

# Estimación del uso de agua en el lavado de agregados pétreos. Caso de estudio: diseño de mezcla asfáltica\*

Water use estimation in the washing process of unbound granular aggregates. Case of study: hot mix asphalt design\*

Estimativa de uso de água no processo de lavagem de agregados granulares não ligados. Caso de estudo: projeto de mistura\* asfáltica quente

Hugo Alexander Rondón Quintana\*\*

María Valentina Rondón Castillo\*\*\*

Hugo Alfonso Rondón Soto\*\*\*\*

Universidad Distrital Francisco José de Caldas\*\*

Colegio Anglo Americano\*\*\*

Universidad Católica de Colombia\*\*\*\*

Fecha de Recibido: Julio 24 del 2018

Fecha de Aceptación: Noviembre 03 de 2018

Fecha de Publicación: Enero 01 de 2019

DOI: <http://dx.doi.org/10.22335/rlct.v11i1.673>

\*El artículo resultado de la investigación "Estimación del uso del agua en ensayos de laboratorio de Programas de Ingeniería Civil". Universidad Distrital Francisco José de Caldas y Universidad Católica de Colombia. 2018.

\*\*Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Civil y Doctor en Ingeniería. Filiación: Profesor Titular y Emérito de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: harondonq@udistrital.edu.co.

\*\*\*Filiación: Colegio Anglo Americano, Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: mvalerc22@gmail.com.

\*\*\*\*Técnico de Laboratorio. Filiación: Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Colombia. Correo electrónico: harondons@ucatolica.edu.co.

## Resumen

Durante el lavado de agregados pétreos para la ejecución de ensayos en el laboratorio se consumen grandes cantidades de agua. En el presente estudio se estimó, el volumen de agua que se utiliza cuando se realiza el diseño de una mezcla asfáltica. Adicionalmente se evaluó, el efecto de lavar el agregado en diversas cantidades máxicas y con dos niveles de velocidad de salida de agua del grifo. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para verificar si los resultados obtenidos son significativos o estáticamente iguales. Como

conclusión general se reporta, que el consumo de agua disminuye significativamente cuando se lavan mayores cantidades de material al mismo tiempo y se emplea para rociar o humedecer las partículas, menores caudales.

**Palabras clave:** agua, consumo de agua en el laboratorio, lavado de agregados pétreos, medio ambiente.

### Abstract

Large quantities of water are consumed during the washing of granular aggregates in laboratory tests. In this study, the volume of water used when is designed a hot mix asphalt - HMA was estimated. Besides, the effect of washing the aggregate in different quantities of mass and with two levels of water speed flow was evaluated. An analysis of variance (ANOVA) was performed to verify if the results obtained are significant or statically equal. As a general conclusion, it is reported that water consumption decreases significantly when larger amounts of material are washed at the same time and used to wash the particles, lower flow rates.

**Keywords:** water, water consumption in the laboratory, washing of unbound granular aggregates, environment.

### Resumo

Durante a lavagem de agregados para a execução de testes no laboratório, grandes quantidades de água são consumidas. No presente estudo, o volume de água utilizado no projeto de uma mistura asfáltica quente foi estimado. Adicionalmente, o efeito da lavagem do agregado em várias quantidades de massa e com dois níveis de velocidade de saída da água da torneira foi avaliado. Uma análise de variância (ANOVA) foi realizada para verificar se os resultados obtidos são significativos ou estaticamente iguais. Como conclusão geral, é relatado que o consumo de água diminui significativamente quando quantidades maiores de material são lavadas ao mesmo tempo e são usadas para umedecer as partículas, taxas de fluxo menores.

**Palavras-chave:** água, consumo de água no laboratório, lavagem de agregados, meio ambiente.

### Introducción

#### *Planteamiento del problema*

El agua es un elemento importante y vital para la existencia de los seres vivos (Maarouf y Girrieow, 2017). Por ejemplo, es de amplio conocimiento que los seres humanos están compuestos principalmente de agua, y dentro de él esta sustancia cumple funciones vitales tales como ayudar en la regulación de la temperatura, la producción de saliva, la eliminación de desechos y la circulación de oxígeno en la sangre. Asimismo, este líquido vital es un elemento que ayuda a controlar el clima en el mundo y sin él no existirían la agricultura y los diversos ecosistemas. Por tal razón, conservar este elemento limitado se vuelve prioritario e indispensable para el medio ambiente. Adicionalmente, el agua es la base de recursos vitales interconectados como son el agua-comida-energía (Bogardi et al. 2012; Montoya et al. 2016; Endo et al. 2017) y es uno de los elementos más críticos, no solo para el sistema natural sino también para el desarrollo socioeconómico, especialmente en las regiones de agua limitada (Feng et al. 2018).

Algunos desafíos que se reportan en temas de sostenibilidad del agua en el mundo son: i) el cambio climático mundial en curso, el aumento de la población, la urbanización y las aspiraciones de mejores niveles de vida (Vörösmarty et al. 2000); ii) la escasez de agua en varias regiones, el empobrecimiento a gran escala de la biodiversidad acuática, la degradación del ecosistema y la reducción de su calidad (Bogardi et al. 2012); iii) el incremento en la demanda de agua (Bekchanov et al. 2017), por ejemplo se estima que las demandas de agua aumentarán en un 40% para el año 2030 (US NIC, 2012; Endo et al. 2017); iv) en algunas regiones el uso del agua subterránea es de gran importancia para la seguridad alimentaria y la generación de energía (Karimi et al. 2012). En síntesis, de acuerdo con Bekchanov et al. (2017), la creciente demanda de agua junto con una menor disponibilidad de dicho elemento en muchas

regiones del mundo está llevando a una creciente escasez que exige la implementación de una gama de soluciones políticas, tecnológicas, institucionales y económicas a nivel mundial.

Por otro lado, el lavado de agregados pétreos consiste en separar y eliminar las partículas más finas (aquellas que pasan el tamiz No. 200 en un ensayo de granulometría por tamizado o partículas con tamaño inferior a 0,075 mm tales como arcillas, agregados muy finos, y materiales solubles en el agua) de las gruesas. Esta práctica es común durante la ejecución de ensayos de laboratorio realizados sobre muestras que emplean agregados pétreos como uno de sus materiales de conformación, ya que las especificaciones así lo exigen. Esta exigencia dentro de los ensayos obliga al uso y consumo de grandes cantidades de agua. Actualmente no existen estudios que hayan calculado o medido con exactitud, las cantidades de agua que se emplean en el laboratorio para tal fin (Roncancio, 2010). Estimar dichas cantidades, así como identificar y evaluar la influencia que tienen los múltiples factores que generan el menor o mayor uso de agua durante el proceso de lavado de agregados en el laboratorio, ayudarán a futuro a planificar las distintas actividades que promuevan la conservación y uso más eficiente del agua en este proceso experimental.

#### *Objetivos y alcance*

El presente estudio tuvo como objetivo principal estimar en el laboratorio, el volumen de agua que se emplea durante el proceso de lavado de un agregado pétreo de origen natural. Como este procedimiento es utilizado en múltiples escenarios (ensayos como la determinación de la gravedad específica – INV. E-222, 223; resistencia a la abrasión en máquina de Los Ángeles – INV E-218,219; Micro-Deval – INV. E-238; 10% de finos – INV. E-224, entre otros), se tomó como base de estudio, la exigencia que tienen las especificaciones de ensayo de materiales del Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2013a) cuando se realiza un diseño de mezclas de concreto asfáltico (INV. E-748). Como objetivos secundarios se ejecutó una fase experimental

tendiente a evaluar el efecto de lavar el agregado en diversas cantidades máscas (1 kg, 2 kg y 3 kg) y con dos niveles de salida de caudal (velocidad de salida de agua del grifo en cm<sup>3</sup>/s para humedecer el material). Lo anterior, con el fin de analizar si estas variables ayudan a disminuir la cantidad de agua que se utiliza cuando se lavan agregados pétreos en el laboratorio. Con el objeto de evaluar si dichas mediciones y las variables analizadas incidían de manera significativa desde el punto de vista estadístico, se ejecutó un análisis de varianza – ANOVA con prueba F-test y nivel de confianza del 95%.

#### **Metodología**

##### *Características del agregado pétreo*

El agregado pétreo usado en el presente estudio es de amplia utilización en la construcción de proyectos viales en la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia) (Figura 1). Dicho material cumple con los requisitos mínimos de calidad que exigen las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013) para la fabricación de mezclas de concreto asfáltico (Tabla 1).



Figura 1. Agregado pétreo natural. Fuente: Autores.

Tabla 1. Propiedades del agregado pétreo.

Ensayo	Método	Requisito	Resultado
Equivalente de arena	AASHTO T 176	50% mínimo	68%
Caras fracturadas a una cara	ASTM D 5821	75% mínimo	83%
Límites líquido y plástico	ASTM D 4318	0%	0%
Índice de alargamiento	NLT 354-91	10% máximo	8,5%
Índice de aplanamiento	NLT 354-91	10% máximo	8,5%
Ataque en sulfato de magnesio	ASTM C 88-99a	18% máximo	11,0%
Micro-Deval	AASHTO T327-05	25% máximo	20,6%
10% de finos (resistencia en seco)	DNER-ME 096-98	90 kN mínimo	122 kN
10% de finos (relación húmedo/seco)		75% mínimo	86%
Resistencia en Máquina de los Ángeles	AASHTO T 96-02	35% máximo	23,4%

Fuente: Autores.

Como granulometría de referencia se utilizó la franja central de una mezcla de concreto asfáltico tipo MDC-25 (MDC significa mezcla densa en caliente de acuerdo con INVIAS, 2013). Esta granulometría fue escogida debido a que es una de las más utilizadas en la conformación de bases asfálticas en Colombia. En la Tabla 2 se presenta la distribución de masa por tamaño de partícula que se necesita para el diseño de una mezcla asfáltica MDC-25 empleando contenidos típicos de asfalto de 4,5%, 5%, 5,5% y 6%. Para el diseño de este tipo de mezcla se requiere la fabricación de muestras denominadas briquetas Marshall de 1200 g, las cuales tienen dimensiones de 2,5" de alto por 4" de diámetro. De acuerdo con INVIAS (2013a, INV. E-748), por cada porcentaje de asfalto se deben

fabricar al menos 3 briquetas Marshall. Con base en esta información, en la antepenúltima columna de la Tabla 2 se presenta la cantidad de material que se necesita por tamaño de partícula para realizar el diseño de una mezcla MDC-25 empleando tres briquetas por porcentaje de asfalto. En la penúltima columna de dicha tabla se presenta la totalidad de material a necesitar teniendo en cuenta un desperdicio aproximado de 10% (Total\*1,1), y en la última columna, el valor redondeado a la cifra superior (Total R), ya que en la práctica es común hacer esto para estimar la cantidad de material a lavar por tamaño de partícula.

Tabla 2. Cálculo de material ha utiliza en el diseño de mezcla MDC-25.

Tamiz	Tamiz [mm]	% Pasa	% Retenido	Porcentaje de asfalto en masa				Total (g)	Total* 1,1 (g)	Total R (kg)
				4,5%	5,0%	5,5%	6,0%			
				Agregado pétreo (g)						
1"	25,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
3/4"	19,0	87,5	12,5	143,3	142,5	141,8	141,0	1705,5	1876,1	2
1/2"	12,5	76,0	11,5	131,8	131,1	130,4	129,7	1569,1	1726,0	2
3/8"	9,5	68,5	7,5	86,0	85,5	85,1	84,6	1023,3	1125,6	2
4	4,75	51,0	17,5	200,6	199,5	198,5	197,4	2387,7	2626,5	3
10	2,00	37,0	14,0	160,4	159,6	158,8	157,9	1910,2	2101,2	3
40	0,43	19,5	17,5	200,6	199,5	198,5	197,4	2387,7	2626,5	3
80	0,18	12,5	7,0	80,2	79,8	79,4	79,0	955,1	1050,6	2
200	0,075	6,0	6,5	74,5	74,1	73,7	73,3	886,9	975,5	1
Fondo		0,0	6,0	68,8	68,4	68,0	67,7	818,6	900,5	No aplica

Fuente: Autores

*Estimación inicial del caudal.* para estimar de manera aproximada el caudal de agua que se utiliza durante el lavado del material fue necesario utilizar un cronometro para medir el tiempo de salida del agua en segundos (s) y un beaker calibrado de 800 ml para medir el volumen en cm<sup>3</sup> de agua que salía del grifo La llave de agua durante las mediciones

fue abierta de manera subjetiva de tal forma que el agua saliera del grifo a diferentes velocidades (denominadas como Bajo, Medio y Alto). Cinco medidas de tiempo y volumen de agua fueron realizadas y registradas por cada nivel de velocidad establecido para estimar el caudal en cm<sup>3</sup>/s (ver Tabla 3).

Tabla 3. Estimación de caudal.

Nivel de abertura	Tiempo [s]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Caudal [cm <sup>3</sup> /s]	Media [cm <sup>3</sup> /s]	Desviación
Bajo	5,33	198	37,15	39,83	3,90 cm <sup>3</sup> /s; 9,8%
	5,48	244	44,53		
	5,30	185	34,91		
	5,41	230	42,51		
	5,37	215	40,04		
Medio	5,35	370	69,16	67,98	4,85 cm <sup>3</sup> /s; 7,1%
	5,33	350	65,67		
	5,35	360	67,29		
	5,29	330	62,38		
	5,37	405	75,42		
Alto	5,25	500	95,24	105,80	7,27 cm <sup>3</sup> /s; 6,9%
	5,37	615	114,53		
	5,35	575	107,48		
	5,36	585	109,14		
	5,31	545	102,64		

Fuente: Autores.

*Lavado de material*

En la Tabla 2 se muestra, que para realizar un diseño de mezcla MDC-25, los valores redondeados de material a lavar dependen del tamaño de partícula y oscilan entre 1 y 3 kg. Por tal motivo y con el ánimo de cumplir el objeto de estudio denotado con anterioridad, cada tamaño de partículas fue lavada en masas de 1, 2 y 3 kg, al emplear como caudales, los niveles bajo y alto presentados en la Tabla 3 al seguir lineamientos especificados en INVIAS (2013a, INV. E-214). Previo al proceso de lavado, el material fue separado por tamaños y secado en un horno a 110°C durante 24 horas. Después de este proceso, cada masa de material seco de 1, 2 o 3 kg por tamaño de partícula a lavar fue colocada en una tara o recipiente especial (ver Figura 3a). Luego, se abrió la llave de tal forma que el agua saliera con los caudales bajo o alto. El agua

y las partículas se mezclaron manualmente (decantación del material, ver Figura 3b) hasta alcanzar un punto en el cual el agua se tornaba de una coloración marrosa, y se podía ir eliminando, botándola al sistema de drenaje (Figura 3c). El proceso de decantación se repite hasta que la coloración superficial del agua fue relativamente cristalina (indicador de ausencia de partículas finas). Durante todo el proceso de lavado, el tiempo de salida de agua (t en s) fue medido empleando un cronómetro para luego estimar el volumen de agua (V, en litros - l) que se utilizaba empleando la ecuación (1).

$$V = \frac{Q \times t}{1000} \tag{1}$$

Donde Q es el caudal medio de agua (39,83 y 105,8 cm<sup>3</sup>/s para los niveles de caudal Bajo y Alto, respectivamente, Tabla 3)



a)



b)



c)

Figura 3. Ejemplos de imágenes del proceso de lavado del material.

Fuente: Autores.

### Resultados

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas. Estos resultados son

presentados de manera resumida (valores promedio con su respectiva desviación estándar) en la Tabla 5 y esquemáticamente en las Figuras 4 y 5.

Tabla 4 Estimación de volumen de agua usado con base en el nivel de caudal (Bajo, Alto) y el tamaño de las partículas.

Tamiz	Tamaño [mm]	1 kg				2 kg				3 kg			
		Bajo		Alto		Bajo		Alto		Bajo		Alto	
		t [s]	V [l]										
3/4"	19,00	38,18	1,52	20,13	2,13	48,25	1,92	27,91	2,95	56,20	2,24	36,77	3,89
		40,65	1,62	18,70	1,98	47,33	1,89	24,71	2,61	59,10	2,36	32,71	3,46
		43,21	1,72	22,44	2,37	51,65	2,06	29,22	3,09	60,07	2,39	34,34	3,63
1/2"	12,50	40,55	1,62	22,37	2,37	51,81	2,06	31,37	3,32	65,82	2,62	37,89	4,01
		43,77	1,74	21,92	2,32	56,65	2,26	32,08	3,39	67,90	2,71	39,10	4,14
		42,39	1,69	20,68	2,19	55,66	2,22	28,31	2,99	61,23	2,44	42,30	4,47
3/8"	9,50	43,12	1,72	22,48	2,38	65,00	2,59	32,91	3,48	78,92	3,14	55,43	5,86
		44,55	1,78	21,50	2,27	61,57	2,45	34,28	3,63	82,10	3,27	52,10	5,51
		43,61	1,74	21,14	2,24	61,74	2,46	35,35	3,74	73,45	2,93	50,22	5,31
No. 4	4,75	46,38	1,78	24,22	2,56	67,25	2,45	37,27	3,94	85,11	3,27	55,89	5,91
		47,88	1,74	25,18	2,66	72,65	2,46	41,63	4,40	85,86	2,93	60,13	6,36
		44,30	1,85	22,14	2,34	66,47	2,68	37,50	3,97	90,07	3,39	58,97	6,24
No. 10	2,00	50,72	2,02	26,97	2,34	77,26	3,08	44,29	3,97	95,23	3,79	66,55	6,24
		55,21	2,20	23,41	2,85	84,31	3,36	40,87	4,68	100,45	4,00	62,32	7,04
		51,47	2,05	28,88	2,48	73,43	2,93	50,86	4,32	97,01	3,87	60,34	6,59
No. 40	0,425	106,77	4,25	47,37	5,01	174,35	6,95	87,73	9,28	253,34	10,10	132,33	14,00
		109,53	4,36	46,78	4,95	168,18	6,70	92,36	9,77	270,78	10,79	147,32	15,58
		112,41	4,48	45,77	4,84	179,43	7,15	95,30	10,08	269,02	10,72	150,42	15,91
No. 80	0,180	166,66	6,64	73,55	7,78	286,05	11,40	144,17	15,25	354,66	14,13	228,56	24,17
		156,30	6,23	75,80	8,02	282,34	11,25	141,57	14,97	373,23	14,87	237,77	25,15
		188,40	7,51	69,16	7,32	264,39	10,54	131,57	13,92	383,88	15,30	219,52	23,22
No. 200	0,075	223,22	8,90	102,34	10,82	411,95	16,42	210,76	22,29	566,67	22,58	273,66	28,95
		255,18	10,17	109,86	11,62	395,31	15,75	190,96	20,20	545,56	21,74	290,44	30,72
		231,07	9,21	110,42	11,68	383,55	15,28	205,98	21,79	590,28	23,52	268,79	28,43

Fuente: Autores.

Tabla 5

Resumen de resultados.

Tamiz	Tamaño [mm]	1 kg				2 kg				3 kg			
		Promedio		Desviación		Promedio		Desviación		Promedio		Desviación	
		Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
V [l]		V [l]		V [l]		V [l]		V [l]		V [l]		V [l]	
3/4"	19,00	1,62	2,16	0,10	0,20	1,96	2,89	0,09	0,25	2,33	3,66	0,08	0,22
1/2"	12,50	1,68	2,29	0,06	0,09	2,18	3,24	0,10	0,21	2,59	4,21	0,14	0,24
3/8"	9,50	1,74	2,30	0,03	0,07	2,50	3,62	0,08	0,13	3,11	5,56	0,17	0,28
No. 4	4,75	1,79	2,52	0,06	0,16	2,53	4,10	0,13	0,26	3,20	6,17	0,24	0,23
No. 10	2,00	2,09	2,56	0,10	0,26	3,12	4,32	0,22	0,36	3,89	6,62	0,11	0,40
No. 40	0,425	4,37	4,93	0,11	0,09	6,93	9,71	0,22	0,40	10,54	15,16	0,38	1,02
No. 80	0,180	6,79	7,70	0,65	0,36	11,06	14,71	0,46	0,70	14,77	24,18	0,59	0,97
No. 200	0,075	9,42	11,37	0,66	0,48	15,82	21,43	0,57	1,09	22,62	29,36	0,89	1,20

Fuente: Autores.

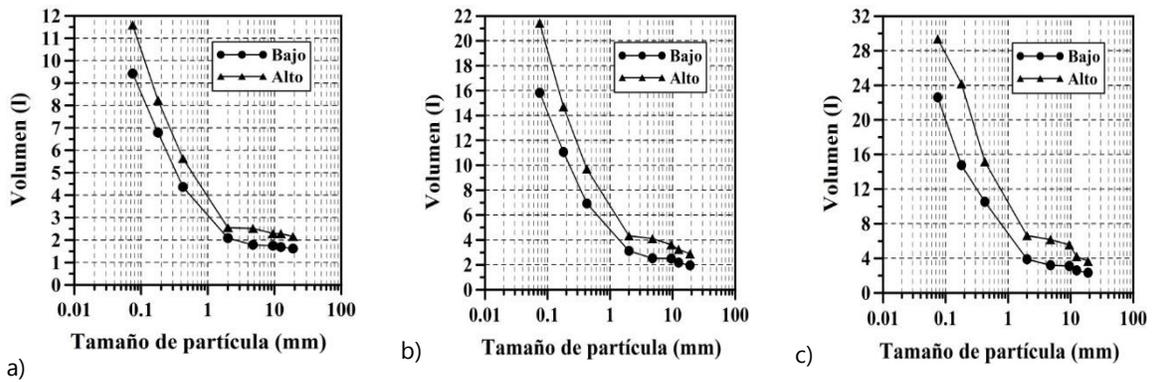


Figura 4. Volumen de agua estimado con base en el tamaño de partícula. a) 1 kg; b) 2 kg; c) 3 kg. Fuente: Autores.

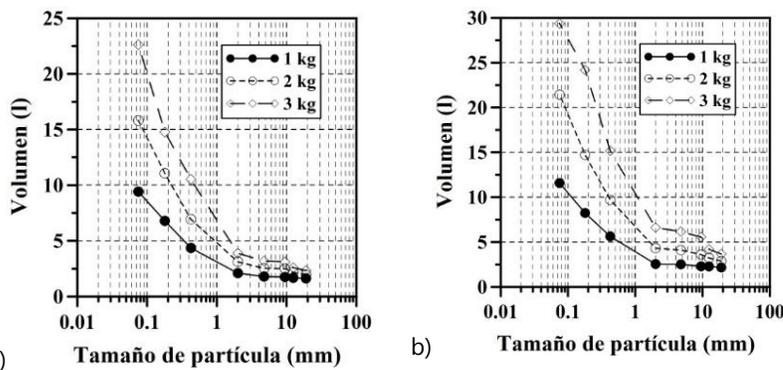


Figura 5. Volumen de agua estimado con base en el nivel de caudal. a) Bajo; b) Alto. Fuente: Autores.

Con base en los resultados presentados se reporta:

- A menor tamaño de las partículas, mayor es la cantidad de agua que se requiere para lavar el agregado. Lo anterior, debido a la mayor dificultad de mezclar el agua con el agregado (dificultando el proceso de manejabilidad y decantación), ya que la superficie específica del material incrementa notoriamente como producto de una mayor cantidad de partículas. En la Tabla 5 se observa, que para lavar 1 kg de partículas de ¾" se consumen 1,62 l y 2,16 l de agua en niveles bajo y alto de caudal, respectivamente. Para el caso de las partículas de menor tamaño (0,075 mm, tamiz No. 200), son necesarios 7,8 l y 9,4 l adicionales de agua, respectivamente.
- Lavar el agregado, suministrando el agua en menores caudales (nivel Bajo), representa menores consumos de agua. Para el mismo ejemplo anterior, si un 1 kg de partículas de ¾" y 0,075 mm son lavadas con alto caudal de agua (nivel Alto), se necesitarían 0,54 l y 2,16 l de agua adicional respectivamente, en comparación a si se hiciera con un suministro más pequeño de agua (nivel Bajo). Si el mismo ejemplo se aplicara para el lavado de 3 kg de agua, se necesitarían 1,33 l y 6,75 l de agua adicional, respectivamente.
- De manera obvia, a medida que incrementa la masa del agregado, aumenta la cantidad de agua que se requiere para lavarlo. Lo anterior es debido principalmente a la mayor cantidad de partículas que deben ser lavadas. Sin embargo, lavar el material en mayores proporciones de masa al mismo tiempo, genera menores desperdicios o consumos de agua. Por ejemplo, para lavar 1 kg de partículas de ¾" se consumen 1,62 l y 2,16 l de agua en los niveles Bajo y Alto de caudal, respectivamente. Esto quiere decir, que, si fuesen lavados 3 kg de partículas de ¾", kg por kg, en total se consumirían alrededor de 4,9 l y 6,5 l de agua en dicho niveles de caudal, mientras que si se lavan los 3 kg al mismo tiempo se consumirían 2,33 l y 3,66 l. Si este mismo ejemplo se aplica para el caso de las partículas de menor tamaño (0,075 mm, tamiz No. 200), lavar 3 kg de este material, kg por kg, precisaría consumir 28,3 y 34,8 l de agua, mientras que si se lavan los 3 kg al mismo tiempo se consumirían 22,62 l y 29,36 l, respectivamente.

- La mayor variabilidad en los consumos de agua ocurre durante el lavado de la fracción fina del agregado pétreo (tamices No. 40, 80 y 200) (figura 4y5). En la fracción gruesa (tamaños de partículas entre 2 mm y 19 mm) dicha variabilidad es menor, pero es estadísticamente significativa (basado en el análisis ANOVA presentado en la Tabla 6). Los resultados del análisis ANOVA presentados en la Tabla 6 son la comparación estadística entre los resultados obtenidos de lavar 1 kg y 2 kg de material. El ANOVA entre 1 kg y 3 kg no fue ejecutado, ya que se observó en la Tabla 6 una variabilidad significativa ( $F > F_{0,05}$ , donde  $F_{0,05} = 7,71$ ).
- Si fuesen lavados 3 kg de cada tamaño de partícula (27 kg de material en total), se consumirían 88,5 l y 111,9 l de agua, lavándolos kg por kg, empleando niveles de caudal Bajo y Alto, respectivamente. Ahora bien, si el lavado de cada tamaño de partícula fuese realizado al mismo tiempo, es decir 3 kg, el consumo sería de 63 l y 95 l, respectivamente. Si dichos 3 kg de cada tamaño de partícula fuesen lavados de 2 kg + 1 kg, el consumo sería de 75,6 l y 101,3 l, respectivamente.

Tabla 6

Resultado de análisis ANOVA (efecto del nivel de caudal con respecto al tamaño de partícula).

Tamiz	Tamiz [mm]	Bajo F	Alto
¾"	19,0	18,4	15,7
½"	12,5	51,0	50,2
⅜"	9,5	254,2	235,6
No. 4	4,75	84,1	79,5
No. 10	2,0	55,4	47,1
No. 40	0,425	313,4	163,4
No. 80	0,180	85,5	149,2
No. 200	0,075	160,6	166,0

Fuente: Autores.

Para lavar el agregado que se necesitó en el diseño de una mezcla MDC-25 (ver última columna de la Tabla 2), se precisan 44,7 y 64 l de agua en los niveles Bajo y Alto, respectivamente. Ahora bien, si este proceso de lavado se realiza kg por kg de cada tamaño de partícula, estas cantidades aumentan a 57,8 y 73,7 l, respectivamente.



## Conclusiones

En el presente estudio se ejecutó una fase experimental tendiente a estimar la cantidad de agua que se usa cuando se lavan agregados pétreos en un proceso de diseño de una mezcla de concreto asfáltico (caso de estudio). Las conclusiones que se reportan a continuación deben ser tenidas en cuenta solo para el agregado empleado y las variables analizadas:

En un proceso de lavado de agregados pétreos en el laboratorio, el consumo de agua disminuye significativamente (basado en el análisis ANOVA) cuando se lavan mayores cantidades de material al mismo tiempo y se emplea para rociar o humedecer las partículas, menores caudales.

La cantidad de agua que se usa en volumen para lavar el agregado pétreo en un diseño de mezcla de concreto asfáltico tipo MDC-25 oscila de manera aproximada entre 44,7 y 64 l, dependiendo si la velocidad de descarga o caudal de agua para humedecer las partículas es de 39,83 y 105,8 cm<sup>3</sup>/s (niveles Bajo y Alto), respectivamente. El uso de mayores cantidades de agua es directa e inversamente proporcional con la masa y el tamaño de las partículas lavadas, respectivamente.

Se recomienda extender y profundizar el presente estudio realizando la evaluación de otras variables que pueden incidir en las mediciones ejecutadas como son la experiencia del laboratorista que realiza el lavado, lavar otros tipos de agregados no por tamaños de partículas sino por fracciones (gruesa y fina), entre otros. Asimismo, se recomienda realizar un estudio donde se evalúe el impacto ambiental del objeto de estudio y los posibles procedimientos o acciones a seguir para disminuirlos.

## Referencias

- Bekchanov, M., Sood, A., Pinto, A., and Jeuland, M. (2017). Systematic review of water-economy modeling applications. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(8). doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000793.
- Bogardi, J. J., Dudgeon, D., Lawford, R., Flinkerbusch, E., Meyn, A., Pahl-Wostl, C., Vielhauer, K., and Vörösmarty, C. (2012). Water security for a planet under pressure: interconnected challenges of a changing world call for sustainable solutions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(1), 35-43. doi.org/10.1016/j.cosust.2011.12.002.
- Endo, A., Tsurita, I., Burnett, K., and Orenco, P. M. (2017). A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 20-30. doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.010.
- Feng, X., Liu, Q., Yin, L., Fu, B., and Chen, Y. (2018). Linking water research with the sustainability of the human-natural system. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 33, 99-103. doi.org/10.1016/j.cosust.2018.05.012.
- Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C., Colombia.
- Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2013a). Normas de Ensayos de Materiales. Bogotá D.C., Colombia.
- Karimi, P., Qureshi, A. S., Bahramloo, R., and Molden, D. (2012). Reducing carbon emissions through improved irrigation and groundwater management: A case study from Iran. *Agricultural Water Management*, 108, 52-60. doi.org/10.1016/j.agwat.2011.09.001.
- Maarouf, I., and Girrieow, M. A. (2017). Water and sustainable development in Misratah. *Procedia Environmental Sciences*, 37, 164-181. doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.032.
- Montoya, F. G., Baños, R., Meroño, J. E., and Manzano-Agugliaro, F. (2016). The research of water use in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 112(Part 5), 4719-4732. doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.042.
- Roncancio Parra, N., & Espinosa, H. (2010). Un breve acercamiento a la formación de los semilleros de investigación. Precisiones acerca de algunas diferencias entre la formación investigativa y la investigación formativa. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 2(1), 152-157.

US NIC (United States National Intelligence Council). (2012). *Global Trends 2030: Alternative Worlds*. US NIC. Washington DC, USA, p. 137.

Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., and Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284-288. doi.org/10.1126/science.289.5477.284.