios empíricos sin un diseño previo.

En este sentido, el presente proyecto evalúa las propiedades del RAP en el laboratorio para determinar su factibilidad como sustituto y/o complemento de material virgen para capas de bases granulares utilizadas en pavimentos expuestos. Para ello, se logró evaluar las propiedades físico-mecánicas del RAP en el laboratorio y comparar dichas propiedades contra fuentes de material granular virgen comúnmente utilizado en caminos con superficies de rodamiento expuestas, mediante el cual se logra visualizar que el material de RAP, así como las mezclas con éste material pueden ser usadas como sustitutos del material granular virgen para uso en caminos de lastre.

Además, basado en la determinación de las propiedades de los materiales, se observó que, si existen diferencias significativas de las propiedades físico-mecánicas entre las fuentes de RAP, dada la variabilidad del mismo, razón por lo cual se requiere caracterizar el material de previo a su uso.

### **Palabras clave**

Caminos en lastre, Evaluación, Reciclado Pavimento Asfáltico (RAP).

## **ABSTRACT**

According to the Sectorial Planning Department of the Public Works and Transport Ministry (MOPT), it is estimated that in Costa Rica there are 26,966 km of unpaved road network commonly, in comparison with 9,142 km that are paved (either concrete or asphalt). By making a comparison in network length, the extension of this network significant, which means that it requires important proportions of materials for its conservation, reason why material optimization with alternate aggregates sources as the recycled materials, can help to optimize the use of virgin aggregate and in return saving maintenance costs.

The durability of surface exposed roads depends on the physical and mechanical properties of the material, so there is a need to assess the condition of the material to conduct a proper pavement structure design. However, when this is not done, accelerated deterioration of the surface can be found, with the aggravating consequence that the granular material is usually the highest cost item within an exposed pavement road project.

In Costa Rica, even though solutions have been accomplished by the intervention of such routes by placing Recycled Asphalt Pavement (RAP) result from the milling activity of asphalt layers in periodic maintenance projects, the use of this material has had compromised results since the design of thickness and placement have been made by empirical means without previous design.

In this sense, this project evaluates the properties of RAP in the laboratory to determine its feasibility as a substitute and / or complement to virgin granular material layers for exposed base pavements. The evaluation of the physical-mechanical RAP properties in the laboratory was accomplished as well as the comparison between such properties and sources of virgin granular material commonly used on unpaved roads, which allowed to conclude that the RAP material and mixtures can be used as substitutes for virgin granular material for use in gravel roads.

In addition, based on the determination of material properties, it was observed that there are significant differences in physic-mechanical properties among sources of RAP, giving the variability among the different sources.

### **Keywords**

Gravel Roads, Evaluation, Recycled Asphalt Pavement (RAP).

## INTRODUCCIÓN.

La evaluación de las calidades del material del reciclado de pavimento asfáltico (RAP) en caminos de lastre, es un aspecto que resulta de suma importancia considerando que en Costa Rica el 74% de la red vial está constituida por caminos de lastre y que se ha estado utilizando el RAP en los proyectos de mantenimiento periódico de los caminos de lastre, debido principalmente a los limitados recursos económicos con los que se cuenta para atender estos proyectos.

Sin embargo, el principal problema surge porque en nuestro país se realiza relastrado de caminos no pavimentados empleando RAP, sin ningún tipo de ensayos de aceptación que permitan seguir estándares de diseño para aprovechar al máximo el potencial de uso que puede llegar a tener este subproducto del perfilado y sobre todo poniendo en riesgo la calidad de los trabajos realizados.

Este proyecto inicia con un apartado de generalidades donde se detallan aspectos como la situación actual en el uso del reciclado del pavimento asfáltico en los caminos de lastre de Costa Rica, además se incluye una justificación del proyecto donde se evidencian aspectos como el uso común del RAP en los proyectos de construcción y en el mantenimiento de carreteras en países europeos, así como los buenos resultados en términos económicos en Estados Unidos cuando utilizan el RAP al combinarlo con material granular virgen para ser utilizado como base y sub-base.

El proyecto tiene como objetivo general “Evaluar el material producto del reciclado de pavimentos asfálticos para reforzamiento de bases granulares para uso en pavimentos expuestos”. Posteriormente se presenta un marco conceptual el cual contiene los fundamentos en los que se basará la propuesta del proyecto, fundada en literatura de proyectos de otros países donde se utiliza el RAP en diferentes proporciones en las bases y sub-bases de proyectos de carreteras, así como la realización de ensayos de laboratorio para determinar las características físico-mecánicas del RAP solo y combinado con material granular virgen.

También se muestra el marco metodológico donde se observan las herramientas propuestas para recabar y analizar la información obtenida para caracterizar el RAP en el apartado de diagnóstico y poder realizar los diseños de mezcla de RAP y material granular virgen (MGV).

El abordaje para este proyecto se dio primeramente mediante la ejecución de ensayos de laboratorio para caracterizar las fuentes de RAP y MGV, para ello se emplearon ensayos de laboratorio que son usualmente utilizados para caracterizar un material para caminos con pavimento expuesto; entre los ensayos a aplicar están los parámetros de aceptación como el límite líquido, índice plástico, análisis granulométrico, densidad seca máxima, humedad óptima e índice de soporte de California (CBR), mientras que entre los parámetros de calidad se tienen los ensayos de caras fracturadas, abrasión en máquina de Los Ángeles, índice de durabilidad e índice de pérdida de sanidad en sulfato de sodio. Seguidamente se realiza un análisis de los resultados de RAP versus el cumplimiento de especificaciones, a fin de determinar su factibilidad como material sustituto del material granular virgen para caminos de lastre, además se procedió elaborar mezclas de MGV y RAP en dosificaciones de 25%, 50% y 75% de contenido de RAP a fin de visualizar el comportamiento de las características de las mezclas frente a los requerimientos técnicos, conforme se aumenta o disminuye el contenido de RAP en una mezcla.

## **1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.**

A continuación, se presentan las principales características del proyecto, así como la definición del problema a tratar por medio de los objetivos propuestos.

### **1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

La técnica de perfilado (fresado) es una técnica comúnmente utilizada en nuestro país para el mantenimiento periódico y rehabilitación de pavimentos asfálticos; el material producto de la remoción de una porción de la carpeta asfáltica es triturado durante el proceso y acarreado hasta algún plantel o predio definido con anterioridad.

En nuestro país el material producto del perfilado de pavimentos asfálticos ha sido empleado de forma regular como material de re-lastrado de caminos, esto debido a la escasez de recursos económicos para adquisición de materiales granulares, sumado a la gran extensión de caminos y carreteras con superficie en lastre, y a las condiciones climáticas de nuestro país, que aceleran el deterioro de las vías con superficie de ruedo expuesta. Además, se debe considerar la mitigación en el impacto ambiental al utilizar el reciclado del RAP, debido a que al utilizar RAP se disminuye la extracción de materiales vírgenes de tajos y canteras, y en el caso de que el RAP se reutilice en la misma obra de donde se extrajo disminuye los costos de acarreo de los materiales, por otro lado, se tiene la importancia del uso de RAP por cuanto permite una reducción de desechos producto de actividad de perfilado de pavimentos. Sin embargo, a pesar de que la utilización de este material ha probado poseer mejores calidades que el lastre convencional, dicho uso no se ha probado ni dado de forma tecnificada o siguiendo estándares de diseño, con lo cual se desaprovecha el potencial de uso que puede llegar a tener.

Se evalúa las propiedades físico-mecánicas del RAP, para conocer si el uso del material producto de perfilado de carpetas asfálticas removidas de caminos existentes, puede ser utilizado como superficie de ruedo expuesta para caminos de lastre, así como para la aplicación en bases y sub-bases de pavimentos. Este material puede ser empleado luego como material de base y/o sub-base en proyectos de pavimentación nuevos, también como superficie de ruedo expuesta para caminos no pavimentados (lastre), lo cual a su vez funciona como agente de control de polvo.

La técnica para la colocación y compactación del material, así como la definición de espesores y dosificaciones de agregados se basa únicamente en las experiencias del personal a cargo, y por lo general incorpora elemento como agua, emulsión asfáltica y/o algún material de secado.

Si bien es cierto en la mayoría de los casos el material por sí solo, con una adecuada colocación y compactación, prueba ser suficiente para un desempeño aceptable en la superficie de rodamiento, debe tomarse en consideración que existe una carencia en cuanto parámetros técnicos para el uso de RAP como superficie de ruedo expuesta o material de “lastre” que permitan establecer dosificaciones para un mejor aprovechamiento.

Es por tanto que se pretende con este proyecto, evaluar el comportamiento del material en laboratorio, teniendo en cuenta que el material producto del perfilado de pavimentos asfálticos es comúnmente utilizado en otros países donde cuentan con normativa para la reutilización de los mismos, un ejemplo muy claro se muestra en las estadísticas recolectadas en el 2009 por la European Asphalt Pavement Association (cuadro 1.1.), donde se demuestra que tiene que más de la mitad del material asfáltico reciclable es reutilizado, del cual aproximadamente una cuarta parte se reutiliza en capas granulares.

Correctamente caracterizado y aplicado, el uso del perfilado favorece un mejor aprovechamiento de los recursos humanos y financieros que por lo general son bastante limitados, ya que según estudios

como el realizado por el Virginia Center for Transportation Innovation and Research llamado “Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Use As Road Base and Subbase Material” utilizar material reciclado en proporción 50/50 en una mezcla con material virgen, estaría generando un ahorro de hasta 30% en los costos por compra de materiales, lo que permitiría lograr una mayor cobertura en la atención de la red vial.

**Cuadro 1.1.** Estadísticas de reciclaje de asfalto en países europeos.

País	Material asfáltico reciclable disponible (t)	% material asfáltico reciclable usado en:			Capas granulares	% de la producción de las nuevas mezclas en caliente y templadas que contengan material reciclado
		Reciclado en caliente y reciclado semicaliente	Reciclado templado	Reciclado en frío		
<b>Alemania</b>	14.000.000	82	0	0	18	60
<b>Austria</b>	400.000	85	0	5	10	0
<b>Bélgica</b>	1.300.000	57	0	0	0	44
<b>Dinamarca</b>	307.000	55	0	0	45	46
<b>Eslovenia</b>	15.360	30	20	50	0	0
<b>España</b>	1.850.000	52	9	15	24	9
<b>Finlandia</b>	500.000	0	0	0	0	0
<b>Francia</b>	7.053.000	41	0	0	0	6,8
<b>Grecia</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Hungría</b>	3.000	66	0	0	33	5
<b>Islandia</b>	30.000	0	0	0	25	6
<b>Irlanda</b>	100.000	30	0	0	0	1
<b>Italia</b>	12.000.000	20	0	0	0	0
<b>Noruega</b>	720.000	11	0	10	63	9
<b>Países bajos</b>	4.500.000	74	0	0	0	72
<b>Polonia</b>	1.100.000	5	0	0	0	0,2
<b>Reino Unido</b>	4.000.000	0	0	0	0	
<b>República Checa</b>	1.5000.000	20	0	30	30	10
<b>Rumania</b>	13.000	60	10	15	3	12
<b>Suecia</b>	1.000.000	75	10	10	5	50
<b>Suiza</b>	1.200.000	50	0	50	0	17
<b>Turquía</b>	1.069.000	9	0	0	97	1

Fuente: European Asphalt Pavement Association (EAPA).

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

En nuestro país tanto las municipalidades como el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, utilizan el material producto del perfilado de la carpeta asfáltica, para “relastrar” caminos no pavimentados, al ser este material completamente reciclable.

Se debe considerar que a nivel nacional un gran porcentaje de caminos de la red vial se encuentran con superficie de ruedo en lastre, es por tanto donde se identifica la necesidad de evaluar las competencias del uso del reciclado de pavimento asfálticos (perfilado) en caminos de lastre, a fin de promover la utilización del RAP como una opción que permita disminuir los costos de los proyectos de conservación vial, además de la ventaja, a nivel ambiental, que representa reutilizar este material, por lo que generaría una disminución en la demanda de agregados vírgenes en caminos de lastre.

## **1.3. OBJETIVOS.**

### **1.3.1. Objetivo General.**

Evaluar el material producto del reciclado de pavimentos asfálticos (RAP) para reforzamiento de capas granulares para pavimentos con superficie de ruedo expuesta.

### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

1. Ejecutar ensayos de laboratorio aplicados sobre diversas fuentes de RAP y material granular virgen (MGV) para determinar sus propiedades físicas y mecánicas.
2. Comparar las propiedades físicas y mecánica, del RAP conforme a las especificaciones técnicas vigentes, para concluir sobre la factibilidad del RAP como sustituto de material granular virgen en caminos de lastre.
3. Realizar ensayos de laboratorio físicos y mecánicos sobre especímenes compuestos por diferentes porcentajes de RAP, para definir una concentración de RAP por peso de material granular virgen tal que permita alcanzar un desempeño adecuado como superficie de ruedo en pavimentos expuestos.

## **1.4. ALCANCE Y LIMITACIONES.**

### **1.4.1. Alcance.**

Este proyecto pretende determinar la factibilidad de utilizar el RAP como sustituto del material granular virgen utilizado para relastrado para superficies de ruedo expuestas, esto únicamente a nivel de laboratorio, además esto se realizará mediante muestreos exploratorios de material granular virgen y RAP que estuvieron disponibles al momento de realización del este proyecto, cuyas fuentes provienen de diversos proyectos de conservación vial, obteniendo así dos fuentes de RAP y cuatro fuentes de MGV,

La procedencia de las fuentes de material de RAP serán los apilamientos en los planteles del MOPT en Santa María de Dota y Cartago, productos de proyectos de perfilado de pavimentos de ruta nacionales cercanas a estos planteles, mientras que el MGV se muestreo agregado propuesto para el mantenimiento de la ruta de travesía 30703 conocida como calle “La Puente”, la cual comunica los poblados de Cipreses y Cervantes en la provincia de Cartago

### **1.4.2. Limitaciones.**

Las principales limitaciones del proyecto son:

- Falta de información o registros a nivel nacional que permitan establecer las ventajas de cada tipo de material analizado.
- La cantidad de fuentes accesibles de material virgen y RAP para obtener muestras representativas.
- La variabilidad que puede existir en los apilamientos de RAP en los distintos planteles del MOPT, puesto que puede existir contaminación o manipulación del material.
- Para el material de RAP apilado en los planteles del MOPT existía la limitante de no contar con equipo y/o maquinaria para fraccionarlo previamente al muestreo, por lo que se trabajó con el material en su condición original luego de haber sido obtenido del perfilado de pavimentos.
- Los ensayos al material de RAP, se realizaron sin haber extraído el cemento asfáltico, por lo que los resultados podrían estar influenciados por dicha condición.
- Existe una limitación presupuestaria de la cantidad de pruebas que pueden realizarse, por lo que queda sujeto a la disponibilidad de los proyectos de conservación vial que se ejecutaron en ese momento.

## 2. CAPÍTULO II: MARCO CONCEPTUAL.

### 2.1. Generalidades del material producto del Reciclado de Pavimentos Asfálticos

De acuerdo con registros del año 2006 del Departamento de Transportes de la Dirección de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), el país cuenta con un total 36.108 km de red vial, esto incluye la red vial nacional y la cantonal; del total de la red un 74% (aproximadamente 26.966 km) corresponde a caminos de superficie de ruedo no pavimentada, comúnmente conocidos como de lastre o tierra. Al poseer una red vial en lastre bastante amplia, implica que se requiera de recursos económicos adecuados para poder brindarle mantenimiento; al ser estos recursos limitados hay deterioro en los caminos y por ende pérdida del nivel de servicialidad de la vía.

Skorseth, K & Selim, A. (2000), definen el lastre como “una mezcla de piedra, arena y partículas finas para usos como sub-bases y bases, así como superficies de ruedo expuestas. La grava es el material utilizado con mayor frecuencia en caminos no pavimentados. Asimismo, señalan que existen dos principios básicos que se deben tomar en consideración en este tipo de caminos, que son los dispositivos de graduación y el material de la superficie de ruedo expuesta, y por ende son los elementos más importantes a tener en consideración para mantener y rehabilitar caminos en lastre.

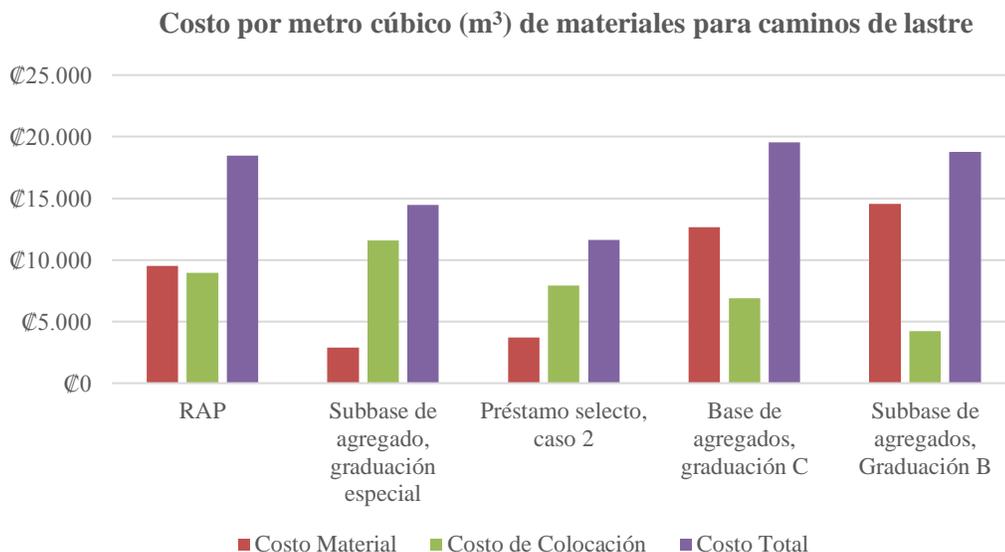
En Costa Rica se ha estado utilizando el reciclado de pavimentos asfálticos para proyectos de mantenimiento periódico de caminos de lastre como sustituto del material granular virgen (MGV). El reciclado de pavimentos asfálticos o RAP (“*Recycled Asphalt Pavement*” por sus siglas en inglés), es la terminología empleada para el material producto de la actividad de perfilado de pavimentos asfálticos, éste se obtiene cuando se remueve total o parcialmente una carpeta asfáltica para rehabilitaciones o reconstrucciones de los pavimentos. Cuando el perfilado es debidamente triturado y cribado, puede llegar a ser un material de alta calidad (Koch & Ksaibati, 2010). Este material puede ser apilado para su uso como fuente única o para mezclas de distintos usos. El perfilado puede ser procesado de varias maneras para obtener el RAP, las cuales incluyen el cribado, triturado o el fraccionamiento (combinación de cribado y triturado); también puede ser procesado como agregado fino de menos de 12,7 mm o como agregado grueso de 38,1 mm (Koch, Huntington & Ksaibati, 2013).

El RAP puede ser empleado para distintos usos en la construcción de carreteras, como de bases y sub-bases, como agregado sustituto y suplemento del cemento asfáltico en pavimentaciones con asfalto reciclado (ya sea en frío o en caliente), como material de relleno para la construcción de terraplenes, así como material correctivo o para el mejoramiento de bases y también como material para caminos de lastre, con la ventaja que en este tipo de camino ayuda como supresor de polvo (Koch, Huntington & Ksaibati, 2013).

Debe tomarse en cuenta, que el empleo del RAP en los procesos de construcción, mantenimiento o reconstrucción de pavimentos aporta fuertes beneficios ambientales y económicos a un país, ya que se evita extraer el volumen de material pétreo virgen de cerros o ríos afectando negativamente al entorno donde se encuentra. Adicionalmente, el costo de los productos finales debe ser menor al emplearse en su manufactura materiales que ya tuvieron un primer uso y su adquisición tiene un costo menor. Es importante mencionar que al fresarse o demolerse una capa de un pavimento de concreto asfáltico o de un concreto hidráulico se presenta la dificultad de encontrar un sitio en el cual verter el producto. Los sitios para alojar estos materiales son escasos y los vertederos controlados se enfocan a recibir desperdicios sólidos domiciliarios, orgánicos. Al no tener, en ocasiones y de manera furtiva se tiran en sitios no autorizados y sin control ocasionando un problema ambiental (Navarro, 2008).

Además, debe tomarse en consideración que existe un importante potencial de beneficio económico en el uso de RAP como base y sub-base. Dicha aplicación puede generar un ahorro del 30% en el costo de los materiales, cuando se realiza una combinación 50/50 de RAP con material virgen (Hoppe et al, 2015).

En el caso de que el RAP sea utilizado en caminos de lastre, permite abaratar costos por cuanto se disminuye la compra de material granular virgen; sin embargo, el uso de este material ha tenido resultados variables puesto que la definición de espesores y su colocación han sido realizados por medios empíricos sin un diseño previo, en el caso específico de Costa Rica, en la Figura 2.1. se muestran los costos promedio, conforme a información suministrada por la Dirección de Costos de CONAVI, de materiales usados para caminos de lastre, es importante aclarar que para estimar el costo del material producto del perfilado, se consideran las actividades constructivas en las especificación técnicas, que incluye el perfilado (fresado) de la superficie a la profundidad indicada en ese cartel, acarreo del material resultante a los planteles autorizados y limpieza de la superficie perfilada, por lo que, para reutilización del material, este costo, el costo del agregado, es cero, por lo que sólo se incluiría el costo de colocación y acarreo representado por la columna en color verde en la figura 2.1.



**Figura 2.1.** Costos promedio por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de materiales para caminos de lastre.  
Fuente: CONAVI, 2016.

A nivel internacional, el uso de estos materiales como base en la construcción de nuevas carreteras se ha tornado cada vez más común en los últimos veinte años debido al impacto que tiene en la disminución de los costos de un proyecto. Además, en general el rendimiento del mismo como capa granular de base y sub-base se ha caracterizado por tener resultados satisfactorios e incluso excelentes en algunos casos (Edil, T.B., 2011).

Collins & Ciesielski (1994), en un reporte para la NCHRP de Prácticas en Carretera, señalan que las agencias de carreteras han sido proactivas en uso del reciclaje de materiales como materiales de construcción; siendo el RAP el más utilizado de ellos. Aparte de uso en mezclas asfálticas, identificaron que tiene aplicaciones para uso como base y sub-base, siendo la graduación del agregado el factor que limita su uso.

De acuerdo con Tutumluer (2013), algunas de las características que pueden afectar el comportamiento del agregado granular son las siguientes:

- Mineralogía
- Distribución por tamaño de las partículas (graduación) y contenidos de finos
- Formas de las partículas, textura superficial y angularidad
- Durabilidad (dureza, resistencia a la abrasión).

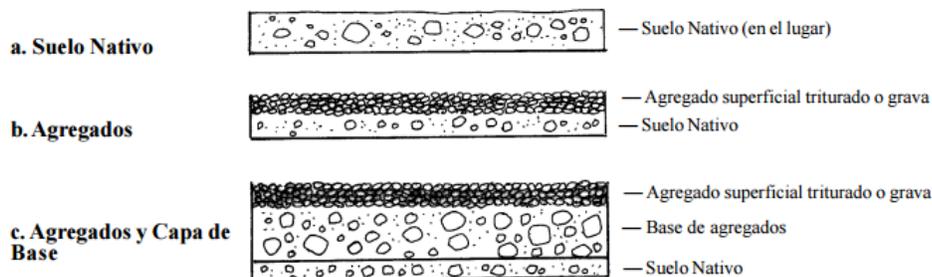
Estas características son relevantes durante la fase constructiva, donde pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla y controlar el grado de compactación (densidad) y vacíos de la capa. Estos a su vez pueden impactar las propiedades de la durabilidad de la capa, estabilidad (resistencia a la deformación) y el módulo (rigidez), las cuales son relevantes para el diseño y desempeño (Tutumluer, 2013).

Los métodos estándar como análisis granulométrico, sanidad en sulfato de sodio y abrasión en la Máquina Los Ángeles, son utilizados para evaluar la idoneidad de los materiales para su uso como material granular para carreteras, así también el índice de soporte de California (CBR) es comúnmente utilizada para caracterizar las capas granulares (Tutumluer, 2013).

## 2.2. Requerimientos para materiales a ser usados como superficie de ruedo expuestas

Keller y Sherar (2008), señalan que es recomendable, y en muchos casos necesario, agregar soporte adicional a la subrasante o mejorar la superficie natural del cuerpo del terraplén mediante materiales tales como grava, suelo rocoso grueso, agregados triturados, cantos rodados, bloques de concretos o algún tipo de recubrimiento bituminoso. La superficie de rodadura al mismo tiempo mejora el apoyo estructural y reduce la erosión de la superficie del camino. La selección del tipo de recubrimiento depende del volumen de tránsito, de los suelos locales, de lo materiales disponibles, de la facilidad de mantenimiento y, al final de cuentas, del costo.

Entre las opciones que existen para mejorar la capacidad estructural de la calzada, principalmente en zonas de suelos blandos o de sub-rasante pobres, está agregar material de mayor resistencia y calidad sobre el suelo blando, como puede ser una capa de grava o de agregado triturado. En la Figura 2.2. se muestra los casos más comunes de las capas en que se puede componer un camino en superficie de ruedo en lastre.

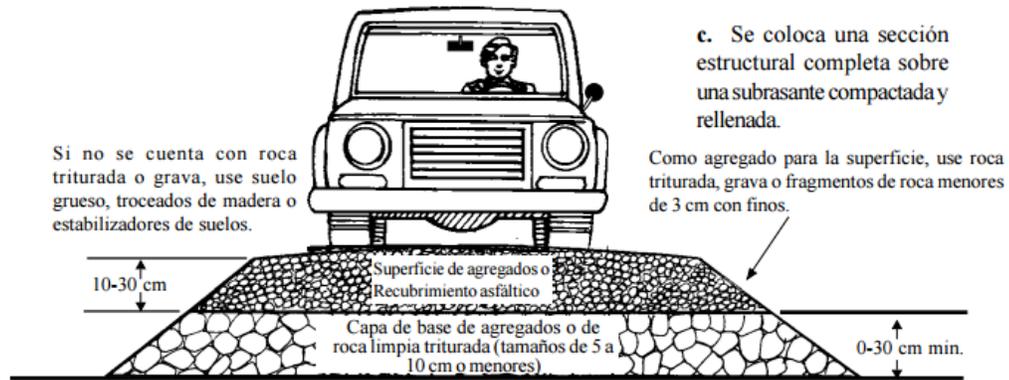


**Figura 2.2.** Tipos de revestimiento con agregados más comunes para caminos de lastre.

Fuente: Keller & Sherar, 2008.

La grava, la roca de canteras o el agregado triturado son los materiales más comunes para mejorar la superficie de rodadura. El agregado para la superficie de rodadura del camino debe cumplir con dos funciones básicas: 1) Debe tener la calidad suficientemente alta y el grosor suficiente para proporcionar

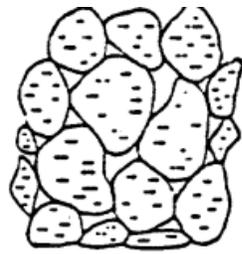
apoyo estructural para el tránsito, así como para evitar la formación de roderas, y 2) Debe estar bien graduado y mezclarse con suficiente cantidad de finos, de preferencia con cierta plasticidad, para evitar el desmoronamiento y la formación de ondulaciones. El espesor necesario del agregado varía típicamente entre 10 y 30 cm (Ver Figura 2.3.), dependiendo de la resistencia del suelo, del tránsito y del clima. (Keller & Sherar, 2008).



**Figura 2.3.** Paquete estructural más adecuado para caminos con superficie de rueda expuesta.

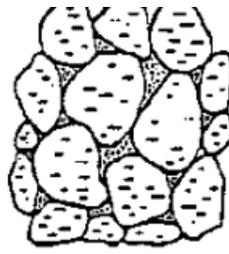
Fuente: Keller & Sherar, 2008.

En la Figura 2.4. se presentan algunas de las propiedades físicas y arreglos de diferentes mezclas de suelo y agregado; la primera columna muestra una mezcla sin finos (ningún material pasa la malla No. 200, con 0,075 mm de abertura), la segunda columna con un porcentaje ideal de finos (6 – 15%) y la tercera con exceso de finos (más de 15 a 30 %) (Keller & Sherar, 2008).



**Agregado sin Finos**

- Contacto entre granos
- Densidad variable
- Alta permeabilidad
- No susceptible al congelamiento
- Alta estabilidad estando confinado. Baja, si no lo está
- No es afectado por el agua
- Difícil de compactar
- Se desmorona fácilmente



**Agregado con Suficientes Finos para Máxima Densidad**

- Contacto entre granos, con mayor resistencia a la deformación
- Aumenta hasta alcanzar la densidad máxima
- Baja permeabilidad
- Susceptible al congelamiento
- Relativamente alta estabilidad en condiciones con y sin confinamiento
- No es muy afectado por las condiciones adversas de agua
- Moderadamente fácil de compactar



**Agregado con Alto Porcentaje de Finos (> 30 %)**

- Se destruye el contacto entre granos; el agregado "flota" dentro del suelo
- Disminución de la densidad
- Baja permeabilidad
- Susceptible al congelamiento
- Baja estabilidad y baja resistencia
- Lo afecta mucho el agua
- Fácil de compactar
- Se vuelve polvo fácilmente

**Figura 2.4.** Propiedades físicas de mezclas de agregados y suelos.

Fuente: Keller & Sherar, 2008.

Se tiene también que el porcentaje deseable de finos en un agregado puede resultar sensible al clima o medio ambiente del camino. En regiones semiáridas a desérticas, un porcentaje relativamente alto de finos, del orden del 15 al 20%, con plasticidad moderada, es lo más recomendable. En un ambiente "húmedo" muy lluvioso, tal como es el caso de las regiones tropicales, costeras, montañosas o selváticas, un porcentaje bajo de finos, comprendido entre 5 y 10% es lo recomendable para evitar la formación de roderas y para mantener estable a la superficie de rodadura del camino. Se tiene que idealmente el agregado para superficie de ruedo es duro, triturado o tamizado hasta alcanzar tamaños máximos de 5 cm y debe estar bien graduado para lograr densidad máxima. Además, puede contener entre el 5 y 15 % de ligante arcilloso para evitar desmoronamiento, y tiene un Índice de Plasticidad de entre 2 y 10. (Keller & Sherar, 2008).

También Keller & Sherar (2008) señalan que la compactación es usualmente el método más eficiente en cuanto a costo para mejorar la calidad (resistencia e impermeabilidad) de las capas de suelo de sub-rasante y para mejorar el comportamiento de la capa superficial de agregados. La compactación puede lograrse con el menor esfuerzo si el suelo o agregado está bien graduado y si está húmedo, debe estar lo más cerca del "Contenido Óptimo de Humedad", el cual puede ser determinado en pruebas como la prueba de compactación – Estándar o Modificada de Proctor.

### 2.2.1. Especificaciones y requerimientos nacionales para superficies de ruedo expuestas

A continuación, se presenta los parámetros que debe cumplir el material para que pueda ser usado como superficie de ruedo expuesta, conforme a los términos del Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR -2010, así como las especificaciones especiales de distintos proyectos de mantenimiento de la red vial en lastre.

En la mayoría de los proyectos recientes de mantenimiento de caminos de lastre, a nivel nacional se emplea un reglón de pago o actividad denominada: Suministro, colocación y compactación de subbase de agregados Graduación “Especial”, para superficie de ruedo expuesta, el cual se rige de acuerdo las Secciones No. 301 y 311 del CR-2010, el cual es el manual vigente para especificaciones técnicas en material vial. Para este material se deberá cumplir con la siguiente graduación especial conforme al Cuadro 2.1.:

**Cuadro 2.1.** Graduación especial para la especificación de capas de rodadura.

Abertura de la malla (mm)	Porcentaje por peso que pasa por los tamices de malla cuadrada de:
<b>38,1 mm</b>	100
<b>25,4 mm</b>	75 - 95
<b>4,75 mm (No.4)</b>	30 – 60
<b>0,425 mm (No. 40)</b>	10 – 35
<b>0,075 (No. 200)</b>	2 – 15

Nota: Si para cumplir con estas especificaciones se requiere la mezcla de dos o más materiales ésta debe hacerse en la fuente de materiales o sitio de acopio, salvo que se utilice un estabilizador de suelo tipo Caterpillar RM250 o similar para hacer la mezcla en sitio.

Fuente: Cartel de la Licitación Abreviada No. 2014LA-000008-0DI00, especificación especial adaptada del CR-2010.

Además, las especificaciones señalan que, en caso que el material disponible no tenga la plasticidad suficiente (4 – 10) que establece el CR-2010, se podrán utilizar materiales con Índice de plasticidad menor a 4, en cuyo caso el contratista deberá asegurar que el material granular retenido en el tamiz #4, tenga al menos un 50% de caras fracturadas.

A su vez el apartado 311 del CR 2010, rige lo referente a capas de rodadura, en ésta sección se definen las operaciones requeridas para la provisión, mezclado, colocación, perfiladura y compactación de capas granulares de rodadura, es decir cuya superficie no contemple un revestimiento. En cuanto a los materiales se establece, que en caso que la Administración no especifique otra cosa, debe haber una exigencia de material quebrado de 50% como mínimo, además el contenido de sales solubles no será mayor a 4%.

Conjuntamente, dicha especificación establece que si la capa de rodadura va a quedar expuesta por varios años (sin una capa asfáltica), el material debe cumplir en cuanto a propiedades mecánicas con un índice de soporte  $CBR \geq 30$ , así como los agregados gruesos, mayores a 5mm, deben ser partículas resistentes, durables, constituidas de fragmentos de roca y grava. Los materiales que se quiebran con los ciclos de humedad-sequedad, no deben ser usados. Por otro lado, se recomienda emplear granulometrías del TM-40c o TM-40b, en el Cuadro 2.2, se presenta las distintas granulometrías para capas de rodadura contenidas en el CR-2010

**Cuadro 2.2.** Bandas granulométricas para subbases, bases y capas de rodadura por porcentaje por peso la malla.

Abertura de la malla (mm)	TM-50a	TM-50b	TM-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
50,8	100	100	100	-	-	-	-
38,1	-	70 - 100	-	100	100	100	-
25,4	55 - 100	55 - 85	70 - 100	70 - 100	80 - 100	80 - 100	100
19,0	-	45 - 75	60 - 90	50 - 80	-	-	70 - 100
12,5	30 - 75	35 - 65	40 - 75	25 - 80	50 - 80	50 - 80	50 - 80
4,75 mm (No. 4)	20 - 65	25 - 55	30 - 60	10 - 30	35 - 65	35 - 65	35 - 65
2,5 (No. 8)	-	-	-	5 - 15	-	-	-
2,0 (No. 10)	10 - 50	15 - 45	15 - 45	-	25 - 50	25 - 50	25 - 50
0,425 mm (No. 40)	5 - 30	5 - 26	10 - 30	0 - 5	10 - 30	15 - 30	10 - 30
0,075 mm (No. 200)	0 - 20	0 - 10	0 - 15	0 - 3	5 - 15	5 - 20	0 - 15

Fuente: CR-2010, Sección 311.

Se debe tomar en consideración las especificaciones de la Licitación Pública No. 2014LN-000019-0CV00, la cual pretende abarcar el mantenimiento de la red vial nacional en lastre por los próximos 4 años. Se establece una especificación especial para la capa de rodadura para superficie de ruedos expuestas, la cual combina la granulometría de la sub-base de graduación “especial” del Cuadro 2.1. Además, modifica los parámetros de cumplimiento de material de la siguiente forma:

- No aplica lo requerido en la subsección 311.02 del CR 2010 en relación a las sales solubles.
- No aplica la subsección 703.05 relativa a materiales granulares.
- El material deberá cumplir con un índice de soporte (CBR) mayor o igual a 30.
- Los agregados gruesos mayores a 4,75  $\mu\text{m}$  deberán ser partículas resistentes, durables, constituidas por fragmentos de roca y grava.
- Índice de plasticidad entre 4 y 10.
- Al igual que el caso de la sub-base para capas de rodadura, si el material disponible no tenga la plasticidad suficiente que se estableció anteriormente, se podrán utilizar materiales con Índice de plasticidad menor a 4, en cuyo caso se deberá asegurar que el material granular retenido en el tamiz No. 4, tenga al menos un 50% de caras fracturadas (ASTM D 5821).

Por otro lado, la nueva especificación para mantenimiento de proyectos de lastre, incluye una especificación de material granular para que pueda ser empleado como material de base, es decir por debajo de la capa de rodadura (TM-40b), a continuación se detalla dicha especificación especial, la cual se denomina CR.301.03 Base de agregado triturado, graduación C. Dicho material consiste en partículas duras y durables o fragmentos de piedra triturada, escoria o grava triturada y no contendrá partículas elongadas, raíces y restos vegetales; debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Abrasión de los Ángeles, AASHTO T 96 (50 % máx.)
- Índice de durabilidad (agregado grueso), AASHTO T 210 (35 mín.)
- Índice de durabilidad (agregado fino), AASHTO T 210 (35 mín.)
- Caras fracturadas retenidas en malla No. 4, ASTM D 5821 (50 % mín.).
- Índice plástico entre 4 y 9.

- Límite líquido, ASSHTO T 89 (25 máx.).
- La granulometría de los agregados se obtendrá quebrando, tamizado y mezclando si es necesario. El agregado fino, material que pasa la malla 4,75 mm, consiste en arena natural o quebrada, y partículas minerales finas.
- Granulometría Graduación C a utilizar será la indicada en la tabla 703.06 (ver Cuadro 2.3) del CR-2010.
- CBR mayor o igual a 80.
- Compactación 95% de la prueba AASHTO T 180, método D
- Libre de materia orgánica, grumos o arcillas

**Cuadro 2.3.** Granulometrías para subbases y bases por porcentaje por peso la malla.

Abertura de la malla (mm)	A (Subbase)	B (Subbase)	C (Base)	D (Base)	E (Base)
63,0	100	-	-	-	-
50,8	97 - 100	100	100		
38,1	-	97 - 100	-		
25,4	65 – 79 (6)	-	80 – 100 (6)	100	
19,0	-	-	64 – 94 (6)	86 – 100 (6)	100
12,5	45 – 59 (7)	-	-	-	-
9,5	-	-	-	51 – 82 (6)	62 – 90 (6)
4,75 mm (No. 4)	28 – 42 (6)	40 – 60 (8)	40 -. 69 (6)	36 – 64 (6)	46 – 74 (7)
0,425 mm (No. 40)	9 – 17 (4)	-	31 – 54 (4)	12 – 26 (4)	12 – 26 (4)
0,075 mm (No. 200)	4 – 8 (3)	4 – 12 (4)	4 – 7 (3)	4 – 7 (3)	4 – 7 (3)

Nota: ( ) La tolerancia permisible ( $\pm$ ) se indica entre paréntesis.

Fuente: CR-2010, Sección 703.05.

En ocasiones dentro de los proyectos de mantenimiento de caminos de lastre, se emplea un material denominado de “préstamo” para realizar correcciones en la geometría del camino, para elevar la estructura de pavimento, para realizar rellenos donde existen deformaciones importantes, así como en sitio donde se requiere un material de calidad menor como superficie de ruedo expuesta. A continuación, se detalla los requerimientos que debe poseer este material de acuerdo con la especificación del apartado 204 del CR-2010 para que el mismo cumpla como material de préstamo selecto para capa superficial de la vía. En el Cuadro 2.4 se muestra las características mecánicas que debe cumplir este material.

**Cuadro 2.4.** Parámetros de cumplimiento para material selecto para capa de rodadura.

Descripción	Especificación
<b>Pasando la malla de 76,2 mm 100 %</b>	100%
<b>Valor de soporte CBR</b>	De acuerdo al cartel de licitación, pero no menor de 10
<b>Límite líquido, LL</b>	Máximo 35%
<b>Índice plástico, IP</b>	Máximo 10%
<b>Grado de compactación</b>	95% mínimo del AASHTO T-99

Fuente: CR-2010, Sección 704.08.

### 2.3. Propiedades y comportamiento esperado del RAP

Actualmente no existe una norma sobre el uso de RAP como agregado para ser usado como base, sub-base o como material para caminos de lastre, de hecho ésta se encuentra en desarrollo la norma ASTM WK26824: “Specifications for Recycled Asphalt Pavement Materials for Base or Sub-base for Highway or Airports” que al momento de redacción de este documento se encontraba en elaboración del borrador final, dicha norma pretende cubrir lo relacionado al reciclado del pavimento asfáltico, cuando se procesa correctamente y se compacta para lograr los estándares de densidad adecuados, a fin de proporcionar una adecuada estabilidad y soporte de cargas para el uso en carreteras o aeropuertos como material de bases y sub-bases (ASTM, 2016).

A continuación, se exponen las características y comportamientos esperados que exponen diversos autores para el uso del RAP como material granular para bases y sub-bases, y en ocasiones como superficie de ruedo expuesta.

El RAP está compuesto por concreto asfáltico triturado o producto del perfilado de pavimentos asfálticos, las partículas individuales deben estar dentro del rango granulométrico desde aquellas que componían el agregado grueso original del concreto asfáltico con algunos finos y minerales adheridos, a partículas compuestas principalmente de la matriz de concreto asfáltico, aglomeraciones de agregado fino, finos minerales y cemento asfáltico. La mezcla de las partículas presentes en el RAP dependerá de la naturaleza del concreto asfáltico con que fue producido, es decir pueden ser mezclas de granulometría “abierta” o densamente graduada. La graduación del material es comparable con el agregado virgen triturado, sin embargo, dependiendo del procedimiento de perfilado y apilamiento, puede contener un mayor porcentaje de finos, con un rango típico bastante amplio (Chesner, Collins & Mackay, 1998).

Las partículas del agregado grueso original se presumen que son fuertes y con buena resistencia a la deformación, mientras que las aglomeraciones del agregado fino y cemento asfáltico pueden tender a ser quebradizas o maleables dependiendo de la condición del asfalto (oxidación) y la temperatura (Hoppe et al., 2015).

Bennert et al. (2000) reportaron que los especímenes compuestos por 100% de RAP poseen una mayor rigidez y módulo resiliente, así como una resistencia al cortante inferior que los especímenes de agregado densamente graduado de base virgen. A pesar de que el RAP es más rígido que la base virgen de graduación densa, el RAP al 100% acumula una gran cantidad de deformación permanente. Diversos estudios han demostrado que para el RAP los módulos resilientes relativamente altos vienen acompañados de grandes deformaciones permanentes, este contraste puede ser atribuido a la ruptura progresiva del ligante asfáltico ante la aplicación de carga. Además, Dong y Huang (2014) indicaron también que los materiales compuestos por RAP tienden a poseer módulos resilientes altos y deformaciones permanentes grandes cuando son ensayados como agregados granulares. Asimismo, los resultados de pruebas de fluencia triaxial demostraron que la mezcla de RAP suelto para base puede poseer propiedades viscosas, así como dependencia de la temperatura. Locander (2009) en su investigación reportó que la resistencia al cortante disminuye cuando se aumenta el contenido de RAP en una mezcla. Mientras que Taha et al. (1999) indicó que la presencia de RAP en una mezcla resulta en una menor capacidad de soporte del material comparado contra agregados vírgenes.

Existe un estudio elaborado, Ayan (2011), acerca del uso de agregados reciclados en subbases, donde se reportó un decrecimiento de los valores de CBR cuando se incrementaba el contenido de RAP. Estos resultados fueron atribuidos al deslizamiento entre sí de los agregados cubiertos de bitumen cuando son sometidos a la aplicación de una carga. El desempeño más satisfactorio se obtuvo con una mezcla 50/50 de RAP con agregado producto de concreto reciclado (RCA). Además, los mejores resultados se obtuvieron

con contenidos de humedad entre el 59% y el 78% del valor óptimo. Sin embargo, los resultados del CBR, fueron por debajo del requerido para el diseño, en este caso, un valor de 80. Por otro lado, un estudio elaborado por Arulrajah et al. (2013) sobre las propiedades geotécnicas y geoambientales del material de desecho de construcciones y demoliciones, indicó que el RAP por sí solo no cumple con el CBR requerido para ser usado como material de subbase.

Existen otros estudios que recomiendan mezclar RAP con agregados de alta calidad para poder obtener los requerimientos de resistencia y deformación. Autores como Bennert y Maher (2005) confirmaron una tendencia generalizada de mayores deformaciones permanentes, así como CBR más bajos, cuando el contenido de RAP aumentaba en una mezcla granular, para lo cual recomendaron que una mezcla utilizando RAP no exceda el 50% por peso del agregado virgen.

Otros autores como Cosentino et al. (2012) informaron que todas las mezclas de material granular con RAP mostraron una cierta cantidad de fluencia. El estudio recomendó que el RAP “puro” sea mezclado con al menos un 75% de agregado aprobado, si este es requerido como base para proyectos viales. Además, como alternativa, dichas mezcla pueden dosificarse de forma que el ligante asfáltico no exceda el 1,5% por peso de la mezcla total. Por otro lado, Bleakley and Cosentino (2013) concluyeron que RAP mezclado con agregado calizo sin que se agregue un agente estabilizante, pueden alcanzar los requerimientos de resistencia y fluencia para ser usado como capa base, si este era mezclado una proporción de 25% de RAP y 75% de agregado calizo como máximo. Mientras que las mezclas con un máximo de 50% de RAP puede que sea necesario el uso de un agente estabilizante como el cemento.

De los estudios realizados por McGarrah (2007) donde examinó las propiedades de RAP para su uso como capa de base, logró determinar que 100% RAP no constituye un material adecuado como capa base y no debe permitirse su uso para tal fin. Cuanto más contenido de RAP se tiene en una mezcla, menor va a ser su resistencia al esfuerzo cortante. En este caso McGarrah recomendó limitarse a incluir un máximo de 25% de RAP mezclado con agregado virgen, en una planta mezcladora. Mientras que los resultados de mezclado realizado en campo no obtuvieron resultados satisfactorios, dado que la capa base se separaba. Mientras que Dong y Huang (2014) en su estudio señalaron que ninguna capa de base con 100% de RAP debe ser colocada por debajo de una carpeta asfáltica, además Shaefer et al. (2008) concluyeron que contenidos de RAP entre el 20% al 50% son usados en la construcción actual. Además, Ooi (2010) concluyó que lo más prudente es limitarse a un contenido no mayor al 50%, siempre y cuando se cumplan con los mismos requerimientos y especificaciones de un agregado virgen para el mismo fin, además de cumplir con valor mínimo de CBR entre 80 y 60 para base y subbase respectivamente, esto a fin de poder obtener desempeño en términos de resultados de CBR.

Resultados positivos se obtuvieron, en colocaciones realizadas en campo en el Estado de Florida con 100% RAP como agregado para caminos temporales (Sayed et al, 2011). A pesar de que el RAP puede ser utilizado en una amplia gama de distribuciones granulométricas, las graduaciones densas demostraron tener el mejor desempeño. Con relación al ligante asfáltico presente en el RAP, debe tomarse en consideración que éste con el tiempo comenzará a oxidarse, esto resulta en un endurecimiento por edad, donde las propiedades químicas pueden influenciar la rigidez y resistencia al cortante de la capa, y esto puede potenciar su resistencia al ahuellamiento y agrietamiento por fatiga (Roberts et al., 1996).

Otro factor a tomar en consideración es que las partículas maleables y quebradizas pueden causar deformaciones por post-compactación de las capas de base o subbase, si no se consigue la densificación suficiente durante la construcción. Si bien es cierto, el método de construcción es muy similar al convencional usado para materiales granulares, la verificación en campo del contenido de humedad y densidad mediante densímetros nucleares puede ser afectado por la presencia de iones de hidrogeno en el material de RAP, y por tanto se requiere de factores de corrección o emplear otro tipo de métodos para complementar el control de calidad. (Hoppe et al, 2015).

La presencia de asfalto reduce también la cantidad de agua requerida para alcanzar el grado de compactación de la mezcla de RAP, debido al recubrimiento de las partículas. Este factor debe ser considerado cuando se determina el contenido de humedad para la compactación. Además, se pudo observar que mientras la fracción de RAP aumenta en una mezcla, el contenido de humedad necesario para alcanzar la compactación disminuye (Locander, 2009).

Con relación a las propiedades drenantes, el Edil et al. (2012) señalan que el RAP tiende a comportarse como un material altamente hidrofóbico, y por ende comparado a otros materiales reciclados o agregados vírgenes posee una mejor capacidad para drenar agua. Como resultado de ello, es esperado que pueda tener un mejor comportamiento de drenaje superficial si se le compara contra otros materiales hidrófilos con el mismo tamaño de poro.

En un estudio diseñado por Mokwa y Pebbles (2005) para evaluar la idoneidad de usar RAP como un aditivo para agregados triturados o suelos granulares, se concluyó que el uso de mezclas con RAP para uso como material de base o subbase era factible. La permeabilidad de las mezclas con RAP incrementó conforme el porcentaje del asfalto perfilado era aumentado, esto indicaba que se mejoraba las propiedades de drenaje.

Por otro lado, las técnicas de estabilización de caminos para materiales granulares pueden ser aplicadas al uso de RAP, la selección va a depender de las características del material producto del perfilado de pavimentos asfálticos y el uso específico que se le pretende dar. Por lo que los métodos mecánicos (compactación, geotextiles), químicos y cementicos (incluyendo cementos hidráulicos, puzolánicos y bituminosos) son potencialmente viables (Hoppe et al, 2015).

### **3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.**

A continuación, se presenta el proceso metodológico definido para el desarrollo del proyecto.

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.**

Debido a que el proyecto se basa en una investigación fundamentada en revisión literaria y ensayos de laboratorio para obtener la variación y propiedades mecánicas del reciclado de pavimentos asfálticos en su uso en caminos de lastre, y poder comprobar si el material es apto como sustituto al lastre convencional, es que el proyecto se considera de enfoque mixto, cuantitativo en cuanto a recolección de información y los resultados de laboratorio, sin embargo la investigación literaria de casos implica un componente cualitativo.

Debido que el proyecto aporta una temática poco estudiada desde el punto de vista técnico (únicamente se ha manejado de forma empírica), es que se puede considerar de alcance exploratorio, por cuanto el análisis del RAP con ensayos de laboratorio no se ha realizado anteriormente en el país, este proyecto pretende facilitar el abordaje de esta temática de forma más específica en futuros proyectos de investigación. Además, se considera que al estar el proyecto fundamentado en caracterizar un material para definir si aplica su uso como sustituto de otro material, es que se puede considerar que la investigación también tiene un componente de carácter descriptivo debido a que “busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Describe tendencias de un grupo o población” (Hernández Sampieri et al, 2010).

#### **3.2. FUENTES Y SUJETOS DE INFORMACIÓN.**

##### **3.2.1.Fuentes.**

Algunas fuentes utilizadas se describen a continuación:

##### **3.2.1.1. Primarias.**

Las fuentes primarias de información utilizadas para este proyecto se basan en manuales y guías de diseño y mantenimiento de caminos de lastre del Departamentos de Transporte de Estados Unidos, así como de la ASTM, AASHTO y ASCE, Manual de Construcción de Carreteras CR-2010, Manual de Diseño del SIECA, además de información aportada por los manuales y registro del MOPT y sobre todo de informes y artículos de proyectos similares realizados en otros países.

##### **3.2.1.2. Secundarias.**

Las fuentes consisten principalmente en la consulta de resúmenes de artículos científicos, debido a la dificultad para obtener los documentos completos.

##### **3.2.1.3. Terciarias.**

Como fuentes terciarias se utilizaron algunas bases de datos en red y sistemas bibliotecarios nacionales e internacionales como Google Académico, Transportation Research Board y Scielo.

### **3.2.2.Sujetos de información.**

Los sujetos de información fueron los proyectos de conservación vial, cuya fuente fue proporcionada por ingenieros de proyecto a quienes se les consultó sobre experiencias con la utilización del RAP en caminos de lastre de forma empírica.

### **3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.**

En cuanto a las técnicas e instrumentos de investigación estos se describen en seguida:

#### **3.3.1.Consulta personal.**

Se basa en realizar consultas puntuales mediante entrevista directa o telefónica a personas que tienen información y/o conocimiento clave para el análisis de una situación determinada.

#### **3.3.2.Revisión documental.**

Consiste en identificar palabras clave en documentos donde se espera obtener información relevante para el desarrollo del proyecto.

#### **3.3.3.Definición de los sitios de muestreo**

Se identifica por medio del personal de la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI que ésta destacado en un proyecto, las posibles fuentes de material granular virgen (MGV), así como los sitios donde se está apilando material producto del perfilado de pavimentos asfálticos (RAP), así como la procedencia de dichas fuentes. Se realiza la coordinación con el laboratorio y los encargados de los planteles y tajos de donde se extraerá material para muestreo, esto de conformidad con los apilamientos a los cuales se tuvo acceso.

#### **3.3.4.Ensayos de laboratorio.**

Corresponde a pruebas realizadas mediante un laboratorio acreditado por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) al material de estudio con el fin de caracterizar el mismo, las pruebas específicas a realizar se describen a continuación y corresponden a los ensayos requeridos para aceptación de capas de rodadura, así como capas de base y sub-base de las secciones 301 y 311 del CR-2010. Para efectos de la toma de muestras de las diversas fuentes, se emplearon los ensayos ASTM D75-03 para muestreo de agregados, así como AASHTO T248-98 (2003) y ASTM C 702-98 (2003) para preparación y reducción de muestras por cuarteo.

##### **3.3.4.1. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.**

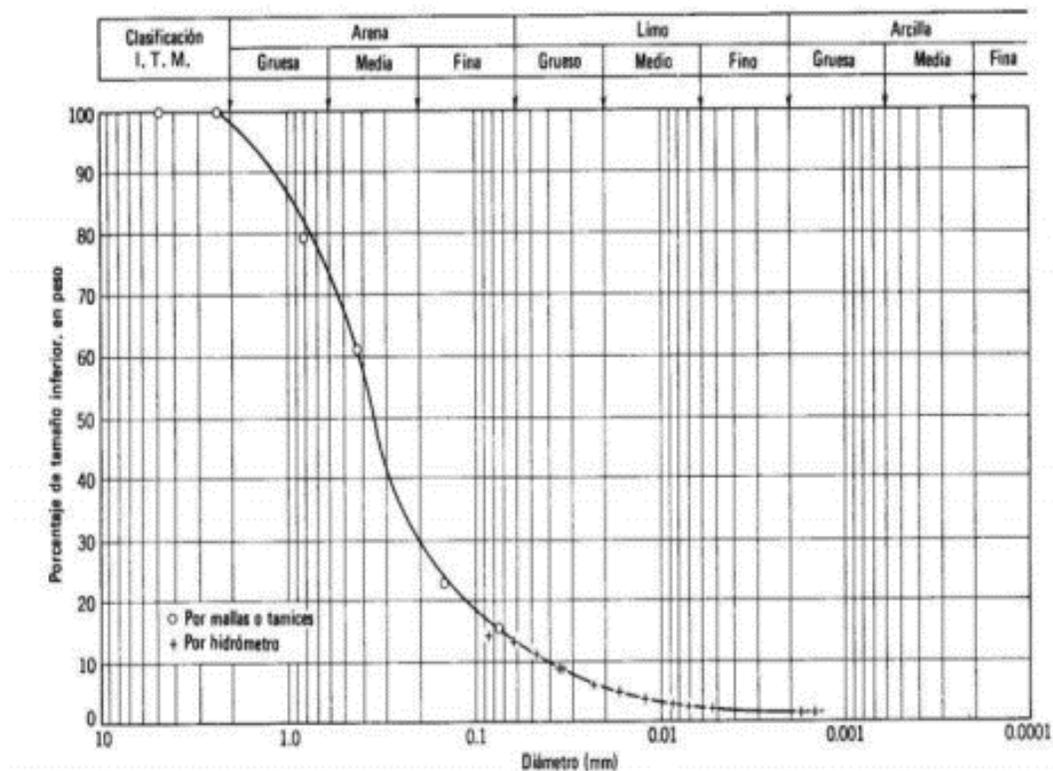
Para la obtención del índice plástico y límite líquido se emplean los ensayos con las normas de referencia AASHTO T 89, AASHTO T 90 y ASTM 4318, el límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado plástico y el estado líquido, por tanto, el límite líquido es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico.

Mientras que la determinación en el laboratorio del límite plástico de un suelo además del líquido permite calcular el cálculo del índice de plasticidad (IP). Se denomina límite plástico (LP) a la humedad más baja con la que pueden formarse barritas de suelo de unos 3,2 mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa (vidrio esmerilado), sin que dichas barritas se desmoronen. (UNI, 2006).

### 3.3.4.2. Análisis granulométrico.

La finalidad de este ensayo es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de agregados. Su importancia se debe a que gran parte de los criterios de aceptación de agregados para ser utilizados en bases o sub-bases de carreteras, presas de tierra o diques, drenajes, etc., dependen de este análisis. Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente, esto conforme a las normativas AASHTO T27/11 y ASTM 117/136.

La distribución granulométrica se puede utilizar para calcular las relaciones entre las diversas mezclas de agregados, para así comprobar el cumplimiento de tales mezclas, y a fin de predecir las tendencias durante la producción, mediante el trazado de curvas de graduación de forma gráfica. En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de la curva granulométrica, ésta se emplea para delimitar los rangos frontera entre tamices que deben cumplir los materiales para las diferentes especificaciones de aceptación. (UNI, 2006).



**Figura 3.1.** Ejemplo de una curva producto de un ensayo de análisis granulométrico.  
 Fuente: Primer Taller de Mecánica de Suelos, Universidad Centroamericana, 1996.

### 3.3.4.3. Densidad máxima y humedad óptima.

La prueba de relación humedad-densidad seca también se llama prueba “Proctor”, y su norma de referencia es la AASHTO T180. Esta prueba determina la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca de suelos compactados en un molde, y consiste en que una cantidad de suelo, o agregados y mezcla de agregados, suelos u otros, se prepara a un determinado contenido de humedad y se compacta en un molde estándar utilizando un pisón manual o mecánico. La masa húmeda de la muestra compactada se divide por el volumen del molde para determinar la densidad húmeda. La comprobación del contenido de humedad en el material de la masa compactada es utilizada para determinar la densidad seca de este material (UNI, 2006). Para efectos de muestreo de RAP y mezclas de RAP con MGV se emplea el ensayo de “Proctor Modificado” por cuanto la prueba “Estándar” no provee de la energía de compactación necesaria para estos agregados. En la Figura 3.2. se muestra la parte del proceso con el pisón manual para determinar la densidad máxima y la humedad óptima.



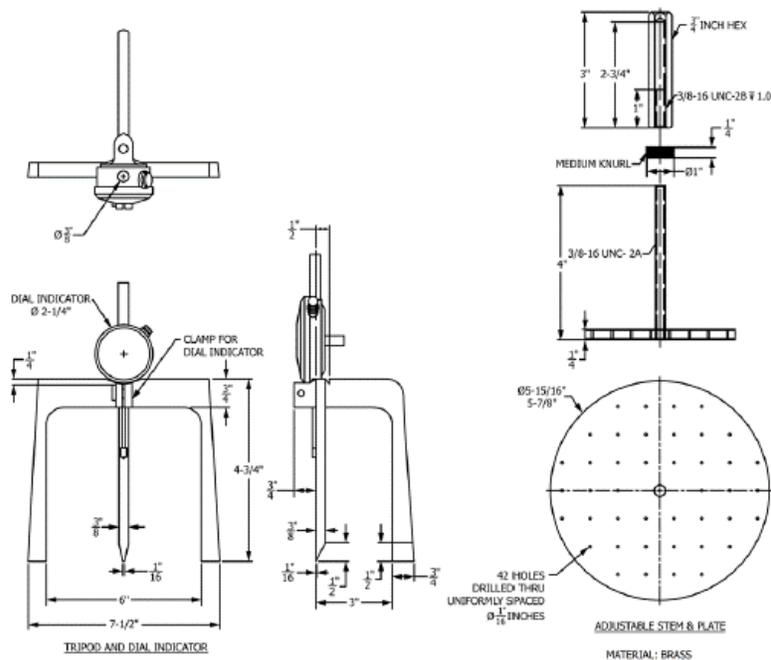
**Figura 3.2.** Muestra del proceso de compactación de la muestra para la Prueba de Proctor Modificado.  
Fuente: Camacho, P. 2016.

### 3.3.4.4. Índice de soporte de California (CBR)

Este ensayo se realiza para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado valor de la relación de soporte, el cual se conoce comúnmente como CBR (“*California Bearing Ratio*” por sus siglas en inglés). Este ensayo, se encuentra normado por la AASHTO T-193 y ASTM D1883, y se realiza normalmente sobre suelo o agregado preparado en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad; pero también puede implementarse en forma análoga sobre muestras inalteradas

tomadas del terreno. Este índice se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante y de las capas de base y subbase.

La finalidad de este ensayo es determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables. Es un método desarrollado por la división de carreteras del estado de California de los Estados Unidos de América y sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para subrasante, subbase y base de pavimentos. El ensayo mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un porcentaje de la relación de soporte con respecto a un material patrón (100%). El porcentaje de CBR, está definido como la fuerza requerida para que un pistón normalizado penetre a una profundidad determinada, expresada en porcentaje de fuerza necesaria para que el pistón penetre a esa misma profundidad y con igual velocidad, en una probeta normalizada constituida por una muestra patrón de material triturado (UNI, 2006). En la Figura 3.3 se muestra parte del equipo empleado para la medición de la penetración.

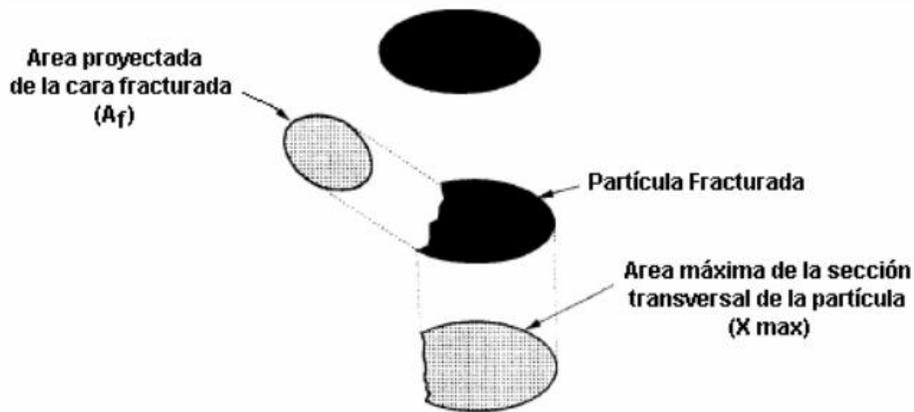


**Figura 3.3.** Muestra del aparato para medición de la expansión en la prueba de CBR.

Fuente: ASTM D1883, 2016.

### 3.3.4.5. Caras fracturadas.

La norma ASTM D 5821 describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en masa o por conteo, de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos. Una cara será considerada fracturada, solo si tiene un área proyectada al menos tan grande como un cuarto de la máxima área proyectada (máxima área de la sección transversal) de la partícula y la cara tiene bordes cortantes y bien definidos (ver Figura 3.4) (UNI, 2006).



Nota: Una cara será considerada “Una cara fracturada” únicamente si tiene:  $A_f = 0.25X_{max}$

**Figura 3.4.** Esquema de una partícula con cara fracturada.

Fuente: Invías, 2007.

Algunas especificaciones de materiales contienen requisitos relacionados a un porcentaje de partículas fracturadas para la porción gruesa. Uno de los propósitos de este requisito es incrementar la resistencia al corte incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregado ligadas o no ligadas. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y proporcionar mayor fricción y textura para agregados usados en capas superficiales de pavimento. Algunas especificaciones difieren en el número de caras fracturadas requeridas en una partícula fracturada, y también difieren en cual criterio utilizar, si el porcentaje en peso o el porcentaje por conteo de partículas. (Invías, 2007).

#### 3.3.4.6. Abrasión de Los Ángeles.

Este ensayo en la máquina de los Ángeles es ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa de la competencia para la resistencia al desgaste o tenacidad de varias fuentes de agregados que tienen una composición mineral similar, y se encuentra regido por la norma AASHTO T-96 y ASTM C 131. Debe tomarse en consideración que los resultados no permiten hacer automáticamente comparaciones válidas entre fuentes de agregados de diferente origen, composición y estructura. El propósito de este ensayo es analizar el desgaste del agregado grueso menor a 38,1 mm, resultante de la combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y trituración en un tambor rotatorio de acero, el cual contiene un número especificado de esferas de acero; el número de esferas va a variar dependiendo de la graduación de la muestra. El proceso consiste en que cuando el tambor rota, una pestaña recoge la muestra y las esferas de acero, arrastrándolas consigo hasta que ellas caen al lado opuesto del tambor, creando un efecto de impacto y trituración. El material es entonces arrastrado dentro del tambor con una acción abrasiva y trituradora hasta que golpea de nuevo la pestaña y el ciclo se repite. Después del número prescrito de revoluciones, el contenido es removido del tambor y la porción de agregado es tamizada para medir el desgaste como pérdida en porcentaje de masa retenida en la malla No. 12 (UNI, 2006).

#### 3.3.4.7. Índice de durabilidad (grueso y fino).

La norma de referencia para índice de durabilidad es la AASHTO T-210, este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, fineza y el carácter del material arcilloso que puede ser generado en un agregado cuando se somete a degradación mecánica. En este caso, los resultados han sido correlacionados con el desempeño de los agregados en varias aplicaciones de la construcción, incluyendo:

agregados para la base, el material permeable para el fondo de rellenos, agregado fino para concreto y el revestimiento para la protección de taludes de roca. Aunque la aplicación de este método ha sido limitada a agregados para usos específicos en la construcción, la aplicación de este método al control de calidad de agregados utilizados en otras áreas de la construcción se puede extender a otras áreas, tal es el caso de agregados para uso en mezclas bituminosas para pavimentos, agregados grueso para uso en el concreto de cemento Portland y para agregado que se utiliza como lastre en las vías de ferrocarril. Esto debido a que su importancia radica en la definición de un índice de durabilidad mínimo, este índice limita donde un agregado determinado no debe emplearse debido a que puede resultar en la generación de partículas finas de arcilla para varios tipos de aplicaciones en la construcción (AASHTO, 2010).

#### **3.3.4.8. Pérdida de sanidad en sulfato de sodio (grueso y fino).**

Este método es un procedimiento para hacer un estimativo de la idoneidad, en términos de resistencia a la degradación por intemperismo o meteorización de los agregados, la norma de referencia para este ensayo en la AASHTO T 104. Para este ensayo los valores obtenidos pueden ser comparados con especificaciones que se han diseñado para indicar la posibilidad de usar el agregado propuesto, este requisito es más rígido en función de la severidad de uso de la capa de agregados. Dado que la precisión de este método es baja, el rechazo de los agregados que no cumplan las especificaciones pertinentes, no tiende a darse sin confirmarse con los resultados de otros ensayos mejor relacionados con el uso que se le va a dar al material. Los valores de porcentaje de pérdidas admisibles resultantes de aplicar este método generalmente difieren para agregados finos y agregados gruesos. Los resultados del ensayo son, generalmente, más severos cuando se utiliza sulfato de magnesio; por lo tanto, los porcentajes de pérdida permitidos cuando se usa sulfato de magnesio son normalmente mayores que los permitidos cuando se usa sulfato de sodio. Mediante este método se puede obtener una información útil para calificar la calidad de los agregados que han de estar sometidos a eventos atmosféricos (Invías, 2007).

#### **3.3.5. Matriz de ensayos**

Una matriz corresponde a un cuadro donde se exponen elementos para ser cruzados con sus principales características; en este caso se utiliza una matriz para representar los ensayos de laboratorio a realizar a cada una de las muestras a caracterizar indicando los requerimientos aplicables. También se indica la cantidad y procedencia de las muestras. (ver Cuadro 3.1).

**Cuadro 3.1** Muestra de la matriz para evaluación de propiedades de los materiales por uso.

Ensayo	Norma referencia	Parámetro	Frecuencia de Ensayo Solicitada para proyecto específico	Base CR - 2010, Sección 301, Graduación C	Subbase CR -2010, Sección 301, Graduación A	Subbase CR -2010, Sección 301, Graduación B	CR 311.03 Capa granular de rodadura graduación TM-40b modificada	CR.204.07 Material selecto para la capa superficial de la vía	
<b>LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE PLÁSTICO</b>	AASHTO T 89/90 ASTM 4318	Límite Líquido, LL(%)	Ensayos por triplicado por tipo y fuente de material	máx.35	máx.35	máx.35	máx.35	máx.35	
		Índice Plástico, IP (%)		Entre 4 y 9	Entre 4 y 10	Entre 4 y 10	Entre 4 y 10	Max. 10	
<b>ANÁLISIS GRANULOMETRICO</b>	AASHTO T 27/11 ASTM 117/136	50,8 mm (2")		100	97 - 100	100	-	-	
		38,1 mm (1 1/2")		-	-	97 - 100	100	-	
		25,4 mm (1")		80 - 100	65 - 79	-	75 - 95	70 - 100	
		19,0 mm (3/4 ")		64 - 94	-	-	-	-	
		12,5 mm (1/2")		-	45 - 59	-	-	-	
		9,5 mm (3/8")		-	-	-	-	-	
		4,75 mm (No. 4)		40 - 69	28 - 42	40 - 60	30 - 60	30 - 70	
		0,425 mm (No. 40)		31 - 54	9 - 17	-	10 - 35	-	
		0,075 mm (No. 200)	4 - 7	4 - 8	4 - 12	2 - 15	0 - 5		
<b>DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD OPTIMA</b>	AASHTO T180	Proctor Modificado	Humedad óptima (%)					Densidad máxima (kg/m3)	
<b>ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)</b>	AASHTO T-193 ASTM D1883	CBR (%)	80 mín.	30 mín.	30 mín.	30 mín.	10 mín.		
<b>CARAS FRACTURADAS</b>	ASTM D5821	Caras Fracturadas	Se debe cumplir con lo estipulado (50% Retenida en malla No. 4 tenga una o más cara fracturada)					NA	
<b>ABRASIÓN DE LOS ANGELES</b>	AASHTO T-96 ASTM C 131	Abrasión	El material al ser sometido al ensayo de abrasión de Los Ángeles, deberá presentar desgaste menor del 50%					NA	
<b>ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T210	Finos	35 % mín.					NA	
		Gruesos						NA	
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T 104	Finos	12 % máx.					NA	
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>		Gruesos						NA	
NOTA: De acuerdo al CR 2010, en caso que el material disponible no tenga la plasticidad suficiente que se estableció anteriormente, se podrán utilizar materiales con Índice de plasticidad menor a 4, en cuyo caso el contratista deberá asegurar que el material granular retenido en el tamiz No. 4, tenga al menos un 50% de caras fracturadas (ASTM D 5821).									

Fuente: Camacho, P.

### **3.3.6. Comunicación personal.**

Se realizaron consultas a los ingenieros involucrados en proyectos de conservación vial, sobre experiencias con la utilización del RAP en caminos de lastre de forma empírica.

### **3.3.7. Análisis de contenido**

Es un método de investigación, empleado para investigaciones cuantitativas, cualitativas y mixtas para hacer inferencias válidas y confiables de datos con respecto a su contexto. Este método permite analizar la información obtenida en la revisión documental en conjunto con los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados.

### **3.3.8. Análisis estadístico.**

Se realizó un análisis estadístico basado en estadística descriptiva, eso se realizó mediante hojas de cálculo de la herramienta “*Microsoft Excel*”, para así representar resultados versus estándares técnicos, también se utilizó la una prueba de hipótesis con t-student, un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba “Tukey”, para un 95% de confianza de los resultados, este nivel de confianza se emplea puesto se tienen pruebas por triplicado, donde se revisa el cumplimiento por precisión de los resultados basado en las normas de referencia, con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre las medias de los datos obtenidos y en caso afirmativo, tratar de determinar en qué punto se dan esas diferencias.

Se busca determinar si más de dos grupos difieren entre sí en cuanto a sus medias y varianzas. La prueba de hipótesis con t-student se usa para dos grupos y el análisis de varianza unidireccional se usa para tres, cuatro o más grupos. Este consiste en plantear una hipótesis de investigación donde se propone que los grupos difieren significativamente entre sí y la hipótesis nula propone que esos grupos no difieren significativamente. Mientras que la Prueba de “*Tukey*” se utiliza en combinación con ANOVA a fin de determinar dentro de los grupos de análisis donde se encuentran las diferencias.

Es importante señalar que el análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales, un ANOVA evalúa la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. Se establece la hipótesis nula que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

## **3.4. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.**

El procesamiento y análisis que se realizará con la información y datos obtenidos se especifican por objetivo de cumplimiento.

### **3.4.1. Procesamiento y análisis de datos en el objetivo 1.**

Para determinar las características físicas y mecánicas del RAP y el material virgen a utilizar se realizarán pruebas de laboratorio, siguiendo los estándares nacionales de calidad para el lastre y las bases, esto conforme a las especificaciones técnicas del Manual CR -2010.

El ensayo se realizará de acuerdo con la cantidad de observaciones del Cuadro 3.2.:

**Cuadro 3.2.** Número de muestras para RAP y material granular virgen (MGV).

Proyecto	Cantidad de muestras de 50 kg aprox.	Material
<b>Ruta Travesía 30703</b>	6	RAP
	3	Material granular virgen con plasticidad
	3	Material granular virgen sin plasticidad

Fuente: Camacho, P.

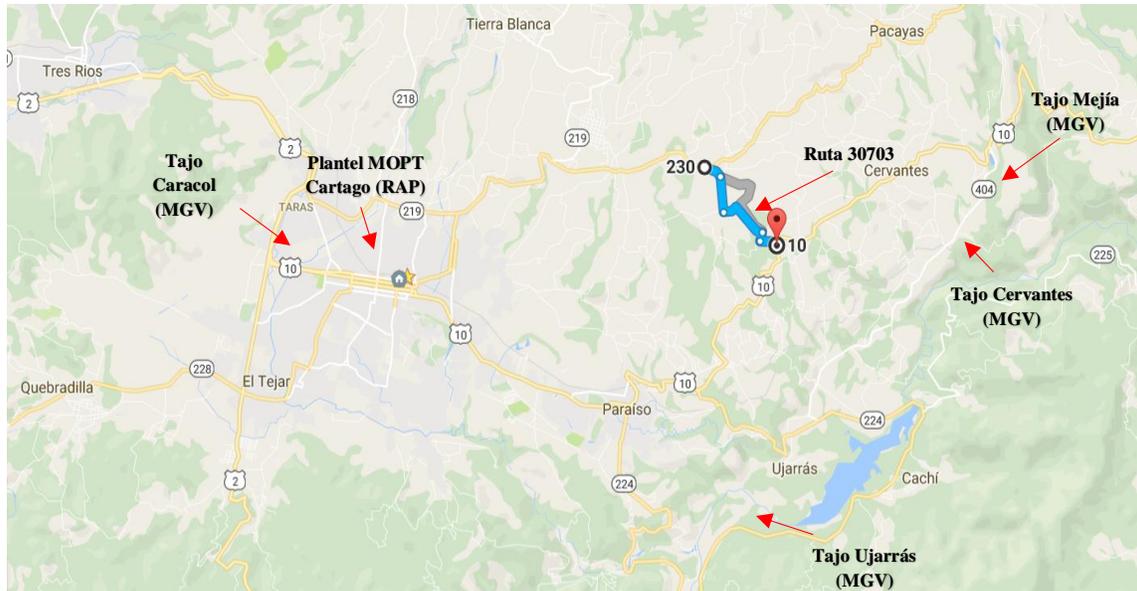
Con la información obtenida se discutirá sobre las características del RAP y el material granular virgen.

### **3.4.2. Procesamiento y análisis de datos en el objetivo 2.**

Con el fin de comprobar si el RAP puede ser utilizado como sustituto del material granular virgen en bases y sub-bases, se utilizaron gráficos de barra y de dispersión con el fin de visualizar el cumplimiento de los resultados obtenidos por el material RAP (de dos fuentes diferentes), con los estándares correspondientes, para poder concluir si el RAP es factible, por sí solo, como sustituto del material virgen. Además, se utilizó la prueba estadística *t* de “Student” para 95% de confianza, donde la hipótesis nula consiste en que no existen diferencias significativas entre las medias de las muestras obtenidas de ambas fuentes de RAP, mientras la hipótesis alternativa indica que existen diferencias significativas entre las medias de las muestras obtenidas de ambas fuentes de RAP.

Las fuentes de material de RAP y de MGV se obtuvieron en su mayoría de fuentes cercanas a la ruta de travesía 30703, puesto existía la posibilidad de realizar pruebas de laboratorio para caracterizar distintos materiales para ser colocados en dicha ruta, en el caso de los Tajos Mejía y Ujarrás, el material granular virgen (MGV) proviene de río, mientras que los Tajos Caracol y Cervantes son tajos de Cantera, los tajos Mejía, Cervantes y Caracol, producen por lo general agregado para subbases y material de préstamo, especialmente con agregado grueso que en ocasiones supera 76,2 mm, mientras que el Tajo Ujarrás produce agregados que han sido fraccionados y tamizados, por lo que produce agregado para bases y subbases principalmente.

Mientras que el RAP apilado de en los planteles de MOPT de Dota y Cartago proviene del perfilado de rutas nacionales como la Ruta 2 Interamericana Sur, y las Rutas Nacionales No. 251 y No. 202 en la zona de Tres Ríos, respectivamente. Debe considerarse que las fuentes cercanas se escogieron por cuanto han sido habituales para el mantenimiento de las rutas nacionales en dicha zona, así como la propia disponibilidad al momento de realizar los muestreos.



**Figura 3.5.** Mapa de ubicación de fuentes de material cercanos a la ruta de travesía 30703.  
Fuente: Camacho, P. Adaptación de Google Maps.

### 3.4.3. Procesamiento y análisis de datos en el objetivo 3.

Teniendo como objetivo realizar ensayos de laboratorio físicos y mecánicos sobre especímenes compuestos por diferentes porcentajes de RAP, para definir una proporción RAP/MGV, que permita alcanzar un desempeño adecuado como superficie de rueda en pavimentos expuestos, es que se procedió a realizar pruebas de laboratorio en mezclas de diferentes proporciones de RAP y material granular virgen, conforme se muestra en el Cuadro 3.3.

**Cuadro 3.3.** Proporción a evaluar y procedencia de los materiales

Combinaciones por tipo de fuente	Proporción a analizar (MGV/RAP)	Punto de Muestreo MGV	Punto de Muestreo RAP
2	0/100	Del apilamiento en tajo	Del apilamiento en plantel
	25/75		
	50/50		
	75/25		
	100/0		

Fuente: Camacho, P.

Sin embargo, antes de este punto se analizaron las características de los materiales granulares vírgenes utilizados, con el fin de tener una referencia en las mezclas a analizar, esto sería una proporción de 100 MGV y 0 RAP. Además, se utilizó la prueba estadística *t* donde la hipótesis nula consiste en que no existen diferencias significativas entre las medias de las muestras obtenidas de ambas fuentes de RAP, mientras la hipótesis alternativa indica que existen diferencias significativas entre las medias de las muestras obtenidas de ambas fuentes de RAP, a fin de verificar la uniformidad del RAP de una sola fuente, así como la variación presente en muestras de RAP de diferente fuente.

Los resultados obtenidos fueron representados por medio de gráficos con el fin de visualizar el cumplimiento de las diferentes mezclas con los estándares correspondientes, además, se utilizó la prueba estadística *ANOVA* donde la hipótesis nula consiste en que no existen diferencias significativas entre las medias de las muestras obtenidas de las diferentes mezclas, mientras la hipótesis alternativa indica que existen diferencias significativas entre las medias de las diferentes mezclas; por último en los casos donde se determinó que si existen diferencias significativas entre las medias se aplicó la prueba "*TUKEY*" para determinar donde se ubican esas diferencias.

## 4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS

### 4.1. OBJETIVO 1

#### 4.1.1. Ubicación de las fuentes de material de RAP y MGV a muestrear.

Primeramente, fue necesario ubicar las fuentes de material granular virgen (MGV) y de material producto del perfilado de pavimentos asfálticos (RAP), para ello se realizó consultas con personal del área de proyectos de conservación vial de la zona de Cartago de CONAVI sobre los puntos de apilamiento de RAP, así como las fuentes usuales de MGV usadas en los proyectos de mantenimiento de caminos con superficie de ruedo en lastre, ya sea con relastrados o para bacheos mecanizados.

Basado en la información obtenida se presenta el plan de muestreo del Cuadro 4.1. éste incluye la propuesta de materiales para uso en un proyecto de mantenimiento de la ruta nacional 30703, conocida como calle “La Puente”, este proyecto de conservación vial fue el seleccionado por cuanto presentaba la posibilidad de muestrear varios tipos de material que podían emplearse para mantenimiento de la ruta, en vista que dicha vía ya había sido intervenida en el pasado, tanto con material granular virgen así como con material producto de perfilado de pavimentos asfálticos, esto debido a la existencia de fuentes cercanas de ambos tipos de material.

**Cuadro 4.1.** Materiales muestreados por tipo de fuente.

Tipo de Material muestreado	Denominación	Fuente del Material	Fecha de muestreo	Punto de Muestreo
Material de perfilado de pavimento asfáltico	RAP-01 DOTA	Material producto del perfilado de la Ruta Nacional 2, tramo entre cruce de Ojo de Agua y Piedra Alta, muestreado en el plantel de MOPT Santa María de Dota	29 de julio de 2015	Del apilamiento en el plantel
Material granular virgen	MGV-01 CARACOL	Tajo El Caracol, extraído de cantera	21 de agosto de 2015	
Material de perfilado de pavimento asfáltico	RAP-02 CARTAGO	Material producto del perfilado de la Rutas Nacionales 202 (San Ramón de Tres Ríos) y 251, muestreado en el plantel de MOPT Cartago	21 de enero de 2016	
Material granular virgen	MGV-02 UJARRAS	Tajo Ujarrás, material extraído del Río Grande de Orosi	21 de enero de 2016	
Material granular virgen	MGV-03 MEJÍA	Tajo Mejía, material extraído del Río Birris	10 de agosto de 2015	
Material granular virgen	MGV-04 CERVANTES	Tajo Cervantes, extraído de cantera	10 de agosto de 2015	

Fuente: Camacho, P.

En las Figuras 4.1. a la 4.6. se muestran las ubicaciones geográficas de las fuentes de material propuestas para muestreo y caracterización de las propiedades físico-mecánicas.



**Figura 4.1.** Ubicación del Plantel del MOPT de Santa María de Dota para muestreo de RAP procedente de proyectos de perfilado de ruta nacional No. 2 en sector Cerro de la Muerte.  
Fuente: Camacho, P. Adaptación de Google Maps.



**Figura 4.2.** Ubicación del Tajo Caracol en La Lima de Cartago para muestreo de MGv de cantera.  
Fuente: Camacho, P. Adaptación de Google Maps.



**Figura 4.3.** Ubicación del Plantel del MOPT Cartago para muestreo de RAP procedente de proyectos de perfilado de las rutas nacionales No. 251 y No. 202.  
Fuente: Camacho, P. Adaptación de Google Maps.



**Figura 4.4.** Ubicación del Tajo Ujarrás en Ujarrás de Cartago para muestreo de MGv de río.  
Fuente: Camacho, P. Adaptación de Google Maps.



**Figura 4.5.** Ubicación del Tajo Cervantes en Cervantes de Cartago.  
Fuente: Camacho, P. Adaptación de Google Maps.



**Figura 4.6.** Ubicación del Tajo Mejía en Cervantes de Cartago.  
Fuente: Camacho, P. Adaptación de Google Maps.

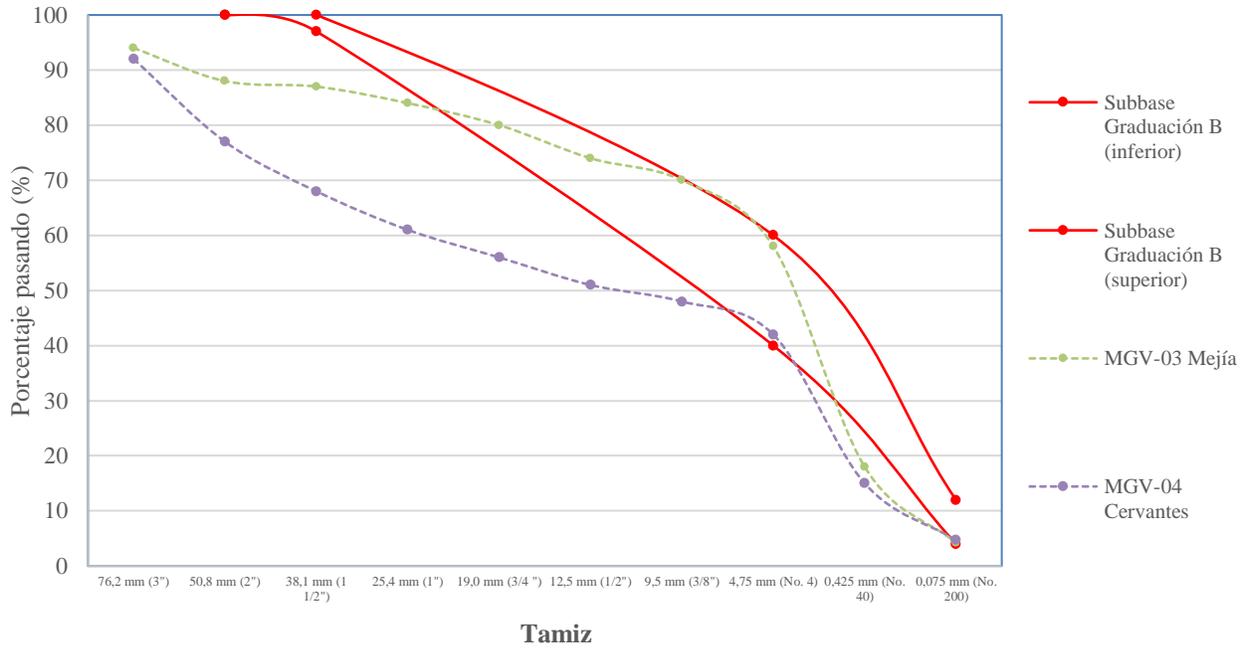
Como se indicó anteriormente, como parte de la búsqueda de las fuentes de agregados, se muestrearon cuatro tipos diferentes de material granular virgen (MGV) de diferentes fuentes, a fin de encontrar un material con condiciones adecuadas conforme a las especificaciones técnicas establecidas en el Cuadro 3.1., con el propósito de usar dicho material en superficies de ruedo expuestas; conforme se puede observar en el cuadro 4.2. los materiales de los tajos Mejía (MGV-03) y Cervantes (MGV-04), no contienen plasticidad y además poseen una granulometría que no cumple con las especificaciones técnicas de referencia; en este caso existe un porcentaje que queda retenido en la mallas de 76,2mm, 50,8mm y 38,1mm, por lo que se puede evidenciar que los materiales poseen partículas de mayor tamaño (agregado grueso) al solicitado y por tanto fueron descartados para a ser evaluados en análisis posteriores, así como para efectuar las combinaciones con RAP.

**Cuadro 4.2.** Comparativa de los resultados de granulometría, límite líquido e índice plástico para los tajos Mejía y Cervantes.

Ensayo	Parámetros	Base CR - 2010, Sección 301, Graduación C	Subbase CR -2010, Sección 301, Graduación A	Subbase CR -2010, Sección 301, Graduación B	CR 311.03 Capa granular de rodadura graduación TM-40b modificada	CR.204.07 Material selecto para la capa superficial de la vía	MGV-03 Mejía	MGV-04 Cervantes
<b>LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE PLÁSTICO</b>	<b>Límite Líquido, LL</b>	máx.35	máx.35	máx.35	máx.35	máx.35	NP	NP
	<b>Índice Plástico, IP</b>	Entre 4 y 9	Entre 4 y 10	Entre 4 y 10	Entre 4 y 10	Max. 10	NP	NP
<b>ANÁLISIS GRANULOMETRICO</b>	<b>76,2 mm (3")</b>	-	100	-	-	100	94,00	92,00
	<b>50,8 mm (2")</b>	100	97 - 100	100	-	-	88,00	77,00
	<b>38,1 mm (1 1/2")</b>	-	-	97 - 100	100	-	87,00	68,00
	<b>25,4 mm (1")</b>	80 - 100	65 - 79	-	75 - 95	70 - 100	84,00	61,00
	<b>19,0 mm (3/4 ")</b>	64 - 94	-	-	-	-	80,00	56,00
	<b>12,5 mm (1/2")</b>	-	45 - 59	-	-	-	74,00	51,00
	<b>9,5 mm (3/8")</b>	-	-	-	-	-	70,00	48,00
	<b>4,75 mm (No. 4)</b>	40 - 69	28 - 42	40 - 60	30 - 60	30 - 70	58,00	42,00
	<b>0,425 mm (No. 40)</b>	31 - 54	9 - 17	-	10 - 35	-	18,00	15,00
	<b>0,075 mm (No. 200)</b>	4 - 7	4 - 8	4 - 12	2 - 15	0 - 5	4,20	4,70

Fuente: Camacho, P.

En la Figura 4.7. siguiente se muestra las curvas granulométricas para los materiales granulares vírgenes (MGV) obtenidos de Tajo Mejía y Cervantes, para efectos comparativos se emplearon las bandas para Subbase graduación B.



**Figura 4.7.** Curva granulométrica del material granular virgen extraído de los Tajos Mejía y Cervantes comparado para la subbase graduación B.

Fuente: Camacho, P.

El análisis en profundidad de los materiales de los MGV-01 Ujarrás y MGV-02 Caracol se encuentra en el apartado 4.3.1. como parte del desarrollo del Objetivo 3 de este proyecto.

#### 4.1.2. Resultados de los ensayos de los materiales muestreados

Los resultados de los ensayos a las fuentes de materiales fueron realizados por un laboratorio de control de calidad y análisis de materiales para pavimentos, en este caso se empleó al Laboratorio Ingeniería Técnica de Pavimentos (ITP) el cual posee dentro de su alcance de acreditación ante ECA los diez ensayos requeridos, por tanto los ensayos se realizan bajo procedimientos normalizados, esto permite reducir la variabilidad en toma de muestras o ejecución de los ensayos; además se tiene que como parte de la metodología establecida, cada ensayo se ejecutaría por triplicado, esto considerando que para la mayoría de los ensayos realizados bajo la normativa ASTM o AASHTO, se recomienda la realización de tres ensayos para una misma muestra en un mismo laboratorio como parte de la declaración de precisión.

Mediante los informes de laboratorio ITP-974-15 y ITP-156-16-E (ver anexos) se obtuvieron los resultados de los ensayos aplicados conforme a lo indicado en el apartado de la metodología. En los Cuadros 4.4. al 4.7. siguientes se muestran los promedios obtenidos para cada una de las fuentes.

Además, en la sección de Apéndices se muestra la tabulación de la totalidad de los datos obtenidos, así como el cálculo para el rango y desviación estándar. Es importante mencionar que los mismos cumplen con la declaración de precisión por repetibilidad de las normas de referencia, en dicho aparte se puede observar la comparación de los resultados.

Para el caso del reporte de CBR se tiene que, conforme a lo estipulado en el apartado 10.2.1. de la norma AASHTO T 193, donde señala que en caso de diferencias significativas entre los CBR a penetraciones de 2,54 mm y 5,08 mm se debe repetir el ensayo, siendo que para el caso del presente proyecto se realizaron pruebas por triplicado y las diferencias en todos los casos se mantuvieron, por tanto, se usa el dato para penetración a 5,08mm.

A continuación, en el Cuadro 4.3. se presenta la clasificación de los materiales muestreados conforme al sistema de la AASHTO.

**Cuadro 4.3.** Clasificación de los materiales según AASHTO.

Material	Clasificación	Material constituyente
<b>RAP 01 Dota</b>	A-1-b	Fragmento de roca grava y arena
<b>RAP 02 Cartago</b>	A-1-a	Fragmento de roca grava y arena
<b>MGV 01 Ujarrás</b>	A-1-a	Fragmento de roca grava y arena
<b>MGV 02 Caracol</b>	A-2-4	Gravas y arenas limosa o arcillosa

Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 4.4.** Resultados de los ensayos para el material RAP-01 proveniente del plantel MOPT de Dota.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros		RAP-01 DOTA		
				Promedio	Diferencia máxima entre resultados	Desviación Estándar
<b>LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE PLÁSTICO</b>	AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)	Límite Líquido, LL		NP	-	-
	AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)	Índice Plástico, IP		NP	-	-
<b>ANÁLISIS GRANULOMETRICO</b>	AASHTO T 27 y AASHTO T 11 (ASTM 117/136)	76,2 mm (3")	Porcentaje Pasando (%)	100,00	0,00	0,00
		50,8 mm (2")		100,00	0,00	0,00
		38,1 mm (1 1/2")		99,33	2,00	1,15
		25,4 mm (1")		99,33	2,00	1,15
		19,0 mm (3/4 ")		99,33	2,00	1,15
		12,5 mm (1/2")		88,33	2,00	1,15
		9,5 mm (3/8")		79,00	2,00	1,00
		4,75 mm (No. 4)		54,67	5,00	2,52
		0,425 mm (No. 40)		18,67	1,00	0,58
<b>DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD OPTIMA</b>	AASHTO T180	Humedad óptima (%)		9,97%	0,30%	0,15%
		Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		2112,33	6,00	3,06
<b>ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)</b>	AASHTO T-193 (ASTM D1883)	CBR (2,54 mm)		76,00	4,00	1,63
		CBR (5,08 mm)		82,00	4,00	2,00
<b>CARAS FRACTURADAS</b>	ASTM D5821	Caras Fracturadas		100,00%	0,00%	0,00%
<b>ABRASIÓN DE LOS ANGELES</b>	AASHTO T-96	Abrasión		27,03%	1,50%	0,75%
<b>ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T210	Finos		71,00%	2,00%	1,00%
		Gruesos		81,00%	2,00%	1,00%
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T 104	Finos		4,90%	0,70%	0,36%
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>		Gruesos		10,90%	1,30%	0,66%

Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 4.5.** Resultados de los ensayos para el material RAP-02 proveniente del plantel MOPT de Cartago.

RAP-02 CARTAGO						
Ensayo	Norma referencia	Parámetros		Promedio	Diferencia máxima entre resultados	Desviación Estándar
<b>LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE PLÁSTICO</b>	AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)	Límite Líquido, LL		NP	-	-
	AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)	Índice Plástico, IP		NP	-	-
<b>ANÁLISIS GRANULOMETRICO</b>	AASHTO T 27 y AASHTO T 11 (ASTM 117/136)	76,2 mm (3")	Porcentaje Pasando (%)	100,00	0,00	0,00
		50,8 mm (2")		100,00	0,00	0,00
		38,1 mm (1 1/2")		100,00	0,00	0,00
		25,4 mm (1")		100,00	0,00	0,00
		19,0 mm (3/4")		100,00	0,00	0,00
		12,5 mm (1/2")		88,00	2,00	1,00
		9,5 mm (3/8")		74,67	1,00	0,58
		4,75 mm (No. 4)		44,00	2,00	1,00
		0,425 mm (No. 40)		4,33	1,00	0,58
		0,075 mm (No. 200)		3,90	0,40	0,20
<b>DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD OPTIMA</b>	AASHTO T180	Humedad óptima (%)		6,03%	0,50%	0,25%
		Densidad (kg/m3)		1999,33	5,00	2,52
<b>ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)</b>	AASHTO T-193 (ASTM D1883)	CBR (2,54) mm		24,00	2,00	0,82
		CBR (5,08 mm)		26,67	5,00	2,52
<b>CARAS FRACTURADAS</b>	ASTM D5821	Caras Fracturadas		100,00%	0,00%	0,00%
<b>ABRASIÓN DE LOS ANGELES</b>	AASHTO T-96	Abrasión		26,17%	1,40%	0,70%
<b>ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T210	Finos		72,00%	2,00%	1,00%
		Gruesos		81,00%	2,00%	1,00%
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T 104	Finos		5,63%	0,90%	0,47%
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>		Gruesos		10,93%	0,30%	0,15%

Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 4.6.** Resultados de los ensayos para el material MGV-01 proveniente del plantel del Tajo de Ujarrás.

MGV-01 UJARRAS						
Ensayo	Norma referencia	Parámetros		Promedio	Diferencia máxima entre resultados	Desviación Estándar
<b>LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE PLÁSTICO</b>	AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)	Límite Líquido, LL		NP	-	-
	AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)	Índice Plástico, IP		NP	-	-
<b>ANÁLISIS GRANULOMETRICO</b>	AASHTO T 27 y AASHTO T 11 (ASTM 117/136)	76,2 mm (3")	<b>Porcentaje Pasando (%)</b>	100,00	0,00	0,00
		50,8 mm (2")		100,00	0,00	0,00
		38,1 mm (1 1/2")		100,00	0,00	0,00
		25,4 mm (1")		88,00	0,00	0,00
		19,0 mm (3/4 ")		73,33	1,00	0,58
		12,5 mm (1/2")		57,33	1,00	0,58
		9,5 mm (3/8")		50,00	0,00	0,00
		4,75 mm (No. 4)		34,67	1,00	0,58
		0,425 mm (No. 40)		12,00	0,00	0,00
		0,075 mm (No. 200)		5,83	0,10	0,06
<b>DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA</b>	AASHTO T180	Humedad óptima (%)		8,90%	0,40%	0,20%
		Densidad (kg/m3)		2181,33	6,00	3,06
<b>ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)</b>	AASHTO T-193 (ASTM D1883)	CBR (2,54 mm)		94,67	5,00	2,05
		CBR (5,08 mm)		124,00	7,00	3,61
<b>CARAS FRACTURADAS</b>	ASTM D5821	Caras Fracturadas		83,00%	2,00%	1,00%
<b>ABRASIÓN DE LOS ANGELES</b>	AASHTO T-96	Abrasión		21,20%	0,70%	0,36%
<b>ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T210	Finos		51,00%	2,00%	1,00%
		Gruesos		77,33%	1,00%	0,58%
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T 104	Finos		16,03%	0,30%	0,15%
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>		Gruesos		11,83%	0,60%	0,31%

Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 4.7.** Resultados de los ensayos para el material MG-V-02 proveniente del plantel del Tajo de Caracol

Ensayo	Norma referencia	Parámetros		MGV-02 CARACOL		
				Promedio	Diferencia máxima entre resultados	Desviación Estándar
<b>LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE PLÁSTICO</b>	AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)	Límite Líquido, LL		27,73	1,80	0,91
	AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)	Índice Plástico, IP		8,77	1,20	0,61
<b>ANÁLISIS GRANULOMETRICO</b>	AASHTO T 27 y AASHTO T 11 (ASTM 117/136)	76,2 mm (3")	Porcentaje Pasando (%)	85,33	2,00	1,15
		50,8 mm (2")		84,33	4,00	2,08
		38,1 mm (1 1/2")		70,00	2,00	1,00
		25,4 mm (1")		63,67	1,00	0,58
		19,0 mm (3/4 ")		60,67	1,00	0,58
		12,5 mm (1/2")		56,67	1,00	0,58
		9,5 mm (3/8")		51,33	7,00	3,79
		4,75 mm (No. 4)		45,00	4,00	2,00
		0,425 mm (No. 40)		23,67	1,00	0,58
		0,075 mm (No. 200)		15,00	2,60	1,30
<b>DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA</b>	AASHTO T180	Humedad óptima (%)		12,93%	1,10%	0,57%
		Densidad (kg/m3)		1877,00	7,00	3,61
<b>ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)</b>	AASHTO T-193 (ASTM D1883)	CBR (2,54 mm)		8,97	0,70	0,29
		CBR (5,08 mm)		12,80	0,80	0,40
<b>CARAS FRACTURADAS</b>	ASTM D5821	Caras Fracturadas		99,67%	1,00%	0,58%
<b>ABRASIÓN DE LOS ANGELES</b>	AASHTO T-96	Abrasión		66,33%	1,60%	0,85%
<b>ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T210	Finos		23,33%	1,60%	0,85%
		Gruesos		31,83%	2,70%	1,39%
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T 104	Finos		46,30%	1,40%	0,72%
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>		Gruesos		65,40%	1,80%	0,96%

Fuente: Camacho, P.

Por tanto, para el presente proyecto se ejecutaron muestreos y ensayos completos de caracterización para aceptación y calidad ensayos para cuatro fuentes de materiales, dos de ellas son fuentes de RAP dos de MGV, para obtener las condiciones originales de cada fuente, con el propósito de evidenciar cambios en los análisis y combinaciones posteriores como parte del desarrollo de los objetivos 2 y 3 de este proyecto.

## 4.2. OBJETIVO 2

### 4.2.1. Evaluación de los límites líquido e índice plástico.

Las fuentes de RAP muestreadas son “no plásticas” en el Cuadro 4.8. se muestran los resultados para límite líquido e índice plástico del material de RAP tomado de los planteles del MOPT. Mediante el cual se puede inferir que los materiales no cumplen para las cinco especificaciones evaluadas. A pesar de ello, esto no implica que los mismos deban ser descartados como material para caminos de lastre, por cuanto los parámetros técnicos permiten agregados no plásticos, siempre y cuando cumplan con tener más del 50% de caras fracturadas retenidas en la malla No. 4 (4,75 mm), por tanto, el cumplimiento de éste parámetro se analizará en el apartado de caras fracturadas. Debe tomarse en consideración que la plasticidad controlada permite brindar unión entre los agregados para evitar desmoronamientos, esto toma mucha importancia en caminos de lastre por cuanto la superficie de ruedo se encuentra expuesta, de ahí que deba valorarse el cumplimiento de otros factores para compensar la falta de plasticidad para este caso.

**Cuadro 4.8.** Evaluación de límite líquido e índice plástico para RAP.

Parámetros	Base CR - 2010, Sección 301, Graduación C	Subbase CR - 2010, Sección 301, Graduación A	Subbase CR - 2010, Sección 301, Graduación B	CR 311.03 Capa granular de rodadura graduación TM-40b modificada	CR.204.07 Material selecto para la capa superficial de la vía	RAP-01 DOTA	RAP-02 CARTAGO
Límite Líquido, LL	máx.35	máx.35	máx.35	máx.35	máx.35	NP	NP
Índice Plástico, IP	Entre 4 y 9	Entre 4 y 10	Entre 4 y 10	Entre 4 y 10	Max. 10	NP	NP

Fuente: Camacho, P.

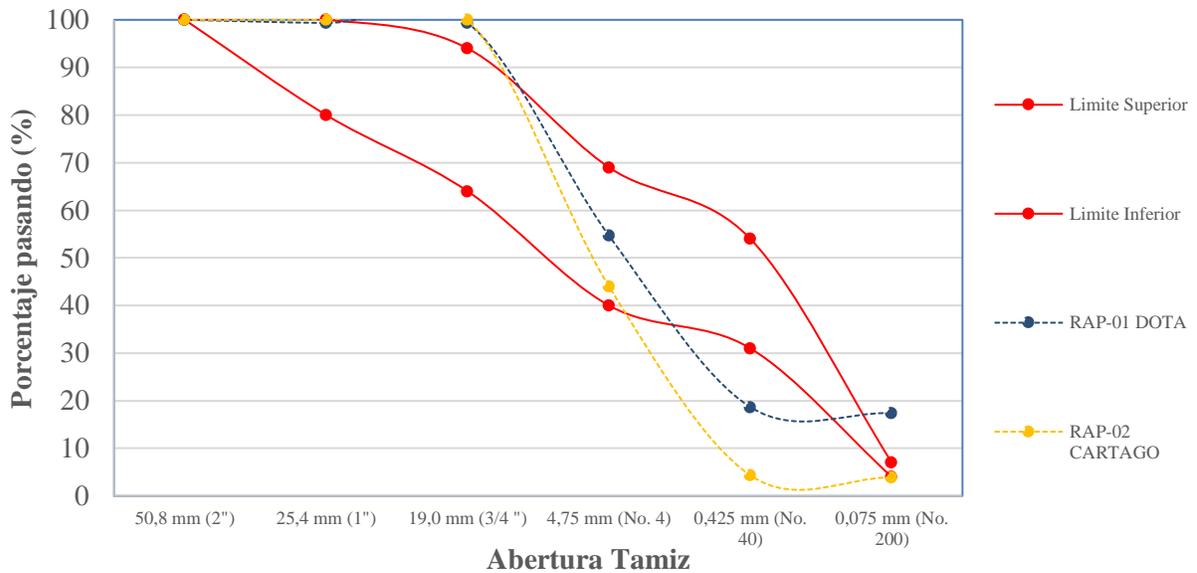
Debe tomarse en consideración que, debido a la naturaleza del RAP, al contener agregado fino que es empleado en la fabricación de mezclas asfálticas, así como con el hecho que las partículas de agregado se encuentren recubiertas de cemento asfáltico, podrían generar que este material no posea plasticidad. Se debe tomar en consideración este punto, en caso que el material sea empleado por sí solo como superficie de ruedo expuesta.

### 4.2.2. Evaluación de cumplimiento por análisis granulométrico

Para efecto de la revisión del cumplimiento de los diversos requerimientos para el material para superficies de ruedo expuestas, se realizó la evaluación granulométrica basada en las graduaciones más frecuentes de uso de este material para caminos de lastre. A fin de determinar si existe variabilidad de las medias de los resultados entre los tamices utilizados para evaluar las graduaciones se aplicó la prueba *t de Student* (ver apéndice sección 7.3.) con un nivel de confianza del 95%, considerando que la hipótesis nula que existe igualdad entre las medias y como hipótesis alternativa que hay diferencias estadísticamente representativas, para lo cual se tiene que para los tamices del 76,2 mm (3") al 12,5 mm (1/2") se aprueba la hipótesis nula, indicando que existe igualdad en la medias de los resultados granulométricos entre las dos

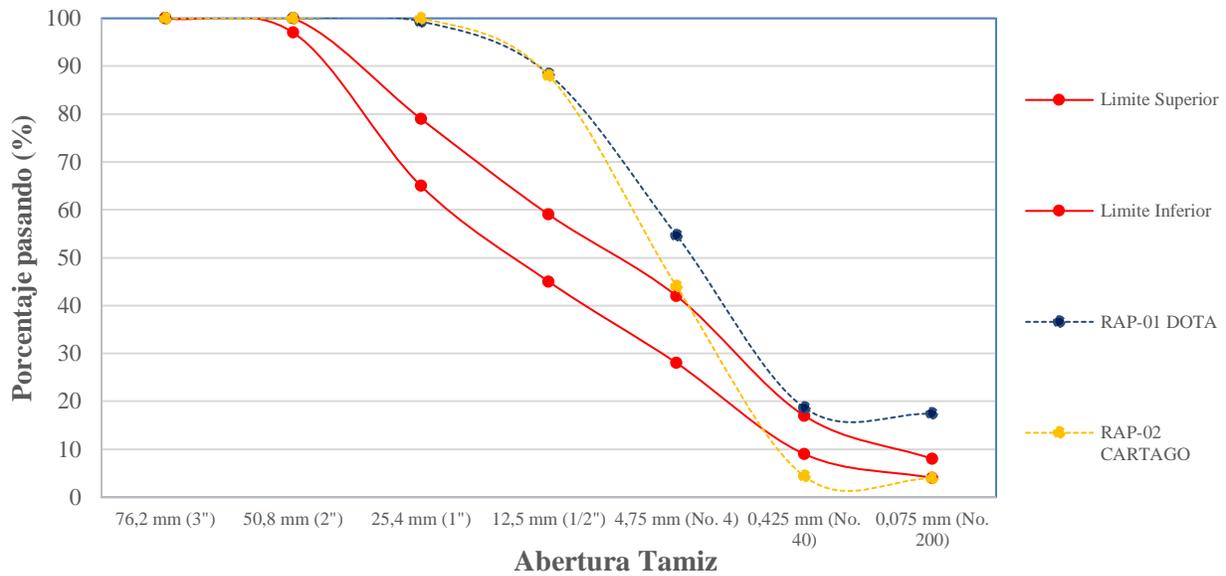
fuentes de RAP muestreadas, mientras que para la malla con abertura de 9,5 mm (3/8") se rechaza la hipótesis nula, y por ende se aprueba la hipótesis alternativa indicando que para esos tamices existen diferencias estadísticamente significativas. Por tanto, se puede evidenciar que la variabilidad estadística de ambas fuentes de material de RAP tiene diferente granulometría en su porción de finos, mientras que para que caso del agregado grueso no existen una diferencia significativa.

En las Figuras 4.8. a la 4.12. se muestra la curva granulométrica para cada una de éstas graduaciones a fin evaluar su cumplimiento.

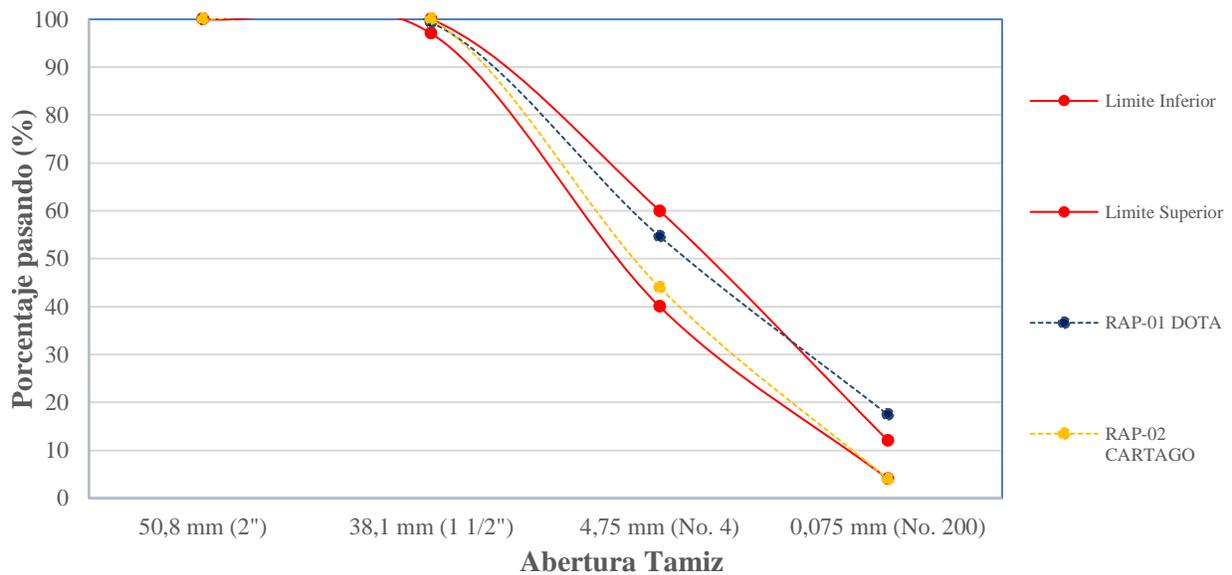


**Figura 4.8.** Comparativa para curva granulométrica de una Base Graduación C, conforme a la sección 301 del CR 2010.  
Fuente: Camacho, P.

De la Figura 4.8. se puede observar que ninguna de las fuentes de RAP muestreadas cumple la especificación para base graduación “C”, específicamente el cumplimiento del porcentaje pasando los tamices de 19,0 mm y 0,425 mm (Malla No. 40); es importante tomar en consideración que para que pueda cumplir ambos materiales requieren un rango de material pasando la malla No. 40 entre el rango de 31% a 54%, sin embargo las muestras poseen mucho material que es retenido en dicha malla, cercano al 36% para el caso de RAP-01 de Dota y casi el 40% para caso del RAP-02 proveniente de plantel de Cartago, por lo que se puede caracterizar el material de RAP para ambos casos con gran cantidad de arenas de las denominadas “gruesas”. Si bien es cierto que existen graduaciones de base que permiten mayor cantidad de material retenido en el tamiz No. 40, estas no son frecuentemente usadas como material de lastre o para superficie de ruedo expuestas, por lo que se no consideran para la evaluación de cumplimiento.



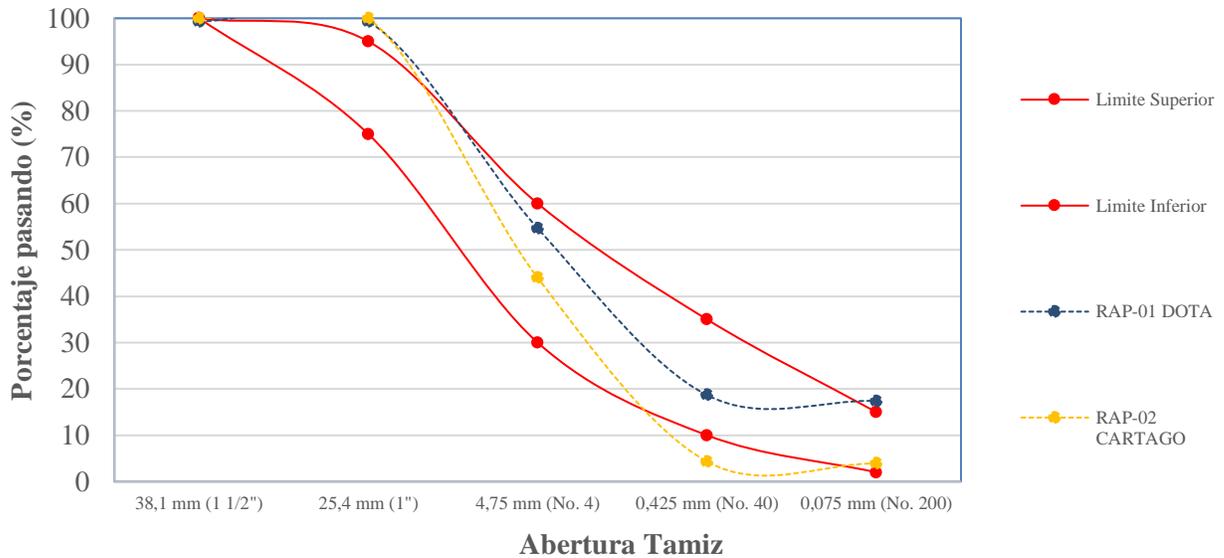
**Figura 4.9.** Comparativa para curva granulométrica de una Subbase Graduación A, conforme a la sección 301 del CR 2010.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.10.** Comparativa para curva granulométrica de una Subbase Graduación B, conforme a la sección 301 del CR 2010.  
Fuente: Camacho, P.

Las Figuras 4.9. y 4.10. presentan la comparación de los materiales de RAP muestreados versus las graduaciones A y B para subbases, cabe destacar que éstas graduaciones son utilizadas de forma frecuente en los distintos proyectos de mantenimiento de caminos en lastre en rutas nacionales. Para el caso de la graduación “A” se tiene que ninguno de los materiales cumplió siendo los tamices de 25,4 mm y 19,5 mm donde mayor desviación se presenta de acuerdo con la especificación. Para el caso de la graduación “B” se tiene que material proveniente del Plantel de Cartago (RAP-02) cumplió con los requerimientos de dicha

graduación y el material proveniente del Plantel de Dota presenta una variación en la malla No. 200 (0,075 mm), el rango máximo permitido es 12% con una tolerancia de  $\pm 4\%$ , por lo está fuera del rango, sin embargo, podría cumplir de forma parcial basado en el rango de tolerancia.

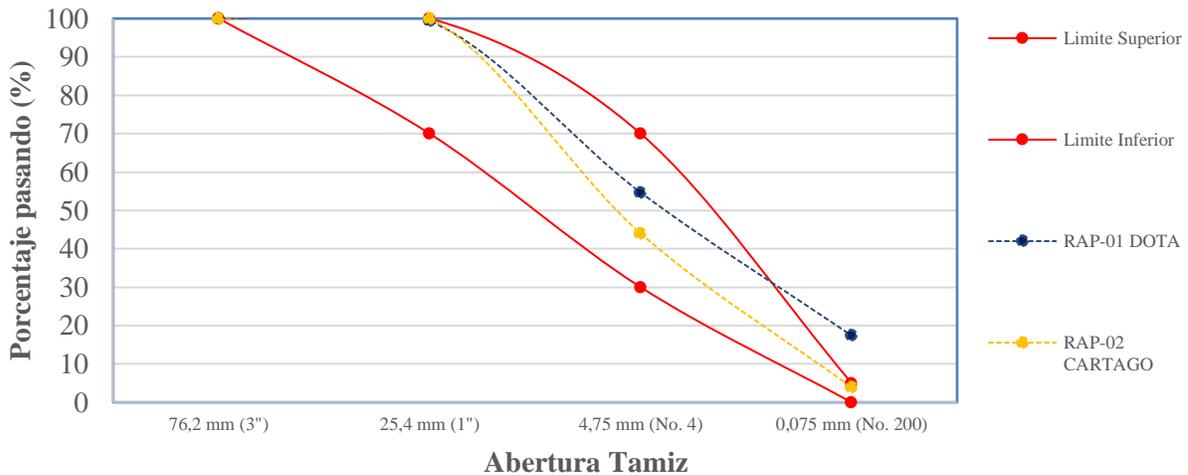


**Figura 4.11.** Comparativa para curva granulométrica de una Capa Granular de Rodadura graduación TM-40b modificada, conforme a la sección 311 del CR 2010.

Fuente: Camacho, P.

La graduación TM-40b modificada (ver Figura 4.11.) se ha implementado en proyectos de conservación en lastre de ruta nacionales más recientes (menos de 2 años), dicha introducción se realizó a raíz de la entrada en vigencia de la especificación CR-2010 para capas de rodadura, por lo que el uso de ésta graduación no ha sido extenso a la fecha; para efectos de la evaluación del material de RAP presenta variaciones en el tamiz de 25,4 mm, así como cumplimiento del tamiz de 0,425 mm (No. 40) para el caso del RAP-02, por lo que ambos materiales no cumplen con ésta granulometría.

#### Comparacion Granulometrica Material Selecto para Capa Superficial de la Via



**Figura 4.12.** Comparativa para curva granulométrica de un Material Selecto para capa superficial, conforme a la sección 204 del CR 2010.

Fuente: Camacho, P.

El material selecto para capa superficial (ver Figura 4.12.) se le conoce también como material de préstamo, su uso en caminos de lastre se da principalmente cuando se da la ausencia de material granular como capa de rodadura, es decir la subrasante se encuentra expuesta, por lo que la superficie de ruedo se compone principalmente del suelo del propio sitio, en estos punto o tramos. Es frecuente la colocación de material selecto como capa de rodadura; la graduación se dicho material se da para únicamente cuatro tamices, cuya principal característica es que debe ser material que pase por la malla de 76,2 mm (3 pulgadas); en esto caso ambos cumplen con los tamices solicitados, salvo la desviación que presenta el material RAP-01, la malla No. 200, esto significa que dicho material posee más material fino que el permitido para las cualquiera de las cinco graduaciones anteriormente presentadas. En el cuadro 4.9. se presenta el resumen de cumplimiento para las granulometrías evaluadas.

**Cuadro 4.9.** Cumplimiento de graduaciones granulométricas para RAP.

Especificación Material	RAP-01 Dota	RAP-02 Cartago
Base CR -2010, Sección 301, Graduación C	No Cumple	No Cumple
Subbase CR -2010, Sección 301, Graduación A	No Cumple	No Cumple
Subbase CR -2010, Sección 301, Graduación B	Cumple parcialmente*	Cumple
Capa granular de rodadura graduación, CR 311.03 TM-40b modificada	No Cumple	No Cumple
Material selecto para la capa superficial de la vía CR.204.07	No Cumple	Cumple

\*Nota 1: Algunos valores se encuentra fuera de rango sin embargo se encuentra dentro de los márgenes de tolerancia.

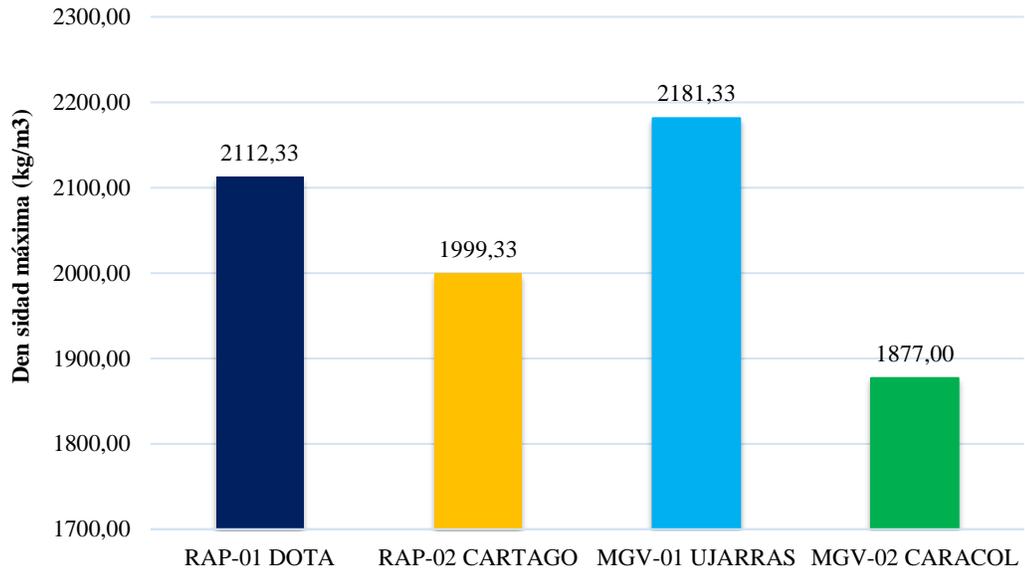
Fuente: Camacho, P.

Del cuadro anterior se tiene que sólo el material de RAP proveniente del plantel de Cartago cumple con dos graduaciones de las utilizadas para evaluar ambos materiales, mientras que el material de RAP-01 Dota cumple de forma parcial en una sola. Debe tomarse en consideración, que el material apilado en ambas fuentes es material sin procesar, es decir, que no se le ha realizado ningún proceso de fraccionamiento o tamizaje para mejorar su graduación, en ambos casos el material fue apilado directamente luego del proceso de perfilado (fresado) de pavimentos asfálticos, por lo que la graduación del material puede estar influenciada por el método constructivo, la condición de la perfiladora de pavimentos y la forma en el material de RAP es apilado en los planteles del MOPT, sin embargo a pesar de ello, unas de las fuentes cumple con dos de las graduaciones solicitadas y otro en forma parcial, por lo que se podría decir, que para algunos casos el material de RAP obtenido directo del proceso de perfilado de pavimentos, cumple para algunas de las graduaciones para caminos de lastre, sin requerir algún proceso de fraccionamiento posterior, esto toma especial importancia debido a que el proceso de fraccionar el material podría generar mayores costos a los proyectos de conservación vial, a pesar de que es esperable que material con un mayor fraccionamiento poseen un mejor desempeño en cuanto a densidad y otras propiedades mecánicas como CBR y caras fracturadas.

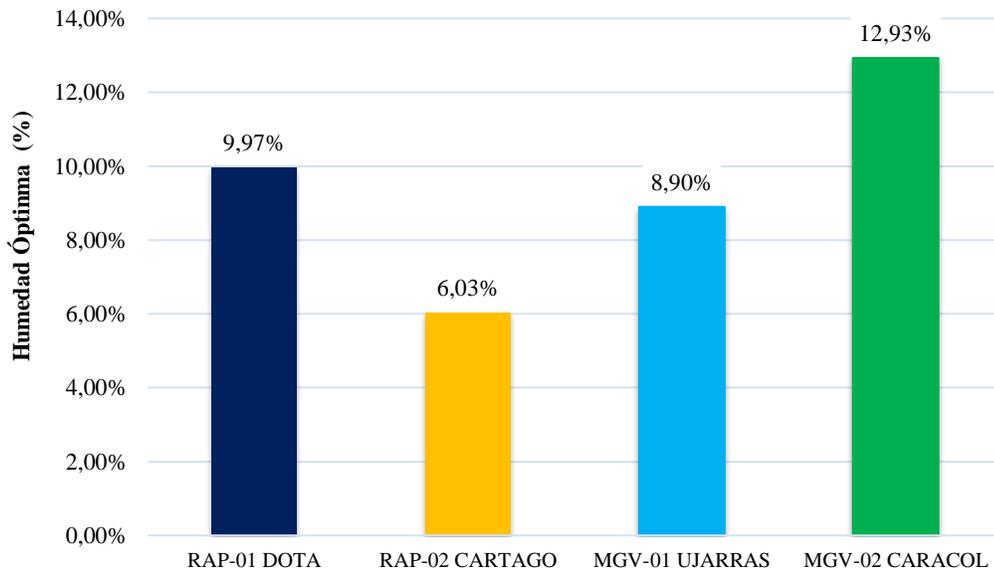
#### 4.2.3. Evaluación de densidad máxima y humedad óptima

En este apartado se realiza la comparación de los resultados obtenidos de densidad máxima y humedad óptima mediante la prueba de Proctor modificado (AASHTO T 180) de las fuentes de RAP, debe tomarse en consideración que a nivel de especificaciones técnicas no existe un valor o rango de valores para aceptación de un material para ser usado en una superficie de ruedo expuesta, sin embargo su determinación toma especial relevancia en la práctica, esto porque permite revisar el grado de compactación de los materiales que se colocan en sitio.

Además, la densidad máxima y humedad óptima está ligada a otras propiedades de aceptación como lo es el CBR, que se evaluará en el siguiente apartado. En la Figuras 4.13. y 4.14. se muestran las comparaciones de densidad máxima y humedad óptima respectivamente, obtenidas de ambas fuentes de RAP, y a manera de ejemplo se incluyen las fuentes de MGV muestreado a fin de comparar los rangos obtenidos, el análisis a profundidad entre los MGV de Ujarrás y Caracol se desarrollará más adelante como parte de los resultados y análisis del objetivo No. 3.



**Figura 4.13.** Comparación de densidades máximas promedio obtenidas para RAP y MGV. Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.14.** Comparación de humedades óptimas promedio obtenidas para RAP y MGV. Fuente: Camacho, P.

De la Figura 4.13. se puede evidenciar que las densidades máximas de los materiales de RAP se encuentran dentro del rango de materiales usados como MGv, los cuales a su vez son comúnmente usados para caminos de lastre. En este caso dado, el resultado obtenido para MGv-01 Ujarrás tiene la más densidad más alta de las fuentes y el MGv-02 Caracol como la más de baja de las fuentes, siendo los valores de RAP dados como valores intermedios dentro de éste rango, debe tomarse en consideración que la media de los resultados obtenidos de ambas fuentes de RAP (Dota-Cartago) se encuentra en el orden de los 2055 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la media de los MGv (Ujarrás-Cartago) se encuentra en los 2029 kg/m<sup>3</sup> aproximadamente, por lo cual se puede observar que los valores de RAP se encuentran dentro de un rango similar a los de materiales que comúnmente se usan para caminos de lastre.

. A su vez el cuadro 4.14. muestra que existe variabilidad entre las humedades óptimas entre los materiales independientemente si son RAP o MGv.

Para la comparación entre las fuentes de RAP se aplicó la prueba *t de Student* con un nivel de confianza del 95% (ver apéndice sección 7.3.), considerando como hipótesis nula que existe igualdad entre las medias y como hipótesis alternativa que hay diferencias estadísticamente representativas entre las medias de densidad máxima y humedad óptima, en este caso se rechaza la hipótesis nula, y por ende se aprueba la hipótesis alternativa indicando que para para densidad máxima y humedad óptima entre los materiales de RAP de Dota y Cartago existen diferencias estadísticamente significativas, y por ende se puede evidenciar la variabilidad estadística de ambas fuentes de material.

La variabilidad de las fuentes en cuanto a la densidad obtenida puede deberse a que los agregados que componen el RAP poseen orígenes distintos, tal es el caso del RAP-01 Dota, el cual está compuesto en su mayoría por RAP que fue extraído del perfilado de pavimentos de la Ruta Nacional No. 2; específicamente entre los kilómetros 78 al 98 de dicha vía, este sector de la Interamericana Sur atraviesa lo que comúnmente se conoce como el cerro de la Muerte, éste tramo de vía, de acuerdo a la consulta realizada a la Ingeniería de Zona de CONAVI, presentaba una carpeta asfáltica de alrededor de 8 cm con algunos puntos donde se había realizado bacheos con mezcla asfáltica en caliente, dicho material fue extraído de la ruta y apilado en el plantel del MOPT en Santa María de Dota. Por otro lado, el material de RAP-02 Cartago está compuesto por una combinación de materiales producto del perfilado de pavimentos asfálticos de las rutas nacionales No. 251, carretera que une Curridabat con Tres Ríos lo cual a su vez lo une con la carretera Florencio del Castillo, comúnmente conocida como “calle vieja a Tres Ríos”, la cual posee espesores de pavimento entre los 16 y 20 cm, y está compuesta por varias carpetas asfálticas, mientras que la ruta No. 202 que comunica el centro de Tres Ríos con San Ramón de la Unión, posee espesores que rondan los 6 a 8 cm y está compuesta por una sola capa de pavimento con presencia de puntos con bacheos recientes, esto de acuerdo a lo comentado con la Ingeniería de Proyecto encargada de la ejecución de ambos proyectos de perfilado y recarpeteo.

De lo anterior se puede presumir que la densidad más alta obtenida para el RAP-01 Dota se podría deber a que el material es más homogéneo, a ser extraído de un solo tramo de carretera, mientras que la variabilidad de los tramos de donde se obtuvo el material de RAP-02 de Cartago incide en su densidad máxima obtenida, y por ende se observa más baja comparada con el RAP-01 Dota. Debe tomarse en consideración que para la extracción de material de RAP se dio una homogenización mecánica previa, en la Figura 4.15. se muestra el método utilizado mediante retroexcavador para la obtención de las muestras de RAP.



**Figura 4.15.** Muestra del método de homogenización mecánica mediante retroexcavador.  
Fuente: Camacho, P.

Otro factor a tomar en consideración sobre la variabilidad obtenida de las fuentes de RAP se debe a la forma de realizar el apilamiento en los planteles de MOPT, puesto que el acomodo de material de RAP se realiza sin considerar su origen, como es el caso del material de RAP de Cartago donde se van apilando el material en un solo punto indistintamente del proyectos de donde provenga (ver Figura 4.16.), sin que exista un proceso de homogenización previo de los agregados; si no que el proceso está más en función del acomodo en un apilamiento único. Para el caso del apilamiento en Dota se sigue la misma metodología, sin embargo, al momento de realizar el muestreo solo había RAP proveniente de la Ruta Nacional No. 2.

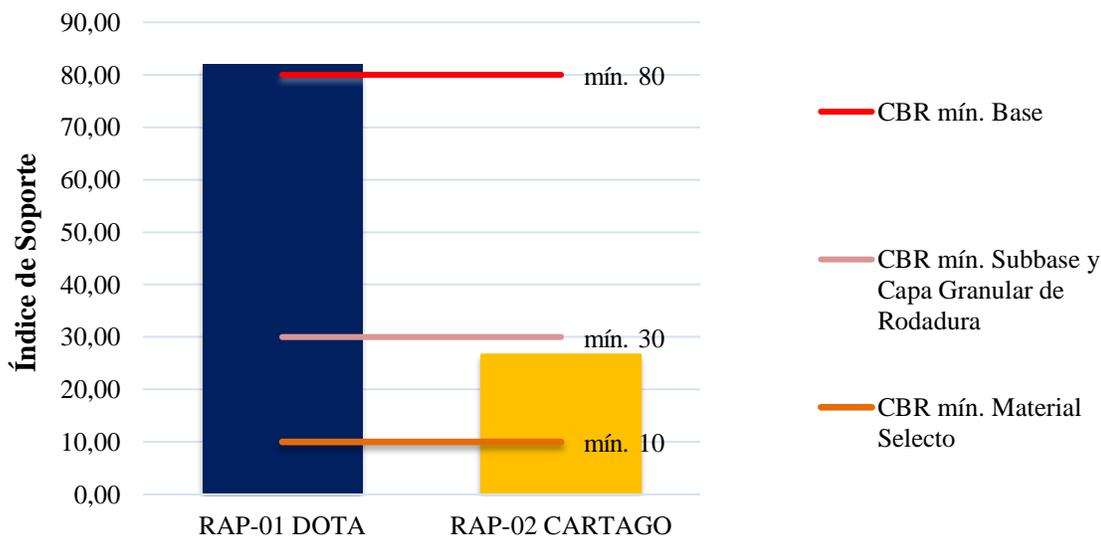


**Figura 4.16.** Vista de los apilamientos de RAP de Planteles de Santa María de Dota (izq.) y Cartago (der.).  
Fuente: Camacho, P.

Se puede deducir que la densidad del RAP se puede ver afectada por su origen, es decir, del tramo de carretera donde fue extraído, puesto que existe variabilidad entre los agregados, e incluso el cemento asfáltico que componen la mezcla asfáltica original. El método empleado para su apilamiento, el cual puede verse influenciado por combinaciones de diversas fuentes de material hasta la segregación de los agregados producto de un inadecuado acomodo del apilamiento.

#### 4.2.4. Evaluación del índice de soporte de California (CBR)

El índice de soporte de California o “CBR” es una de las propiedades más importantes para definir si un material es apto para colocarlo en un camino. De la Figura 4.17. se puede evidenciar el cumplimiento de las dos fuentes muestreadas, conforme a las especificaciones técnicas empleadas; en dicho gráfico se puede observar que el CBR mínimo está definido en tres categorías que son la base, las subbases (incluye la capa superficial de rodadura TM-40b) y el material selecto (conocido como préstamo).



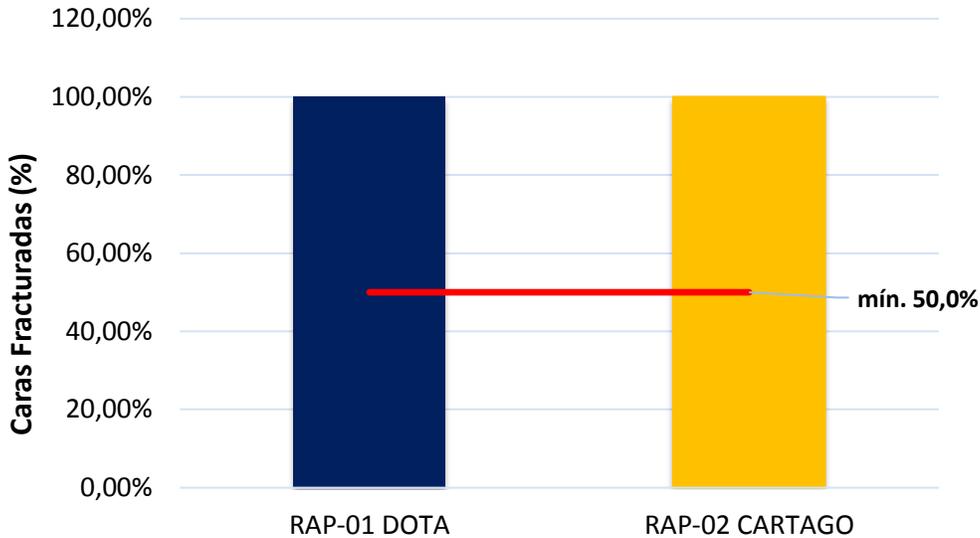
**Figura 4.17.** Comparación de CBR obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO.  
Fuente: Camacho, P.

Al igual que para los anteriores ensayos, para la comparación entre las fuentes de RAP se aplicó la prueba *t de Student* con un nivel de confianza del 95% (ver apéndice sección 7.3.), considerando que la hipótesis nula que existe igualdad entre las medias y como hipótesis alternativa que hay diferencias estadísticamente representativas entre las medias del CBR obtenido, en este caso se rechaza la hipótesis nula, y por ende se aprueba la hipótesis alternativa indicando que el CBR obtenido entre los materiales de RAP de Dota y Cartago existen diferencias estadísticamente significativas, y por ende se puede evidenciar la variabilidad estadística de ambas fuentes de material.

Puede observarse que de los materiales evaluados, existen diferencias entre el cumplimiento de especificaciones, mientras que el material RAP-01 DOTA cumple con un CBR mayor a 80 y por consiguiente cumple para ser utilizado como material de base; el RAP-02 CARTAGO cumple como material selecto, pero no llega a un CBR de 30 requerido para cumplir como subbase, es importante considerar que el material del plantel de Dota posee una densidad mayor al de Cartago y por ende que exista una relación directa con el CBR obtenido para cada caso. Los resultados de CBR permiten conocer que las fuentes de RAP no necesariamente poseen el mismo comportamiento en cuanto a capacidad de soporte, y por tanto su uso puede variar conforme a los resultados obtenidos, esto es importante conocer cuando se tienen caminos con alto volumen de tránsito o con tránsito de carga pesada, por cuanto pueden requerir materiales con CBR mayores a los de un material selecto, o cuando se requiere colocar una capa de “lastre” sobre la subrasante o suelo existente, el cual es usual que posea CBR muy bajos (menores a 10), por lo que colocar material con CBR inferiores a 30 pueden causar problemas de soporte de la estructura del pavimento, que podrían reflejarse mediante ahuellamientos en la superficie de rodamiento o deformaciones por la pérdidas en la capacidad de soporte.

#### 4.2.5. Evaluación de caras fracturadas

El porcentaje de caras fracturadas es uno de los parámetros físicos del material que va a ser usado como superficie de rueda expuesta, que más deben tomarse en consideración, especialmente si el material no posee plasticidad (No plástico o “NP”), como es el caso de los materiales de RAP tal y como se mostró en el apartado 4.2.1. relacionado al límite líquido e índice plástico. Para este caso, se evalúa que posean un mínimo de un 50% de caras fracturadas; conforme a las especificaciones técnicas, en la Figura 4.17. se pueden observar los resultados obtenidos en cuanto a este requerimiento.



**Figura 4.18.** Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) de caras fracturadas obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO.

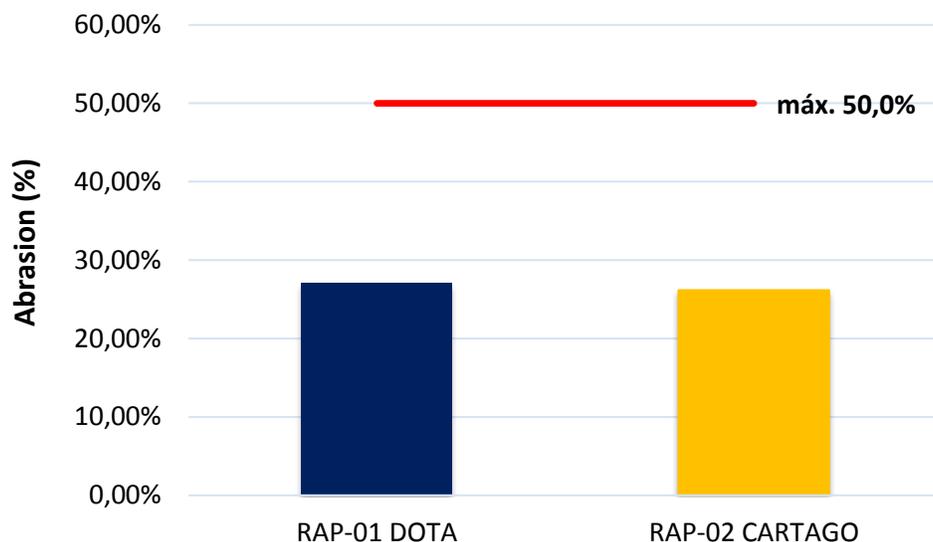
Fuente: Camacho, P.

Como se puede observar del gráfico anterior, para ambos casos el porcentaje de caras fracturas es del 100%, cumpliendo así con las especificaciones técnicas de base y subbase, es importante resaltar que este resultado se debe a que los agregados utilizados en la producción de mezclas asfálticas son por lo general agregados quebrados, conformados por agregados tales como la quintilla, cuartilla y polvo de piedra, entre otros. Además, es necesario considerar la acción de la máquina perfiladora (o fresadora) de pavimentos, debido a que el proceso de rasgar el pavimento puede también fraccionar el RAP.

Relacionado a la evaluación del material para capa de granular de rodadura, se tendría por cuanto el RAP es un material no plástico, este podría ser utilizado por tener un porcentaje de caras fracturadas mayor al 50%, esto importante por cuanto al tener mayor fricción entre partículas, permite una mayor resistencia al corte; esto evita que se presenten deterioros prematuros en el material como desplazamientos o roderas, además la fricción incrementa la resistencia de la segregación del material, principalmente cuando éste es colocado en tramos de carretera con pendientes verticales inclinadas, esto por cuanto mejora el desmoronamiento provocado por la tracción de los vehículos que transitan sobre la superficie de rueda expuesta.

#### 4.2.6. Evaluación de abrasión con la máquina de Los Ángeles

El requerimiento que deben poseer los materiales evaluados para abrasión mediante la máquina de Los Ángeles es menor al 50%, como se pueden observar en la Figura 4.19. este porcentaje para los materiales de RAP evaluados no alcanza un 30% por lo que ambos materiales cumplen con este requerimiento.



**Figura 4.19.** Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) abrasión con la máquina de Los Ángeles obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO.

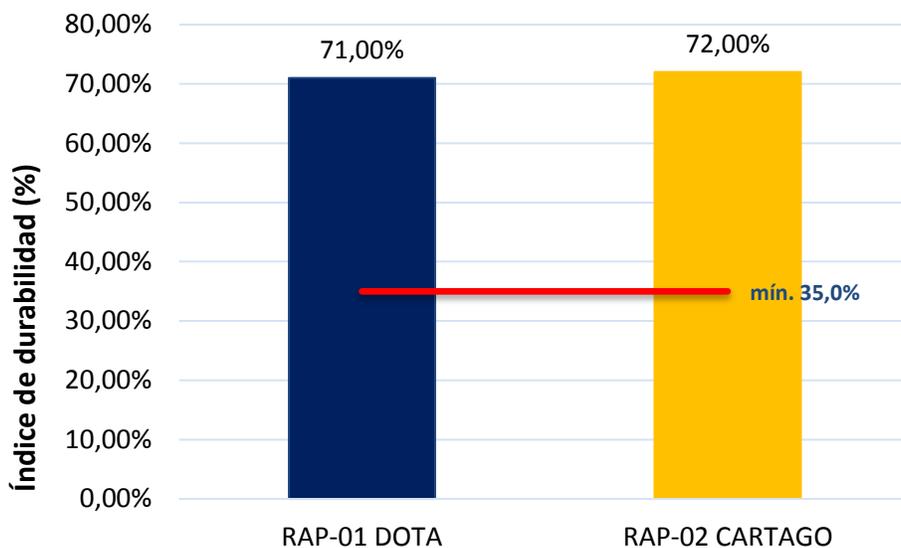
Fuente: Camacho, P.

De los resultados obtenidos para este ensayo, se puede evidenciar que ambos materiales de RAP evaluados conforme a las especificaciones técnicas empleadas, poseen la tenacidad necesaria en cuanto a la pérdida por abrasión para ser utilizados en superficies de ruedo expuestas, se debe considerar que el tránsito vehicular produce un efecto abrasivo en los caminos de lastre, por lo que es importante emplear materiales que puedan resistir este efecto. Al igual que el caso de las caras fracturadas, parte de la tenacidad del RAP se debe a que está compuesto por agregados que fueron utilizados en la producción de mezclas asfálticas, por lo que supone es un material que ha sido procesado y selecto con competencias adecuadas.

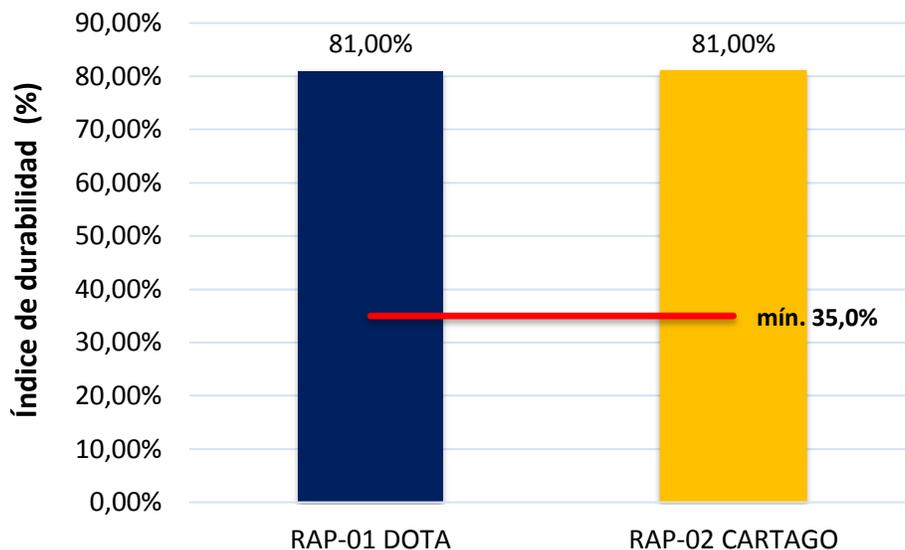
A raíz de los resultados obtenidos se tiene que el material de RAP por sí solo posee adecuadas condiciones en cuanto a resistencia a la abrasión para ser utilizado como material para superficie de ruedo expuesta en caminos de lastre.

#### 4.2.7. Evaluación de índice de durabilidad

Para la evaluación del cumplimiento del índice de durabilidad del RAP-01 Dota y RAP-02 Cartago se valoró esta condición tanto para agregado grueso como para agregado fino, en las Figuras 4.20. y 4.21. se muestran la comparación de los resultados obtenidos, para ambos casos se puede evidenciar que cumplen con el porcentaje mínimo establecido para su uso como bases y subbases, así como material para capas de rodadura.



**Figura 4.20.** Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) índice de durabilidad para agregado fino obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.21.** Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) índice de durabilidad para agregado grueso obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO.  
Fuente: Camacho, P.

La evaluación de propiedades físicas-mecánicas como el índice de durabilidad, posee relevancia en la definición de las calidades de los materiales para uso en caminos de lastre, por cuanto definen qué tanta degradación puede sufrir un material; en este caso las muestras de RAP evaluadas cumplen con las condiciones técnicas de uso, principalmente como se ha indicado en anteriores apartados, debido a la naturaleza del agregado que compone el RAP además debe considerarse que el material es evaluado para una condición en la cual se va a encontrar a la intemperie y sometido directamente a la cargas vehiculares, así como al efecto de tracción de estos. Otro factor a considerar que puede incidir en el índice de durabilidad

es el recubrimiento asfáltico del agregado que compone el RAP, esto puede mejorar su índice de durabilidad frente a MGV.

#### 4.2.8. Evaluación de pérdida de sanidad en sulfato de sodio

El último ensayo empleado para evaluar la calidad de los agregados que componen el RAP es la pérdida de sanidad en sulfato de sodio, en las Figuras 4.22. y 4.23. se puede observar la comparación de los resultados obtenidos para agregado fino y grueso, debe tomarse en cuenta que la tolerancia máxima es de un 12 % para ambos casos, por lo tanto, el RAP cumple con las solicitudes conforme a las especificaciones técnicas vigentes.

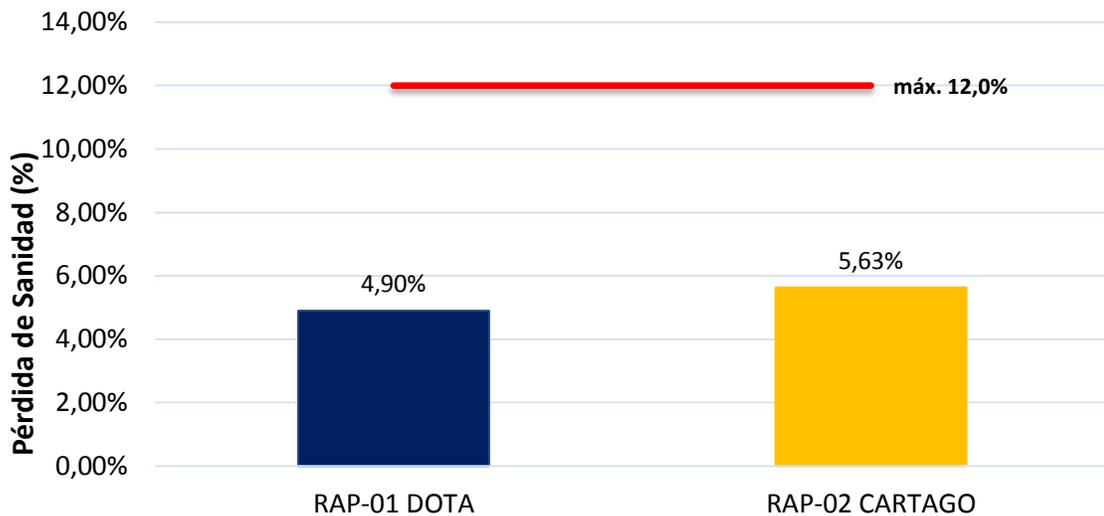


Figura 4.22. Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) índice de durabilidad para agregado grueso obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO.

Fuente: Camacho, P.

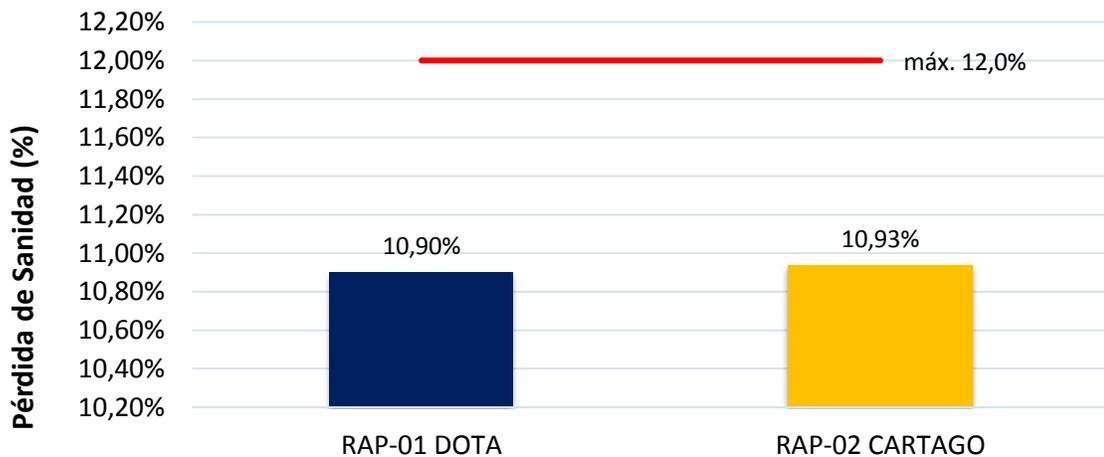


Figura 4.23. Comparación de cumplimiento de porcentaje (%) índice de durabilidad para agregado grueso obtenidos para RAP de planteles DOTA y CARTAGO.

Fuente: Camacho, P.

Mediante este método se tiene que la calidad de los agregados que componen ambas muestras de RAP poseen la capacidad de soportar la acción de los agentes atmosféricos, que puedan degradar el agregado, y por ende producir deterioros prematuros en el material, es importante notar que para ambos casos, a pesar de que las fuentes son diferentes y variables entre sí, el parámetro de pérdida por sanidad es relativamente constante para ambas muestras, lo cual puede dar una idea de la caracterización del RAP en forma en general, en cuanto a la evaluación de su calidad para uso como material expuesto para caminos de lastre.

#### 4.2.9. Evaluación general del RAP para uso como sustituto al MGV en caminos de lastre

Este apartado presenta el resumen de evaluación general de las muestras RAP-01 Dota y RAP-02 Cartago, conforme a las especificaciones técnicas del manual del CR-2010 para materiales que van a ser utilizados para caminos de lastre. En el Cuadro 4.10. se refleja los resultados finales obtenidos, mediante el cual se puede evidenciar que las muestras analizadas cumplen por sí sola como material para ser utilizado en caminos con superficie de rueda expuesta, se debe hacer la observación que para el caso de la evaluación granulométrica no se dio cumplimiento para las graduaciones evaluadas sino únicamente para la Subbase Graduación B de la sección 301 del CR-2010.

**Cuadro 4.10.** Evaluación de cumplimiento general de las muestras de RAP como material para caminos de lastre.

Ensayo Evaluado	RAP-01 Dota	RAP-02 Cartago	Resultados de la Evaluación Estadística mediante t de Student
<b>Índice Plástico y Límite Líquido</b>	No Cumple*	No Cumple*	No Aplica.
<b>Granulometría</b>	Cumple Parcialmente**	Cumple Parcialmente**	<b>Agregado Grueso:</b> Hipótesis nula, existe igualdad de medias; <b>Agregado Fino:</b> Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa
<b>Densidad Máxima y Humedad Óptima</b>	No aplica	No aplica	Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa
<b>Índice de Soporte de California (CBR)</b>	Cumple	Cumple Parcialmente** *	Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa
<b>Caras Fracturadas</b>	Cumple	Cumple	Hipótesis nula, existe igualdad de medias
<b>Abrasión de Los Ángeles</b>	Cumple	Cumple	Hipótesis nula, existe igualdad de medias
<b>Índice de Durabilidad</b>	Cumple	Cumple	Hipótesis nula, existe igualdad de medias
<b>Pérdida de Sanidad en Sulfato de Sodio</b>	Cumple	Cumple	Hipótesis nula, existe igualdad de medias

\*Nota 1: Materiales son no plásticos por tanto no cumplen.

\*\*Nota 2: Cumple para algunas de las graduaciones evaluadas.

\*\*Nota 3: Solo cumple como material selecto para capa de rodadura.

Fuente: Camacho, P.

Para el caso del RAP-01 Dota se tiene que para ninguna de las graduaciones granulométricas evaluadas se tiene un cumplimiento al 100% de los tamices requeridos, principalmente debido a un exceso de finos que posee (Malla No. 200), además de un faltante de material retenido en el tamiz de 25,4mm, situación que para efectos de poder emplearlo como material para uso en caminos de lastre, se deberá mejorar mediante una homogeneización del material por medios mecánicos, así como la adición de otro material que funcione como correctivo, a fin de añadir agregado en los tamices correspondientes que permitan cumplir con las graduaciones que solicita la normativa vigente.

En cuanto a la calidad de los agregados, el RAP proveniente del plantel de Dota, en cuanto a las propiedades de textura, abrasión, dureza, y sanidad cumple como material para capa de rodadura, así como para base y subbase, por lo que se puede concluir que el material posee la calidad adecuada para su uso en caminos de lastre, además mediante el ensayo de capacidad de soporte se logró evidenciar que el CBR de este material cumple incluso para ser utilizado como material de base con un CBR mayor a 80, lo cual refleja que posee una resistencia a las deformaciones y deterioros producto de la falta de capacidad de soporte como ahuellamientos o roderas.

Por otro lado, el material RAP-02 Cartago cumple con dos de las graduaciones granulométricas de material, específicamente para Subbase Graduación B de la Sección 301 y Material Selecto para Capa de Rodadura ambos del CR-2010, para estos casos no habría necesidad de adecuar el material mediante homogeneización mecánica o la adición de un segundo material como correctivo, salvo que se requiera otra de las graduaciones empleadas en la evaluación. Si bien es cierto, esta fuente también superó los ensayos de calidad de agregado, el CBR obtenido es menor a 30 y por ende no es un material recomendado para superficie de ruedo expuesta, razón por cual solo cumple como material selecto para capa de rodadura, un factor muy importante a tomar en cuenta, por cuanto en el caso que sea el único material disponible para colocar en un camino, el mismo no posee el CBR requerido para ser usado por sí solo. A pesar, este material podría tener uso como material de préstamo o material de capa drenante entre la subrasante y la capa de subbase para efecto de abatir el nivel freático, y así evitar que alcance las capas superiores.

Con relación a los parámetros de calidad como textura, durabilidad, abrasión y sanidad, se tiene que para la comparación entre las fuentes de RAP se aplicó la prueba *t de Student* con un nivel de confianza del 95% (ver apéndice sección 7.3.), donde se considera como hipótesis nula que existe igualdad entre las medias y como hipótesis alternativa que hay diferencias estadísticamente representativas entre las medias de caras fracturadas, abrasión de los ángeles y los índices de durabilidad y sanidad; en este caso se acepta la hipótesis nula, y por ende se rechaza la hipótesis alternativa indicando que para los parámetros de calidad entre los materiales de RAP de Dota y Cartago no existen diferencias estadísticamente significativas, y por ende se logra visualizar que no hay variabilidad estadísticamente representativa entre ambas fuentes de material, al menos en cuanto a los resultados de los ensayos mencionados, lo anterior permite indicar que existe similitud en las calidades mecánicas de los agregados que componen las distintas muestras de RAP.

Basados en los resultados obtenidos, se puede presumir que los parámetros de granulometría y capacidad de soporte (CBR) son los aspectos físico-mecánicos que inciden en el cumplimiento de un material de RAP para que sea utilizado en un camino de lastre, si bien es cierto el resto de factores no deben dejarse de lado para determinar el cumplimiento de un material, la evaluación previa de granulometría y CBR es imprescindible para caracterizar preliminarmente el material de RAP, a fin de determinar su aceptación o rechazo, mientras que los parámetros de calidad del agregado como textura, durabilidad, abrasión y sanidad, pueden evaluarse en un segundo plano, una vez se haya demostrado el cumplimiento granulométrico y de capacidad de soporte, esto para aquellos proyectos donde se requiere usar el material de RAP por sí solo, es decir sin combinar o añadir algún material correctivo, el comportamiento del RAP combinado con materiales de base y subbase se incluye en el apartado siguiente. Es importante señalar que el cumplimiento de la granulometría no debe verse como un fin en sí mismo, por lo que podría controlarse

en el sentido de asegurar uniformidad del material, así como una graduación que permita una densidad adecuada.

Basado en las evaluaciones a las fuentes de material de RAP se tiene que éste podría ser factible para ser usado como sustituto al material granular virgen, por cuanto cumple con los requerimientos técnicos conforme a los manuales técnicos vigentes, siendo la principal limitación el ajuste granulométrico, parámetro donde obtuvo un cumplimiento parcial, requiriendo de la aplicación de los márgenes de tolerancia para aceptar su cumplimiento.

Debe tomarse en cuenta que no existe a una graduación específica para uso de RAP en caminos no pavimentados, además se puede mejorar el cumplimiento granulométrico mediante el fraccionamientos y tamizado del RAP a fin de obtener proporciones necesarias para ajustarse a los rangos requeridos. Además, para determinar la factibilidad de un material de RAP se debe realizar como mínimos ensayos de CBR por cuanto se logró observar que existe variabilidad entre los resultados de éste parámetro, por lo que no necesariamente se puede obtener el CBR requerido para soportar la exigencia del tránsito de una vía, en términos generales la factibilidad inicial de un RAP se puede obtener mediante la determinación de la granulometría, densidad, contenido de humedad y el CBR de dicho material, mientras que características como durabilidad, textura, abrasión y sanidad se puede realizar como complemento una vez se tenga certeza de las fuentes a utilizar.

### 4.3. OBJETIVO 3

Como parte del desarrollo del tercer objetivo se estableció la realización los ensayos de laboratorio para especímenes compuestos por combinaciones de RAP y MGV, a fin de definir una concentración de RAP por peso de material granular virgen tal que permita alcanzar un desempeño adecuado como superficie de ruede en pavimentos expuestos, para ello se realizó la combinación con porcentajes de RAP de 25%, 50% y 75%; estos porcentajes se definieron basados en los reportes de diversos autores donde señalan los resultados que han obtenido con dichas combinaciones de RAP y MGV.

La combinación de los materiales tiene por objeto visualizar en qué medida la adición de RAP a un material MGV como el utilizado en caminos de lastre, puede aumentar o disminuir las calidades de éste, conforme a las especificaciones técnicas del CR-2010. Además, puede darse una situación donde las fuentes de RAP por sí solas no cumplan, sin embargo, pueden ser aprovechadas mediante la combinación con MGV; al contrario, puede ser que se requiera mejorar las condiciones de una fuente de MGV mediante la a adición de RAP para así obtener un material de mejores competencias.

Las combinaciones empleadas de RAP y MGV se realizaron conforme a la disponibilidad de material que pudo obtenerse de los planteles del MOPT, puesto que los muestreos se realizaron en distintos periodos de tiempo por lo que la disponibilidad de material variaba conforme avanzaba la ejecución de los distintos proyectos; además de la limitación sobre la cantidad de pruebas que podían realizarse, por tanto se optó por realizar la primera combinación de materiales entre los materiales RAP-01 Dota y el MGV-02 Caracol, y la segunda combinación se conformó entre los materiales RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás, en el Cuadro 4.11. se muestran las combinaciones empleadas, además en la sección 7.2. del Apéndice se muestra los resultados completos de las combinaciones de RAP y MGV.

**Cuadro 4.11.** Combinaciones empleadas de material granular virgen y perfilado de pavimento asfálticos.

Combinación	Proporción a analizar (MGV/RAP)	Procedencia MGV	Punto de Muestreo MGV	Procedencia RAP	Punto de Muestreo RAP
1	0/100	Tajo Ujarrás (MGV-01)	Del apilamiento en tajo	RAP combinado Ruta Nacional 251 y 202 extraído del plantel de MOPT Cartago (RAP-02)	Del apilamiento en plantel
	25/75				
	50/50				
	75/25				
	100/0				
2	0/100	Tajo El Caracol (MGV-02)	Del apilamiento en tajo	RAP combinado Ruta Nacional 2 (Cerro de la Muerte) extraído del plantel de MOPT Santa María de Dota (RAP-01)	Del apilamiento en plantel
	25/75				
	50/50				
	75/25				
	100/0				

Fuente: Camacho, P.

A continuación, en las Figuras 4.24 a la 4.26., se muestra a manera de ejemplo las mezclas de material de MGV-02 de Tajo Caracol con RAP-01 de Dota, a fin de visualizar el detalle de las características físicas de la mezcla de MGV y RAP.



**Figura 4.24.** Vista de la mezcla del material de 75% MGV-02 Caracol y 25% RAP-01 Dota.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.25.** Vista de la mezcla del material de 50% MGV-02 Caracol y 50% RAP-01 Dota.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.26.** Vista de la mezcla del material de 25% MGV-02 Caracol y 75% RAP-01 Dota.  
Fuente: Camacho, P.

### 4.3.1. Comparación de las propiedades de los materiales fuente de MGV y RAP.

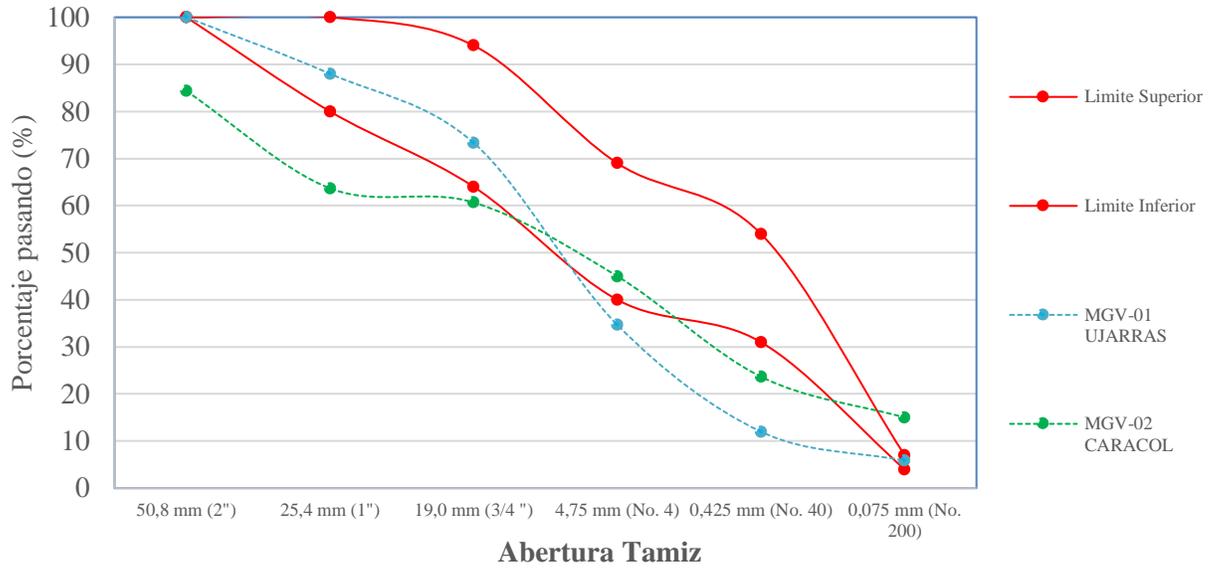
En este apartado se evaluarán las propiedades de las fuentes de MGV empleadas en las combinaciones, así como su comparación con el RAP, a fin de establecer las modificaciones que pueden surgir de los materiales fuente, y así poder observar su variación conforme a las especificaciones técnicas. Primeramente, debe tomarse en consideración que el único material de todos los MGV muestreados que posee plasticidad es el tomado del Tajo Caracol, el cual proviene de cantera; tal y como se evidencia en el Cuadro 4.12. el mismo cumple, al poseer un límite líquido e índice plástico dentro del rango de las especificaciones, razón por lo cual fue seleccionado para realizar combinaciones, por cuanto se pretende visualizar el comportamiento de un material con plasticidad al combinar con distintas proporciones de RAP. Siendo éste último un material “no plástico”. Por otro lado, se tiene el material del Tajo Ujarrás que es material proveniente de río y por tanto un material no plástico. Debe tomarse en consideración que ambas fuentes han sido utilizadas para realizar relastrados de caminos, esto conforme a lo reportado por las Ingenierías de Zona de CONAVI; el material de Ujarrás incluso es empleado con frecuencia con subbase y base, mientras que el material de Caracol como material de préstamo o subbase, así como correctivo para adicionar plasticidad a materiales mas granulares.

**Cuadro 4.12.** Resultados de límite líquido e índice plástico para las fuentes de MGV muestreadas.

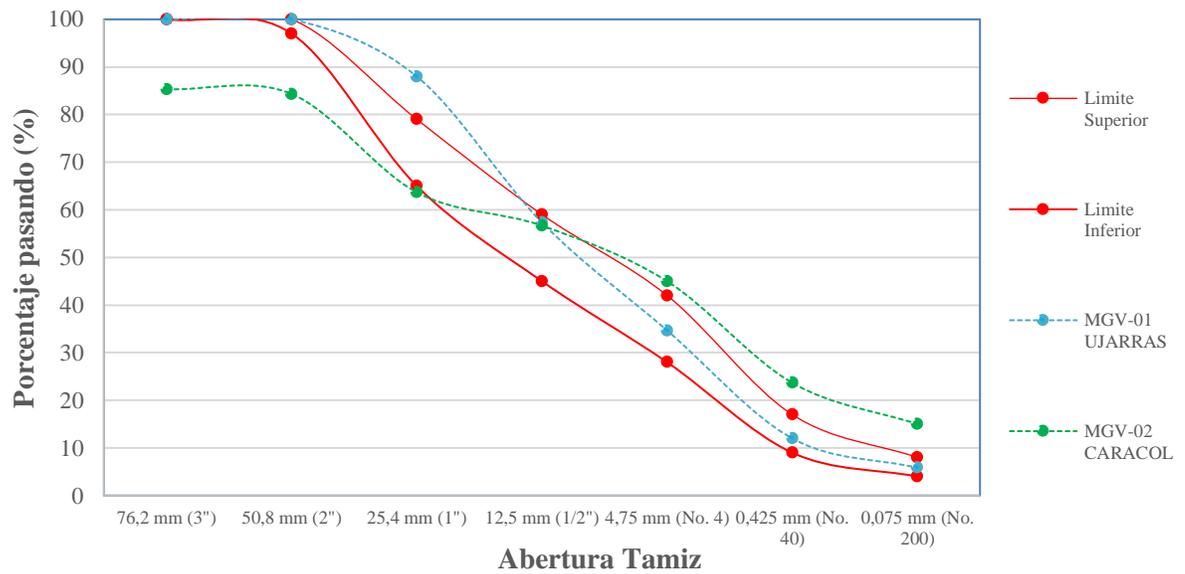
Parámetros	Base CR - 2010, Sección 301, Graduación C	Subbase CR - 2010, Sección 301, Graduación A	Subbase CR - 2010, Sección 301, Graduación B	CR 311.03 Capa granular de rodadura graduación TM-40b modificada	CR.204.07 Material selecto para la capa superficial de la vía	MGV-01 UJARRAS	MGV-02 CARACOL
<b>Límite Líquido, LL</b>	máx.35	máx.35	máx.35	máx.35	máx.35	NP	27,73
<b>Índice Plástico, IP</b>	Entre 4 y 9	Entre 4 y 10	Entre 4 y 10	Entre 4 y 10	Max. 10	NP	8,77

Fuente: Camacho, P.

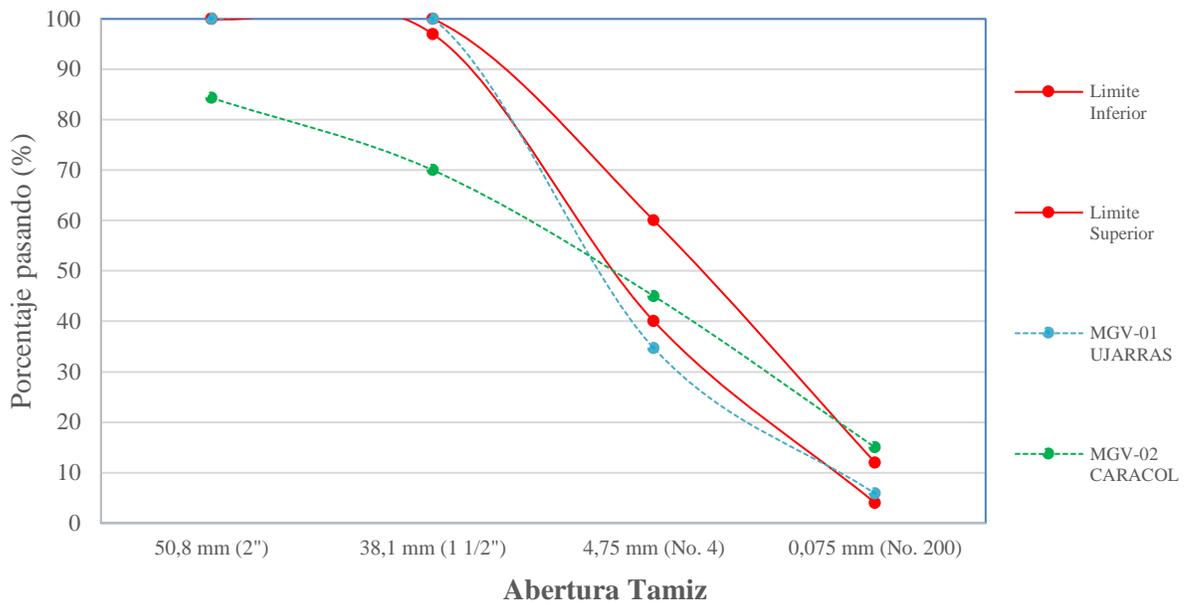
Al igual que para la evaluación del material de RAP, para mostrar el cumplimiento de los MGV conforme a las especificaciones, se elaboran las curvas granulométricas; en las Figuras 4.27 a la 4.31. se muestra las curvas granulométricas de MGV para las cinco graduaciones empleadas para caminos con superficie de ruedo expuesta.



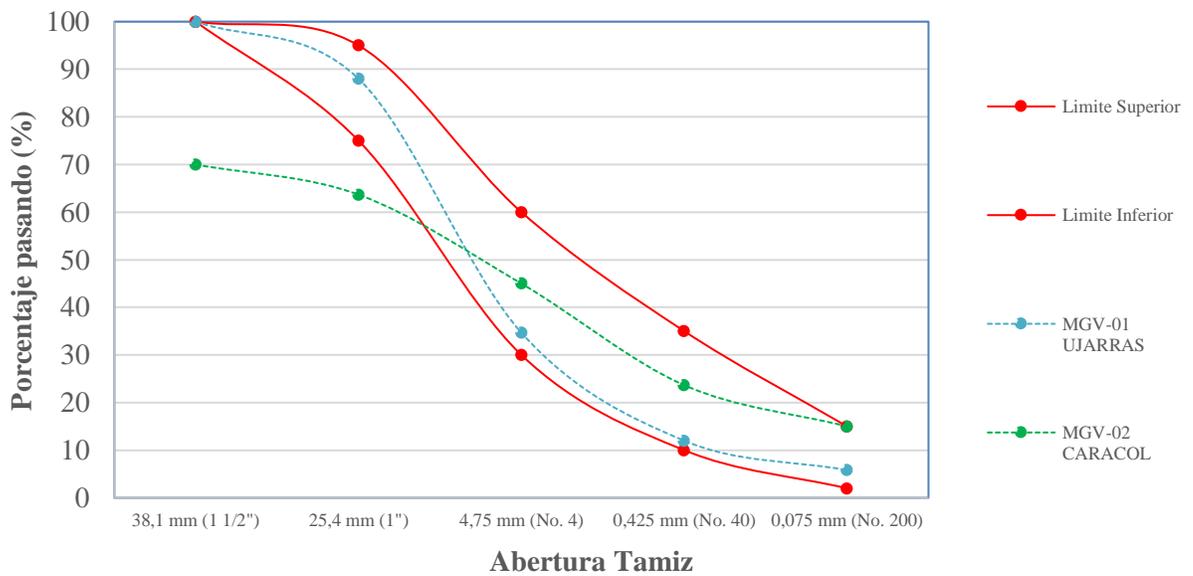
**Figura 4.27.** Comparativa para la curva granulométrica de una Base Graduación C para MGV de las muestras de Ujarrás y Caracol.  
Fuente: Camacho, P.



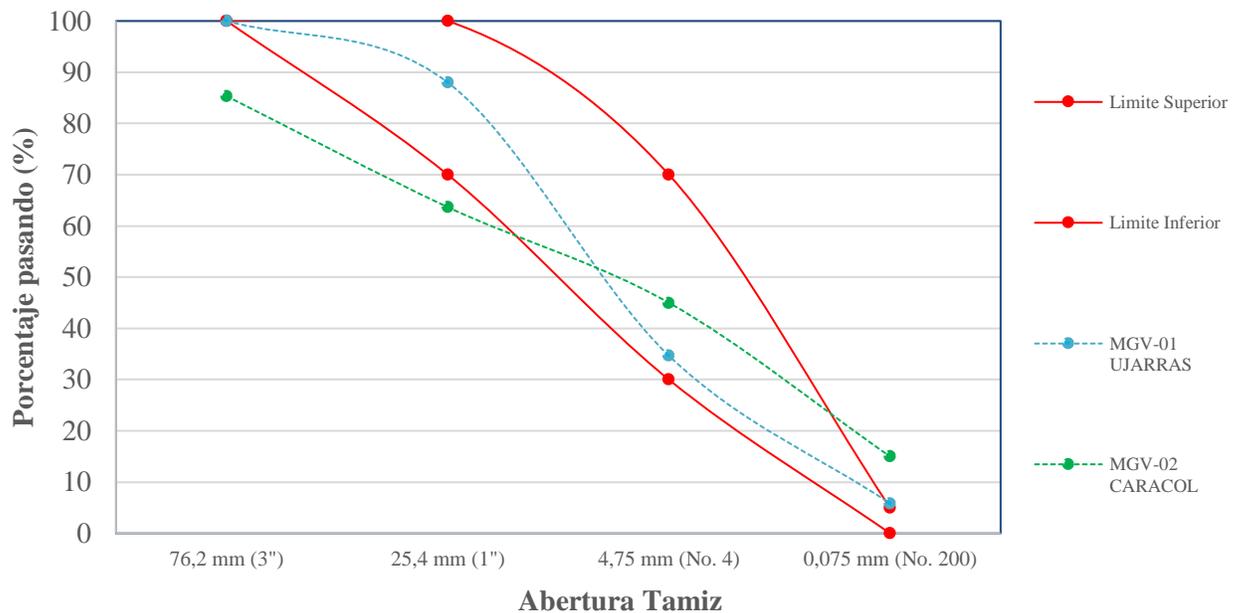
**Figura 4.28.** Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación A para MGV de las muestras de Ujarrás y Caracol.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.29.** Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación B para MGV de las muestras de Ujarrás y Caracol.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.30.** Comparativa para la curva granulométrica de Capa Granular de Rodadura Graduación TM-40b para MGV de las muestras de Ujarrás y Caracol.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.31.** Comparativa para la curva granulométrica de Material Selecto para Capa Superficial de la Vías para MGV de las muestras de Ujarrás y Caracol.  
Fuente: Camacho, P.

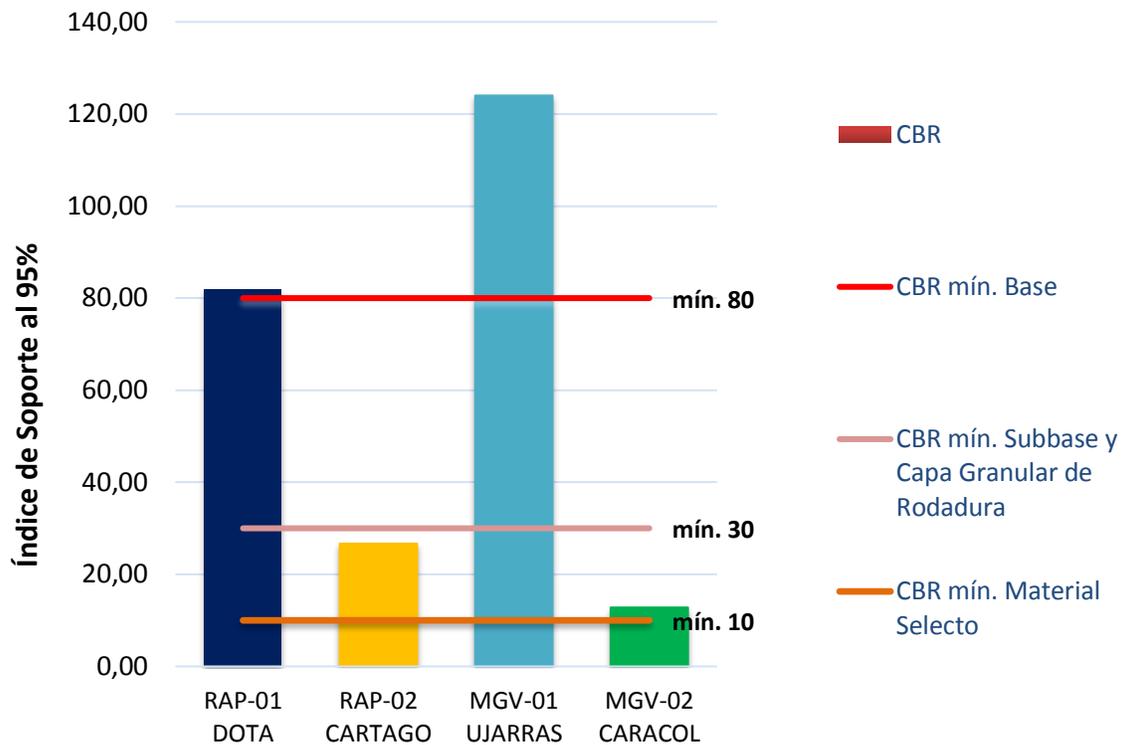
Los resultados del cumplimiento del análisis granulométrico se resumen en el Cuadro 4.13. Es importante señalar que el material MGV-02 proveniente del Tajo Caracol no cumple por sí solo para ninguna de las graduaciones solicitadas, principalmente debido a que posee agregados que son retenidos en el tamiz de 76,2 mm; por cuanto en la mayoría de proyectos de conservación vial este tamaño de agregados se considera un sobre tamaño, es importante tomar en consideración que para el caso del material del Tajo Caracol, al momento de realizar el muestreo se estaba extrayendo un material de una veta nueva de cantera, por lo para que para mejorar la graduación del material se requiere de un fraccionamiento adicional del agregado grueso, el cual no fue disponible al momento de muestreo. Por otro lado, el material de Ujarrás cumple para las solicitudes de material selecto para capa superficial y capa granular de rodadura graduación TM-40b, es importante diferenciar que el proceso del material de Ujarrás posea un fraccionamiento adicional, lo puede incidir en la adecuación en el cumplimiento de algunas graduaciones.

**Cuadro 4.13.** Cumplimiento de graduaciones granulométricas para MGV.

Especificación Material	MGV-01 Ujarrás	MGV-02 Caracol
Base CR -2010, Sección 301, Graduación C	No Cumple	No Cumple
Subbase CR -2010, Sección 301, Graduación A	No Cumple	No Cumple
Subbase CR -2010, Sección 301, Graduación B	No Cumple	No Cumple
Capa granular de rodadura graduación, CR 311.03 TM-40b modificada	<b>Cumple</b>	No Cumple
Material selecto para la capa superficial de la vía CR.204.07	<b>Cumple</b>	No Cumple

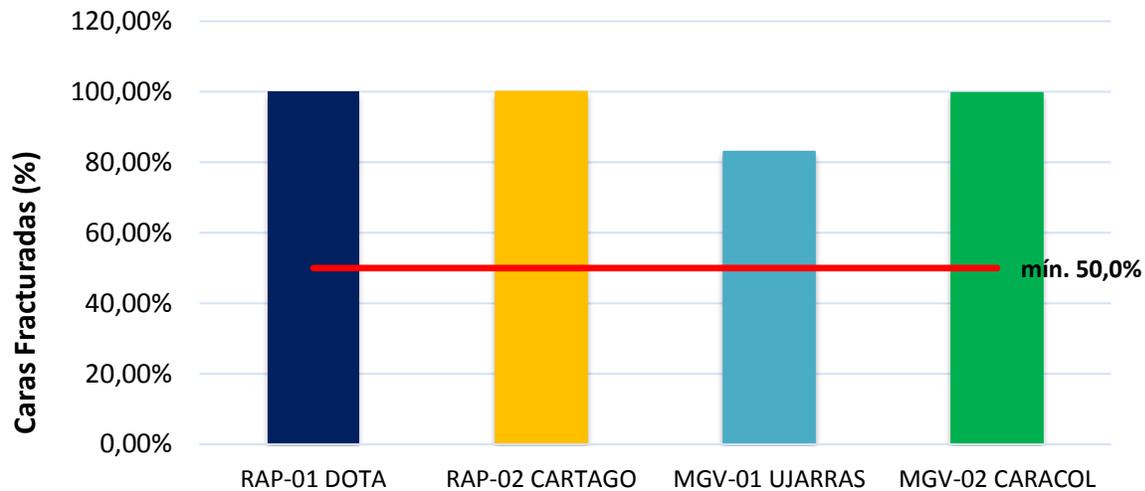
Fuente: Camacho, P.

Se debe destacar que existen diferencias en las calidades de los materiales MG. En la Figura 4.32. se puede observar que el MG-01 Ujarrás posee competencias adecuadas para cumplir con un CBR tanto para bases, subbases y capas de rodadura, mientras que el material de Caracol solo cumple como material selecto para capa superficial, es sustancial hacer notar que la mayoría de especificaciones solicitan un mínimo de CBR de 30 para materiales para relastrados o capas de rodadura de superficies no pavimentada, por lo que el rango de acción del material del Tajo Caracol es limitado en cuanto a su uso. Por otro lado, se puede apreciar que existe variaciones en cuanto a los CBR de RAP y MG, al igual que en el caso del RAP, el CBR de los materiales granulares vírgenes puede variar dependiendo del origen, en este sentido se tiene que existe el RAP-01 de Dota y MG-01 de Ujarrás poseen un índice de soporte que cumple como material para base y subbases de pavimentos.



**Figura 4.32.** Comparación de CBR obtenidos para los materiales fuente MG y RAP.  
Fuente: Camacho, P.

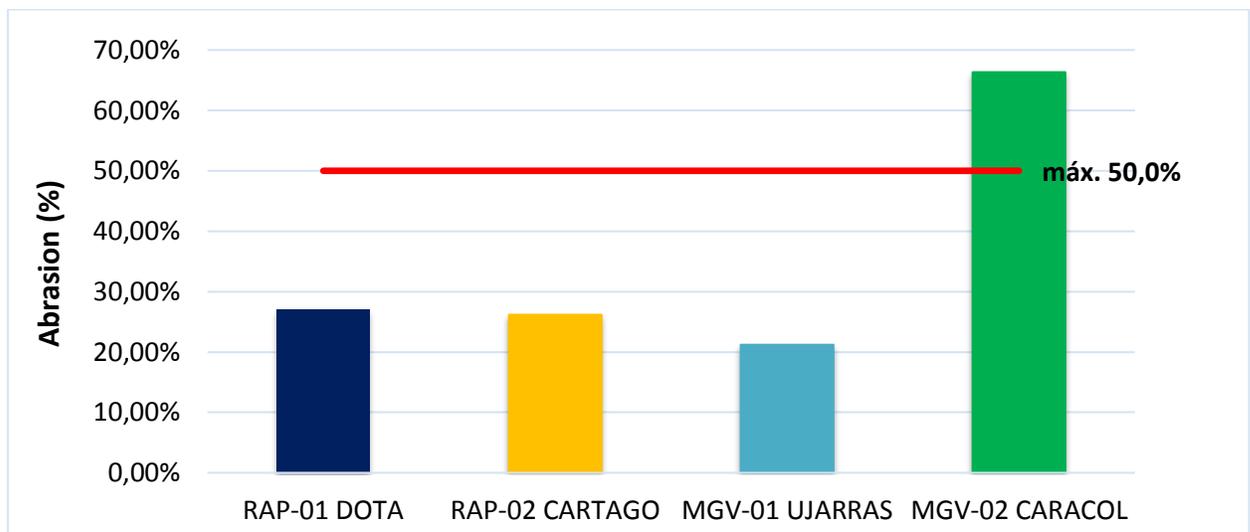
Por otro lado, en la Figura 4.33. se muestra una comparación de los resultados de caras fracturadas, donde para ambas fuentes se supera el 50% requerido, y por tanto cumplen con la especificación; esto es importante principalmente en el caso del material del Tajo Ujarrás por lo que a pesar de ser “no plástico”, su uso podría ser avalado al cumplir con el requerimiento mínimo de caras fracturadas, además se tiene que el material de Ujarrás, de las cuatro fuentes empleadas es el único que no posee un 100% de caras fracturadas posiblemente por ser material tomado de río.



**Figura 4.33.** Comparación de porcentaje de caras fracturadas obtenidos para los materiales fuente MGV y RAP.

Fuente: Camacho, P.

Relacionado a la pérdida por abrasión en la máquina de los Ángeles, se muestra en la Figura 4.34. que el material MGV-02 Caracol no cumple con la especificación de abrasión superando el requerimiento de 50%, a diferencia del material MGV-01 Ujarrás que se mantiene en aproximadamente un 21,20%, el cual cumple con los requerimientos en cuanto a desgaste de los agregados, además éste último mantiene un resultado similar al presentado por los materiales de RAP.

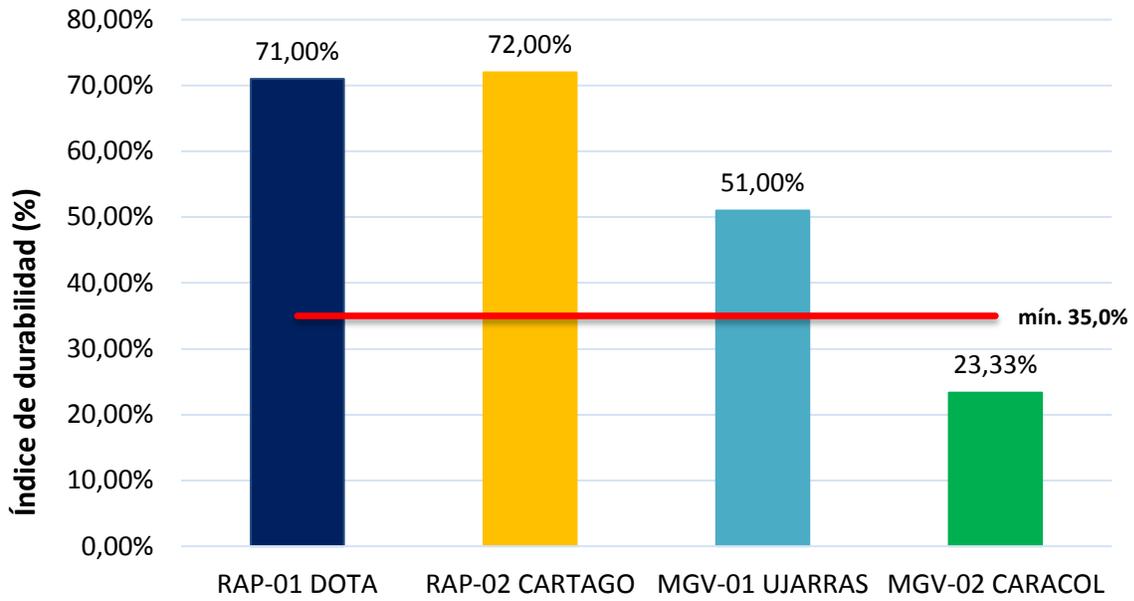


**Figura 4.34.** Comparación de Abrasión en Máquina de los Ángeles para los materiales fuente MGV y RAP.

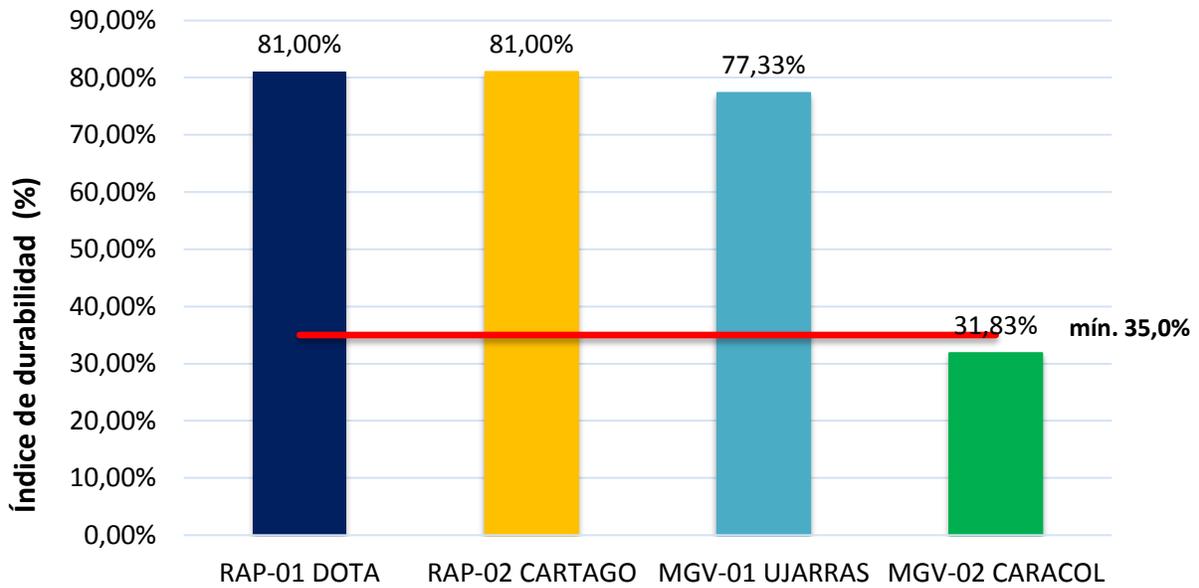
Fuente: Camacho, P.

En las Figuras 4.35 a la 4.38. se muestra la comparación gráfica de los resultados de índice de durabilidad y pérdida de sanidad en sulfato de sodio para agregado fino y grueso; de las gráficas se puede mostrar que el material MGV-01 Ujarrás cumple con los parámetros a excepción de la sanidad en sulfato de sodio del agregado fino, mientras que MGV-02 Caracol no cumple para ninguno de los parámetros evaluados, esto contrasta con el cumplimiento de ambas fuentes de RAP para estos parámetros, donde se

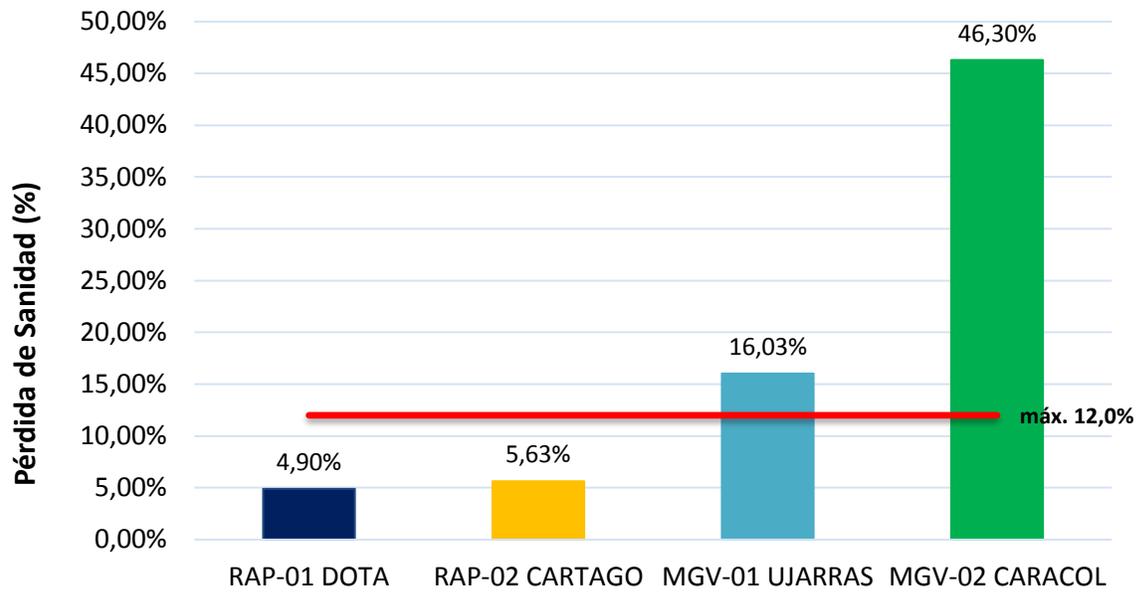
obtuvo resultados muy similares para los índices de durabilidad y sanidad tanto del agregado grueso como el fino.



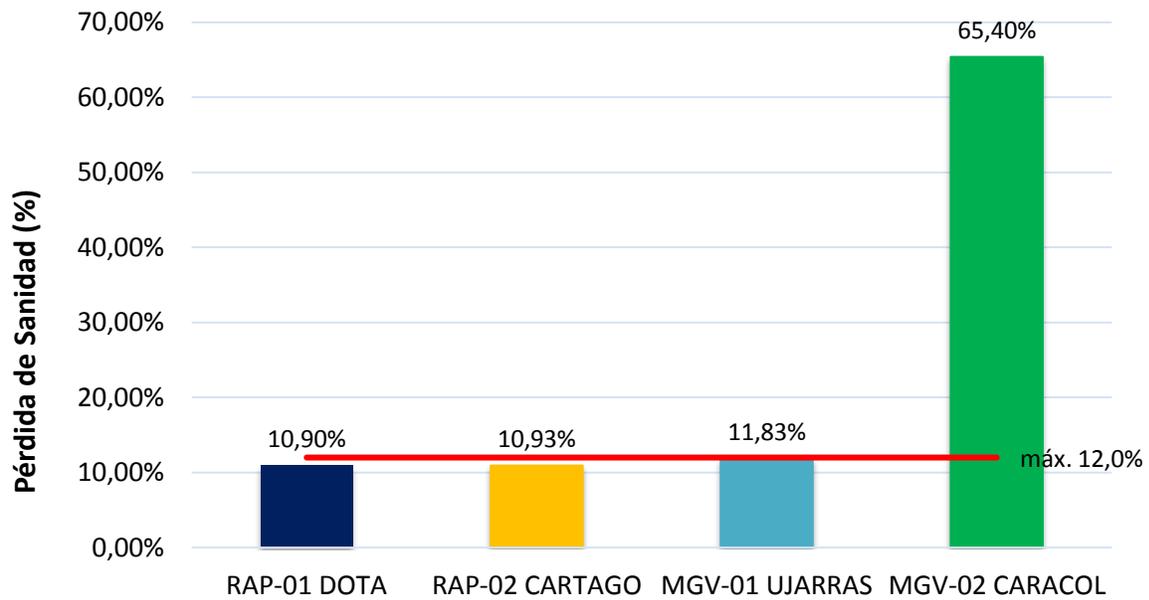
**Figura 4.35.** Comparación de Índice de Durabilidad (Fino) para los materiales fuente MGV y RAP.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.36.** Comparación de Índice de Durabilidad (Grueso) para los materiales fuente MGV y RAP.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.37.** Comparación de Pérdida de Sanidad (Fino) para los materiales fuente MG y RAP.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.38.** Comparación de Pérdida de Sanidad (Grueso) para los materiales fuente MG y RAP.  
Fuente: Camacho, P.

En el Cuadro 4.14. se resume la caracterización tanto de los criterios de aceptación como de calidad de los materiales fuentes empleados para realizar la combinación con RAP; debe tomarse en consideración que se evaluó la variabilidad estadísticamente representativa de las cuatro fuentes mediante la aplicación de una ANOVA de un factor, además se complementó con la Prueba de “Tukey para señalar donde se presentaban las diferencias (ver apartado 7.4 del Apéndice), de lo cual se puede observar que si existen diferencias entre los materiales de RAP y MGV en cuanto a su propiedades físico-mecánicas, por tanto, para la todos los ensayos realizados salvo algunos tamices del análisis granulométrico, se rechaza la hipótesis nula y por ende se acepta la hipótesis alternativa, es decir existen diferencias estadísticamente representativas entre las medias de los materiales, ya sea entre los materiales de MGV entre ellos, así como entre los materiales de RAP.

**Cuadro 4.14.** Evaluación de cumplimiento general de las muestras de MGV como material para caminos de lastre.

Ensayo Evaluado	MGV-01 Ujarrás	MGV-02 Caracol	Resultados de la Evaluación Estadística mediante ANOVA de un factor y prueba de “Tukey”.
<b>Índice Plástico y Límite Líquido</b>	No Cumple*	Cumple	No Aplica.
<b>Granulometría</b>	Cumple Parcialmente**	No Cumple	<b>Para la comparación entre MGV se tiene (ver detalle completo en la sección 7.4. del Apéndice):</b> Hipótesis nula, existe igualdad de medias: para los tamices de 12,5mm, 9,5mm y 4,75mm. Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa para el resto de tamices.
<b>Densidad Máxima y Humedad Óptima</b>	No aplica	No aplica	Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa entre todas muestras.
<b>Índice de Soporte de California (CBR)</b>	Cumple	Cumple Parcialmente***	Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa entre todas muestras.
<b>Caras Fracturadas</b>	Cumple	No Cumple	Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa entre las muestras de MGV de Caracol y Ujarrás, así como entre la muestra de Ujarrás y ambas fuentes de RAP.
<b>Abrasión de Los Ángeles</b>	Cumple	No Cumple	Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa entre todas muestras.
<b>Índice de Durabilidad</b>	Cumple	No Cumple	<b>Agregado Fino:</b> Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa entre las muestras de MGV de Caracol y Ujarrás, así como entre la muestra de Caracol y ambas fuentes de RAP. <b>Agregado Fino:</b> Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa entre todas muestras.
<b>Pérdida de Sanidad en Sulfato de Sodio</b>	Cumple Parcialmente	No Cumple	<b>Agregado Fino:</b> Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa entre las muestras de MGV de Caracol y Ujarrás, así como entre la muestra de Caracol y ambas fuentes de RAP, y entre la muestra de Ujarrás y ambas fuentes de RAP. <b>Agregado Fino:</b> Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa entre las muestras de MGV de Caracol y Ujarrás, así como entre la muestra de Caracol y ambas fuentes de RAP.

\*Nota 1: Materiales son no plásticos por tanto no cumplen.

\*\*Nota 2: Cumple para dos de las cinco graduaciones evaluadas.

\*\*\*Nota 3: Solo cumple como material selecto para capa de rodadura.

Fuente: Camacho, P.

La variabilidad obtenida puede deberse al origen de los materiales tanto MGV como RAP, por cuanto en el caso de los MGV uno de ellos es extraído de cantera en el caso de Caracol y mientras que Ujarrás

proviene de tajo de río, además los procesos de fraccionamiento y tamizado varían para cuatro fuentes varían desde la forma de los apilar los materiales hasta su homogenización. Esta caracterización permite tomar un punto de partida a fin de visualizar los cambios en las propiedades de los materiales de MGCV conforme se adiciona RAP.

Es importante destacar que el material MGCV-02 Caracol no es apto para uso en superficie de ruedo expuestas, por cuanto no cumplió en la mayoría de parámetros conforme a las especificaciones técnicas, no obstante, se adoptó la decisión de emplearlo en las mezclas con RAP a fin valorar si el RAP podría mejorar algunas propiedades del material, así como comprobar el desempeño de la combinación de RAP con un material con plasticidad.

#### 4.3.2. Evaluación de los límites líquido e índice plástico para las combinaciones de RAP y MGCV.

Basados en los resultados de laboratorio se tiene que de las cuatro fuentes muestreadas (2 RAP y 2 MGCV), solo una de ellas, la tomada del tajo Caracol contenía plasticidad mientras que las demás se catalogan como materiales no plásticos (NP). Es importante recalcar que los materiales de RAP y el proveniente del Tajo de Ujarrás, son materiales no plásticos, sin embargo, como se indicó en apartados anteriores no implican que deban ser descartados, por cuanto los parámetros técnicos permiten agregados no plásticos, siempre y cuando cumplan con tener más del 50% de caras fracturadas retenidas en la malla No. 4 (4,75 mm), por tanto, el cumplimiento de este parámetro se analizará en el apartado de caras fracturadas. Debe tomarse en consideración que la plasticidad permite brindarles cohesión a los agregados para evitar desmoronamientos, esto toma mucha importancia en caminos de lastre por cuanto la superficie de ruedo se encuentra expuesta. Ahora en el cuadro 4.15. se muestran los resultados de límite líquido e índice plástico para las combinaciones de RAP y MGCV; en este caso solo se presenta la combinación Dota-Caracol pues es la única que presentó plasticidad.

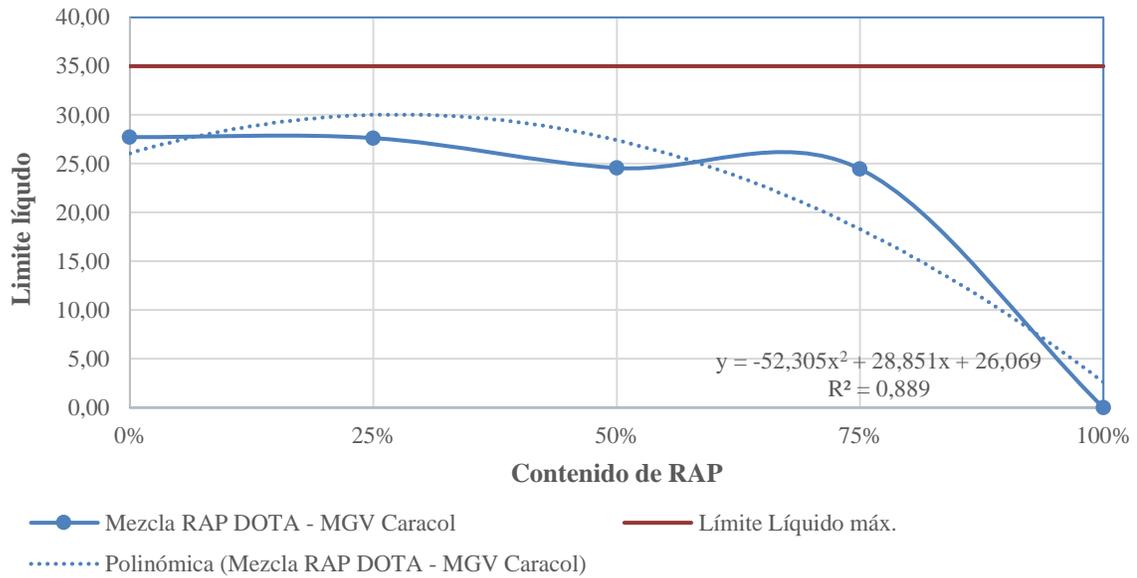
**Cuadro 4.15.** Resultados de límite líquido e índice plástico para las combinaciones de RAP-01 Dota y MGCV-02 Caracol.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0%	25%	50%	75%	100%
			MGV Caracol y 100% RAP Dota	MGV Caracol y 75% RAP Dota	MGV Caracol y 50% RAP Dota	MGV Caracol y 25% RAP Dota	MGV Caracol y 0% RAP Dota
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE PLÁSTICO	AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)	<b>Límite Líquido, LL</b>	0,00	24,47	24,57	27,63	27,73
	AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)	<b>Índice Plástico, IP</b>	0,00	5,80	5,57	8,40	8,77

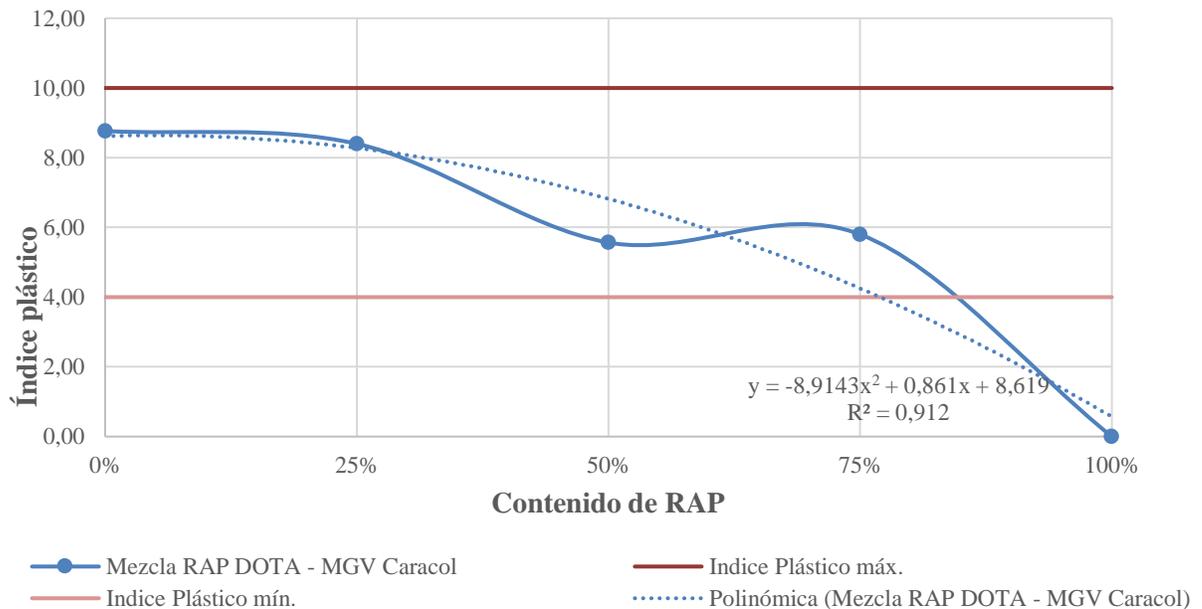
Fuente: Camacho, P.

Del cuadro anterior, se puede visualizar que la combinación de RAP-01 Dota con MGCV-02 Caracol posee plasticidad; el material del Caracol aporta la plasticidad a dicha mezcla; para las tres combinaciones efectuadas, los resultados se ubican dentro de las especificaciones técnicas para cumplir como material para superficie de ruedo expuesta. Para el caso de la combinación de RAP-02 Cartago con MGCV-Ujarrás se tiene que el material es no plástico, sin embargo, tal y como se indicó para la evaluación de las fuentes de RAP,

esto no significa que dicha combinación deba descartarse o sea indicador de incumplimiento, puesto que en caso de que se presente este escenario el material puede ser aceptado si éste cumple con un porcentaje mayor del 50% de caras fracturadas, este parámetro se evaluará en detalle en apartados siguientes, además en las Figuras 4.39. y 4.40. se muestra la variación del límite líquido e índice plástico conforme se aumenta el contenido de RAP de la mezcla.



**Figura 4.39.** Variación del límite líquido de la combinación RAP-01 Dota y MG Caracol.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.40.** Variación del índice plástico de la combinación RAP-01 Dota y MG Caracol.  
Fuente: Camacho, P.

De las figuras anteriores se puede observar que los valores de límite líquido e índice plástico tienden a disminuir conforme se aumenta el contenido de RAP en la mezcla, esto es congruente por cuanto el RAP es un material No Plástico (NP); es importante notar que conforme a la tendencia descrita del Límite Líquido, el mismo se mantiene entre un rango de valores de 24 a 27, para luego decaer para un contenido de RAP del 100%, esto se podría interpretar como que la acción del RAP al combinarse con un MGTV plástico genera variaciones leves en el contenido de agua del punto de transición del estado líquido a un estado plástico, en este caso donde el suelo adquiere una cierta resistencia al corte; esto puede estar unido al hecho a que el ligante asfáltico del RAP puede limitar la capacidad de absorción de agua de los agregados, lo cual podría generar una condición cuasi impermeable restándole así plasticidad al material combinado.

Se tiene que los valores disminuyen gradualmente entre las combinaciones con 25% a 75%, siendo el valor de 50% muy similar al de 75%, en este caso las 3 combinaciones empleadas superan las especificaciones para el cumplimiento conforme a Límite Líquido e Índice Plástico para ser utilizado en superficie de ruedo expuestas.

No se omite manifestar que se logró observar que existe un efecto de disminuir la plasticidad de un material si éste se combina con RAP, esto posee relevancia, puesto puede ser usado como material “correctivo” para combinar con agregados que superen los límites que establecen las especificaciones, o que por las propiedades del material, limitaciones en los procesos constructivo o condiciones climáticas lluviosas, los valores de límite líquido e índice de plasticidad deban disminuirse a un rango determinado.

#### **4.3.3. Evaluación del análisis granulométrico para las combinaciones de RAP y MGTV.**

Inicialmente de la caracterización de los MGTV, se tiene que el material MGTV-01 Ujarrás cumple con dos de las solicitaciones en cuanto a graduaciones, mientras que el material MGTV-02 Caracol no cumple con las graduaciones. Ahora, en el Cuadro 4.16. se muestran los resultados de porcentaje pasando los tamices para ambas combinaciones de RAP y MGTV. Además, en las Figuras 4.41. a la 4.50. se trazaron las curvas granulométricas para evaluar el cumplimiento de las graduaciones para cada una de las 5 especificaciones empleadas en la evaluación; para ello se elaboró un cuadro comparativo para cada combinación por aparte, incluyendo en cada gráfico las tres combinaciones de 25%, 50% y 75%, a fin de observar la tendencia de las curvas conforme a la dosificación.

Para el caso de la combinación conformada por RAP-01 Dota y MGTV-02 Caracol (ver Figura 4.41) se tiene que el material no alcanza la especificación de graduación para Base Graduación C, por cuanto posee un rango menor de material pasando la malla No. 40 (0,425 mm) para las tres combinaciones realizadas, mientras que para el caso de la malla No. 200 se puede observar que posee exceso de material pasando dicho tamiz, siendo que la combinación más cercana se encuentra al rango de cumplimiento la compuesta por un 25% de contenido de RAP. Por otro lado, para el caso de la mezcla compuesta por RAP-02 Cartago y MGTV-01 Ujarrás (ver Figura 4.42), el principal incumplimiento se presenta en la malla No. 40 donde los valores de porcentaje pasando rondan el 10%, siendo el mínimo requerido de al menos 31%, esto denota que existe un faltante de agregado pasando la malla No. 40, para así cumplir como material de Base Graduación C, mismo que no es aportado por los MGTV ni por RAP, por lo que se presume que para alcanzar estas graduaciones el material deberá llevar un proceso de tamizado adicional, para alcanzar la graduación indicada, sin embargo esto podría incrementar los costos de cualquier proyecto por cuanto implica que no podría ser utilizado de forma directa del apilamiento del plantel, al menos si su uso se pretende para material de base.

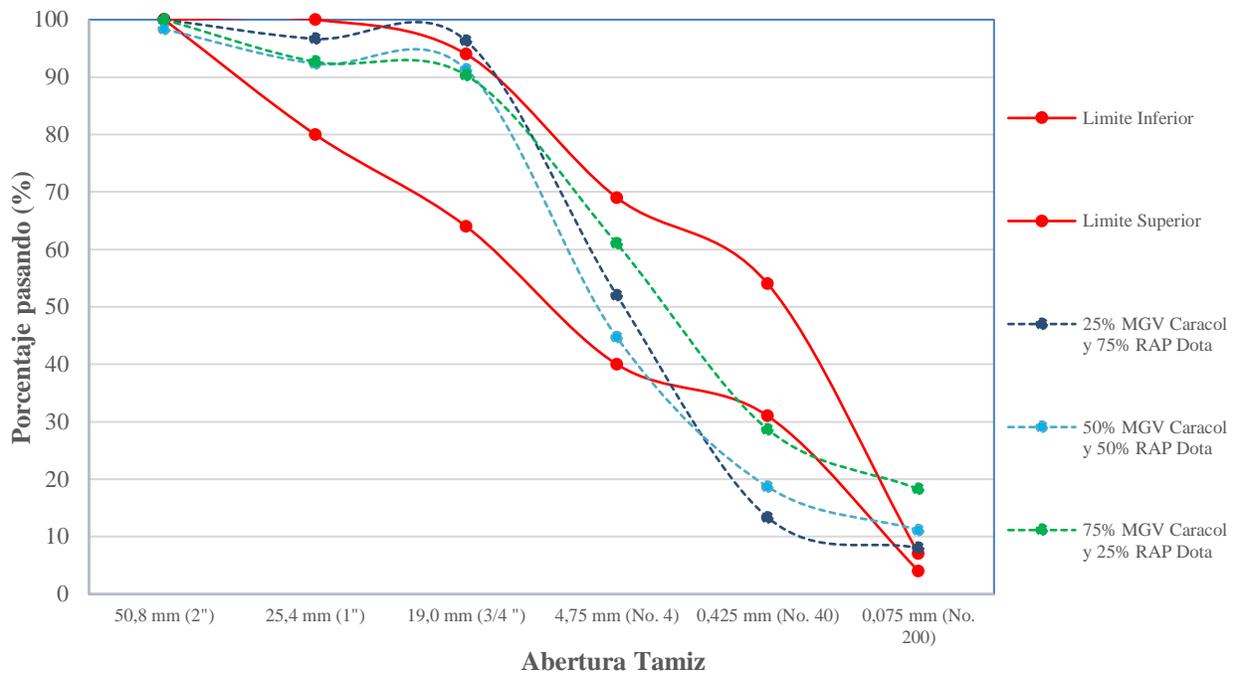
Para el caso de la graduación A de Subbase se tiene para la combinación RAP-01 Dota y MGTV-02 Caracol (ver Figura 4.43) así como la combinación de RAP-02 Cartago y MGTV-01 Ujarrás (ver Figura 4.44) requieren de mayor material de retenido en los tamices de 25,4mm, 12,5mm y 4,57mm, por lo que

tampoco cumple con ésta especificación técnica para ninguna de las dosificaciones empleadas, además la combinación de Caracol y Dota posee mayor porcentaje pasando de agregados finos que el requerido.

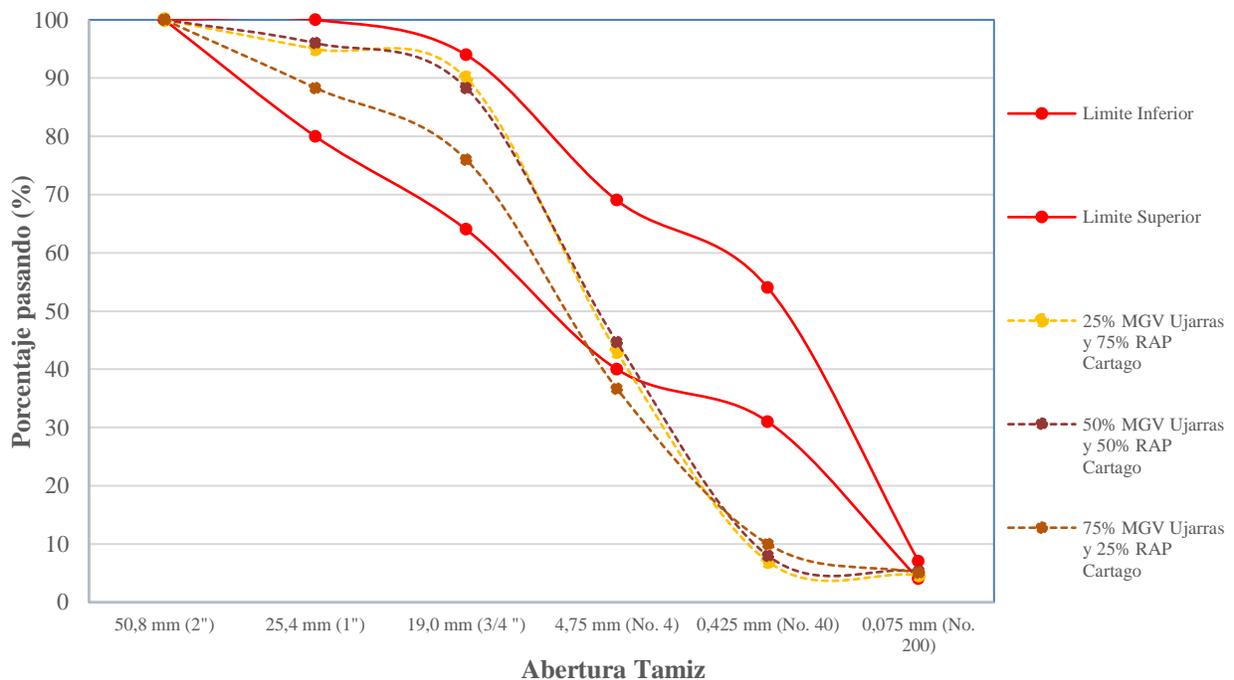
**Cuadro 4.16.** Resultados de los porcentajes pasando para distintas aberturas de tamiz para las combinaciones de RAP y MGV.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	25%	50%	75%	25%	50%	75%
			MGV Caracol y 75% RAP Dota	MGV Caracol y 50% RAP Dota	MGV Caracol y 25% RAP Dota	MGV Ujarrás y 75% RAP Cartago	MGV Ujarrás y 50% RAP Cartago	MGV Ujarrás y 25% RAP Cartago
<b>ANÁLISIS GRANULOMETRICO</b>	AASHTO T 27 y AASHTO T 11 (ASTM 127/136)	<b>76,2 mm (3")</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		<b>50,8 mm (2")</b>	100,00	98,33	100,00	100,00	100,00	100,00
		<b>38,1 mm (1 1/2")</b>	99,00	98,00	95,33	100,00	100,00	100,00
		<b>25,4 mm (1")</b>	96,67	92,33	92,67	95,00	96,00	88,33
		<b>19,0 mm (3/4 ")</b>	96,33	91,33	90,33	90,00	88,33	76,00
		<b>12,5 mm (1/2")</b>	86,67	80,67	83,67	79,33	76,00	62,00
		<b>9,5 mm (3/8")</b>	76,67	72,67	80,67	67,33	66,67	52,00
		<b>4,75 mm (No. 4)</b>	52,00	44,67	61,00	43,00	44,67	36,67
		<b>0,425 mm (No. 40)</b>	13,33	18,67	28,67	7,00	8,00	10,00
		<b>0,075 mm (No. 200)</b>	8,00	11,13	18,27	4,70	5,37	5,03

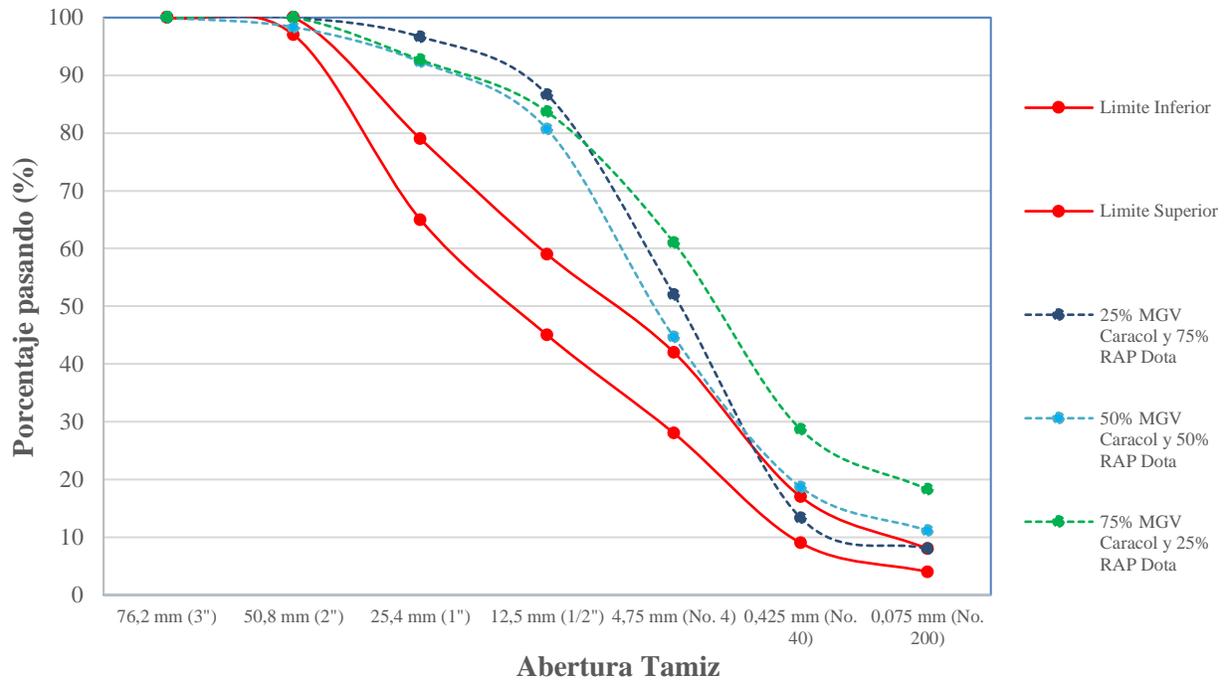
Fuente: Camacho, P.



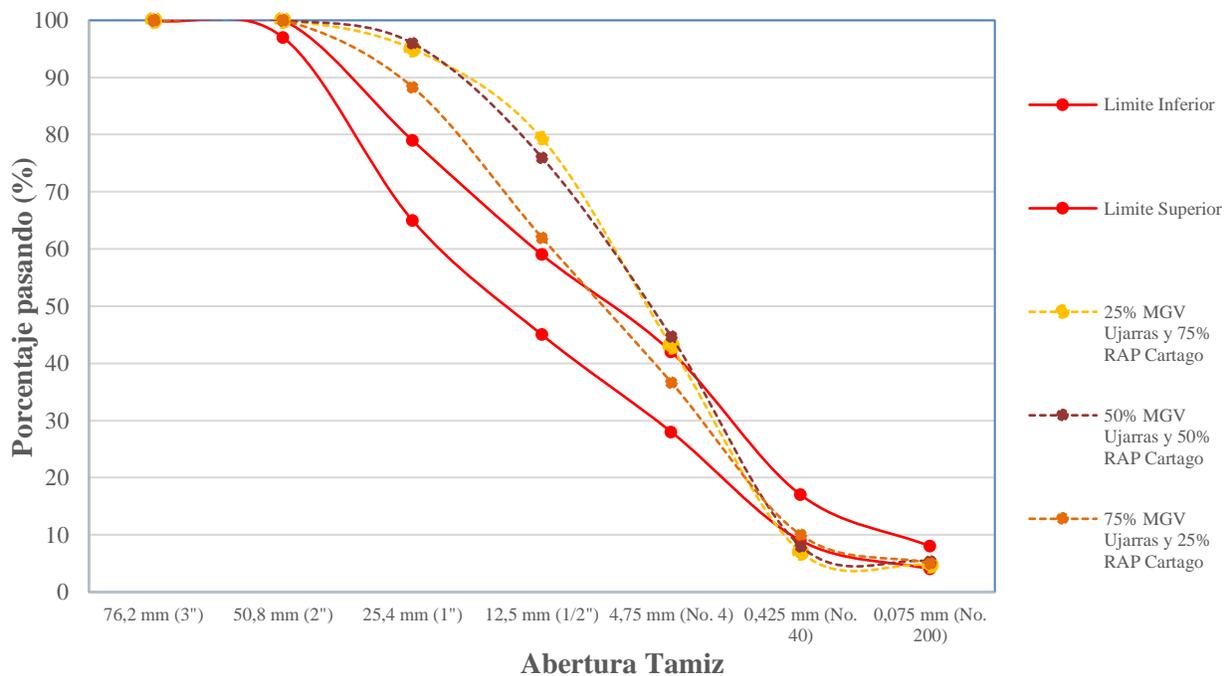
**Figura 4.41.** Comparativa para la curva granulométrica de una Base Graduación C para la mezcla de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol.  
Fuente: Camacho, P.



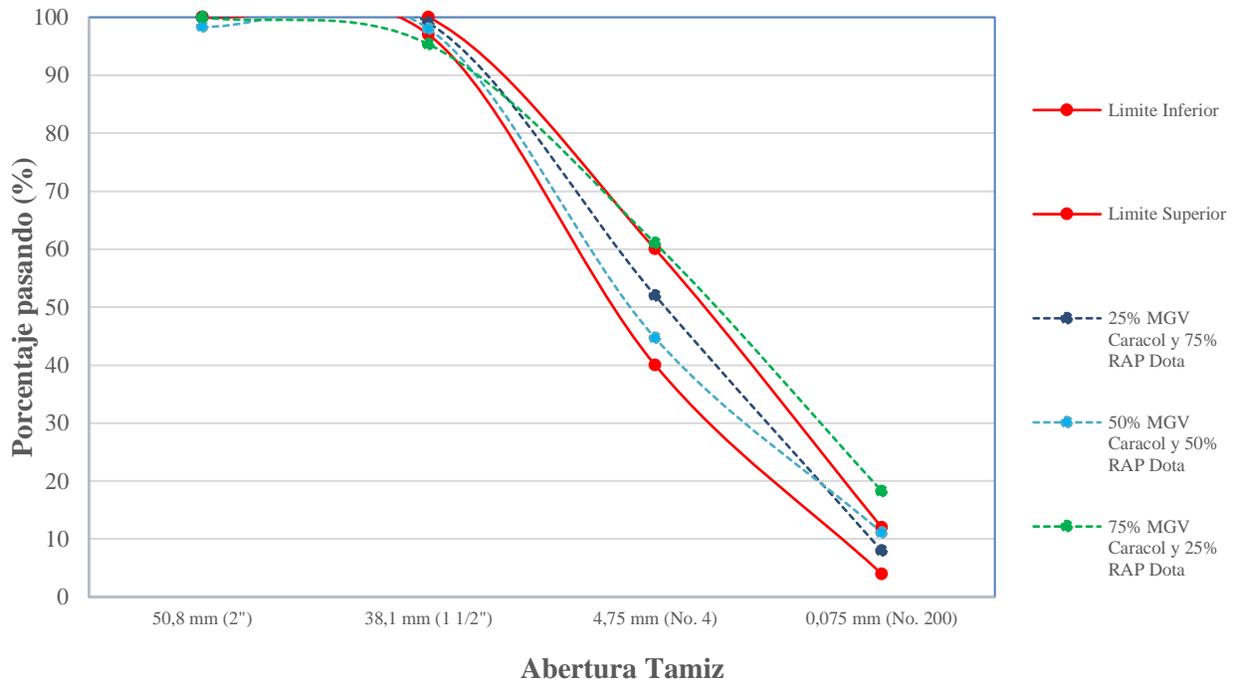
**Figura 4.42.** Comparativa para la curva granulométrica de una Base Graduación C para la mezcla de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás.  
Fuente: Camacho, P.



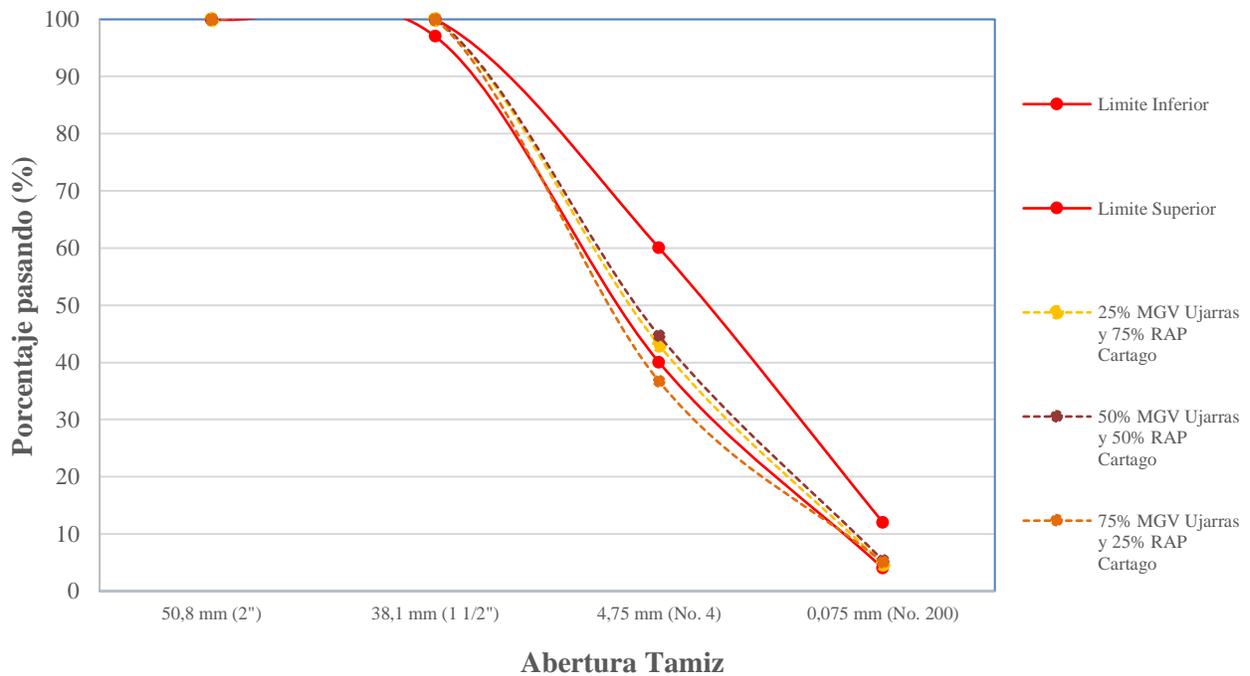
**Figura 4.43.** Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación A para la mezcla de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol.  
Fuente: Camacho, P.



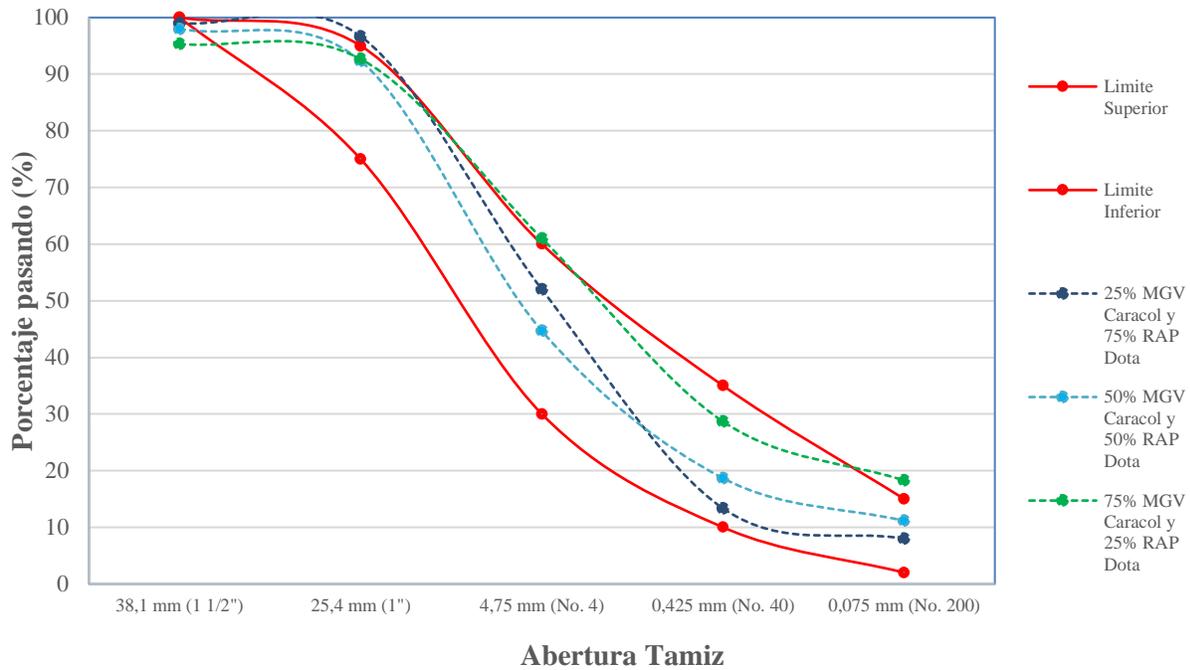
**Figura 4.44.** Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación A para la mezcla de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás.  
Fuente: Camacho, P.



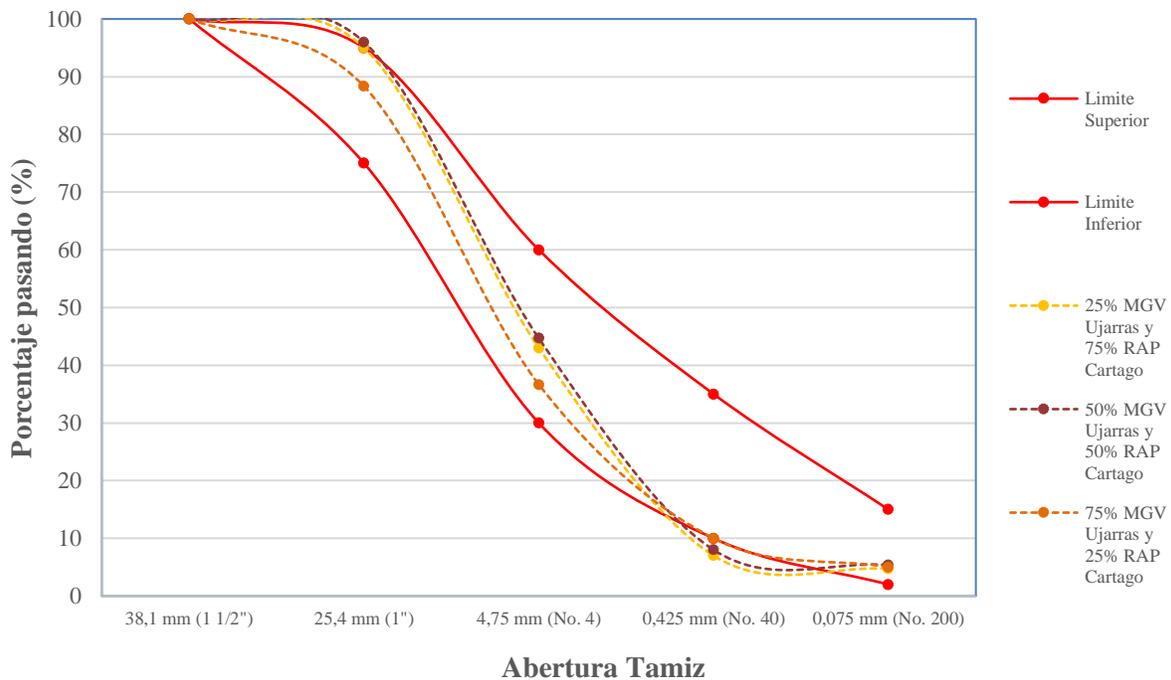
**Figura 4.45.** Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación B para la mezcla de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol.  
Fuente: Camacho, P.



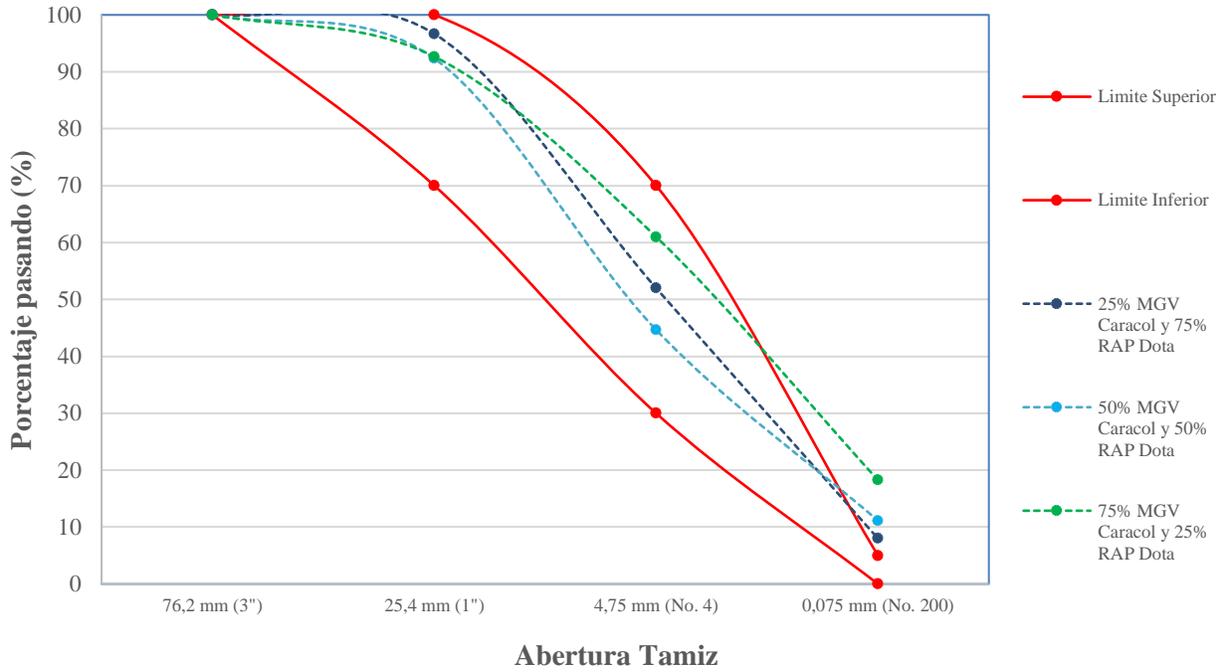
**Figura 4.46.** Comparativa para la curva granulométrica de una Subbase Graduación B para la mezcla de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás.  
Fuente: Camacho, P.



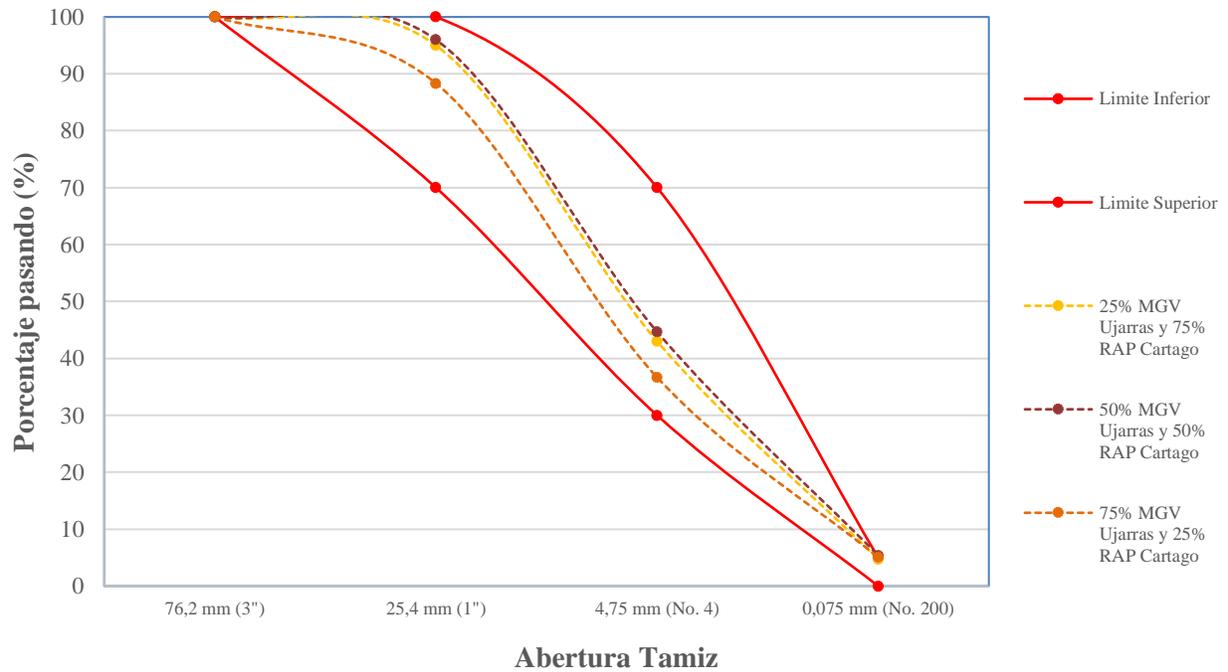
**Figura 4.47.** Comparativa para la curva granulométrica de una Capa Granular de Rodadura graduación TM-40b modificada para la mezcla de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.48.** Comparativa para la curva granulométrica de una Capa Granular de Rodadura graduación TM-40b modificada para la mezcla de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.49.** Comparativa para la curva granulométrica de un Material Selecto para Capa Superficial de Rodadura para la mezcla de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.50.** Comparativa para la curva granulométrica de Material Selecto para Capa Superficial de Rodadura para la mezcla de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás.  
Fuente: Camacho, P.

Para la evaluación granulométrica de la Subbase Graduación B (ver Figura 4.45.), para la combinación de MGV-02 Caracol con RAP-01 Dota, para las combinaciones 50% y 75% de contenido de RAP, se cumple con los parámetros técnicos, mientras que la combinación con un contenido de 25% de RAP sigue una tendencia similar a la Graduación B, donde se sale del rango pasando la malla No. 200 principalmente, esto debido a que como se mostró en apartados anteriores, el material MGV-02 Caracol posee una cantidad mayor de finos pasando la malla No. 200 que el requerido para cualquiera de las graduaciones empleadas, no se omite manifestar que tanto el material de Dota como el de Caracol no cumplían por sí solos para la Graduación B, sin embargo al combinarse ambos logran obtener una granulometría adecuada para usarse como Subbase Graduación B. Para el caso de la combinación de MGV-01 Ujarrás con RAP-02 Cartago se tiene una tendencia similar (ver Figura 4.46.) donde para las dosificaciones con contenidos de RAP de 50% y 75% se da cumplimiento para Subbase Graduación B, en tanto para un contenido de 25% de RAP se sigue una tendencia similar donde se sobrepasa el rango de aceptación en el tamiz No. 4 especialmente, para este caso se tiene que de los materiales fuente solo el RAP-02 Cartago cumplía con esta Graduación, por lo que al adicionar mayor contenido de RAP a la mezcla con Ujarrás, éste posee una tendencia a centrarse dentro de los rangos establecidos.

Siguiendo con la evaluación granulométrica de la graduación especial para capa granular de rodadura TM-40b, se tiene que para la combinación MGV-02 Caracol y RAP-01 Dota (ver Figura 4.47.) prácticamente existe una tendencia al cumplir con la graduación solicitada siendo la graduación de 50% de contenido de RAP, la que mejor cumplió con las especificaciones técnicas, si bien es cierto posee un porcentaje mínimo retenido en el tamiz de 38,1 mm, si se aplica los rangos de tolerancia establecidos en el manual CR-2010 puede cumplir parcialmente, así como realizando una reducción de sobretamaños inicial se puede lograr un cumplimiento al 100% de la graduación, de igual forma los contenidos 25% y 75% de RAP describen tendencias cercanas al cumplimiento, lo cual mediante una homogenización de agregados, principalmente en la malla No. 200 para el contenido de 25% de RAP y una corrección en la malla 25,4 mm para el contenido de 75% de RAP, se podría alcanzar. A su vez considerando los rangos de tolerancia se tendría un cumplimiento para las tres dosificaciones propuestas. Para el caso de la combinación de MGV-01 Ujarrás y RAP-02 Cartago (ver Figura 4.48.) se tiene una tendencia similar para los rangos de porcentaje pasando para las tres dosificaciones, siendo el caso del contenido de 25% de RAP, el que cumple en su totalidad con las solicitudes y en las dosificaciones de 25% y 75% se salen de la banda inferior de la malla No. 40, lo cual también pueden cumplir conforme a los rangos de tolerancia de las especificaciones técnicas.

Por último, se tiene la evaluación granulométrica para el Material Selecto para Capa Superficial, realizando un análisis de las curvas granulométricas de la combinación MGV-02 Caracol y RAP-Dota se tiene que existe un cumplimiento parcial de la graduación, siendo que para las tres dosificaciones el requerimiento para la malla No. 200 se encuentra fuera del rango, al existir un mayor porcentaje de material pasando este tamiz. Se puede notar que conforme se aumenta el contenido de RAP, la tendencia de la curva se acerca a rango de cumplimiento en la banda superior de éste tamiz, esto se puede deber a que el material fuente MGV del Tajo Caracol posee un contenido de material fino pasando No. 200 por encima de las especificaciones por lo que el adicionar RAP a la mezcla, este funciona como un correctivo. Además, para la combinación MGV-01 Ujarrás con RAP-02 Cartago se tiene que las dosificaciones de 25%, 50% y 75% se encuentran dentro de los rangos establecidos y por tanto cumplen como material selecto para capa superficial.

Como se ha indicado en apartados anteriores las graduaciones de Subbase Graduación B y la Capa Granular de Rodadura Graduación TM-40b son las que más frecuentemente se utilizan como material para caminos de lastre, por lo que la evaluación para estas dos granulometrías es crucial para determinar si las mezclas de RAP y MGV pueden ser empleadas para lastrados de caminos. En el Cuadro 4.17. se resume el cumplimiento de las combinaciones para a las seis combinaciones de RAP y MGV.

**Cuadro 4.17.** Cumplimiento de graduaciones granulométricas para las combinaciones de RAP y MGV.

Especificación Material	25% MGV Caracol y 75% RAP Dota	50% MGV Caracol y 50% RAP Dota	75% MGV Caracol y 25% RAP Dota	25% MGV Ujarrás y 75% RAP Cartago	50% MGV Ujarrás y 50% RAP Cartago	75% MGV Ujarrás y 25% RAP Cartago
Base CR -2010, Sección 301, Graduación C	No Cumple	No Cumple	No Cumple	No Cumple	No Cumple	No Cumple
Subbase CR -2010, Sección 301, Graduación A	No Cumple	No Cumple	No Cumple	No Cumple	No Cumple	No Cumple
Subbase CR -2010, Sección 301, Graduación B	Cumple	Cumple	Cumple Parcialmente*	Cumple	Cumple	Cumple Parcialmente*
Capa granular de rodadura graduación, CR 311.03 TM-40b modificada	Cumple Parcialmente*	Cumple Parcialmente*	Cumple Parcialmente*	Cumple Parcialmente*	Cumple Parcialmente*	Cumple
Material selecto para la capa superficial de la vía CR.204.07	Cumple Parcialmente*	Cumple Parcialmente*	Cumple Parcialmente*	Cumple	Cumple	Cumple

\*Nota 1: Algunos valores se encuentra fuera de rango sin embargo se encuentra dentro de los márgenes de tolerancia.

Fuente: Camacho, P.

Del cuadro anterior se tiene que las combinaciones RAP y MGV para especificaciones de Base Graduación C y Subbase Graduación A, no hubo variación en cuanto al cumplimiento de los rangos para estos materiales, por lo que al adicionar RAP en proporciones de 25%, 50% y 75% no aportó a que la tendencia de las curvas entrará en un rango de cumplimiento, mientras que para la Subbase Graduación B, Capa Granular de Rodadura TM-40b y Material Selecto para Capa Superficial el adicionar el RAP a la fuente de MGV mejoró las propiedades granulométricas a fin de hacerlo cumplir para algunos combinaciones, en tanto para otras mantuvo una tendencia que conforme a los márgenes de tolerancia podría cumplir parcialmente. Basado en lo anterior se tiene que el rango de 25% a 50% de contenido de RAP para las dos combinaciones empleadas, la mezcla resultante tiende a cumplir mejor, que el rango de 50% a 75%, al menos para el caso de Subbase Graduación B. Además, la combinación de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás posee mayor cantidad de casos donde se presenta cumplimiento total de los parámetros técnicos, este resultado puede ser esperable considerando que existe variabilidad significativa entre las fuentes de MGV empleadas en las combinaciones, por lo que se puede inferir que adicionar material de RAP a un material MGV puede mejorar el cumplimiento de las algunas graduaciones para ser usado como material para superficies de ruedo expuestas.

#### 4.3.4. Evaluación de densidad máxima y humedad óptima para las combinaciones de RAP y MG V.

Como se ha indicado en apartes anteriores no existe un valor o rango de valores de aceptación de la densidad máxima que debe poseer un material para ser usado como material para caminos no pavimentados con superficie de ruedo expuesta, en los Cuadro 4.18 y 4.19. se muestran los valores de humedad óptima y densidad máxima obtenidos para las mezclas de MG V y RAP para las dosificaciones con contenido de RAP de 25%, 50% y 75%. Como referencia, se debe tomar en consideración que los rangos de densidad de MG V promediaron 2029 kg/m<sup>3</sup> con un valor mínimo de 1877 kg/m<sup>3</sup> proveniente del MG V-02 Caracol y valor máximo de 2181 kg/m<sup>3</sup> obtenido para el MG V-01 Ujarrás, mientras que para los RAP se obtuvo un promedio de 2055 kg/m<sup>3</sup>, para un valor mínimo de 1999 kg/m<sup>3</sup> para el RAP-02 Cartago y como valor máximo de 2112 kg/m<sup>3</sup> para el RAP-01 Dota. Por tanto, se tienen que las mezclas de RAP con el material proveniente del Tajo Caracol promediaron por debajo de los valores de referencia, mientras que las combinaciones de RAP con material del Tajo Ujarrás en términos generales promediaron con valores por encima de los promedios de las fuentes empleados como referencia.

**Cuadro 4.18.** Resultados de densidad máxima y humedad óptima para la combinación RAP-01 Dota y MG V-02 Caracol.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0%	25%	50%	75%	100%
			MGV Caracol y 100% RAP Dota	MGV Caracol y 75% RAP Dota	MGV Caracol y 50% RAP Dota	MGV Caracol y 25% RAP Dota	MGV Caracol y 0% RAP Dota
DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD OPTIMA	AASHTO T180	Proctor Modificado	9,97%	8,87%	11,43%	10,53%	12,93%
			2112,33	1957,33	1927,00	1896,00	1877,00

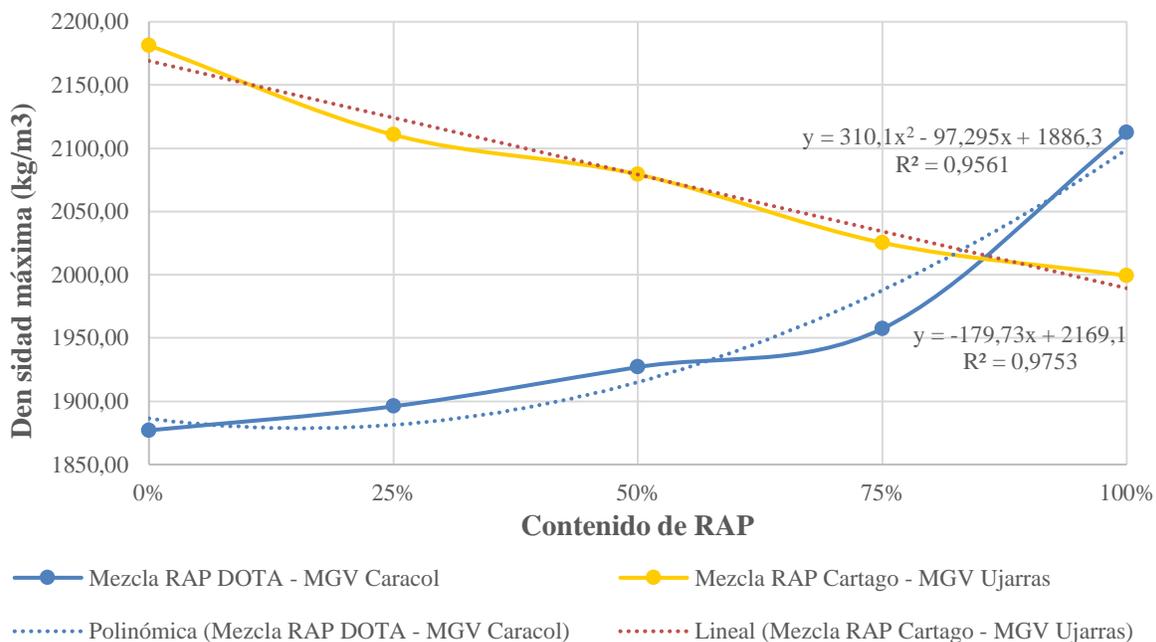
Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 4.19.** Resultados de densidad máxima y humedad óptima para la combinación RAP-02 Cartago y MG V-01 Ujarrás.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0%	25%	50%	75%	100%
			MGV Ujarrás y 100% RAP Cartago	MGV Ujarrás y 75% RAP Cartago	MGV Ujarrás y 50% RAP Cartago	MGV Ujarrás y 25% RAP Cartago	MGV Ujarrás y 0% RAP Cartago
DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD OPTIMA	AASHTO T180	Proctor Modificado	6,03%	7,00%	8,00%	7,13%	8,90%
			1999,33	2025,33	2079,33	2110,67	2181,33

Fuente: Camacho, P.

A fin de visualizar el comportamiento de un MGV en cuanto a los parámetros de densidad máxima y humedad óptima, conforme se aumenta el contenido de RAP en la mezcla se elaboró un gráfico (ver Figura 4.51), donde se puede observar la variación de las dos combinaciones para densidad máxima, es importante destacar que el comportamiento de las mezclas es distinto, mientras que la densidad máxima de la combinación MGV-02 Caracol y RAP-01 Dota tiende a incrementar conforme se aumenta el contenido de RAP, la combinación de MGV-01 Ujarrás y RAP-02 Cartago tiende a disminuir conforme se aumenta el contenido de RAP en la mezcla, lo cual describe un comportamiento opuesto entre las mezclas, si bien es cierto la teoría indica que entre mayor contenido de RAP se incluye dentro de una mezcla la densidad tiene a disminuir esto no sucede con la combinación entre Caracol y Dota, en parte se debe a que el valor de densidad máxima del material proveniente del Tajo Caracol es relativamente baja en comparación con el resto de materiales incluyendo las dos fuentes de RAP, esto significa que el material obtenido del plantel de Dota, le aporta densidad a la mezcla en lugar de disminuirla. Mientras que la combinación de RAP-02 Cartago describe una tendencia a disminuir la densidad de la mezcla conforme aumenta el contenido de RAP, esto se puede deber a que a la naturaleza propia del RAP donde el cemento asfáltico puede impedir una compactación adecuada debido a que éste cubre los agregados y puede estar reduciendo la cantidad de finos, y por ende que exista una mayor cantidad de vacíos al limitar la cantidad de finos en una mezcla de RAP, esto genera una reducción en la densidad, lo cual podría describir el comportamiento de la curva de la combinación entre los RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás.



**Figura 4.51.** Comparativa de la variación de la Densidad Máxima para las combinaciones de RAP y MGV.

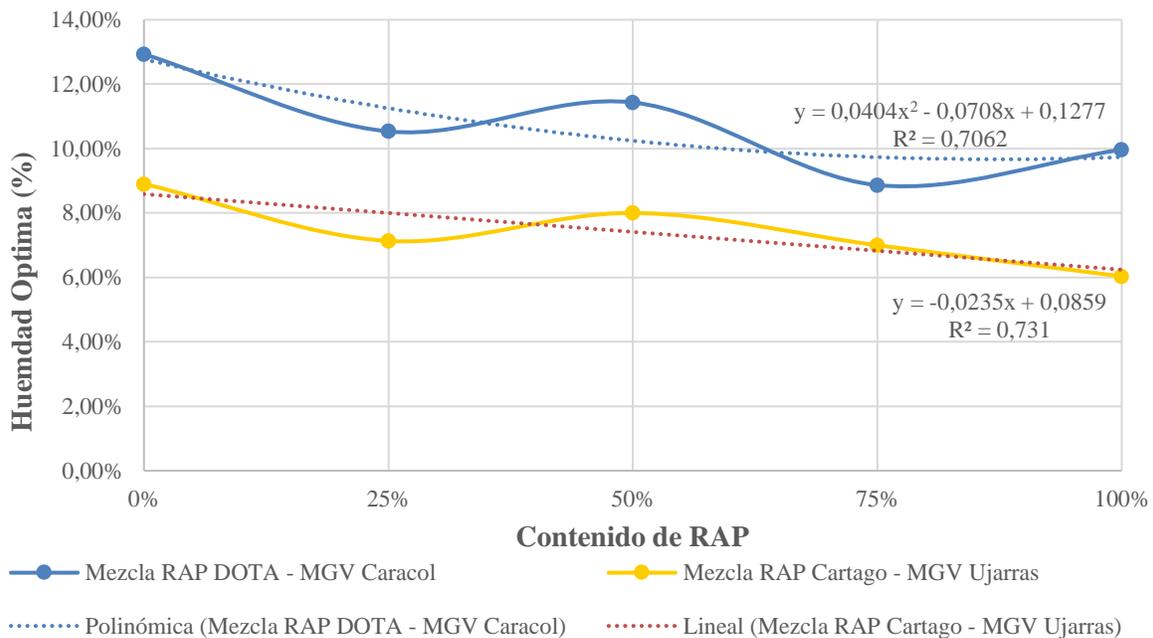
Fuente: Camacho, P.

A fin de ver la variabilidad entre las medias de los resultados obtenidos de densidad máxima se aplicó un análisis de ANOVA de un factor con un nivel de confianza del 95% (ver sección 7.5 del Apéndice), donde se obtuvo que para ambas combinaciones existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias obtenidas para densidad máxima, además mediante la prueba de “Tukey” se logró determinar que estas diferencias se dan principalmente en las medias entre combinaciones.

Analizando el comportamiento de la curva de densidad máxima de la mezcla Dota-Caracol se tiene que el incremento en la densidad se puede deber a que a pesar de que material de RAP aporta agregado

recubierto por cemento asfáltico, el material del Caracol aporta un adicional de finos que puedan estar llenando los vacíos de la mezcla, aunado al hecho que al ser un material con plasticidad permite un mejor amarre de los agregados y por ende podría generar un efecto diferente a la otra mezcla, esto es congruente considerando el porcentaje de finos pasando la malla No. 200 que presenta el material del Caracol es mayor al resto de fuentes, en parte por ser un material producido de cantera.

Ahora, basado en que el recubrimiento de RAP puede aumentar la cantidad de vacíos en una mezcla, esto también podría afectar la mezcla incrementando la permeabilidad de la misma, por tanto, esta permeabilidad podría limitar la capacidad de la mezcla de retener agua durante un proceso de compactación, lo cual permitiría un mejor acomodo e interacción de los agregados durante este proceso, en la Figura 4.52. se muestra la variación del contenido óptimo de humedad conforme se aumenta el contenido de RAP, donde se puede observar que comportamiento de la humedad óptima, en ambos casos posee una tendencia descendente conforme se aumenta el contenido de RAP, siendo que existe un ligero repunte para la dosificación de 50% de contenido de RAP, de las curvas se puede inferir que conforme se aumenta el contenido de RAP de una mezcla la variación de la humedad óptima de la mezcla tiene un impacto menor puesto se aumenta la permeabilidad, y esto permita explicar los repuntes en cuanto a humedad que existe a lo largo de la curva.



**Figura 4.52.** Comparativa de la variación de la Humedad Óptima obtenida para las combinaciones de RAP y MGV.

Fuente: Camacho, P.

A fin de ver la variabilidad entre las medias de los resultados obtenidos de humedad óptima se aplicó un análisis de ANOVA de un factor con un nivel de confianza del 95% (ver sección 7.5 del Apéndice), donde se obtuvo que para ambas combinaciones existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias obtenidas para humedad óptima, además mediante la prueba de “Tukey” se logró determinar que éstas diferencias se dan tanto en las medias entre combinaciones como en las medias de una sola mezcla.

Es importante mencionar que las mezclas de RAP y MGV se realizaron en dosificación por peso por porcentaje de contenido de RAP, basado en la condición original de cada una de fuentes, es decir, no

se dio un fraccionamiento o tamizaje adicional previo a la realizar la revoltura para elaborar la mezcla, por lo que estos procesos se pueden considerar para eventuales mezclas a fin de mejorar la densidad de los materiales, debe tomarse en cuenta sin embargo que podría aumentar los costos del proyecto.

#### 4.3.5. Evaluación del índice de soporte de California (CBR)

Para las combinaciones de MGV y RAP se evaluó el Índice de soporte de California (CBR), esta propiedad mecánica es de importancia en la definición de potencial de las mezclas para ser usadas en caminos, en el Cuadro 4.20 y 4.21. se muestran los resultados de CBR para las combinaciones de Caracol-Dota y Ujarrás-Cartago, para todas combinaciones se tiene que se cumple con el CBR mínimo para subbases y capas de rodadura, pero no alcanza el valor 80 requerido para cumplir como material para base.

**Cuadro 4.20.** Resultados de Índice de Soporte de California (CBR) para las combinaciones de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0% MGV Caracol y 100% RAP Dota	25% MGV Caracol y 75% RAP Dota	50% MGV Caracol y 50% RAP Dota	75% MGV Caracol y 25% RAP Dota	100% MGV Caracol y 0% RAP Dota
ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)	AASHTO T-193 (ASTM D1883)	<b>CBR</b>	82,00	78,00	49,33	38,00	12,80

Fuente: Camacho, P.

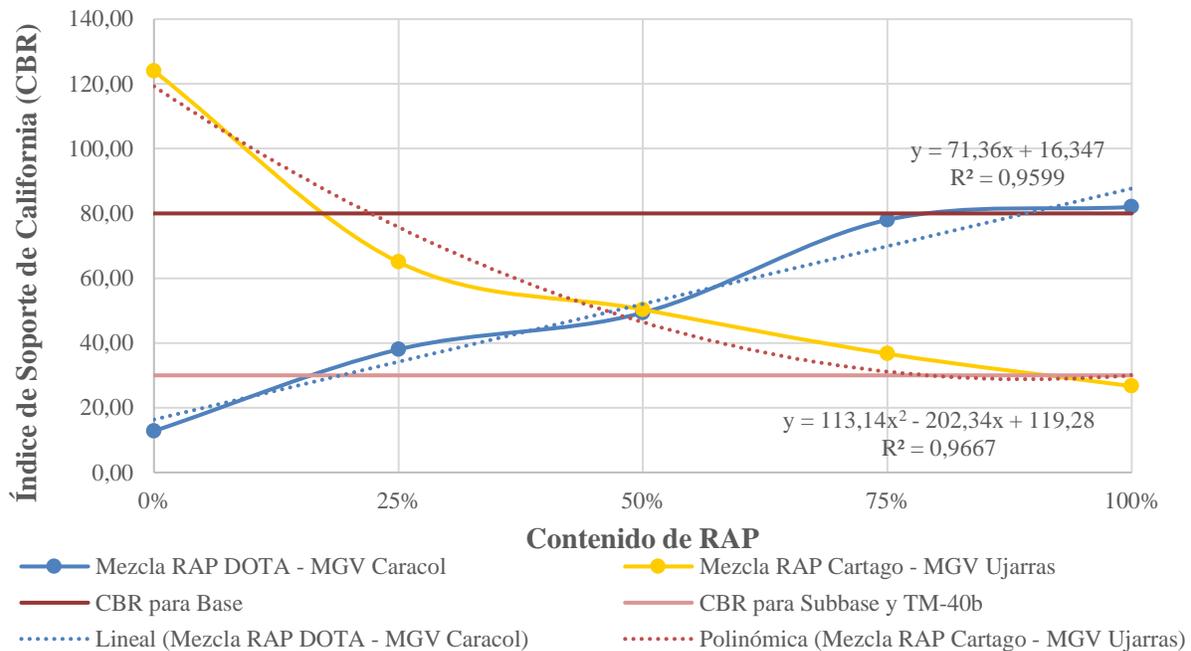
**Cuadro 4.21.** Resultados de Índice de Soporte de California (CBR) para las combinaciones de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0% MGV Ujarrás y 100% RAP Cartago	25% MGV Ujarrás y 75% RAP Cartago	50% MGV Ujarrás y 50% RAP Cartago	75% MGV Ujarrás y 25% RAP Cartago	100% MGV Ujarrás y 0% RAP Cartago
ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)	AASHTO T-193 (ASTM D1883)	<b>CBR</b>	26,67	36,67	50,33	65,00	124,00

Fuente: Camacho, P.

En la Figura 4.53. se muestra la variación de CBR conforme se aumenta el contenido de RAP en una mezcla, al igual que en la densidad máxima se tiene tendencia distintas para la combinación Dota-Caracol y Cartago-Ujarrás, en el primer caso se parte de un CBR promedio de 12,80 del MGV Caracol hasta un valor de 82,00 del RAP Dota para un contenido de 100% RAP lo que describe una tendencia a aumentar el CBR conforme aumenta el contenido de RAP, mientras que el segundo caso describe una tendencia a disminuir el CBR obtenido conforme se incrementa el RAP en la mezcla, lo cual es el comportamiento esperado del CBR en la mayoría de casos señalados por diversos autores, no obstante debe tomarse necesariamente en consideración que el CBR está estrechamente relacionado con la densidad del material, por lo que se puede visualizar un comportamiento similar al señalado en el apartado 4.3.4. esto

porque las mezclas aumentan o disminuyen densidad debido a la presencia de vacíos llenos de material fino.



**Figura 4.53.** Comparativa de la variación del CBR para las combinaciones de RAP y MG.

Fuente: Camacho, P.

A fin de ver la variabilidad entre las medias de los resultados obtenidos de CBR se aplicó un análisis de ANOVA de un factor (ver sección 7.5 del Apéndice), donde se obtuvo que para ambas combinaciones existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias obtenidas para CBR, además mediante la prueba de “Tukey” se logró determinar que estas diferencias se dan tanto en las medias entre combinaciones como en las medias de una sola mezcla.

Cabe resaltar que, a pesar de que existen comportamientos diferentes en las mezclas, se tiene que las mezclas cumplieron el CBR solicitado para subbases y capas de rodadura, siendo que para la dosificación de 50% de contenido de RAP se obtuvo un valor cercano a 50 para ambas mezclas. En este caso se puede decir que no necesariamente el valor de CBR de una mezcla va a disminuir conforme se aumenta el contenido de RAP, de acuerdo a la teoría se tiene que existe esta tendencia, existe la posibilidad de que el RAP actué como un correctivo, y aumente la capacidad de soporte de un MG con CBR bajo conforme al requerimiento de especificaciones técnicas, además es necesario tomar en consideración que conforme se logró observar de la evaluación de las fuentes de RAP del Objetivo 2, existen diferencias significativas entre los CBR obtenidos de los RAP por sí solos, por lo que el hecho de que disminuye el CBR no puede ser generalizado, y va a depender de las propiedades de cada fuente de RAP.

A raíz de lo anteriormente descrito, es imperante que para cada proyecto donde exista la posibilidad de uso de RAP ya sea solo o en una mezcla, se deba caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de las fuentes de previo a su uso en caminos de lastre, puesto conforme se mostró en la Figura 4.52. puede presentarse variabilidad en las condiciones físicos mecánicas del RAP.

#### 4.3.6. Evaluación de caras fracturadas para las combinaciones de RAP y MGCV.

Para caminos con superficie de ruedo expuesta se debe tomar en consideración la textura de los agregados, en este caso la cantidad de caras fracturadas que posea un material mejora la interacción de las partículas por fricción, y por consiguiente un incremento en la capacidad del material de no desmoronarse o disgregarse, en especial por el efecto del tránsito vehicular. En los Cuadros 4.22. y 4.23. se presentan los resultados obtenidos para las mezclas de 25%, 50% y 75% de RAP y MGCV, puede observarse que para todas dosificaciones se cumple con la especificación de poseer un porcentaje mayor al 50%, además permite que la mezcla de MGCV-01 Ujarrás y RAP-02 Cartago no deba ser descartada por ser un material no plástico.

**Cuadro 4.22.** Resultados de porcentaje de caras fracturadas para la combinación de RAP-01 Dota y MGCV-02 Caracol.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0%	25%	50%	75%	100%
			MGV Caracol y 100% RAP Dota	MGV Caracol y 75% RAP Dota	MGV Caracol y 50% RAP Dota	MGV Caracol y 25% RAP Dota	MGV Caracol y 0% RAP Dota
CARAS FRACTURADAS	ASTM D5821	Caras fracturadas	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,67%

Fuente: Camacho, P.

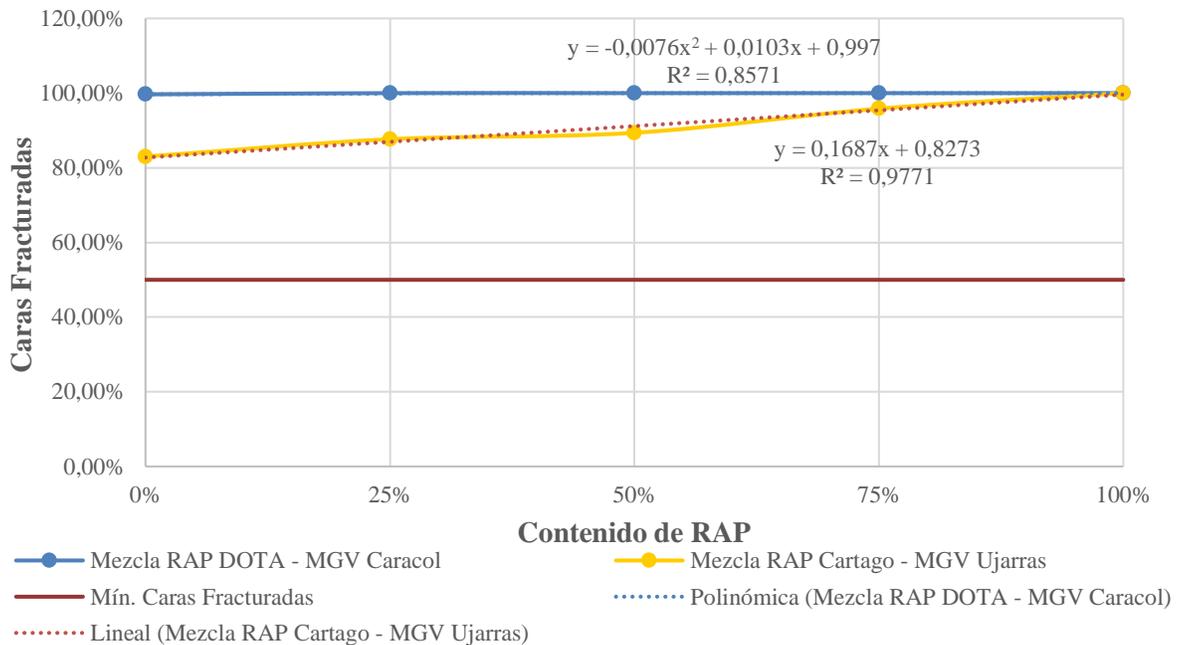
**Cuadro 4.23.** Resultados de porcentaje de caras fracturadas para la combinación de RAP-02 Cartago y MGCV-01 Ujarrás.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0%	25%	50%	75%	100%
			MGV Ujarrás y 100% RAP Cartago	MGV Ujarrás y 75% RAP Cartago	MGV Ujarrás y 50% RAP Cartago	MGV Ujarrás y 25% RAP Cartago	MGV Ujarrás y 0% RAP Cartago
CARAS FRACTURADAS	ASTM D5821	Caras fracturadas	100,00%	95,83%	89,37%	87,65%	83,00%

Fuente: Camacho, P.

En la Figura 4.54. se tiene la variación del porcentaje de caras fracturadas conforme se aumenta el contenido de RAP, para el caso de la mezcla Dota-Caracol se tiene que todas las dosificaciones poseen en su totalidad caras fracturadas, esto se debe a que tanto el material del Tajo Caracol, al ser de cantera, como el RAP son materiales quebrados, mientras que la mezcla de Ujarrás-Cartago se tiene que conforme se incrementa el contenido de RAP en la mezcla se aumenta el contenido de caras fracturadas. En este caso se debe considerar que el material del Tajo Ujarrás proviene de río, por lo que, a pesar de pasar por procesos de fraccionamiento y quebrado, existe la posibilidad de obtener cierto porcentaje de caras redondeadas debido a la naturaleza del material. Como se ha indicado el apartado de evaluación de caras fracturadas del RAP, se tiene que las fuentes de RAP debido a los agregados que componen la producción de mezcla asfáltica poseen caras fracturadas como la quintilla, cuartilla, polvo de piedra, etc., por lo que se puede inferir al igual que en la evaluación de otras propiedades, que el RAP puede ser utilizado como correctivo para dosificarse en mezclas con materiales que poseen caras redondeadas a fin de aumentar el porcentaje

de caras fracturadas de un material, y así incrementar su resistencia al corte dada por la fricción entre partículas.



**Figura 4.54.** Comparativa de la variación del porcentaje de Caras Fracturadas para las combinaciones de RAP y MGV.

Fuente: Camacho, P.

A fin de ver la variabilidad entre las medias de los resultados obtenidos de caras fracturadas se aplicó un análisis de ANOVA de un factor con un nivel de confianza del 95% (ver sección 7.5 del Apéndice), donde se obtuvo que para ambas combinaciones existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias obtenidas para caras fracturadas, además mediante la prueba de “Tukey” se logró determinar que éstas diferencias se dan tanto en las medias entre combinaciones como en las medias de la mezcla de Cartago-Ujarrás.

#### 4.3.7. Evaluación de abrasión con la máquina de Los Ángeles para las combinaciones de RAP y MGV.

Los resultados del ensayo de abrasión mediante la máquina de Los Ángeles de las mezclas de RAP y MGV se muestran en los Cuadros 4.24. y 4.25. Para que las mezclas puedan cumplir como material para caminos de lastre se debe cumplir con que ésta sea menor al 50%, para la combinación de MGV-02 Caracol y RAP-01 Dota se tiene que la dosificación con contenido de RAP de 25% posee una pérdida por abrasión mayor a la especificación y por tanto no cumple, mientras que para el caso de la combinación de MGV-01 Ujarrás y RAP-02 Cartago para las tres combinaciones se mantiene por debajo del 50% cumpliendo así con este parámetro.

**Cuadro 4.24.** Resultados de porcentaje de abrasión en la máquina de Los Ángeles para la combinación de RAP-01 Dota y MGCV-02 Caracol.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0% MGV Caracol y 100% RAP Dota	25% MGV Caracol y 75% RAP Dota	50% MGV Caracol y 50% RAP Dota	75% MGV Caracol y 25% RAP Dota	100% MGV Caracol y 0% RAP Dota
ABRASIÓN DE LOS ANGELES	AASHTO T-96	Abrasión de Los Ángeles	27,03%	29,57%	38,70%	51,40%	66,33%

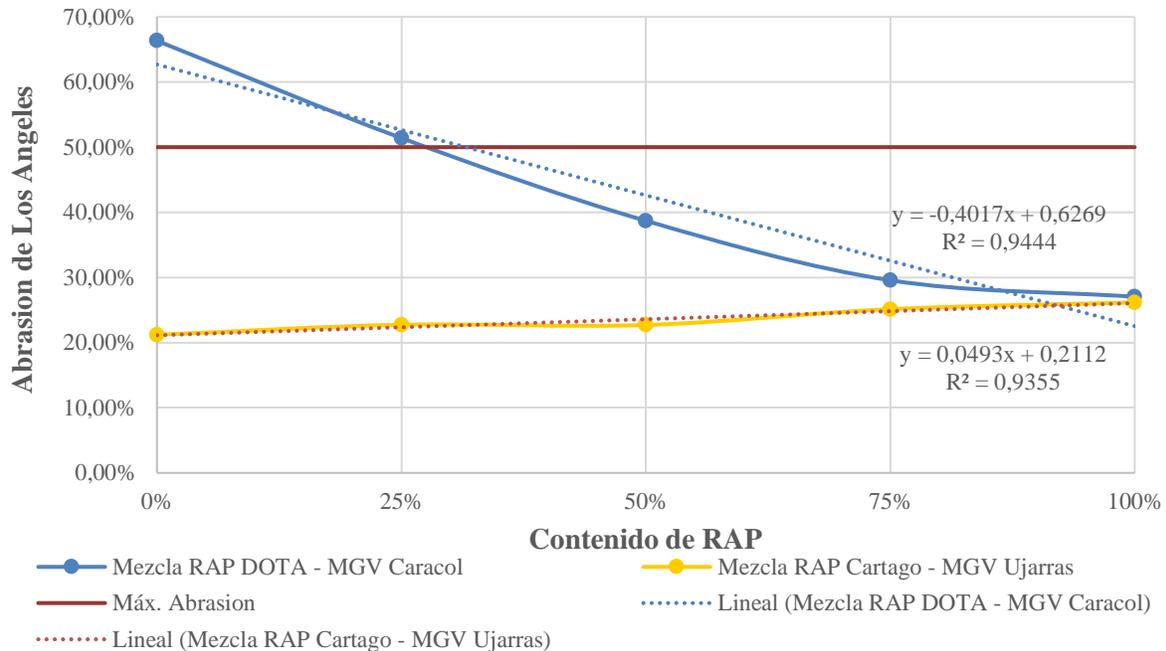
Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 4.25.** Resultados de porcentaje de abrasión en la máquina de Los Ángeles para la combinación de RAP-02 Cartago y MGCV-01 Ujarrás.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0% MGV Ujarrás y 100% RAP Cartago	25% MGV Ujarrás y 75% RAP Cartago	50% MGV Ujarrás y 50% RAP Cartago	75% MGV Ujarrás y 25% RAP Cartago	100% MGV Ujarrás y 0% RAP Cartago
ABRASIÓN DE LOS ANGELES	AASHTO T-96	Abrasión de Los Ángeles	26,17%	25,13%	22,70%	22,73%	21,20%

Fuente: Camacho, P.

En el caso de la mezcla de Dota-Caracol se tiene que existe una variación de la pérdida por abrasión en la Figura 4.55. se puede observar que conforme se aumenta el contenido de RAP ésta disminuye. Es sustancial tomar en consideración que el material del Caracol posee un alto porcentaje de pérdida por abrasión, por lo que la adición del RAP disminuye en parte este porcentaje, se puede decir que funciona como un material correctivo, por otro lado se tiene que la combinación Cartago-Ujarrás conforme muestra la curva del gráfico no presente variaciones significativas en pérdida por abrasión, se presume entonces que los materiales fuente poseen una capacidad similar de resistencia a la pérdida por abrasión, de lo cual se puede inferir que si ambas fuentes poseen características similares, el aumento del contenido de RAP no genera cambios significativos en la mezcla. En este caso es esperable que mezclas que posean valores similares se mantengan dentro de un mismo rango, situación que por el contrario en caso que exista diferencias significativas, se registrará por las características del material que predomina en la mezcla.



**Figura 4.55.** Comparativa de la variación del porcentaje de Abrasión en la Máquina de Los Ángeles para las combinaciones de RAP y MGV.

Fuente: Camacho, P.

A fin de ver la variabilidad entre las medias de los resultados obtenidos de abrasión se aplicó un análisis de ANOVA de un factor (ver sección 7.5 del Apéndice), donde se obtuvo que para ambas combinaciones existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias obtenidas para abrasión, además mediante la prueba de “Tukey” se logró determinar que estas diferencias se dan tanto en las medias entre combinaciones como en las medias de una sola mezcla.

#### 4.3.8. Evaluación del índice de durabilidad para las combinaciones de RAP y MGV.

El índice de durabilidad permite determinar si un material posee competencias para ser usado en caminos, en los Cuadros 4.26. y 4.27 se muestra los resultados obtenidos para agregado grueso y fino. Este ensayo permite evaluar la cantidad de material arcilloso que puede ser generado por los agregados al sometidos a degradación mecánica, se tiene que para que un material cumpla para ser utilizado en caminos de lastre debe poseer un índice superior a 35%, en este caso las dosificaciones de 25%, 50% y 75% de ambas mezclas de RAP y MGV cumplen con este requisito.

**Cuadro 4.26.** Resultados de porcentaje de Índice de Durabilidad para agregado fino y grueso para la combinación de RAP-01 Dota y MGCV-02 Caracol.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0% MGCV Caracol y 100% RAP Dota	25% MGCV Caracol y 75% RAP Dota	50% MGCV Caracol y 50% RAP Dota	75% MGCV Caracol y 25% RAP Dota	100% MGCV Caracol y 0% RAP Dota
ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)	AASHTO T210	Finos	71,00%	60,33%	42,67%	45,00%	23,33%
		Gruesos	81,00%	62,00%	50,67%	41,67%	31,83%

Fuente: Camacho, P.

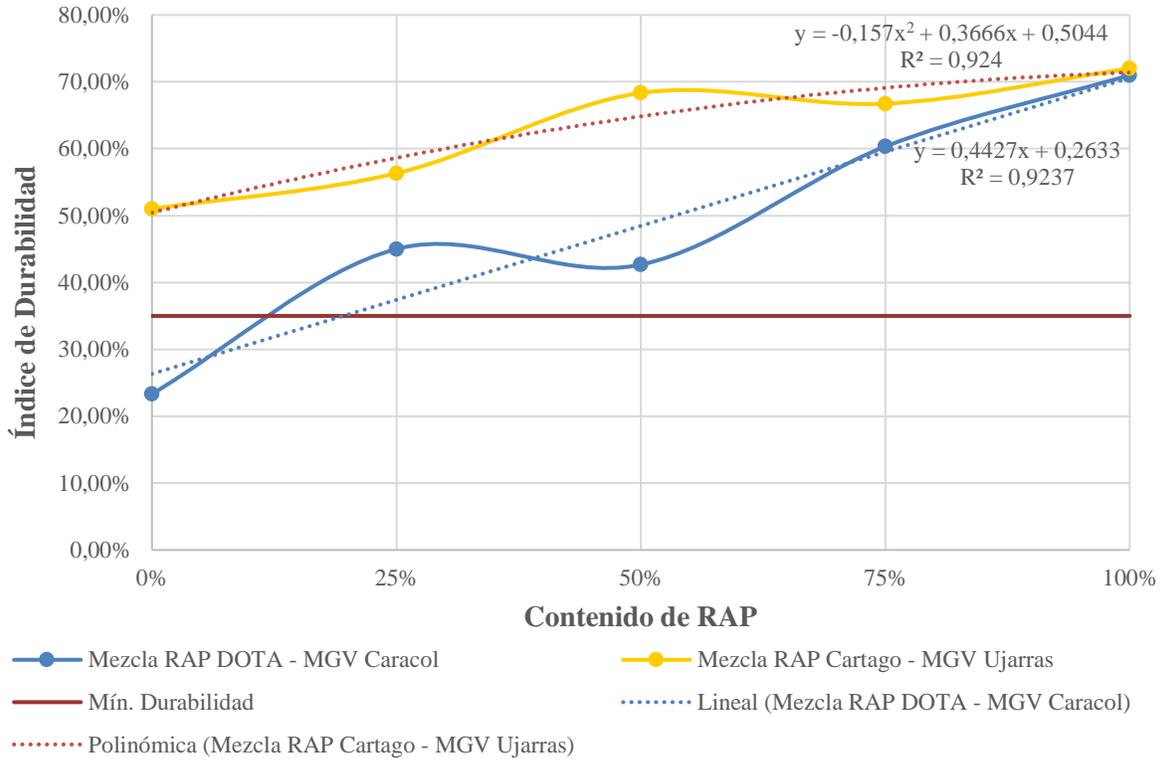
**Cuadro 4.27.** Resultados de porcentaje de Índice de Durabilidad para agregado fino y grueso para la combinación de RAP-02 Cartago y MGCV-01 Ujarrás.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0% MGCV Ujarrás y 100% RAP Cartago	25% MGCV Ujarrás y 75% RAP Cartago	50% MGCV Ujarrás y 50% RAP Cartago	75% MGCV Ujarrás y 25% RAP Cartago	100% MGCV Ujarrás y 0% RAP Cartago
ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)	AASHTO T210	Finos	72,00%	66,73%	68,33%	56,33%	51,00%
		Gruesos	81,00%	80,20%	85,00%	78,33%	77,33%

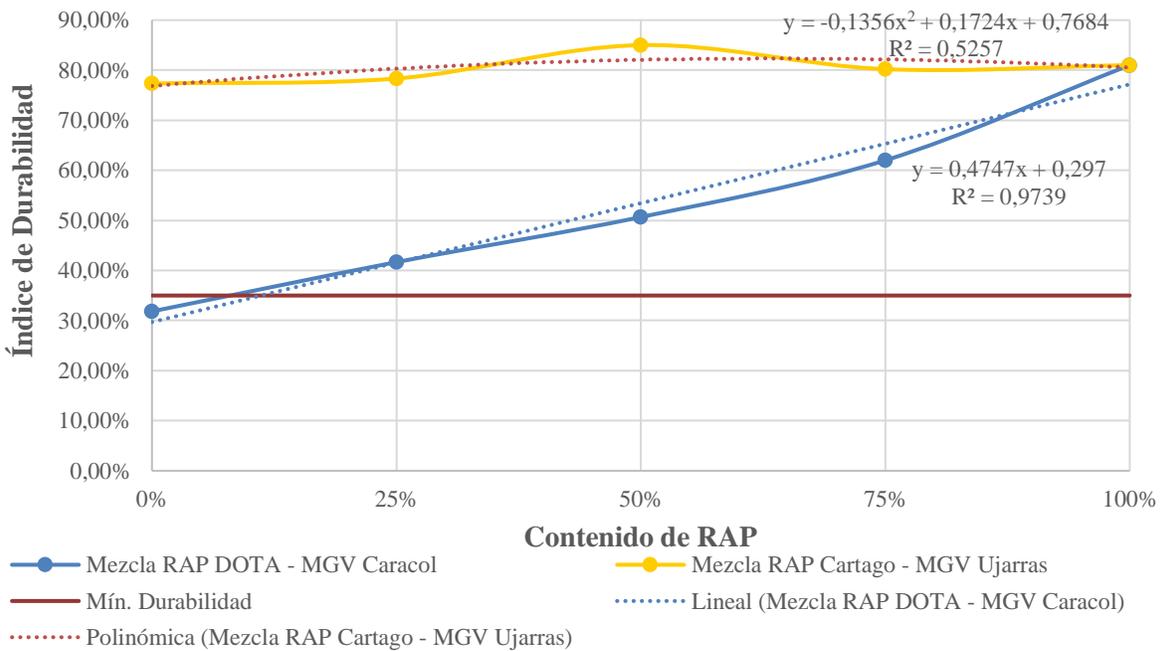
Fuente: Camacho, P.

A fin de ver la variabilidad entre las medias de los resultados obtenidos de durabilidad se aplicó un análisis de ANOVA de un factor (ver sección 7.5 del Apéndice), donde se obtuvo que para ambas combinaciones existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias obtenidas para durabilidad, además mediante la prueba de “Tukey” se logró determinar que estas diferencias se dan tanto en las medias entre combinaciones como en las medias de una sola mezcla.

En la Figura 4.56. se muestra la variabilidad que se presenta del índice de durabilidad para agregado finos conforme se varía el contenido de RAP, mientras la Figura 4.57. muestra esta misma tendencia, pero para agregado grueso.



**Figura 4.56.** Comparativa de la variación del Índice de Durabilidad (Finos) para las combinaciones de RAP y MGV.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.57.** Comparativa de la variación del Índice de Durabilidad (Gruesos) para las combinaciones de RAP y MGV.  
Fuente: Camacho, P.

De los gráficos anteriores se puede visualizar que para el caso del agregado fino el índice de durabilidad tiende a aumentar conforme se aumenta el contenido de RAP, se debe notar que los valores de índice de durabilidad para el RAP proveniente de Dota como de Cartago, poseen valores muy similares por lo que la condición inicial de la mezcla va estar regida por el MGV fuente, como se ha visto en apartados anteriores el material del Caracol posee susceptibilidad a degradación mecánica, por lo que los valores de durabilidad de la mezcla Dota- Caracol son menores que Ujarrás-Cartago.

La tendencia de aumentar el índice de durabilidad en el agregado fino puede estar dada debido a la presencia de agregado fino recubierto con cemento asfáltico lo cual puede prevenir que se presente una mayor formación de material arcilloso por degradación mecánica, además debe tomarse en cuenta el origen de los agregados que componen el RAP, puesto las mezclas asfálticas se elaboran por lo general con materiales limpios y durables que permiten soportan repeticiones de cargas vehiculares, y por tanto es esperable que soporten mejor la degradación mecánica, aunado esto al hecho que las partículas recubiertas por ligante asfáltico podrían tener una mayor durabilidad a la degradación.

Por otro lado, se tiene para el agregado grueso en el caso de la combinación Cartago-Ujarrás se puede observar que describe una tendencia prácticamente invariable en cuanto al índice de durabilidad, lo cual puede deberse a que ambas fuentes poseen índices muy cercanos por lo que el aumento de RAP no provoca cambios significativos en esta propiedad, por el contrario, el material de Caracol posee un índice que se encuentra por debajo del 35%, por lo que al incrementar el contenido de RAP genera un incremento en el índice de durabilidad tanto de agregado fino como grueso.

#### **4.3.9. Evaluación de pérdida de sanidad en sulfato de sodio para las combinaciones de RAP y MGV.**

Como último se tiene la evaluación por pérdida de sanidad en sulfato de sodio, se tiene que para agregado grueso y fino debe cumplir con que no sobrepase un máximo de 12%, en los Cuadro 4.28. y 4.29. se presentan los resultados obtenidos para las mezclas de RAP y MGV, se tiene que las mezclas compuesta por MGV-02 Caracol y RAP-01 Dota sobrepasa el límite máximo tanto para agregado grueso como fino, mientras para la mezcla de MGV-01 Ujarrás y RAP-02 Cartago se cumple con el requerimiento máximo a excepción de la dosificación con contenido de 25% de RAP donde posee un valor de 13,70%, en la Figura 4.58. y 4.59. se muestra para agregado fino y grueso la variación de la pérdida de sanidad en sulfato de sodio conforme se varía el contenido de RAP.

**Cuadro 4.28.** Resultados de porcentaje de pérdida por sanidad en sulfato de sodio para agregado fino y grueso para la combinación de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol.

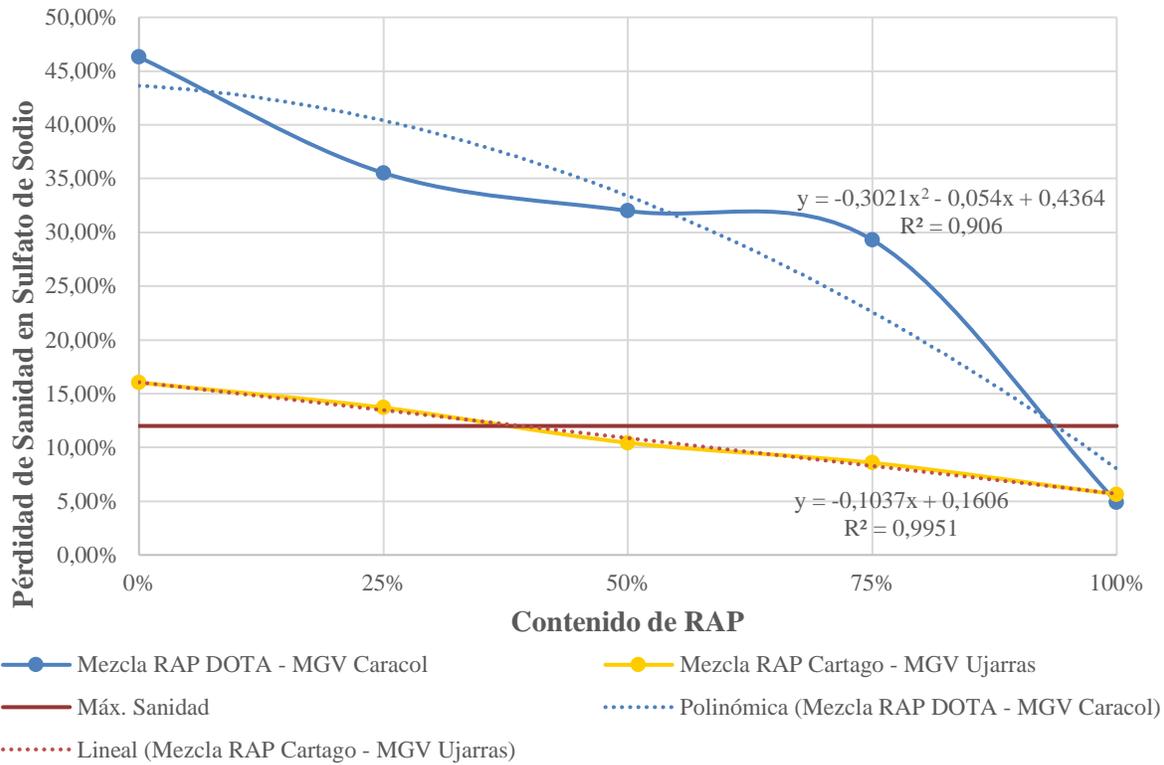
Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0% MGV Caracol y 100% RAP Dota	25% MGV Caracol y 75% RAP Dota	50% MGV Caracol y 50% RAP Dota	75% MGV Caracol y 25% RAP Dota	100% MGV Caracol y 0% RAP Dota
PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)	AASHTO T 104	Finos	4,90%	29,30%	32,00%	35,53%	46,30%
		Gruesos	10,90%	22,50%	21,57%	46,43%	65,40%

Fuente: Camacho, P.

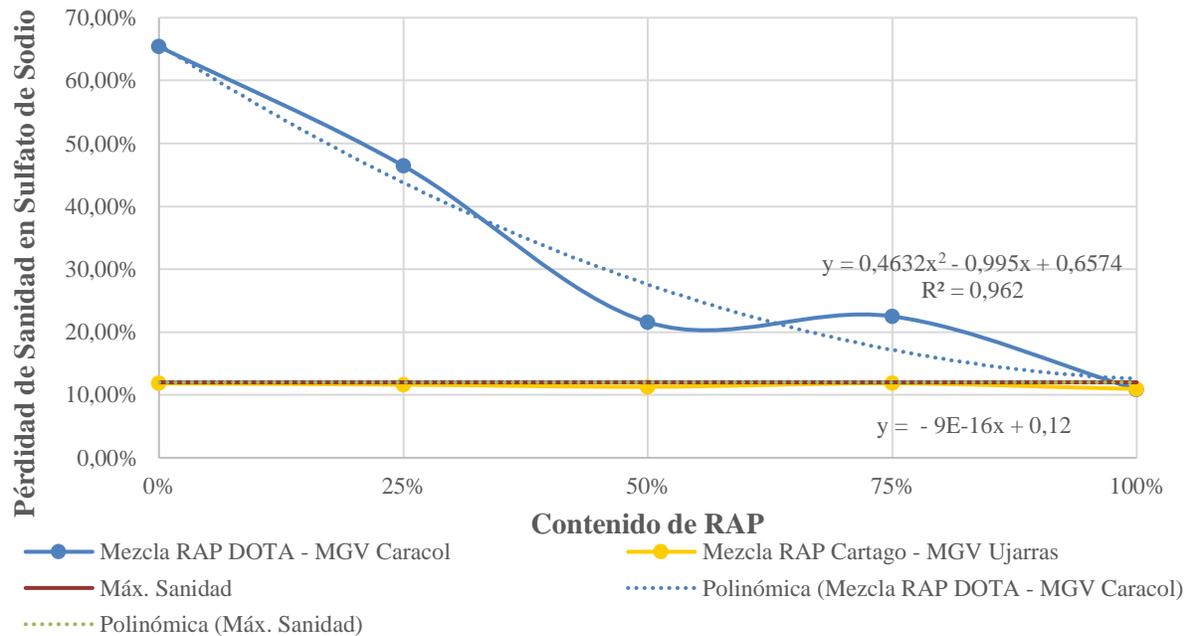
**Cuadro 4.29.** Resultados de porcentaje de pérdida por sanidad en sulfato de sodio para agregado fino y grueso para la combinación de RAP-02 Cartago y MGV-01 Ujarrás.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros	0% MGV Ujarrás y 100% RAP Cartago	25% MGV Ujarrás y 75% RAP Cartago	50% MGV Ujarrás y 50% RAP Cartago	75% MGV Ujarrás y 25% RAP Cartago	100% MGV Ujarrás y 0% RAP Cartago
PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)	AASHTO T 104	Finos	5,63%	8,57%	10,43%	13,70%	16,03%
		Gruesos	10,93%	11,83%	11,30%	11,63%	11,83%

Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.58.** Comparativa de la variación de Pérdida de Sanidad en Sulfato de Sodio (Finos) para las combinaciones de RAP y MGV.  
Fuente: Camacho, P.



**Figura 4.59.** Comparativa de la variación de Pérdida de Sanidad en Sulfato de Sodio (Grosos) para las combinaciones de RAP y MGV.  
Fuente: Camacho, P.

A fin de ver la variabilidad entre las medias de los resultados obtenidos de sanidad se aplicó un análisis de ANOVA de un factor con nivel de confianza del 95% (ver sección 7.5 del Apéndice), donde se obtuvo que para ambas combinaciones existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias obtenidas para sanidad, además mediante la prueba de “*Tukey*” se logró determinar que estas diferencias se dan tanto en las medias entre combinaciones como en las medias de una sola mezcla, a excepción de las medias para sanidad en agregado grueso de la combinación Cartago-Ujarrás.

Se debe destacar que el material granular virgen proveniente del Tajo Caracol es susceptible a la pérdida de sanidad, es decir posee una alta probabilidad de sufrir degradación por acción del intemperismo, esto puede observarse en los resultados obtenidos, donde se tiene que conforme aumenta el contenido de RAP la pérdida disminuye, sin embargo, no es suficiente para que la mezcla cumpla con el límite máximo de 12%, por otro lado la combinación de Cartago-Ujarrás presenta una tendencia a disminuir el porcentaje de pérdida para agregado fino conforme se aumenta el contenido de RAP, mientras que para agregado grueso esta tendencia es más estable y se mantiene por debajo del 12%. De lo anteriormente descrito se puede inferir que la proporción de RAP no afecta significativamente la pérdida por sanidad cuando el MGV posee valores similares al material de RAP para el caso de agregado grueso, mientras que para el agregado fino se puede deducir que puede presentarse una disminución gradual bajo estas mismas condiciones.

#### **4.3.10. Evaluación general del desempeño de las combinaciones de RAP y MGV para uso en pavimentos expuestos.**

Los resultados obtenidos de las dos combinaciones de MGV y RAP arrojan resultados variables en cuanto a la verificación del desempeño que pueden tener para uso en caminos ya sea para reforzamiento de capas granulares existentes o como capa superficial de rodadura, en ambos casos aplicados a caminos de lastre. En el Cuadro 4.30. se muestra un resumen general del cumplimiento de las mezclas de 25%, 50% y 75%, conforme a las especificaciones técnicas obtenidas del manual CR-2010, así como de especificaciones especiales de contrataciones para mantenimiento de caminos con superficie de ruedo en lastre.

Como primer punto dentro de la evaluación general se tiene que el material MGV-02 Caracol, por las condiciones particulares que posee, no es un material adecuado para uso por sí solo para caminos con superficie de ruedo expuesta, porque presenta valores de degradación mecánica, sanidad y durabilidad que se encuentra por encima de las tolerancias, aunado a la presencia de agregado grueso mayor a los 76,2 mm y un porcentaje pasando la malla No. 200 mayor al requerido para graduaciones granulométricas, provocan que no sea un material idóneo para el uso capas de rodadura de pavimentos expuestos, situación que incide directamente en los resultados de las mezclas, provocando resultados distintos a los que normalmente señala la teoría, a pesar de ellos se obtienen resultados interesantes de las mezclas con RAP, por cuanto se puede evidenciar la característica del RAP como agente correctivo.

Basado en este hecho se tiene por ejemplo que el material del Tajo Caracol no cumple para ninguna de las graduaciones utilizada, sin embargo, al combinarse en proporciones de 25%, 50% y 75%, se da un ajuste granulométrico, haciendo que las mezclas cumplan como Subbase Graduación B, Capa Granular de Rodadura e incluso como Material Selecto para Capa Superficial.

Como parte del aporte en cuanto al desempeño de las mezclas se tiene que la adición de RAP puede mejorar el valor de CBR de un material, tal y como sucedió con el material proveniente del Tajo Caracol, que a su vez logró obtener mezclas más densas comparada con los materiales fuente.

**Cuadro 4.30.** Resumen general del cumplimiento de las mezclas de RAP y MGV conforme a las especificaciones técnicas.

Ensayo Evaluado	25% MGV Caracol y 75% RAP Dota	50% MGV Caracol y 50% RAP Dota	75% MGV Caracol y 25% RAP Dota	25% MGV Ujarrás y 75% RAP Cartago	50% MGV Ujarrás y 50% RAP Cartago	75% MGV Ujarrás y 25% RAP Cartago
Índice Plástico y Límite Líquido	Cumple	Cumple	Cumple	No Aplica	No Aplica	No Aplica
Granulometría	Cumple parcialmente *	Cumple parcialmente *	Cumple parcialmente *	Cumple parcialmente *	Cumple parcialmente *	Cumple parcialmente *
Densidad Máxima y Humedad Óptima	No Aplica	No Aplica	No Aplica	No Aplica	No Aplica	No Aplica
Índice de Soporte de California (CBR)	Cumple CBR de subbase	Cumple CBR de subbase	Cumple CBR de subbase			
Caras Fracturadas	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Abrasión de Los Angeles	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Índice de Durabilidad	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Pérdida de Sanidad en Sulfato de Sodio	No cumple	No Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	No Cumple

\*Nota 1: Cumplen parcialmente para las Subbase Graduación B, Capa Granular de Rodadura TM-40b y Material Selecto.

Fuente: Camacho, P.

Es importante mencionar que el material del Tajo de Caracol se mantuvo a fin de poder observar el comportamiento de una mezcla de RAP con un material con plasticidad, sin embargo, una vez realizado el análisis, se tiene que el porcentaje de caras fracturadas posee relevancia en este tema, al permitir el uso de agregados no plásticos siempre que se cumpla con un porcentaje de caras fracturadas mayor al 50%, para efectos de mezclas RAP-MGV esto es importante por cuanto el porcentaje de caras fracturadas se puede obtener de la dosificación con RAP, ya que debido a su naturaleza posee porcentajes del 100% de caras fracturadas, esto se puede visualizar en la tendencia que describe la combinación de Ujarrás-Cartago, donde el material de río proveniente del Tajo de Ujarrás posee cierto porcentaje de caras redondeadas, que es compensado con el aporte del RAP, de esto se puede concluir que no necesariamente se requiere materiales con plasticidad, si se pretende emplear una mezcla de RAP, por cuanto se puede mejorar la textura del material para cumplir con los requerimientos técnicos.

Para el caso de análisis granulométrico se tiene que las mezclas superaron el cumplimiento de graduaciones, que los materiales fuente por sí solos, este importante mencionar que el RAP ni las mezclas lograron cumplir con material de Base Graduación C ni como Subbase Graduación A, siendo el caso de las mezclas donde se logró cumplir con las graduaciones restantes, esto sucedió para ambas combinaciones, a pesar de que existen algunos valores fuera de rango, se toma como un cumplimiento parcial puesto el manual del CR-2010 establece rangos de tolerancia para los valores fuera de las bandas de aceptación. Cabe destacar que en los manuales nacionales no existe graduaciones específicas para RAP o mezclas de RAP para uso como material en caminos de lastre, por lo que implementar una especificación podría mejorar el ajuste granulométrico.

Relacionado a los valores de densidad máxima y humedad óptima, se tiene que no existen valores de aceptación para estos parámetros, a pesar de que podría establecerse rangos para MGV y RAP, basado en el muestreo de diversas fuentes y caracterización del origen de los materiales, no obstante se estableció que el material de RAP puede tener variabilidad significativa de sus propiedades, incluyendo los valores de densidad máxima seca, el cual puede deberse a la combinación como otros materiales productos del perfilado de pavimentos asfálticos que se apilan en su mismo sitio, así como a la misma forma en que se

realiza el apilamiento, por cuanto puede generar segregación de material y pérdida de finos, en general en los planteles o predios donde se apila el material podría implementarse un procedimiento de apilamiento y acarreo de material, a fin de mejorar la homogenización.

De conformidad con la investigación de diversos autores como los citados en el marco conceptual, que han realizado mezclas con RAP se tiene que el CBR disminuye conforme se aumenta el contenido de RAP, esta tendencia fue evidenciada en la curva que describió la combinación de MGV-01 Ujarrás con RAP-02 Cartago comprobando así lo descrito anteriormente. Además se logra evidenciar que dicha situación no se presenta para todas las mezclas, por cuanto el RAP puede actuar como correctivo cuando las propiedades física y mecánicas de un MGV son limitadas, situación que pudo evidenciarse para la combinación de MGV-02 Caracol con RAP-01 Dota, esto reviste interés en el tanto existen proyectos donde las fuente más cercanas de MGV no necesariamente son de calidad o presentan parámetros fuera de especificaciones, lo cuales puede ser corregidos mediante una dosificación con RAP, en términos generales para los resultados específicos obtenidos de este proyecto, se tiene que para una combinación con contenido de 50% de RAP, se podría obtener CBR mayores a 30, con lo cual cumpliría de subbases y capas superficiales de rodadura, además de evitar que se presenten deterioros por falta de capacidad de soporte con ahuellamientos, deformaciones o hundimientos.

La pérdida por abrasión presenta otro escenario donde el material de RAP posee un desempeño adecuado, tanto por las propiedades del material solo, como en conjunto en una mezcla, donde puede funcionar para mejorar la resistencia al impacto y abrasión, si el MGV es susceptible a esta acción, se debe recordar que para el uso en caminos de no pavimentados, los agregados no solo deben resistir las cargas y tracción del tránsito vehicular, sino también el proceso de colocación, conformación y compactación del material, el cual en el caso de las mezclas puede incluir el proceso de revoltura por diversos medios mecánicos.

En cuanto a la durabilidad del agregado grueso y fino se tiene que para mezclas RAP-MGV, la diferencia entre los índice la puede marcar el MGV usado en la mezcla, esto podría deberse a la naturaleza del material del RAP, el cual está conformado por agregados que componen la producción de mezclas asfálticos, los cuales son materiales selectos, fraccionados y por lo general libres de impurezas, en este sentido se debe revisar las propiedades de material MGV que se será empleado en la combinación.

La pérdida por sanidad en sulfato de sodio permitió afianzar las condiciones físico-mecánicas que poseía el material proveniente del Tajo Caracol, el cual presentaba susceptibilidad a degradación, lo que a su vez permitió explicar la tendencia opuesta de las curvas de las combinaciones en la mayoría de los ensayos, así como evidenciar las calidades de material de RAP proveniente del plantel de Dota para corregir algunas de estas propiedades.

Se debe destacar que basado en una evaluación general de cumplimiento de todas las características de físicas y mecánicas, las mezclas de RAP-MGV, presentan un mejor desempeño para ser usadas como material sustituto en caminos de lastre que el material de RAP por sí solo, sin embargo, en caso que deba emplearse solo RAP su uso también es factible como agregado para superficies de rueda expuestas.

De las combinaciones MGV-RAP no se logra evidenciar que algunas de las dosificaciones superen en cumplimiento una a otra, de los resultados obtenidos la mezcla mayor cantidad de cumplimientos obtuvo es para el contenido de RAP del 50% al 75% para la combinación Ujarrás-Cartago.

## 5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1.1. Conclusiones.

- Los resultados de los ensayos realizados cumplen con la declaración de precisión por repetibilidad de las normas de referencia para cada caso.
- De las caracterizaciones completas de aceptación y calidad para seis fuentes de agregados, se logró obtener la caracterización de las propiedades físico-mecánicas de dos fuentes de material granular virgen y de dos de material producto del reciclado de pavimentos asfálticos.
- A pesar de que los dos materiales RAP no tienen plasticidad no se deben descartar, por cuanto los parámetros técnicos permiten agregados no plásticos, siempre y cuando cumplan con tener más del 50% de caras fracturadas retenidas en la malla No. 4 (4,75 mm), en este caso todas fuentes muestreadas superaron este requisito.
- Considerando los resultados de los ensayos de granulometría, se puede concluir que el material proveniente del plantel de Dota (RAP-01) cumple parcialmente para Subbase Graduación B, mientras que el material proveniente del Plantel de Cartago (RAP-02) cumplió con los requerimientos de la graduación “B” y como material selecto para la capa superficial de la vía CR.204.07.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en cuanto al análisis granulométrico es necesario realizar un procesamiento y homogenización de los materiales de RAP, así también incluir un proceso de trituración en caso de ser necesario.
- Ambas fuentes de RAP presentan una variabilidad significativa en cuanto a la densidad máxima seca, así como el valor de CBR obtenido, para el RAP-01 Dota se tiene que el CBR cumple como base y subbase, mientras que para RAP-02 Cartago solo cumple como subbase.
- Los parámetros de textura, abrasión, durabilidad y sanidad no presentan variabilidad significativa entre resultados de las fuentes de RAP, mismos que cumplen conforme a las especificaciones técnicas.
- En la evaluación de material de RAP no necesariamente se puede obtener el CBR requerido para soportar la exigencia del tránsito de una vía, en términos generales la factibilidad inicial de un RAP se puede obtener mediante la determinación de la granulometría, densidad, contenido de humedad y el CBR de dicho material, mientras que características como durabilidad, textura, abrasión y sanidad se puede realizar una vez se han superado los parámetros de aceptación.
- El uso de RAP como sustituto de material para caminos de lastre es factible siempre y cuando se evalúe su aporte basado en la caracterización de las propiedades físico-mecánicas.
- Conforme al análisis granulométrico las mezclas de RAP-MGV cumplen como Subbase Graduación B, Capa Granular de Rodadura Graduación TM-40b y Material Selecto para Capa Superficial.
- Para la combinación de materiales de RAP-02 Cartago con MGV-01 Ujarrás al aumentar el contenido de RAP de la mezcla los valores de CBR y densidad disminuyen, mientras que para la combinación de RAP-01 Dota con MGV-02 Caracol se obtiene el resultado inverso donde se ve incrementado este parámetro.
- El RAP puede ser usado como material “correctivo” cuando se tiene MGV con calidades inferiores a los requerimientos técnicos, siendo la mezcla de RAP-MGV un material de mejores competencias.

- Las propiedades de ambas mezclas de RAP con MGW en cuanto a durabilidad, abrasión y caras fracturadas cumplen conforme a las especificaciones técnicas, mientras que la pérdida por sanidad en sulfato de sodio solo cumple la combinación Ujarrás-Cartago.
- De acuerdo a una evaluación general las mezclas de RAP y MGW, presentan un mejor desempeño para ser usados como material sustituto en caminos de lastre que el material de RAP por sí solo.
- La dosificación de contenido de RAP de 50% al 75% de la combinación Ujarrás-Cartago es la que mejor enmarca el cumplimiento de las especificaciones técnicas.

### 5.1.2.Recomendaciones.

- Profundizar en el estudio de las fuentes de RAP que pueda permitir la elaboración de una especificación técnica de los requerimientos técnicos para uso de RAP y mezclas de RAP como material sustituto en caminos de lastre, incluyendo el análisis de otras propiedades del RAP como absorción y contenido de asfalto.
- Se recomienda realizar una valoración específica para determinar si introduciendo un proceso de fraccionamiento mediante tamizaje o trituración al material RAP antes de utilizarlo, permitirá el cumplimiento de las especificaciones en cuanto a granulometría de este tipo de materiales para la base o subbase graduación “A”, “B” y “C” así como la graduación TM-40b modificada y como material selecto para la capa superficial de la vía CR.204.07, así como de otras graduaciones requeridas.
- Para futuras investigaciones se debe ampliar el rango de dosificación de contenido de RAP de las mezclas en intervalos más estrechos como a fin de evaluar el comportamiento para contenidos de RAP de 10%, 20%, 40%, 60%, 80% 90%, etc., así también se debe incrementar la cantidad de combinaciones de las mezclas, a fin de evaluar el comportamiento de un mismo RAP para diferentes muestras de MGv, y viceversa.
- Realizar comparaciones de los rangos de dosificación con métodos de análisis de gráfico para verificar y aproximar valores que permitan cumplir con el rango teórico.
- Realizar ensayos de absorción módulo resiliente y gravedad específica de las fuentes de RAP y combinaciones, a fin de complementar la caracterización de las propiedades de los materiales.
- Se debe ampliar el muestreo de RAP de diferentes fuentes de todo el país a fin de detallar mejor sus propiedades y condiciones, tomando en consideración origen y el proceso de acarreo y apilamiento.
- Para un análisis de factibilidad inicial de un RAP se recomienda usar los ensayos de CBR, densidad máxima, humedad optima y granulometría, ésta última para uso comparativo.
- Realizar estudios de campo del comportamiento del RAP y mezclas de RAP-MGV colocado en caminos de lastre, a fin de evaluar el desempeño de los materiales como sustituto del material granular virgen en condiciones reales de tránsito.
- Se recomienda la elaboración de una guía para el apilamiento y acarreo de RAP, así como la elaboración de una especificación técnica para el proceso de elaboración de mezclas con RAP y proceso constructivo de colocación de material para pavimentos con superficie de ruedo expuesta.
- Realizar un estudio de costo-beneficio de uso RAP versus MGv, considerando el origen de las fuentes y las distancias de acarreo.
- Se recomienda realizar paños de prueba en sitio basado en las combinaciones de RAP-MGV a fin monitorear su desempeño frente a cargas reales de tránsito, así como su exposición al intemperismo.
- Se puede optimizar la combinación de RAP-MGV para un proyecto específico, tomando consideración el material que se encuentra en sitio, así como las distancias de acarreo, a fin de brindar una mejor cobertura y potencial ahorro en costos del proyecto.

## 6. BIBLIOGRAFÍA.

- AASHTO. (2010). *AASHTO T 210-10: Standard Method of Test for Aggregate Durability Index*. Washington, DC.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. & Bo, M. (2013). *Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications*. Journal of Materials in Civil Engineering. Vo. 25, No. 8. Pp. 1077 – 1088.
- ASTM International (2016). *ASTM WK26824: New Specification for Standard Specifications for Recycled Asphalt Pavement Materials for Base or Subbase for Highway or Airports*. Subcommittee D18.14 on Geotechnics of Sustainable Construction. West Conshohocken, PA.
- ASTM International (2016). *ASTM D1883-16: Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted-Soils*. West Conshohocken, PA.
- Ayan, V. (2011). *Assessment of Recycled Aggregates for Use in Unbound Subbase of Highway Pavement*. Ph.D. Tesis, Kingston University. Londres.
- Bennert, T., & Maher, A. (2005). *The Development of a Performance Specification for Granular Base and Subbase Material*. Rutgers University. New Jersey.
- Bennert, T., Papp, W., Maher, A., & Gucunski, N. (2000). *Utilization of Construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1714. Washington, DC. 33-39p.
- Bleakley, A. & Cosentino, P. (2013). *Improving the Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Roadway Base Applications Through Blending and Chemical Stabilization*. Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC.
- Chesner, W., Collins, R., & Mackay, M. (1998). *User Guidelines for Waste a By-Product Materials in Pavement Construction*. Federal Highway Administration. Washington, DC.
- Collins, R y Ciesielski, SK. (1994). *Recycling and Use of Waste Materials a By-Products in Highway Construction*. Transportation Research Board of the National Academies, NCHRP Synthesis 199. Washington, DC.
- Cosentino, P., Kalajian, E. Bleakey, A., Diouf, B., Misilo, T., Petersen, A., Krajcik, R. & Sajjadi, A. (2012). *Improving the Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Road Base Applications*. Florida Institute of Technology. Melbourne.
- CONAVI. (2016). *Licitación Pública No. 2009LN-000003-0CV00, proyecto: “Proyecto de conservación de la Red Vial Nacional Pavimentada por Precios Unitarios”*. Gerencia de Contratación de Vías y Puentes.
- CONAVI. (2016). *Licitación Abreviada No. 2014LA-000008-0DI00 proyecto: “Trabajos para la atención de la Ruta Nacional No. 709 (en lastre), sección de control No. 20414 (Lourdes (Cruce Calle Chayote)-Llano Bonito (R.N. No. 141)), Zona 1-5”*. Gerencia de Contratación de Vías y Puentes.
- CONAVI. (2016). *Licitación Pública No. 2014LN-000019-0CV00, proyecto: “Conservación de la Red Vial Nacional con superficie de ruedo en lastre y tierra (4 años)”*. Gerencia de Contratación de Vías y Puentes.
- Dong, Q., y Huang, B. (2014). *Laboratory Evaluation on Resilient Modulus a Rate Dependencies of RAP Used as Unbound Base Material*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol, 26, No. 2. 379-383p.
- Edil, T. (2011). *Specifications and recommendations for Recycled Materials Used as Unbound Base Course*. Recycled Materials Resource Center, University of Wisconsin – Madison. Madison, Wisconsin.

- Edil, T., Tinjum, J. & Benson, C. (2012). *Recycled Unbound Materials. Final Report 2012 – 35*. Minnesota Department of Transportation Research Services. University of Wisconsin – Madison. Madison, Wisconsin.
- Hernández Sampieri & Otros. (2010). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill, Quinta edición, México.
- Hoppe, E., Lane, S., Fitch, M. & Shetty, S. (2015). *Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Use as Road Base and Subbase*. Virginia Center for Transportation Innovation and Research. Charlottesville, Virginia.
- Keller, G. & Sherar, J. (2008). *Ingeniería de Caminos Rurales: Guía de Campo para las Mejores Prácticas de Gestión de Caminos Rurales*. Instituto Mexicano del Transporte. México.
- Instituto Nacional de Vías. (2007). *Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados - I.N.V.E. 227-07*. INVÍAS. Colombia.
- Koch, S.; y Ksaibati, K. (2010). *Performance of Recycled Asphalt Pavement in Gravel Roads*. Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming.
- Koch, S; Huntington, G. y Ksaibati, K. (2013). *Performance of Reclaimed Asphalt Pavement on Unpaved Roads*. Wyoming Technology Transfer Center, University of Wyoming.
- Locander, R. (2009). *Analysis of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) As a Base Course Material*. Colorado Department of Transportation – Research. Denver.
- McGarragh, E. (2007). *Evaluation of Current Practices of Reclaimed Asphalt Pavement – Virgin Aggregate as Base Course Material*. University of Washington, Seattle.
- Mokwa, R. & Pebbles, C. (2005). *Evaluation of the Engineering Characteristics of RAP/Aggregate Blends*. Montana State University. Bozeman.
- MOPT. (2006). *Longitud de la Red Vial de Costa Rica por tipo de superficie*. Dirección de Planificación Sectorial, Departamento de Medios de Transporte.
- MOPT. (2010). *Manual de Especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes, CR-2010*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- Ooi, P.S.K. (2010). *Application of Recycled Materials in Highway Projects*. University of Hawaii. Honolulu.
- Roberts, F., Kandhal, P. Brown, E., Lee, D., & Kennedy, T. (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. NAPA Education Foundation. Maryland.
- Sayed, S., Pulsifer, J. & Jackson, N. (2011). *UNRAP: Are We Ready for It?* Journal of Materials in Civil Engineering. Vo. 23, No. 2. Pp 188 – 196.
- Shaefer, V., Stevens, L., White, D., & Ceylan, H. (2008) *Design Guide for Improved Quality Roadway Subgrades and Subbases*. Iowa State University. Ames.
- Skorseth, K y Selim, A. (2000). *Gravel Roads: Maintenance and Design Manual*. United States Environmental Protection Agency. USDOT-FHWA.
- Sojo, M. (2016). Consulta personal sobre manejo de proyectos de perfilado de pavimentos para contrataciones de conservación vial en la Zona 1-7 Cartago.
- Taha, R., Ali, G., Basma, A. & Al – Turk, O. (1999). *Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases*. Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board, No. 1652. Washington, DC. pp 264 – 269.
- Navarro. (2008). *Reciclaje de carpetas asfálticas*. Instituto Tecnológico de Monterrey. México.
- Tutumluer. (2013). *Practices for Unbound Aggregate Pavement Layers*. Transportation Research Board of the National Academies, NCHRP Synthesis 445. Washington, DC.
- Universidad Centroamericana. (1996). *Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso, y determinación de material más fino que el tamiz No. 200 (75  $\mu\text{m}$ ) en agregado mineral por lavado*. Laboratorio de Materiales de Construcción. San Salvador.
- Universidad Nacional de Ingeniería – UNI. (2006). *Primer Taller de Mecánica de Suelos*. Facultad de Ingeniería Civil. Lima, Perú.

## 7. APÉNDICES.

### 7.1. Resultados obtenidos para muestreo de material granular virgen (MGV) y reciclado de pavimentos asfálticos (RAP).

En el Cuadros 7.1. se muestra los parámetros de precisión aplicables a los ensayos de laboratorio empleados en este proyecto, de los Cuadros 7.2. al 7.7 se muestran los resultados de cada una de las pruebas por triplicado de los materiales fuente, así como de las combinaciones realizadas, además en la Figura 7.1. se muestra el significado de cada celda aplicable a todos los cuadros.

**Resultados Ensayos**

Parametros	RAP-01 DOTA (1)	RAP -01 DOTA (2)	RAP DOTA (3)
76,2 mm (3")	100	100	100
	100,00	0,00	0,00

Promedio                      Rango                      Desviación estandar

**Figura 7.1.** Leyenda de lectura de resultados de los ensayos.

Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 7.1.** Parámetros de precisión para los ensayos de caracterización.

Ensayo	Norma referencia	Parametros	Precisión requerida																																																																																																																																																											
<b>LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO e ÍNDICE PLÁSTICO</b>	AASHTO T 89/90 ASTM 4318	<b>Límite Líquido, LL</b>	Variación entre dos resultados no puede diferir en mas de un 7% de su media.																																																																																																																																																											
		<b>Índice Plástico, IP*</b>	Variación entre dos resultados no puede diferir en mas de un 10% de su media.																																																																																																																																																											
<b>ANÁLISIS GRANULOMETRICO</b>	AASHTO T 27/11 ASTM 117/136	<b>76,2 mm (3")</b>	<table border="1"> <caption>Table 2—Estimates of Precision</caption> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="2">Total Percentage of Material Passing</th> <th>Standard Deviation (s), Percent<sup>a</sup></th> <th>Acceptable Range of Two Results (R), Percent<sup>a</sup></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">Coarse Aggregate<sup>b</sup></td> <td>100</td> <td>≥95</td> <td>0.32</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>Single-operator precision</td> <td>≥95</td> <td>≥85</td> <td>0.81</td> <td>2.3</td> </tr> <tr> <td>Multioperator precision</td> <td>≥85</td> <td>≥60</td> <td>1.34</td> <td>3.8</td> </tr> <tr> <td>≥80</td> <td>≥40</td> <td>2.25</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>≥60</td> <td>≥20</td> <td>1.32</td> <td>3.7</td> </tr> <tr> <td>≥20</td> <td>≥15</td> <td>0.85</td> <td>2.7</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">Fine Aggregate</td> <td>≥15</td> <td>≥10</td> <td>1.00</td> <td>2.8</td> </tr> <tr> <td>≥10</td> <td>≥5</td> <td>0.75</td> <td>2.1</td> </tr> <tr> <td>≥5</td> <td>≥2</td> <td>0.53</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td>≥2</td> <td>≥0</td> <td>0.27</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>Multioperator precision</td> <td>100</td> <td>≥95</td> <td>0.35</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>≥95</td> <td>≥85</td> <td>1.07</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">Finer Aggregate</td> <td>≥85</td> <td>≥60</td> <td>1.92</td> <td>5.4</td> </tr> <tr> <td>≥80</td> <td>≥40</td> <td>2.82</td> <td>8.0</td> </tr> <tr> <td>≥60</td> <td>≥20</td> <td>1.97</td> <td>5.6</td> </tr> <tr> <td>≥20</td> <td>≥15</td> <td>1.60</td> <td>4.5</td> </tr> <tr> <td>≥15</td> <td>≥10</td> <td>1.48</td> <td>4.2</td> </tr> <tr> <td>≥10</td> <td>≥5</td> <td>1.22</td> <td>3.4</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">Multioperator precision</td> <td>≥5</td> <td>≥2</td> <td>1.04</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>≥2</td> <td>≥0</td> <td>0.45</td> <td>1.3</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>≥95</td> <td>0.34</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>Single-operator precision</td> <td>≥95</td> <td>≥80</td> <td>0.55</td> <td>1.6</td> </tr> <tr> <td>Multioperator precision</td> <td>≥80</td> <td>≥20</td> <td>0.83</td> <td>2.4</td> </tr> <tr> <td>≥20</td> <td>≥15</td> <td>0.54</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">Finer Aggregate</td> <td>≥15</td> <td>≥10</td> <td>0.36</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>≥10</td> <td>≥2</td> <td>0.37</td> <td>1.1</td> </tr> <tr> <td>≥2</td> <td>≥0</td> <td>0.14</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td>Multioperator precision</td> <td>100</td> <td>≥95</td> <td>0.23</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>Single-operator precision</td> <td>≥95</td> <td>≥60</td> <td>0.77</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>Multioperator precision</td> <td>≥60</td> <td>≥20</td> <td>1.41</td> <td>4.0</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">Finer Aggregate</td> <td>≥20</td> <td>≥15</td> <td>1.00</td> <td>3.1</td> </tr> <tr> <td>≥15</td> <td>≥10</td> <td>0.73</td> <td>2.1</td> </tr> <tr> <td>≥10</td> <td>≥2</td> <td>0.65</td> <td>1.8</td> </tr> <tr> <td>≥2</td> <td>≥0</td> <td>0.31</td> <td>0.9</td> </tr> </tbody> </table>		Total Percentage of Material Passing		Standard Deviation (s), Percent <sup>a</sup>	Acceptable Range of Two Results (R), Percent <sup>a</sup>	Coarse Aggregate <sup>b</sup>	100	≥95	0.32	0.9	Single-operator precision	≥95	≥85	0.81	2.3	Multioperator precision	≥85	≥60	1.34	3.8	≥80	≥40	2.25	6.4	≥60	≥20	1.32	3.7	≥20	≥15	0.85	2.7	Fine Aggregate	≥15	≥10	1.00	2.8	≥10	≥5	0.75	2.1	≥5	≥2	0.53	1.5	≥2	≥0	0.27	0.8	Multioperator precision	100	≥95	0.35	1.0	≥95	≥85	1.07	3.0	Finer Aggregate	≥85	≥60	1.92	5.4	≥80	≥40	2.82	8.0	≥60	≥20	1.97	5.6	≥20	≥15	1.60	4.5	≥15	≥10	1.48	4.2	≥10	≥5	1.22	3.4	Multioperator precision	≥5	≥2	1.04	3.0	≥2	≥0	0.45	1.3	100	≥95	0.34	0.9	Single-operator precision	≥95	≥80	0.55	1.6	Multioperator precision	≥80	≥20	0.83	2.4	≥20	≥15	0.54	1.5	Finer Aggregate	≥15	≥10	0.36	1.0	≥10	≥2	0.37	1.1	≥2	≥0	0.14	0.4	Multioperator precision	100	≥95	0.23	0.6	Single-operator precision	≥95	≥60	0.77	2.2	Multioperator precision	≥60	≥20	1.41	4.0	Finer Aggregate	≥20	≥15	1.00	3.1	≥15	≥10	0.73	2.1	≥10	≥2	0.65	1.8	≥2	≥0	0.31	0.9
				Total Percentage of Material Passing		Standard Deviation (s), Percent <sup>a</sup>	Acceptable Range of Two Results (R), Percent <sup>a</sup>																																																																																																																																																							
		Coarse Aggregate <sup>b</sup>		100	≥95	0.32	0.9																																																																																																																																																							
				Single-operator precision	≥95	≥85	0.81	2.3																																																																																																																																																						
				Multioperator precision	≥85	≥60	1.34	3.8																																																																																																																																																						
				≥80	≥40	2.25	6.4																																																																																																																																																							
				≥60	≥20	1.32	3.7																																																																																																																																																							
				≥20	≥15	0.85	2.7																																																																																																																																																							
		Fine Aggregate		≥15	≥10	1.00	2.8																																																																																																																																																							
				≥10	≥5	0.75	2.1																																																																																																																																																							
≥5	≥2		0.53	1.5																																																																																																																																																										
≥2	≥0		0.27	0.8																																																																																																																																																										
Multioperator precision	100		≥95	0.35	1.0																																																																																																																																																									
≥95	≥85		1.07	3.0																																																																																																																																																										
Finer Aggregate	≥85	≥60	1.92	5.4																																																																																																																																																										
	≥80	≥40	2.82	8.0																																																																																																																																																										
	≥60	≥20	1.97	5.6																																																																																																																																																										
	≥20	≥15	1.60	4.5																																																																																																																																																										
	≥15	≥10	1.48	4.2																																																																																																																																																										
	≥10	≥5	1.22	3.4																																																																																																																																																										
Multioperator precision	≥5	≥2	1.04	3.0																																																																																																																																																										
	≥2	≥0	0.45	1.3																																																																																																																																																										
	100	≥95	0.34	0.9																																																																																																																																																										
	Single-operator precision	≥95	≥80	0.55	1.6																																																																																																																																																									
	Multioperator precision	≥80	≥20	0.83	2.4																																																																																																																																																									
	≥20	≥15	0.54	1.5																																																																																																																																																										
Finer Aggregate	≥15	≥10	0.36	1.0																																																																																																																																																										
	≥10	≥2	0.37	1.1																																																																																																																																																										
	≥2	≥0	0.14	0.4																																																																																																																																																										
	Multioperator precision	100	≥95	0.23	0.6																																																																																																																																																									
	Single-operator precision	≥95	≥60	0.77	2.2																																																																																																																																																									
	Multioperator precision	≥60	≥20	1.41	4.0																																																																																																																																																									
Finer Aggregate	≥20	≥15	1.00	3.1																																																																																																																																																										
	≥15	≥10	0.73	2.1																																																																																																																																																										
	≥10	≥2	0.65	1.8																																																																																																																																																										
	≥2	≥0	0.31	0.9																																																																																																																																																										
	<b>DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD OPTIMA</b>	AASHTO T180	<b>Humedad óptima (%)</b>	0,40																																																																																																																																																										
				1,00																																																																																																																																																										
<b>Densidad (kg/m3)</b>			9,61																																																																																																																																																											
			28,83																																																																																																																																																											
<b>ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)</b>	AASHTO T-193 ASTM D1883	<b>2,54mm (al 95%)</b>	Variación entre dos resultados no puede diferir en mas de un 17% de su media.																																																																																																																																																											
		<b>5,08mm (al 95%)</b>																																																																																																																																																												
<b>CARAS FRACTURADAS</b>	ASTM D5821	Caras Fracturadas																																																																																																																																																												
<b>ABRASIÓN DE LOS ANGELES</b>	AASHTO T-96 ASTM C 131	Abrasión	0,02																																																																																																																																																											
			0,06																																																																																																																																																											
<b>ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T210	Finos	0,02																																																																																																																																																											
			0,05																																																																																																																																																											
		Gruesos	0,01																																																																																																																																																											
			0,03																																																																																																																																																											
<b>PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)</b>	AASHTO T 104	Finos	0,24																																																																																																																																																											
			0,68																																																																																																																																																											
		Gruesos	0,24																																																																																																																																																											
			0,68																																																																																																																																																											

**Cuadro 7.2.** Resultados de los ensayos para los parámetros de aceptación de los materiales de las fuentes de RAP y MG. V.

Ensayo	Norma referencia	Parametros	RAP-01 Dota (1)	RAP-01 Dota (2)	RAP-01 Dota (3)	RAP-02 Cartago (1)	RAP-02 Cartago (2)	RAP-02 Cartago (3)	MGV-01 Ujarras (1)	MGV-01 Ujarras (2)	MGV-01 Ujarras (3)	MGV-02 Caracol (1)	MGV-02 Caracol (2)	MGV-02 Caracol (3)	
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE PLÁSTICO	AASHTO T 89/90 ASTM 4318	Límite Líquido, LL	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	26,90	28,70	27,60	
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,73	1,80	0,74
		Índice Plástico, IP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	8,10	9,30	8,90
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,77	1,20	0,50
ANÁLISIS GRANULOMETRICO	AASHTO T 27/11 ASTM 117/136	76,2 mm (3")	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	84,00	86,00	86,00	
			100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	85,33	2,00	0,94
		50,8 mm (2")	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	82,00	85,00	86,00
			100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	84,33	4,00	1,70
		38,1 mm (1 1/2")	100,00	100,00	98,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	69,00	71,00	70,00
			99,33	2,00	0,94	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	70,00	2,00	0,82
		25,4 mm (1")	100,00	100,00	98,00	100,00	100,00	100,00	100,00	88,00	88,00	88,00	64,00	63,00	64,00
			99,33	2,00	0,94	100,00	0,00	0,00	88,00	0,00	0,00	0,00	63,67	1,00	0,47
		19,0 mm (3/4 ")	100,00	100,00	98,00	100,00	100,00	100,00	100,00	73,00	73,00	74,00	61,00	60,00	61,00
			99,33	2,00	0,94	100,00	0,00	0,00	73,33	1,00	0,47	0,47	60,67	1,00	0,47
		12,5 mm (1/2")	89,00	89,00	87,00	88,00	87,00	89,00	57,00	57,00	58,00	57,00	57,00	56,00	57,00
			88,33	2,00	0,94	88,00	2,00	0,82	57,33	1,00	0,47	0,47	56,67	1,00	0,47
		9,5 mm (3/8")	79,00	80,00	78,00	75,00	74,00	75,00	50,00	50,00	50,00	50,00	54,00	53,00	47,00
			79,00	2,00	0,82	74,67	1,00	0,47	50,00	0,00	0,00	0,00	51,33	7,00	3,09
4,75 mm (No. 4)	55,00	57,00	52,00	44,00	43,00	45,00	35,00	35,00	34,00	34,00	45,00	47,00	43,00		
	54,67	5,00	2,05	44,00	2,00	0,82	34,67	1,00	0,47	0,47	45,00	4,00	1,63		
0,425 mm (No. 40)	19,00	19,00	18,00	4,00	4,00	5,00	12,00	12,00	12,00	12,00	24,00	23,00	24,00		
	18,67	1,00	0,47	4,33	1,00	0,47	12,00	0,00	0,00	0,00	23,67	1,00	0,47		
0,075 mm (No. 200)	17,10	18,30	16,80	3,90	3,70	4,10	5,80	5,80	5,90	5,90	15,00	16,30	13,70		
	17,40	1,50	0,65	3,90	0,40	0,16	5,83	0,10	0,05	0,05	15,00	2,60	1,06		
DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA	AASHTO T180	Humedad óptima (%)	10,10%	9,80%	10,00%	6,00%	6,30%	5,80%	8,90%	8,70%	9,10%	13,40%	12,30%	13,10%	
			9,97%	0,30%	0,12%	6,03%	0,50%	0,21%	8,90%	0,40%	0,16%	12,93%	1,10%	0,46%	
		Densidad (kg/m3)	2115,00	2109,00	2113,00	1999,00	1997,00	2002,00	2182,00	2178,00	2184,00	1873,00	1880,00	1878,00	
			2112,33	6,00	2,49	1999,33	5,00	2,05	2181,33	6,00	2,49	1877,00	7,00	2,94	
ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)	AASHTO T-193 ASTM D1883	2,54mm (al 95%)	78,00	74,00	76,00	24,00	25,00	23,00	95,00	92,00	97,00	8,60	9,30	9,00	
			76,00	4,00	1,63	24,00	2,00	0,82	94,67	5,00	2,05	8,97	0,70	0,29	
		5,08mm (al 95%)	84,00	82,00	80,00	27,00	29,00	24,00	125,00	120,00	127,00	12,40	12,80	13,20	
			82,00	4,00	1,63	26,67	5,00	2,05	124,00	7,00	2,94	12,80	0,80	0,33	

Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 7.3.** Resultados de los ensayos para los parámetros de calidad de los materiales de las fuentes de RAP y MG. V.

Ensayo	Norma referencia	Parametros	RAP-01 Dota (1)	RAP-01 Dota (2)	RAP-01 Dota (3)	RAP-02 Cartago (1)	RAP-02 Cartago (2)	RAP-02 Cartago (3)	MGV-01 Ujarras (1)	MGV -01 Ujarras (2)	MGV-01 Ujarras (3)	MGV-02 Caracol (1)	MGV-02 Caracol (2)	MGV-02 Caracol (3)
CARAS FRACTURADAS	ASTM D5821	Caras Fracturadas	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	83,00%	82,00%	84,00%	100,00%	100,00%	99,00%
			<b>100,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>83,00%</b>	<b>2,00%</b>	<b>0,82%</b>	<b>99,67%</b>	<b>1,00%</b>	<b>0,47%</b>
ABRASIÓN DE LOS ANGELES	AASHTO T-96 ASTM C 131	Abrasión	27,00%	26,30%	27,80%	26,90%	25,50%	26,10%	20,80%	21,30%	21,50%	67,30%	65,70%	66,00%
			<b>27,03%</b>	<b>1,50%</b>	<b>0,61%</b>	<b>26,17%</b>	<b>1,40%</b>	<b>0,57%</b>	<b>21,20%</b>	<b>0,70%</b>	<b>0,29%</b>	<b>66,33%</b>	<b>1,60%</b>	<b>0,69%</b>
ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)	AASHTO T210	Finos	72,00%	70,00%	71,00%	71,00%	72,00%	73,00%	51,00%	50,00%	52,00%	23,00%	24,30%	22,70%
			<b>71,00%</b>	<b>2,00%</b>	<b>0,82%</b>	<b>72,00%</b>	<b>2,00%</b>	<b>0,82%</b>	<b>51,00%</b>	<b>2,00%</b>	<b>0,82%</b>	<b>23,33%</b>	<b>1,60%</b>	<b>0,69%</b>
		Gruesos	80,00%	82,00%	81,00%	81,00%	80,00%	82,00%	77,00%	78,00%	77,00%	33,00%	30,30%	32,20%
			<b>81,00%</b>	<b>2,00%</b>	<b>0,82%</b>	<b>81,00%</b>	<b>2,00%</b>	<b>0,82%</b>	<b>77,33%</b>	<b>1,00%</b>	<b>0,47%</b>	<b>31,83%</b>	<b>2,70%</b>	<b>1,13%</b>
PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)	AASHTO T 104	Finos	4,80%	5,30%	4,60%	5,80%	5,10%	6,00%	15,90%	16,20%	16,00%	46,90%	45,50%	46,50%
			<b>4,90%</b>	<b>0,70%</b>	<b>0,29%</b>	<b>5,63%</b>	<b>0,90%</b>	<b>0,39%</b>	<b>16,03%</b>	<b>0,30%</b>	<b>0,12%</b>	<b>46,30%</b>	<b>1,40%</b>	<b>0,59%</b>
		Gruesos	10,80%	11,60%	10,30%	10,90%	11,10%	10,80%	11,90%	11,50%	12,10%	65,80%	64,30%	66,10%
			<b>10,90%</b>	<b>1,30%</b>	<b>0,54%</b>	<b>10,93%</b>	<b>0,30%</b>	<b>0,12%</b>	<b>11,83%</b>	<b>0,60%</b>	<b>0,25%</b>	<b>65,40%</b>	<b>1,80%</b>	<b>0,79%</b>

Fuente: Camacho, P.

## 7.2. Resultados obtenidos para muestreo de las combinaciones de material granular virgen (MGV) y reciclado de pavimentos asfálticos (RAP).

**Cuadro 7.4.** Resultados de los ensayos para los parámetros de aceptación de los materiales de la combinación de RAP-01 Dota y MGV-02 Caracol.

Ensayo	Norma referencia	Parámetros		25% MGV Caracol y 75% RAP Dota (1)	25% MGV Caracol y 75% RAP Dota (2)	25% MGV Caracol y 75% RAP Dota (3)	50% MGV Caracol y 50% RAP Dota (1)	50% MGV Caracol y 50% RAP Dota (2)	50% MGV Caracol y 50% RAP Dota (3)	75% MGV Caracol y 25% RAP Dota (1)	75% MGV Caracol y 25% RAP Dota (2)	75% MGV Caracol y 25% RAP Dota (3)
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE PLÁSTICO	AASHTO T 89/90 ASTM 4318	Límite Líquido, LL		25,60	23,50	24,30	25,60	23,40	24,70	27,80	26,70	28,40
				<b>24,47</b>	<b>2,10</b>	<b>0,87</b>	<b>24,57</b>	<b>2,20</b>	<b>0,90</b>	<b>27,63</b>	<b>1,70</b>	<b>0,70</b>
		Índice Plástico, IP		6,00	5,60	5,80	6,00	5,60	5,10	8,40	8,10	8,70
				<b>5,80</b>	<b>0,40</b>	<b>0,16</b>	<b>5,57</b>	<b>0,90</b>	<b>0,37</b>	<b>8,40</b>	<b>0,60</b>	<b>0,24</b>
ANÁLISIS GRANULOMETRICO	AASHTO T 27/11 ASTM 117/136	% Pasado	76,2 mm (3")	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
				<b>100,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>100,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>100,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
			50,8 mm (2")	100,00	100,00	100,00	98,00	99,00	98,00	100,00	100,00	100,00
				<b>100,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>98,33</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>100,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
			38,1 mm (1 1/2")	99,00	98,00	100,00	98,00	98,00	98,00	95,00	96,00	95,00
				<b>99,00</b>	<b>2,00</b>	<b>0,82</b>	<b>98,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>95,33</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>
			25,4 mm (1")	97,00	96,00	97,00	93,00	92,00	92,00	93,00	92,00	93,00
				<b>96,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>92,33</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>92,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>
			19,0 mm (3/4")	97,00	96,00	96,00	92,00	91,00	91,00	90,00	91,00	90,00
				<b>96,33</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>91,33</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>90,33</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>
			12,5 mm (1/2")	87,00	86,00	87,00	81,00	80,00	81,00	84,00	84,00	83,00
				<b>86,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>80,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>83,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>
9,5 mm (3/8")	77,00	76,00	77,00	73,00	72,00	73,00	81,00	81,00	80,00			
	<b>76,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>72,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>80,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>			
4,75 mm (No. 4)	52,00	54,00	50,00	43,00	45,00	46,00	61,00	62,00	60,00			
	<b>52,00</b>	<b>4,00</b>	<b>1,63</b>	<b>44,67</b>	<b>3,00</b>	<b>1,25</b>	<b>61,00</b>	<b>2,00</b>	<b>0,82</b>			
0,425 mm (No. 40)	13,00	14,00	13,00	19,00	18,00	19,00	29,00	28,00	29,00			
	<b>13,33</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>18,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>28,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>			
0,075 mm (No. 200)	7,70	8,30	8,00	10,60	11,70	11,10	18,40	17,60	18,80			
	<b>8,00</b>	<b>0,60</b>	<b>0,24</b>	<b>11,13</b>	<b>1,10</b>	<b>0,45</b>	<b>18,27</b>	<b>1,20</b>	<b>0,50</b>			
DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA	AASHTO T180	Humedad óptima (%)		0,09	0,09	0,09	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10
				<b>0,09</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,11</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,11</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
		Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		1960,00	1954,00	1958,00	1924,00	1930,00	1927,00	1900,00	1895,00	1893,00
		<b>1957,33</b>	<b>6,00</b>	<b>2,49</b>	<b>1927,00</b>	<b>6,00</b>	<b>2,45</b>	<b>1896,00</b>	<b>7,00</b>	<b>2,94</b>		
ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)	AASHTO T-193 ASTM D1883	2,54mm (al 95%)		61,00	60,00	59,00	47,00	45,00	46,00	29,00	32,00	31,00
				<b>60,00</b>	<b>2,00</b>	<b>0,82</b>	<b>46,00</b>	<b>2,00</b>	<b>0,82</b>	<b>30,67</b>	<b>3,00</b>	<b>1,25</b>
		5,08mm (al 95%)		79,00	78,00	77,00	49,00	50,00	49,00	37,00	38,00	39,00
		<b>78,00</b>	<b>2,00</b>	<b>0,82</b>	<b>49,33</b>	<b>1,00</b>	<b>0,47</b>	<b>38,00</b>	<b>2,00</b>	<b>0,82</b>		

Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 7.5.** Resultados de los ensayos para los parámetros de calidad de los materiales de la combinación de RAP-01 Dota y MG-02 Caracol.

Ensayo	Norma referencia	Parametros	25% MG Caracol y 75% RAP Dota (1)	25% MG Caracol y 75% RAP Dota (2)	25% MG Caracol y 75% RAP Dota (3)	50% MG Caracol y 50% RAP Dota (1)	50% MG Caracol y 50% RAP Dota (2)	50% MG Caracol y 50% RAP Dota (3)	75% MG Caracol y 25% RAP Dota (1)	75% MG Caracol y 25% RAP Dota (2)	75% MG Caracol y 25% RAP Dota (3)
CARAS FRACTURADAS	ASTM D5821	Caras Fracturadas	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
			<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
ABRASIÓN DE LOS ANGELES	AASHTO T-96 ASTM C 131	Abrasión	0,29	0,29	0,31	0,39	0,39	0,38	0,51	0,50	0,53
			<b>0,30</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,39</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,51</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>
ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)	AASHTO T210	Finos	0,60	0,59	0,62	0,40	0,43	0,45	0,45	0,47	0,43
			<b>0,60</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,43</b>	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>	<b>0,45</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
		Gruesos	0,61	0,63	0,62	0,52	0,50	0,50	0,43	0,42	0,40
			<b>0,62</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,51</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,42</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>
PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)	AASHTO T 104	Finos	0,30	0,29	0,30	0,33	0,32	0,31	0,35	0,37	0,35
			<b>0,29</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,32</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,36</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
		Gruesos	0,23	0,23	0,22	0,23	0,21	0,20	0,46	0,46	0,47
			<b>0,23</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,22</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,46</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>

Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 7.6.** Resultados de los ensayos para los parámetros de aceptación de los materiales de la combinación de RAP-02 Cartago y MG-01 Ujarrás.

Ensayo	Norma referencia	Parametros		25% MG	25% MG	25% MG	50% MG	50% MG	50% MG	75% MG	75% MG	75% MG			
				Ujarras y 75% RAP Cartago (1)	Ujarras y 75% RAP Cartago (2)	Ujarras y 75% RAP Cartago (3)	Ujarras y 50% RAP Cartago (1)	Ujarras y 50% RAP Cartago (2)	Ujarras y 50% RAP Cartago (3)	Ujarras y 25% RAP Cartago (1)	Ujarras y 25% RAP Cartago (2)	Ujarras y 25% RAP Cartago (3)			
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE PLÁSTICO	AASHTO T 89/90 ASTM 4318	Límite Líquido, LL		NP											
				NP	NP	-	NP	-	NP	-					
		Índice Plástico, IP		NP											
				NP	NP	-	NP	-	NP	-					
ANÁLISIS GRANULOMETRICO	AASHTO T 27/11 ASTM 117/136	% Pasando	76,2 mm (3")	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
			50,8 mm (2")	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
			38,1 mm (1 1/2")	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
			25,4 mm (1")	95,00	94,00	96,00	96,00	97,00	95,00	89,00	89,00	87,00			
			19,0 mm (3/4 ")	95,00	2,00	0,82	96,00	2,00	0,82	88,33	2,00	0,94			
			12,5 mm (1/2")	90,00	89,00	91,00	88,00	88,00	89,00	76,00	77,00	75,00			
			9,5 mm (3/8")	90,00	2,00	0,82	88,33	1,00	0,47	76,00	2,00	0,82			
			4,75 mm (No. 4)	79,00	80,00	79,00	76,00	75,00	77,00	62,00	60,00	64,00			
			0,425 mm (No. 40)	79,33	1,00	0,47	76,00	2,00	0,82	62,00	4,00	1,63			
			0,075 mm (No. 200)	68,00	66,00	68,00	67,00	66,00	67,00	54,00	50,00	52,00			
			DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD OPTIMA	AASHTO T180	Humedad óptima (%)		0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07
			Densidad (kg/m3)		0,07	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00		
			ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)	AASHTO T-193 ASTM D1883	2,54mm (al 95%)		2026,00	2022,00	2028,00	2080,00	2077,00	2081,00	2111,00	2108,00	2113,00
2025,33	6,00	2,49					2079,33	4,00	1,70	2110,67	5,00	2,05			
5,08mm (al 95%)		34,00			36,00	32,00	34,00	36,00	35,00	34,00	32,00	34,00			
		34,00			4,00	1,63	35,00	2,00	0,82	33,33	2,00	0,94			

Fuente: Camacho, P.

**Cuadro 7.7.** Resultados de los ensayos para los parámetros de calidad de los materiales de la combinación de RAP-02 Cartago y MGCV-01 Ujarrás.

Ensayo	Norma referencia	Parametros	25% MGCV Ujarras y 75% RAP Cartago (1)	25% MGCV Ujarras y 75% RAP Cartago (2)	25% MGCV Ujarras y 75% RAP Cartago (3)	50% MGCV Ujarras y 50% RAP Cartago (1)	50% MGCV Ujarras y 50% RAP Cartago (2)	50% MGCV Ujarras y 50% RAP Cartago (3)	75% MGCV Ujarras y 25% RAP Cartago (1)	75% MGCV Ujarras y 25% RAP Cartago (2)	75% MGCV Ujarras y 25% RAP Cartago (3)
CARAS FRACTURADAS	ASTM D5821	Caras Fracturadas	0,96	0,96	0,96	0,89	0,89	0,90	0,87	88.4%	0,88
			<b>0,96</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,89</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,88</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>
ABRASIÓN DE LOS ANGELES	AASHTO T-96 ASTM C 131	Abrasión	0,25	0,25	0,25	0,23	0,23	0,22	0,22	0,23	0,23
			<b>0,25</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,23</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,23</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>
ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO Y FINO)	AASHTO T210	Finos	0,66	0,67	0,67	0,68	0,69	0,68	0,56	0,57	0,56
			<b>0,67</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,68</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,56</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>
		Gruesos	0,80	0,80	0,81	0,85	0,84	0,86	0,78	0,78	0,79
			<b>0,80</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,85</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,78</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>
PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO Y FINO)	AASHTO T 104	Finos	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,14	0,14
			<b>0,09</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,14</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>
		Gruesos	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12
			<b>0,12</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,11</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,12</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>

Fuente: Camacho, P.

**7.3. Análisis estadístico mediante prueba *t* de “Student” para las fuentes de RAP-01 Dota y RAP-02 Cartago**

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (76,2 mm (3"))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	100	100
2	100	100
3	100	100
Promedio	100	100
VAR	0	0

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (50,8 mm (2"))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	100	100
2	100	100
3	100	100
Promedio	100	100
VAR	0	0

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (38,1 mm (1 1/2"))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	100	100
2	100	100
3	98	100
Promedio	99,3333333	100
VAR	0,88888889	0

R Hipótesis nula, existe igualdad de medias

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	99,33333333	100
Varianza	1,333333333	0
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-1	
P(T<=t) una cola	0,211324865	
Valor crítico de t (una cola)	2,91998558	
P(T<=t) dos colas	0,422649731	
Valor crítico de t (dos colas)	4,30265273	

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (25,4 mm (1"))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	100	100
2	100	100
3	98	100
Promedio	99,3333333	100
VAR	0,88888889	0

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	99,33333333	100
Varianza	1,333333333	0
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-1	
P(T<=t) una cola	0,211324865	
Valor crítico de t (una cola)	2,91998558	
P(T<=t) dos colas	0,422649731	
Valor crítico de t (dos colas)	4,30265273	

R Hipótesis nula, existe igualdad de medias

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (19,0 mm (3/4 ''))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	100	100
2	100	100
3	98	100
Promedio	99,3333333	100

R Hipótesis nula, existe igualdad de medias

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (12,5 mm (1/2"))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	89	88
2	89	87
3	87	89
Promedio	88,3333333	88
VAR	0,88888889	0,666666667

R Hipótesis nula, existe igualdad de medias

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	88,33333333	88
Varianza	1,333333333	1
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	0,377964473	
P(T<=t) una cola	0,362329318	
Valor crítico de t (una cola)	2,131846786	
P(T<=t) dos colas	0,724658636	
Valor crítico de t (dos colas)	2,776445105	

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (9,5 mm (3/8"))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	79	75
2	80	74
3	78	75
Promedio	79	74,66666667
VAR	0,66666667	0,222222222

R Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	79	74,66666667
Varianza	1	0,333333333
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	6,5	
P(T<=t) una cola	0,003697262	
Valor crítico de t (una cola)	2,353363435	
P(T<=t) dos colas	0,007394525	
Valor crítico de t (dos colas)	3,182446305	

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (4,75 mm (No. 4))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	55	44
2	57	43
3	52	45
Promedio	54,6666667	44
VAR	4,2222222	0,666666667

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	54,66666667	44
Varianza	6,333333333	1
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	6,822422923	
P(T<=t) una cola	0,003221179	
Valor crítico de t (una cola)	2,353363435	
P(T<=t) dos colas	0,006442357	
Valor crítico de t (dos colas)	3,182446305	

R Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (0,425 mm (No. 40))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	19	4
2	19	4
3	18	5
Promedio	18,6666667	4,333333333
VAR	0,22222222	0,22222222

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	18,66666667	4,333333333
Varianza	0,333333333	0,333333333
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,333333333	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	30,40559159	
P(T<=t) una cola	3,48483E-06	
Valor crítico de t (una cola)	2,131846786	
P(T<=t) dos colas	6,96967E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2,776445105	

R Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (0,075 mm (No. 200))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	17,1	3,9
2	18,3	3,7
3	16,8	4,1
Promedio	17,4	3,9
VAR	0,42	0,026666667

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	17,4	3,9
Varianza	0,63	0,04
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	28,56649744	
P(T<=t) una cola	0,000611588	
Valor crítico de t (una cola)	2,91998558	
P(T<=t) dos colas	0,001223175	
Valor crítico de t (dos colas)	4,30265273	

R Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa

**Humedad óptima (%)**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	0,101	0,06
2	0,098	0,063
3	0,1	0,058
Promedio	0,09966667	0,060333333
VAR	1,5556E-06	4,2222E-06

R Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,099666667	0,060333333
Varianza	2,33333E-06	6,33333E-06
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	23,14170395	
P(T<=t) una cola	8,83778E-05	
Valor crítico de t (una cola)	2,353363435	
P(T<=t) dos colas	0,000176756	
Valor crítico de t (dos colas)	3,182446305	

**Densidad (kg/m3)**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	2115	1999
2	2109	1997
3	2113	2002
Promedio	2112,33333	1999,333333
VAR	6,22222222	4,22222222

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	2112,333333	1999,333333
Varianza	9,333333333	6,333333333
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	49,44823212	
P(T<=t) una cola	5,0042E-07	
Valor crítico de t (una cola)	2,131846786	
P(T<=t) dos colas	1,00084E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2,776445105	

R Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa

**CBR (2,54mm (al 95%))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	78	24
2	74	25
3	76	23
Promedio	76	24
VAR	2,66666667	0,66666667

R Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	76	24
Varianza	4	1
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	40,2790268	
P(T<=t) una cola	1,68361E-05	
Valor crítico de t (una cola)	2,353363435	
P(T<=t) dos colas	3,36722E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	3,182446305	

**CBR (5,08mm (al 95%))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	84	27
2	82	29
3	80	24
Promedio	82	26,66666667
VAR	2,66666667	4,222222222

R Hipótesis alternativa, hay diferencia estadísticamente representativa

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	Variable 1	Variable 2
Media	82	26,66666667
Varianza	4	6,333333333
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	29,81448014	
P(T<=t) una cola	3,76844E-06	
Valor crítico de t (una cola)	2,131846786	
P(T<=t) dos colas	7,53689E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2,776445105	

### CARAS FRACTURADAS

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	1	1
2	1	1
3	1	1
Promedio	1	1

### ABRASIÓN DE LOS ANGELES

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	0,27	0,269
2	0,263	0,255
3	0,278	0,261
Promedio	0,27033333	0,26166667
VAR	3,7556E-05	3,28889E-05

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	Variable 1	Variable 2
Media	0,270333333	0,261666667
Varianza	5,63333E-05	4,93333E-05
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	1,460305486	
P(T<=t) una cola	0,108995393	
Valor crítico de t (una cola)	2,131846786	
P(T<=t) dos colas	0,217990786	
Valor crítico de t (dos colas)	2,776445105	

R Hipótesis nula, existe igualdad de medias

**ÍNDICE DE DURABILIDAD (FINO)**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	0,72	0,71
2	0,7	0,72
3	0,71	0,73
Promedio	0,71	0,72
VAR	6,6667E-05	6,6667E-05

R Hipótesis nula, existe igualdad de medias

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,71	0,72
Varianza	0,0001	0,0001
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-1,224744871	
P(T<=t) una cola	0,143932067	
Valor crítico de t (una cola)	2,131846786	
P(T<=t) dos colas	0,287864135	
Valor crítico de t (dos colas)	2,776445105	

**ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO)**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	0,8	0,81
2	0,82	0,8
3	0,81	0,82
Promedio	0,81	0,81
VAR	6,6667E-05	6,6667E-05

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,81	0,81
Varianza	1E-04	1E-04
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	1E-04	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	0	
P(T<=t) una cola	0,5	
Valor crítico de t (una cola)	2,131846786	
P(T<=t) dos colas	1	
Valor crítico de t (dos colas)	2,776445105	

R Hipótesis nula, existe igualdad de medias

**PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (FINO)**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	0,048	0,058
2	0,053	0,051
3	0,046	0,06
Promedio	0,049	0,056333333
VAR	8,6667E-06	1,48889E-05

R Hipótesis nula, existe igualdad de medias

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,049	0,056333333
Varianza	0,000013	2,23333E-05
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-2,136828897	
P(T<=t) una cola	0,049720749	
Valor crítico de t (una cola)	2,131846786	
P(T<=t) dos colas	0,099441498	
Valor crítico de t (dos colas)	2,776445105	

**PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO)**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago
1	0,108	0,109
2	0,116	0,111
3	0,103	0,108
Promedio	0,109	0,109333333
VAR	2,8667E-05	1,55556E-06

R Hipótesis nula, existe igualdad de medias

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,109	0,109333333
Varianza	4,3E-05	2,33333E-06
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-0,085749293	
P(T<=t) una cola	0,469738623	
Valor crítico de t (una cola)	2,91998558	
P(T<=t) dos colas	0,939477247	
Valor crítico de t (dos colas)	4,30265273	

**7.4. Análisis estadístico de ANOVA de un factor y prueba de Tukey para las fuentes de MGV-y RAP.**

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (76,2 mm (3"))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	100	100	100	84.00
2	100	100	100	86.00
3	100	100	100	86.00
Promedio	100	100	100	85.33333333

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
RAP DOTA	3	300	100	0
RAP Cartago	3	300	100	0
MGV UJARRAS	3	300	100	0
MGV Caracol	3	256	85.33333333	1.333333333

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	484	3	161.3333333	484	<b>2.21358E-09</b>	4.066180551
Dentro de los grupos	2.666666667	8	0.333333333			
Total	486.6666667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	1.51
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	0.333333333
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		0	0	<b>14.66666667</b>
<b>RAP Cartago</b>			0	<b>14.66666667</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>14.66666667</b>
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA  
 Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago  
 Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV Caracol

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (50,8 mm (2"))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	100	100	100	82.00
2	100	100	100	85.00
3	100	100	100	86.00
Promedio	100	100	100	84.33333333

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	300	100	0
Columna 2	3	300	100	0
Columna 3	3	300	100	0
Columna 4	3	253	84.33333333	4.333333333

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	552.25	3	184.0833333	169.9230769	1.39384E-07	4.066180551
Dentro de los grupos	8.666666667	8	1.083333333			
Total	560.9166667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	2.722191213
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	1.083333333
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		0	0	<b>15.66666667</b>
<b>RAP Cartago</b>			0	<b>15.66666667</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>15.66666667</b>
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA  
 Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago  
 Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV Caracol

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (38,1 mm (1 1/2"))**

<b>Muestra</b>	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
1	100	100	100	69.00
2	100	100	100	71.00
3	98	100	100	70.00
Promedio	99.33333333	100	100	70

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Columna 1	3	298	99.33333333	1.333333333
Columna 2	3	300	100	0
Columna 3	3	300	100	0
Columna 4	3	210	70	1

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1996	3	665.3333333	1140.571429	7.27819E-11	4.066180551
Dentro de los grupos	4.666666667	8	0.583333333			
Total	2000.666667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	1.99754224
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	0.583333333
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		-0.666666667	-0.666666667	<b>29.33333333</b>
<b>RAP Cartago</b>			0	<b>30</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>30</b>
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA  
 Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago  
 Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV Caracol

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (25,4 mm (1"))**

<b>Muestra</b>	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
1	100	100	88	64.00
2	100	100	88	63.00
3	98	100	88	64.00
Promedio	99.33333333	100	88	63.66666667

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Columna 1	3	298	99.33333333	1.333333333
Columna 2	3	300	100	0
Columna 3	3	264	88	0
Columna 4	3	191	63.66666667	0.333333333

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2592.916667	3	864.3055556	2074.333333	6.68354E-12	4.066180551
Dentro de los grupos	3.333333333	8	0.416666667			
Total	2596.25	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	1.688231323
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	0.416666667
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		-0.666666667	<b>11.33333333</b>	<b>35.66666667</b>
<b>RAP Cartago</b>			<b>12</b>	<b>36.33333333</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>24.33333333</b>
<b>MGV Caracol</b>				

- Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA
- Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago
- Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV Caracol
- Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA
- Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (19,0 mm (3/4 ''))**

<b>Muestra</b>	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
1	100	100	73	61.00
2	100	100	73	60.00
3	98	100	74	61.00
Promedio	99.33333333	100	73.33333333	60.66666667

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Columna 1	3	298	99.33333333	1.333333333
Columna 2	3	300	100	0
Columna 3	3	220	73.33333333	0.333333333
Columna 4	3	182	60.66666667	0.333333333

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	3442.666667	3	1147.555556	2295.111111	4.46212E-12	4.066180551
Dentro de los grupos	4	8	0.5			
Total	3446.666667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	1.849364756
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	0.5
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		-0.666666667	26	38.66666667
<b>RAP Cartago</b>			26.66666667	39.33333333
<b>MGV UJARRAS</b>				12.66666667
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (12,5 mm (1/2"))**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	89	88	57	57.00
2	89	87	57	56.00
3	87	89	58	57.00
Promedio	88.33333333	88	57.33333333	56.66666667

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	265	88.33333333	1.333333333
Columna 2	3	264	88	1
Columna 3	3	172	57.33333333	0.333333333
Columna 4	3	170	56.66666667	0.333333333

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2914.916667	3	971.6388889	1295.518519	4.37796E-11	4.066180551
Dentro de los grupos	6	8	0.75			
Total	2920.916667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	2.265
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	0.75
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		0.333333333	31	31.66666667
<b>RAP Cartago</b>			30.66666667	31.33333333
<b>MGV UJARRAS</b>				0.66666667
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (9,5 mm (3/8"))**

<b>Muestra</b>	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
1	79	75	50	54.00
2	80	74	50	53.00
3	78	75	50	47.00
Promedio	79	74.66666667	50	51.33333333

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Columna 1	3	237	79	1
Columna 2	3	224	74.66666667	0.333333333
Columna 3	3	150	50	0
Columna 4	3	154	51.33333333	14.33333333

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2084.916667	3	694.9722222	177.4397163	1.17563E-07	4.066180551
Dentro de los grupos	31.33333333	8	3.916666667			
Total	2116.25	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	5.176019223
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	3.916666667
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		4.333333333	29	27.66666667
<b>RAP Cartago</b>			24.66666667	23.33333333
<b>MGV UJARRAS</b>				-1.333333333
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (4,75 mm (No. 4))**

<b>Muestra</b>	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
1	55	44	35	45.00
2	57	43	35	47.00
3	52	45	34	43.00
Promedio	54.66666667	44	34.66666667	45

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Columna 1	3	164	54.66666667	6.333333333
Columna 2	3	132	44	1
Columna 3	3	104	34.66666667	0.333333333
Columna 4	3	135	45	4

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	601.5833333	3	200.5277778	68.75238095	4.7112E-06	4.066180551
Dentro de los grupos	23.33333333	8	2.916666667			
Total	624.9166667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	4.466640236
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	2.916666667
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		10.66666667	<b>20</b>	<b>9.666666667</b>
<b>RAP Cartago</b>			<b>9.333333333</b>	<b>-1</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>-10.333333333</b>
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el RAP Cartago y el RAP DOTA

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (0,425 mm (No. 40))**

<b>Muestra</b>	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
1	19	4	12	24.00
2	19	4	12	23.00
3	18	5	12	24.00
Promedio	18.66666667	4.333333333	12	23.66666667

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Columna 1	3	56	18.66666667	0.333333333
Columna 2	3	13	4.333333333	0.333333333
Columna 3	3	36	12	0
Columna 4	3	71	23.66666667	0.333333333

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	632.6666667	3	210.8888889	843.5555556	2.42376E-10	4.066180551
Dentro de los grupos	2	8	0.25			
Total	634.6666667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 1.30769836  
 Multiplicador (Q alfa) 4.53  
 Cuadrado del error medio 0.25  
 n = 3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		14.33333333	6.66666667	-5
<b>RAP Cartago</b>			-7.66666667	-19.33333333
<b>MGV UJARRAS</b>				-11.66666667
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA  
 Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago  
 Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS  
 Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA  
 Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago  
 Hay diferencia entre el RAP Cartago y el RAP DOTA

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (0,075 mm (No. 200))**

<b>Muestra</b>	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
1	17.1	3.9	5.8	15.00
2	18.3	3.7	5.8	16.30
3	16.8	4.1	5.9	13.70
Promedio	17.4	3.9	5.833333333	15

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Columna 1	3	52.2	17.4	0.63
Columna 2	3	11.7	3.9	0.04
Columna 3	3	17.5	5.833333333	0.003333333
Columna 4	3	45	15	1.69

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	399.58	3	133.1933333	225.4330042	4.57548E-08	4.066180551
Dentro de los grupos	4.726666667	8	0.590833333			
Total	404.3066667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	2.01034257
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	0.590833333
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		13.5	<b>11.56666667</b>	<b>2.4</b>
<b>RAP Cartago</b>			<b>-1.933333333</b>	<b>-11.1</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>-9.166666667</b>
<b>MGV Caracol</b>				

- Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA
- Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago
- Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS
- Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA
- Hay diferencia entre el RAP Cartago y el RAP DOTA

### Humedad óptima (%)

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	0.101	0.06	0.089	0.13
2	0.098	0.063	0.087	0.12
3	0.1	0.058	0.091	0.13
Promedio	0.099666667	0.060333333	0.089	0.129333333

### ANOVA

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

### RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	0.299	0.099666667	2.33333E-06
Columna 2	3	0.181	0.060333333	6.33333E-06
Columna 3	3	0.267	0.089	4E-06
Columna 4	3	0.388	0.129333333	3.23333E-05

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.007312917	3	0.002437639	216.6790123	5.34979E-08	4.066180551
Dentro de los grupos	9E-05	8	0.00001125			
Total	0.007402917	11				

TUKEY

Diferencia honestamente significativa 0.008772307  
 Multiplicador (Q alfa) 4.53  
 Cuadrado del error medio 0.00001125  
 n = 3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		0.039333333	<b>0.010666667</b>	<b>-0.029666667</b>
<b>RAP Cartago</b>			<b>-0.028666667</b>	<b>-0.069</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>-0.040333333</b>
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA  
 Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago  
 Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS  
 Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA  
 Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago  
 Hay diferencia entre el RAP Cartago y el RAP DOTA

**Densidad (kg/m3)**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	2115	1999	2182	1873.00
2	2109	1997	2178	1880.00
3	2113	2002	2184	1878.00
Promedio	2112.333333	1999.333333	2181.333333	1877

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	6337	2112.333333	9.333333333
Columna 2	3	5998	1999.333333	6.333333333
Columna 3	3	6544	2181.333333	9.333333333
Columna 4	3	5631	1877	13

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	160215	3	53405	5621.578947	1.24347E-13	4.066180551
Dentro de los grupos	76	8	9.5			
Total	160291	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	8.06119408
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	9.5
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		113	-69	235.3333333
<b>RAP Cartago</b>			-182	122.3333333
<b>MGV UJARRAS</b>				304.3333333
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el RAP Cartago y el RAP DOTA

**CBR (2,54mm (al 95%))**

<b>Muestra</b>	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
1	78	24	95	8.60
2	74	25	92	9.30
3	76	23	97	9.00
Promedio	76	24	94.66666667	8.966666667

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Columna 1	3	228	76	4
Columna 2	3	72	24	1
Columna 3	3	284	94.66666667	6.333333333
Columna 4	3	26.9	8.966666667	0.123333333

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	15082.63583	3	5027.545278	1755.325672	1.3021E-11	4.066180551
Dentro de los grupos	22.91333333	8	2.864166667			
Total	15105.54917	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	4.426257929
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	2.864166667
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		52	-18.66666667	67.03333333
<b>RAP Cartago</b>			-70.66666667	15.03333333
<b>MGV UJARRAS</b>				85.7
<b>MGV Caracol</b>				

- Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA
- Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago
- Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS
- Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA
- Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago
- Hay diferencia entre el RAP Cartago y el RAP DOTA

**CBR (5,08mm (al 95%))**

<b>Muestra</b>	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
1	84	27	125	12.40
2	82	29	120	12.80
3	80	24	127	13.20
Promedio	82	26.66666667	124	12.8

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Columna 1	3	246	82	4
Columna 2	3	80	26.66666667	6.333333333
Columna 3	3	372	124	13
Columna 4	3	38.4	12.8	0.16

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	23734.44	3	7911.48	1347.017026	3.74718E-11	4.066180551
Dentro de los grupos	46.98666667	8	5.873333333			
Total	23781.42667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	6.338403742
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	5.873333333
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		55.33333333	-42	69.2
<b>RAP Cartago</b>			-97.33333333	13.86666667
<b>MGV UJARRAS</b>				111.2
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el RAP Cartago y el RAP DOTA

**CARAS FRACTURADAS**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	1	1	0.83	1.00
2	1	1	0.82	1.00
3	1	1	0.84	0.99
Promedio	1	1	0.83	0.996666667

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	3	1	0
Columna 2	3	3	1	0
Columna 3	3	2.49	0.83	0.0001
Columna 4	3	2.99	0.996666667	3.33333E-05

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.0642	3	0.0214	642	7.19308E-10	4.066180551
Dentro de los grupos	0.000266667	8	3.33333E-05			
Total	0.064466667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	0.0151
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	3.33333E-05
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		0	<b>0.17</b>	<b>0.003333333</b>
<b>RAP Cartago</b>			<b>0.17</b>	<b>0.003333333</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>-0.166666667</b>
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

## ABRASIÓN DE LOS ANGELES

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	0.27	0.269	0.208	0.67
2	0.263	0.255	0.213	0.66
3	0.278	0.261	0.215	0.66
Promedio	0.270333333	0.261666667	0.212	0.663333333

## ANOVA

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

## RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	0.811	0.270333333	5.63333E-05
Columna 2	3	0.785	0.261666667	4.93333E-05
Columna 3	3	0.636	0.212	0.000013
Columna 4	3	1.99	0.663333333	7.23333E-05

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.394073667	3	0.131357889	2750.950553	2.16368E-12	4.066180551
Dentro de los grupos	0.000382	8	4.775E-05			
Total	0.394455667	11				

TUKEY

Diferencia honestamente significativa	0.018072751
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	4.775E-05
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		0.008666667	<b>0.058333333</b>	<b>-0.393</b>
<b>RAP Cartago</b>			<b>0.049666667</b>	<b>-0.401666667</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>-0.451333333</b>
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

## ÍNDICE DE DURABILIDAD (FINO)

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	0.72	0.71	0.51	0.23
2	0.7	0.72	0.5	0.24
3	0.71	0.73	0.52	0.23
Promedio	0.71	0.72	0.51	0.233333333

## ANOVA

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

## RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	2.13	0.71	0.0001
Columna 2	3	2.16	0.72	0.0001
Columna 3	3	1.53	0.51	0.0001
Columna 4	3	0.7	0.233333333	7.23333E-05

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.4686	3	0.1562	1678.066249	1.55849E-11	4.066180551
Dentro de los grupos	0.000744667	8	9.30833E-05			
Total	0.469344667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	0.02523327
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	9.30833E-05
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		-0.01	<b>0.20</b>	<b>0.476666667</b>
<b>RAP Cartago</b>			<b>0.21</b>	<b>0.486666667</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>0.276666667</b>
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS

**ÍNDICE DE DURABILIDAD (GRUESO)**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	0.8	0.81	0.77	0.33
2	0.82	0.8	0.78	0.30
3	0.81	0.82	0.77	0.32
Promedio	0.81	0.81	0.773333333	0.318333333

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

**RESUMEN**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	2.43	0.81	1E-04
Columna 2	3	2.43	0.81	1E-04
Columna 3	3	2.32	0.773333333	3.33333E-05
Columna 4	3	0.955	0.318333333	0.000192333

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.519889583	3	0.173296528	1628.471678	1.75682E-11	4.066180551
Dentro de los grupos	0.000851333	8	0.000106417			
Total	0.520740917	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	0.026980028
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	0.000106417
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		0	<b>0.04</b>	<b>0.491666667</b>
<b>RAP Cartago</b>			<b>0.036666667</b>	<b>0.491666667</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>0.455</b>
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

**PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (FINO)**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	0.048	0.058	0.159	0.47
2	0.053	0.051	0.162	0.46
3	0.046	0.06	0.16	0.47
Promedio	0.049	0.056333333	0.160333333	0.463

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	0.147	0.049	0.000013
Columna 2	3	0.169	0.056333333	2.23333E-05
Columna 3	3	0.481	0.160333333	2.33333E-06
Columna 4	3	1.389	0.463	5.2E-05

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.338734333	3	0.112911444	5036.94176	1.92884E-13	4.066180551
Dentro de los grupos	0.000179333	8	2.24167E-05			
Total	0.338913667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa	0.012382921
Multiplicador (Q alfa)	4.53
Cuadrado del error medio	2.24167E-05
n =	3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		-0.007333333	<b>-0.11</b>	<b>-0.414</b>
<b>RAP Cartago</b>			<b>-0.104</b>	<b>-0.406666667</b>
<b>MGV UJARRAS</b>				<b>-0.302666667</b>
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV UJARRAS y el RAP Cartago

**PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO (GRUESO)**

Muestra	RAP DOTA	RAP Cartago	MGV UJARRAS	MGV Caracol
1	0.108	0.109	0.119	0.66
2	0.116	0.111	0.115	0.64
3	0.103	0.108	0.121	0.66
Promedio	0.109	0.109333333	0.118333333	0.654

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

Valor  $p < 0,05$

Se rechaza la hipótesis nula, hay diferencias significativas

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	0.327	0.109	4.3E-05
Columna 2	3	0.328	0.109333333	2.33333E-06
Columna 3	3	0.355	0.118333333	9.33333E-06
Columna 4	3	1.962	0.654	9.3E-05

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.660595333	3	0.220198444	5964.743416	9.81193E-14	4.066180551
Dentro de los grupos	0.000295333	8	3.69167E-05			
Total	0.660890667	11				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 0.015890912  
 Multiplicador (Q alfa) 4.53  
 Cuadrado del error medio 3.69167E-05  
 n = 3

	<b>RAP DOTA</b>	<b>RAP Cartago</b>	<b>MGV UJARRAS</b>	<b>MGV Caracol</b>
<b>RAP DOTA</b>		-0.000333333	-0.01	-0.545
<b>RAP Cartago</b>			-0.009	-0.544666667
<b>MGV UJARRAS</b>				-0.535666667
<b>MGV Caracol</b>				

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP DOTA

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el RAP Cartago

Hay diferencia entre el MGV Caracol y el MGV UJARRAS

**7.5. Análisis estadístico de ANOVA de un factor y prueba de Tukey para las combinaciones de MGV-y RAP.**

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO (76,2 mm (3"))**

	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6
	<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
	100	100	100	100	100	100
	100	100	100	100	100	100
	100	100	100	100	100	100
<b>Promedio</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	300	100	0
Columna 2	3	300	100	0
Columna 3	3	300	100	0
Columna 4	3	300	100	0
Columna 5	3	300	100	0
Columna 6	3	300	100	0

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0	5	0	65535	#¡DIV/0!	3,105875239
Dentro de los grupos	0	12	0			
Total	0	17				

TUKEY

Diferencia honestamente significativa	0
Multiplicador (Q alfa)	4,75
Cuadrado del error medio	0
n =	3

	<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>		0	0	0	0	0
<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>			0	0	0	0
<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>				0	0	0
<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					0	0
<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						0
<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO 50,8 mm (2")**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
100	98	100	100	100,00	100,00
100	99	100	100	100,00	100,00
100	98	100	100	100,00	100,00
<b>Promedio</b>	<b>100</b>	<b>98,33333333</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	300	100	0
Columna 2	3	295	98,33333333	0,33333333
Columna 3	3	300	100	0
Columna 4	3	300	100	0
Columna 5	3	300	100	0
Columna 6	3	300	100	0

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6,944444444	5	1,388888889	25	5,89073E-06	3,105875239
Dentro de los grupos	0,666666667	12	0,055555556			
Total	7,611111111	17				

TUKEY

Diferencia honestamente significativa	0,646393127
Multiplicador (Q alfa)	4,75
Cuadrado del error medio	0,055555556
n =	3

	25% MG Caracol/75% RAP Dota	50 MG Caracol/50% RAP Dota	75% MG Caracol/25% RAP Dota	25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago	50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago	75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago
25% MG Caracol/75% RAP Dota		1,666666667	0	0	0	0
50 MG Caracol/50% RAP Dota			-1,666666667	1,666666667 7	1,666666666 7	-1,666666667
75% MG Caracol/25% RAP Dota				0	0	0
25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago					0	0
50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago						0
75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago						

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO 38,1 mm (1 1/2")**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6
<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
99,00	98,00	95,00	100,00	100,00	100,00
98,00	98,00	96,00	100,00	100,00	100,00
100,00	98,00	95,00	100,00	100,00	100,00

**Promedio**

**99**

**98**

**95,33333333**

**100**

**100**

**100**

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Columna 1	3	290	96,66666667	0,33333333
Columna 2	3	277	92,33333333	0,33333333
Columna 3	3	278	92,66666667	0,33333333
Columna 4	3	285	95	3
Columna 5	3	288	96	1
Columna 6	3	265	88,33333333	1,33333333

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	141,8333333	5	28,36666667	39,2769230 8	4,95624E- 07	3,105875239
Dentro de los grupos	8,666666667	12	0,722222222			
Total	150,5	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 2,330603562  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 0,722222222  
 n = 3

	<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>		1	3,666666667	-1	-1	-1
<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>			2,666666667	-2	-2	-2
<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>				- 4,666666666 7	- 4,666666666 7	-4,666666667
<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					0	0
<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						0
<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO 25,4 mm (1")**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>	
97,00	93,00	93,00	95,00	96,00	89,00	
96,00	92,00	92,00	94,00	97,00	89,00	
97,00	92,00	93,00	96,00	95,00	87,00	
<b>Promedio</b>	<b>96,66666667</b>	<b>92,33333333</b>	<b>92,66666667</b>	<b>95</b>	<b>96</b>	<b>88,33333333</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	297	99	1
Columna 2	3	294	98	0
Columna 3	3	286	95,33333333	0,33333333
Columna 4	3	300	100	0
Columna 5	3	300	100	0
Columna 6	3	300	100	0

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
----------------------------------	--------------------------	---------------------------	----------------------------------	----------	---------------------	-----------------------------

Entre grupos	50,94444444	5	10,18888889	45,85	2,08033E-07	3,105875239
Dentro de los grupos	2,666666667	12	0,222222222			
<b>Total</b>	<b>53,61111111</b>	<b>17</b>				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 1,292786253  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 0,222222222  
 n = 3

	25% MGV Caracol/75% RAP Dota	50 MGV Caracol/50% RAP Dota	75% MGV Caracol/25% RAP Dota	25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago	50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago	75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago
25% MGV Caracol/75% RAP Dota		4,333333333	4	1,666666667	0,666666667	8,333333333
50 MGV Caracol/50% RAP Dota			-0,333333333	-	-	4
75% MGV Caracol/25% RAP Dota				-	-	4,333333333
25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago				2,333333333	3,333333333	4,333333333
50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago					-1	6,666666667
75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago						7,666666667

ANÁLISIS GRANULOMETRICO 19,0 mm (3/4 ")

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
97,00	92,00	90,00	90,00	88,00	76,00
96,00	91,00	91,00	89,00	88,00	77,00
96,00	91,00	90,00	91,00	89,00	75,00

<b>Promedio</b>	<b>96,33333333</b>	<b>91,33333333</b>	<b>90,33333333</b>	<b>90</b>	<b>88,33333333</b>	<b>76</b>
				<b>3</b>		

ANOVA

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	289	96,33333333	0,33333333
Columna 2	3	274	91,33333333	0,33333333
Columna 3	3	271	90,33333333	0,33333333
Columna 4	3	270	90	1
Columna 5	3	265	88,33333333	0,33333333
Columna 6	3	228	76	1

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	692,9444444	5	138,5888889	249,46	1,08441E-11	3,105875239
Dentro de los grupos	6,666666667	12	0,555555556			
Total	699,6111111	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 2,044074544  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 0,555555556  
 n = 3

	<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>		5	6	6,333333333 3	8	20,33333333
<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>			1	1,333333333 3	3	15,33333333
<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>				0,333333333 3	2	14,33333333
<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					1,666666666 7	14
<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						12,33333333
<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO 12,5 mm (1/2")**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>	
87,00	81,00	84,00	79,00	76,00	62,00	
86,00	80,00	84,00	80,00	75,00	60,00	
87,00	81,00	83,00	79,00	77,00	64,00	
<b>Promedio</b>	<b>86,66666667</b>	<b>80,66666667</b>	<b>79,33333333</b>	<b>3</b>	<b>76</b>	<b>62</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	260	86,66666667	0,33333333
Columna 2	3	242	80,66666667	0,33333333
Columna 3	3	251	83,66666667	0,33333333
Columna 4	3	238	79,33333333	0,33333333
Columna 5	3	228	76	1
Columna 6	3	186	62	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1128,277778	5	225,6555556	213,778947	2,70635E-11	3,105875239
Dentro de los grupos	12,66666667	12	1,055555556	4		
Total	1140,944444	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 2,817562317  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 1,055555556  
 n = 3

	<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>		6	3	7,333333333 3	10,66666666 7	24,66666667
<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>			-3	1,333333333 3	4,66666666 7	18,66666667
<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>				4,333333333 3	7,66666666 7	21,66666667
<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					3,333333333 3	17,33333333
<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						14
<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO 9,5 mm (3/8")**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>	
77,00	73,00	81,00	68,00	67,00	54,00	
76,00	72,00	81,00	66,00	66,00	50,00	
77,00	73,00	80,00	68,00	67,00	52,00	
<b>Promedio</b>	<b>76,66666667</b>	<b>72,66666667</b>	<b>80,66666667</b>	<b>67,33333333 3</b>	<b>66,66666666 7</b>	<b>52</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	230	76,66666667	0,33333333 3
Columna 2	3	218	72,66666667	0,33333333 3
Columna 3	3	242	80,66666667	0,33333333 3
Columna 4	3	202	67,33333333	1,33333333 3
Columna 5	3	200	66,66666667	0,33333333 3
Columna 6	3	156	52	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1514,666667	5	302,9333333	272,64	6,4007E-12	3,105875239
Dentro de los grupos	13,33333333	12	1,111111111			
Total	1528	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 2,890757942  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 1,111111111  
 n = 3

	25% MG Caracol/75% RAP Dota	50 MG Caracol/50% RAP Dota	75% MG Caracol/25% RAP Dota	25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago	50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago	75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago
25% MG Caracol/75% RAP Dota		4	-4	9,333333333 3	10	24,66666667
50 MG Caracol/50% RAP Dota			-8	5,333333333 3	6	20,66666667
75% MG Caracol/25% RAP Dota				13,33333333 3	14	28,66666667
25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago					0,666666666 7	15,33333333
50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago						14,66666667
75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago						

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO 4,75 mm (No. 4)**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
52,00	43,00	61,00	44,00	45,00	37,00
54,00	45,00	62,00	42,00	44,00	35,00
50,00	46,00	60,00	43,00	45,00	38,00
<b>Promedio</b>	<b>52</b>	<b>44,66666667</b>	<b>61</b>	<b>43</b>	<b>44,66666666</b>
				<b>7</b>	<b>36,66666667</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	156	52	4
Columna 2	3	134	44,66666667	2,333333333
Columna 3	3	183	61	1
Columna 4	3	129	43	1
Columna 5	3	134	44,66666667	0,333333333
Columna 6	3	110	36,66666667	2,333333333

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1064	5	212,8	116,072727 3	9,87126E- 10	3,105875239
Dentro de los grupos	22	12	1,833333333			
Total	1086	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 3,71324581  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 1,833333333  
 n = 3

	<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>		7,333333333	-9	9	7,333333333 3	15,33333333
<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>			-16,33333333	1,666666666 7	0	8
<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>				18	16,33333333 3	24,33333333
<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					- 1,666666666 7	6,333333333
<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						8
<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO 0,425 mm (No. 40)**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
13,00	19,00	29,00	7,00	8,00	10,00
14,00	18,00	28,00	7,00	9,00	9,00
13,00	19,00	29,00	7,00	7,00	11,00
<b>Promedio</b>	<b>13,33333333</b>	<b>18,66666667</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>10</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	40	13,33333333	0,33333333
Columna 2	3	56	18,66666667	0,33333333
Columna 3	3	86	28,66666667	0,33333333
Columna 4	3	21	7	0
Columna 5	3	24	8	1
Columna 6	3	30	10	1

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
----------------------------------	--------------------------	---------------------------	----------------------------------	----------	---------------------	-----------------------------

Entre grupos	1013,611111	5	202,722222	405,444444	6,04271E-	3,105875239
Dentro de los grupos	6	12	0,5	4	13	
<b>Total</b>	<b>1019,611111</b>	<b>17</b>				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 1,93917938  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 0,5  
 n = 3

	25% MGV Caracol/75% RAP Dota	50 MGV Caracol/50% RAP Dota	75% MGV Caracol/25% RAP Dota	25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago	50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago	75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago
25% MGV Caracol/75% RAP Dota		-5,333333333	-15,33333333	6,333333333 3	5,333333333 3	3,333333333
50 MGV Caracol/50% RAP Dota			-10	11,66666666 7	10,66666666 7	8,666666667
75% MGV Caracol/25% RAP Dota				21,66666666 7	20,66666666 7	18,66666667
25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago					-1	-3
50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago						-2
75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago						

**ANÁLISIS GRANULOMETRICO 0,075 mm (No. 200)**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6		
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>		
7,70	10,60	18,40	4,70	5,40	5,00		
8,30	11,70	17,60	4,50	5,10	5,20		
8,00	11,10	18,80	4,90	5,60	4,90		
<b>Promedio</b>	<b>8</b>	<b>11,13333333</b>	<b>18,26666667</b>	<b>4,7</b>	<b>5,36666666</b>	<b>7</b>	<b>5,03333333</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	24	8	0,09
Columna 2	3	33,4	11,13333333	0,30333333
Columna 3	3	54,8	18,26666667	0,37333333
Columna 4	3	14,1	4,7	0,04
Columna 5	3	16,1	5,36666667	0,06333333
Columna 6	3	15,1	5,03333333	0,02333333

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	415,4183333	5	83,08366667	558,024626	8,99485E-	3,105875239
Dentro de los grupos	1,786666667	12	0,148888889	9	14	
Total	417,205	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 1,058191154  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 0,148888889  
 n = 3

	<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>		-3,133333333	-10,26666667	3,3	2,633333333 3	2,966666667
<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>			-7,133333333	6,433333333 3	5,766666666 7	6,1
<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>				13,56666666 7	12,9	13,23333333
<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					- 0,666666666 7	-0,333333333
<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						0,333333333
<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

**Humedad óptima (%)**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>	
0,09	0,12	0,11	0,07	0,08	0,07	
0,09	0,11	0,11	0,07	0,08	0,07	
0,09	0,11	0,10	0,07	0,08	0,07	
<b>Promedio</b>	<b>0,08866667</b>	<b>0,114333333</b>	<b>0,105333333</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,071333333</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	0,266	0,08866667	9,33333E-06
Columna 2	3	0,343	0,114333333	2,33333E-06
Columna 3	3	0,316	0,105333333	2,33333E-06
Columna 4	3	0,21	0,07	4E-06
Columna 5	3	0,24	0,08	4E-06
Columna 6	3	0,214	0,071333333	2,33333E-06

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,004978944	5	0,000995789	245,536986	1,19129E-11	3,105875239
Dentro de los grupos	4,86667E-05	12	4,05556E-06	3		
Total	0,005027611	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 0,005522785  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 4,05556E-06  
 n = 3

	25% MGV Caracol/75% RAP Dota	50 MGV Caracol/50% RAP Dota	75% MGV Caracol/25% RAP Dota	25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago	50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago	75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago
25% MGV Caracol/75% RAP Dota		-0,025666667	-0,016666667	0,018666667	0,008666667	0,017333333
50 MGV Caracol/50% RAP Dota			0,009	0,044333333	0,034333333	0,043
75% MGV Caracol/25% RAP Dota				0,035333333	0,025333333	0,034
25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago					-0,01	-0,001333333
50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago						0,008666667
75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago						

**Densidad (kg/m3)**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>	
1960,00	1924,00	1900,00	2026,00	2080,00	2111,00	
1954,00	1930,00	1895,00	2022,00	2077,00	2108,00	
1958,00	1927,00	1893,00	2028,00	2081,00	2113,00	
<b>Promedio</b>	<b>1957,333333</b>	<b>1927</b>	<b>1896</b>	<b>2025,33333 3</b>	<b>2079,33333 3</b>	<b>2110,666667</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	5872	1957,333333	9,33333333
Columna 2	3	5781	1927	9
Columna 3	3	5688	1896	13
Columna 4	3	6076	2025,333333	9,33333333
Columna 5	3	6238	2079,333333	4,33333333
Columna 6	3	6332	2110,666667	6,33333333

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	111434,9444	5	22286,98889	2604,97272	8,90758E-	3,105875239
Dentro de los grupos	102,6666667	12	8,555555556	7	18	
Total	111537,6111	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 8,021527748  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 8,555555556  
 n = 3

	<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>		30,33333333	61,33333333	-68	-122	-153,3333333
<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>			31	98,33333333 3	152,3333333 3	-183,6666667
<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>				129,3333333 3	183,3333333 3	-214,6666667
<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					-54	-85,33333333
<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						-31,33333333
<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

CBR 2,54mm (al 95%)

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
61,00	47,00	29,00	34,00	34,00	34,00
60,00	45,00	32,00	36,00	36,00	32,00
59,00	46,00	31,00	32,00	35,00	34,00

Promedio

60

46

30,66666667

34

35

33,33333333

#### ANOVA

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

#### RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	180	60	1
Columna 2	3	138	46	1
Columna 3	3	92	30,66666667	3
Columna 4	3	102	34	4
Columna 5	3	105	35	1
Columna 6	3	100	33,33333333	3

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
---------------------------	-------------------	--------------------	---------------------------	---	--------------	----------------------

Entre grupos	1885,166667	5	377,0333333	212,08125	2,83713E-11	3,105875239
Dentro de los grupos	21,33333333	12	1,777777778			
<b>Total</b>	<b>1906,5</b>	<b>17</b>				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 3,656551705  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 1,777777778  
 n = 3

	25% MGV Caracol/75% RAP Dota	50 MGV Caracol/50% RAP Dota	75% MGV Caracol/25% RAP Dota	25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago	50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago	75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago
25% MGV Caracol/75% RAP Dota		14	29,33333333	26	25	26,66666667
50 MGV Caracol/50% RAP Dota			15,33333333	12	11	12,66666667
75% MGV Caracol/25% RAP Dota				- 3,33333333 3	- 4,33333333 3	-2,666666667
25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago					-1	0,666666667
50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago						1,666666667
75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago						

CBR 5,08mm (al 95%)

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
79,00	49,00	37,00	36,00	52,00	65,00
78,00	50,00	38,00	38,00	50,00	63,00
77,00	49,00	39,00	36,00	49,00	67,00
<b>Promedio</b>	<b>78</b>	<b>49,33333333</b>	<b>38</b>	<b>36,66666666</b>	<b>50,33333333</b>
			<b>7</b>	<b>3</b>	<b>65</b>

#### ANOVA

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

#### RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	234	78	1
Columna 2	3	148	49,33333333	0,33333333
Columna 3	3	114	38	1
Columna 4	3	110	36,66666667	1,33333333
Columna 5	3	151	50,33333333	2,33333333
Columna 6	3	195	65	4

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	3843,777778	5	768,7555556	461,2533333	2,80179E-13	3,105875239
Dentro de los grupos	20	12	1,666666667	3		
Total	3863,777778	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 3,540440964  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 1,666666667  
 n = 3

	<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>		28,66666667	40	41,33333333 3	27,66666666 7	13
<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>			11,33333333	12,66666666 7	-1	-15,66666667
<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>				1,33333333 3	- 12,33333333 3	-27
<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					- 13,66666666 7	-28,33333333
<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						-14,66666667
<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						



<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,047484944	5	0,009496989	730,537606 8	1,79995E- 14	3,105875239
Dentro de los grupos	0,000156	12	0,000013			
Total	0,047640944	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 0,009887913  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 0,000013  
 n = 3

	<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>		0	0	0,04166666 7	0,10633333 3	0,12233333
<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>			0	0,04166666 7	0,10633333 3	0,12233333
<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>				0,04166666 7	0,10633333 3	0,12233333
<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					0,06466666 7	0,08066666
<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						0,016
<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

## Abrasión

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>	
0,29	0,39	0,51	0,25	0,23	0,22	
0,29	0,39	0,50	0,25	0,23	0,23	
0,31	0,38	0,53	0,25	0,22	0,23	
<b>Promedio</b>	<b>0,295666667</b>	<b>0,387</b>	<b>0,514</b>	<b>0,251333333 3</b>	<b>0,227</b>	<b>0,227333333</b>

## ANOVA

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

## RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	0,887	0,295666667	9,23333E-05
Columna 2	3	1,161	0,387	0,000016
Columna 3	3	1,542	0,514	0,000279
Columna 4	3	0,754	0,251333333	4,33333E-06
Columna 5	3	0,681	0,227	2,8E-05
Columna 6	3	0,682	0,227333333	9,33333E-06

## ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,193848944	5	0,038769789	542,234809	1,06757E-13	3,105875239
Dentro de los grupos	0,000858	12	7,15E-05	6		
Total	0,194706944	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 0,023189213  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 7,15E-05  
 n = 3

	<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>		-0,091333333	-0,218333333	0,044333333 3	0,068666666 7	0,068333333
<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>			-0,127	0,135666666 7	0,16	0,159666667
<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>				0,262666666 7	0,287	0,286666667
<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					0,024333333 3	0,024
<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						-0,000333333
<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

**ÍNDICE DE DURABILIDAD (fino)**

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>	
0,60	0,40	0,45	0,66	0,68	0,56	
0,59	0,43	0,47	0,67	0,69	0,57	
0,62	0,45	0,43	0,67	0,68	0,56	
<b>Promedio</b>	<b>0,603333333</b>	<b>0,426666667</b>	<b>0,45</b>	<b>0,667333333 3</b>	<b>0,683333333 3</b>	<b>0,563333333</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	1,81	0,603333333	0,000233333 3
Columna 2	3	1,28	0,426666667	0,000633333 3
Columna 3	3	1,35	0,45	0,0004 1,63333E-
Columna 4	3	2,002	0,667333333	05 3,33333E-
Columna 5	3	2,05	0,683333333	05 3,33333E-
Columna 6	3	1,69	0,563333333	05

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,174916667	5	0,034983333	155,519881	1,77146E-	3,105875239
Dentro de los grupos	0,002699333	12	0,000224944	5	10	
Total	0,177616	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 0,041131128  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 0,000224944  
 n = 3

	<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>		0,176666667	0,153333333	-0,064	-0,08	0,040
<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>			-0,023333333	-	-	-
<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>				0,240666667 7	0,256666666 7	-0,136666667
<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>				0,217333333 3	0,233333333 3	-0,113333333
<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>					-0,016	0,104
<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						0,12

**ÍNDICE DE DURABILIDAD**  
(gruesos)

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>	
0,61	0,52	0,43	0,80	0,85	0,78	
0,63	0,50	0,42	0,80	0,84	0,78	
0,62	0,50	0,40	0,81	0,86	0,79	
<b>Promedio</b>	<b>0,62</b>	<b>0,506666667</b>	<b>0,416666667</b>	<b>0,802</b>	<b>0,85</b>	<b>0,783333333</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	1,86	0,62	0,0001
Columna 2	3	1,52	0,506666667	0,00013333
Columna 3	3	1,25	0,416666667	0,00023333
Columna 4	3	2,406	0,802	0,000021
Columna 5	3	2,55	0,85	0,0001
Columna 6	3	2,35	0,783333333	3,33333E-05

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,467217778	5	0,093443556	902,836285 6	5,07504E- 15	3,105875239
Dentro de los grupos	0,001242	12	0,0001035			
Total	0,468459778	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 0,027899933  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 0,0001035  
 n = 3

	<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>		0,113333333	0,203333333	-0,182	-0,23	-0,163
<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>			0,09	- 0,29533333 3	- 0,34333333 3	-0,276666667
<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>				- 0,38533333 3	- 0,43333333 3	-0,366666667
<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					-0,048	0,018666667
<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						0,066666667
<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						



<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,215567778	5	0,043113556	663,285470	3,20525E-14	3,105875239
Dentro de los grupos	0,00078	12	6,5E-05			
Total	0,216347778	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 0,022110047  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 6,5E-05  
 n = 3

	<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>		-0,027	-0,062333333	0,207333333 3	0,188666666 7	0,156
<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>			-0,035333333	0,234333333 3	0,215666666 7	0,183
<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>				0,269666666 7	0,251	0,218333333
<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					- 0,018666666 7	-0,051333333
<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						-0,032666667
<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

**PÉRDIDA DE SANIDAD EN SULFATO DE SODIO**  
(grueso)

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6		
<b>25% MG Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MG Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MG Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MG Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MG Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MG Ujarrás /25% RAP Cartago</b>		
0,23	0,23	0,46	0,11	0,11	0,12		
0,23	0,21	0,46	0,12	0,12	0,11		
0,22	0,20	0,47	0,12	0,11	0,12		
<b>Promedio</b>	<b>0,225</b>	<b>0,215666667</b>	<b>0,464333333</b>	<b>0,118333333</b>	<b>3</b>	<b>0,113</b>	<b>0,116333333</b>

**ANOVA**

Ho: Todas las medias son iguales

Hi: Las medias poblaciones no son iguales

**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	0,675	0,225	6,7E-05 0,00021233
Columna 2	3	0,647	0,215666667	3 6,03333E- 05
Columna 3	3	1,393	0,464333333	3,63333E- 05
Columna 4	3	0,355	0,118333333	0,000031 2,03333E- 05
Columna 5	3	0,339	0,113	
Columna 6	3	0,349	0,116333333	

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,274556444	5	0,054911289	770,985335	1,30431E-	3,105875239
Dentro de los grupos	0,000854667	12	7,12222E-05	4	14	
Total	0,275411111	17				

**TUKEY**

Diferencia honestamente significativa 0,023144124  
 Multiplicador (Q alfa) 4,75  
 Cuadrado del error medio 7,12222E-05  
 n = 3

	<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>	<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>	<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>	<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>	<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>	<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>
<b>25% MGV Caracol/75% RAP Dota</b>		0,009333333	-0,239333333	0,106666667	0,112	0,109
<b>50 MGV Caracol/50% RAP Dota</b>			-0,248666667	0,097333333	0,102666667	0,099333333
<b>75% MGV Caracol/25% RAP Dota</b>				0,346	0,351333333	0,348
<b>25% MGV Ujarrás /75% RAP Cartago</b>					0,005333333	0,002
<b>50 MGV Ujarrás /50% RAP Cartago</b>						-0,003333333
<b>75% MGV Ujarrás /25% RAP Cartago</b>						

## **8. ANEXOS.**

- Informe de laboratorio ITP-R-40-U
- Informe de laboratorio ITP-974-15-E
- Informe de laboratorio ITP-156-16-E