

**LAVADO DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES SOBRE UNA  
AVENIDA DE BOGOTÁ D.C. CON ALTO TRÁNSITO VEHÍCULAR**

**SEBASTIÁN FELIPE PRIETO PARRA  
CAMILO ALBERTO SALAMANCA LÓPEZ**

**TRABAJO PRESENTADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**ANDRÉS TORRES ABELLO  
INGENIERO CIVIL  
(IC, MSc, PhD)  
DIRECTOR**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
BOGOTÁ  
2011**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, 6 de Diciembre de 2011

## **AGRADECIMIENTOS**

*Para la elaboración de este trabajo fue indispensable contar con la dirección del ingeniero Andrés Torres quien nos guío y nos motivó para realizar de la mejor manera posible nuestra tesis de grado. Queremos ofrecer un agradecimiento especial a Carlos Quitiaquez y a Denisse Amazo por su colaboración para la elaboración de los ensayos. Igualmente deseamos extender un agradecimiento a nuestras familias Salamanca López y Prieto Parra por su apoyo incondicional.*

## Contenido

Introducción .....	3
1. Marco Teórico .....	5
1.1. Contaminantes presentes en la escorrentía urbana .....	5
1.2. Primer Lavado (Tomado de Torres, 2004) .....	6
1.2.1. Curvas M (V) .....	8
1.2.2. Definición de Gupta y Saul (1996) .....	9
1.2.3. Definición de Bertrand-Krajewski, Cheboo y Saget (1998)..	10
2.2. Definiciones hidrológicas (Chow Ven Te, 1994) .....	12
2.3. Hidráulica (F.M., White 1998) .....	12
2.3.1. Conservación de la masa.....	12
2.3.2. Ecuación general de la energía.....	13
2.3.3. Número de Reynolds .....	13
2.3.4. Ecuación de Darcy-Weisbach .....	13
2.4. Herramientas matemáticas.....	14
2.4.1. Teoría de dúster.....	14
2.4.2. Análisis de Componentes Principales (PCA).....	15
2.4.3. Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS) .....	16
2.4.4. Correlación por Rangos de Spearman .....	17
3. Materiales y Métodos.....	18
3.1. Localización del sitio de estudio.....	18
3.2. Protocolo de campo.....	21
3.2.1. Nivelación topográfica .....	21
3.2.2. Mediciones de caudal.....	22
3.2.3. Toma de muestras .....	24
3.3. Protocolo de laboratorio.....	26
3.3.1. Ensayos de turbiedad .....	26
3.3.2. Ensayos de SST.....	27
3.4. Herramienta Computacional R.....	28
4. Resultados y Discusión .....	30
4.1. Relación Turbiedad-SST .....	33
4.2. Hidrogramas, Polutogramas y Análisis de curvas M(V) mediante la definición de Bertrand-Krajewski et al. (1998). .....	34

4.2.1. Análisis de hidrogramas y polutogramas .....	35
4.2.2. Análisis de curvas M(V).....	41
4.3. Relaciones del primer lavado con las características de los eventos lluviosos .....	47
4.3.1. Análisis por Componentes Principales (PCA) .....	47
4.3.2. Análisis de correlación por rangos de Spearman .....	49
4.3.3. Análisis PLS.....	52
4.3.5. Implementación del modelo propuesto por Gupta y Saul (1996) .....	56
5. Implementación del modelo propuesto por los autores .....	60
6. Conclusiones.....	66
7. Recomendaciones .....	68
8. Referencias .....	69

## Introducción

En los sistemas de drenaje urbano de Bogotá se transportan todas las aguas residuales provenientes de las actividades humanas (industria, comercio, residencia), al igual que las aguas provenientes de la precipitación. El aumento de las áreas impermeables debido a la expansión y el crecimiento descontrolado de la urbe dan lugar a unos mayores volúmenes de escorrentía y por ende a un arrastre de los contaminantes de la superficie hacia los cuerpos hídricos receptores, generando problemas de saneamiento básico y degradación del ambiente (Duarte 2009). Uno de los principales problemas que han venido enfrentando las medianas y grandes ciudades es el alto costo de tratamiento de estas aguas. Desde mediados del siglo XX se planteó como solución la separación de la red combinada en red sanitaria y red pluvial, pensando que se garantizaría un tratamiento del agua residual y el resto se vertería directamente al cuerpo receptor (asumiéndola como agua limpia). Sin embargo, el hecho de tener dos redes en vez de una implica mayores costos de construcción y operación de dichas redes (Burian y Edwards, 2002; Andoh, 2002). Adicionalmente autores como Zhang et al. (2010), han observado que la presencia de contaminantes en el agua de escorrentía puede ser mucho más importante que aquella en el agua que cae directamente del cielo sin tocar la superficie (relación de 10 para la Demanda Química De Oxígeno (*DQO*), según Zhang et al. (2010). Cabe resaltar que Zhang et al. (2010) también encontraron una alta relación entre los Sólidos Suspendidos Totales (*SST*) y la *DQO* con un  $R^2$  de 0.9488 y 0.8772 para dos eventos respectivamente, lo anterior pone en evidencia que varios contaminantes, incluidos los orgánicos (como la *DQO*), están asociados al material particulado. Además se ha demostrado que las cargas de contaminantes asociadas al *Primer Lavado* (entendido como la mayor fracción de masa contaminante contenida en una pequeña fracción de volumen, asociado a los primeros minutos del evento lluvioso) en un evento lluvioso pueden llegar a ser superiores a las de las aguas residuales en tiempo seco (Novotny y Chesters, 1981, Artina et al., 1999). Con lo expuesto anteriormente sería un error considerar las aguas pluviales como aguas limpias. Debido a los grandes volúmenes de escorrentía resulta importante encontrar la manera de descontaminar la fracción de volumen de agua lluvia que contenga la mayor cantidad de contaminantes.

Zhang et al. (2010) encontraron que el impacto del fenómeno varía de acuerdo al tipo de zona (residencial, comercial e industrial), siendo la comercial y la industrial las que presentan mayor cantidad de contaminantes debido a una mayor actividad, en especial debido a la densidad del tráfico vehicular. También encontraron que las concentraciones de contaminantes asociadas al *Primer Lavado* (*PL*) en las vías son considerablemente mayores que las de un *PL* en los techos.

Varios autores han realizado investigaciones para determinar la relación entre las variables hidrológicas como Profundidad de lluvia (*P*), Duración (*T<sub>r</sub>*), Intensidad (*I*), Intensidad máxima (*I<sub>max</sub>*), Periodo seco anterior al evento (*ADWP*), ente otras, con la ocurrencia y magnitud del fenómeno de *PL*.

Bertrand-Krajewski (1992) y Li *et al.* (2007a) encontraron que la concentración de SST está estrechamente relacionada con las intensidades. Li *et al.* (2007b) encontraron que el ADWP también está relacionado con la cantidad de contaminantes con un  $R^2 = 0.95$  (valor  $p < 0.01$ ). Pero sin embargo el fenómeno es algo complejo y es relativo al sitio donde se estudie (Bertrand-Krajewski *et al.* 1998).

En Colombia se ha intentado estudiar el fenómeno: Guio (2006) lo estudió en la cuenca El Virrey pero el enfoque fue hacia la identificación de los contaminantes mas no el establecimiento de una relación entre la ocurrencia y magnitud del fenómeno y hidrología. En la Universidad Nacional, María del Pilar Duarte (2009) en su tesis de maestría ha sido la única en Colombia que ha intentado caracterizar el fenómeno ligándolo con la hidrología, pero observó eventos que calificó como "Primeros Lavados débiles"<sup>1</sup>, debido a que el área donde lo realizó (campus de la Universidad Nacional, sede Bogotá), cuenta con muchas zonas verdes distribuidas en la cuenca que ayudan a la infiltración y reducen la escorrentía superficial. Debido a lo anterior hoy en día no existen resultados concluyentes en nuestro medio acerca del PL y su relación con la hidrología de los eventos asociados. Con este trabajo se intentó caracterizar el lavado de sólidos suspendidos totales sobre una avenida con alto tránsito vehicular, en este caso el estudio se realizó sobre la Avenida 39 entre carreras 7ª y 13, teniendo en cuenta que esta recibe una gran parte de la escorrentía proveniente de la Carrera 7ª.

Este documento está dividido en 8 capítulos. En el capítulo 2, llamado Marco Teórico, se revisan los conceptos y fundamentos que soportan este trabajo, específicamente en las temáticas de calidad de aguas, hidrología e hidráulica y conceptos matemáticos. En el capítulo 3, se consigna la metodología usada tanto en campo como en el laboratorio para la obtención de los datos experimentales, así mismo se presentan las herramientas computacionales utilizadas para el análisis de datos. Posteriormente en el capítulo 4 se presentan los resultados y el análisis de los mismos. En el capítulo 5 se encuentra una propuesta de implementación del modelo propuesto por los autores. En el capítulo 6 y 7 se encuentran las conclusiones y recomendaciones respectivamente. En el capítulo 8, están las referencias usadas para llevar a cabo esta investigación.

En el cd adjunto se encuentran los anexos, donde se consignan las memorias de cálculo, datos, fotos y toda la información utilizada para llevar a cabo este trabajo.

---

<sup>1</sup> "Primer Lavado débil" es un término usado por Pilar Duarte en su tesis de maestría "Propuesta Metodológica Para La Medición Y Análisis Del Fenómeno De Primer Lavado (FirstFlush) En Cuencas Urbanas - Campus Universidad Nacional De Colombia - Sede Bogotá."

## **1. Marco Teórico**

En este apartado se consignan los conceptos de hidrología, hidráulica, estadística, y parámetros de calidad del agua utilizados en la realización del presente trabajo.

### **1.1. Contaminantes presentes en la escorrentía urbana**

La contaminación causada por el agua de escorrentía constituye un gran problema en las áreas urbanas. La escorrentía urbana se considera como una fuente de contaminación de difícil localización (difusa), pues se origina en áreas extensas, su vertido es intermitente ligado a un fenómeno aleatorio, la lluvia, variable en el tiempo, difícil de muestrear en origen y está relacionada con el uso del suelo (Novotny, 1994; Malgrat, 1995).

En la actualidad se puede apreciar cómo el ritmo y magnitud del desarrollo pueden llegar a irrumpir en las características naturales y originales del medio ambiente y en especial el medio acuático (Menéndez y Tarela, 2000). La manera más evidente de constatar la alteración de la condición natural de un hidrosistema es a través de la cantidad de sustancias naturales o sintéticas que intervienen en dicho medio acuático de manera nociva o anormal, es decir, lo que se conoce como grado de contaminación (Iwona *et al*, 2002). El incremento notorio de la contaminación de los recursos hídricos ha generado afanes en la búsqueda de una mejor caracterización y manejo de contaminantes presentes en medios acuáticos. Año tras año el incremento en la demanda actual del recurso y su notoria escasez pronosticada a nivel mundial en algunos sectores ya se puede sentir, esto conduce a que las fuentes hídricas potables no pueden poseer contaminantes que inhabiliten su consumo ni siquiera en dosis mínimas que resulten perjudiciales a la salud humana y al entorno mismo (Menéndez y Tarela, 2000).

Los cuerpos de agua tienden a contaminarse por múltiples razones, lo que determina y discrimina directamente el origen de sus contaminantes: en primer lugar podemos destacar los contaminantes naturales tales como materia orgánica, hojas, sedimentos, pastos etc. que usualmente hacen parte del medio acuático debido a movimientos normales de la naturaleza por efecto del viento y deslizamientos de tierra. En otro gran grupo encontramos los contaminantes artificiales (efectos ajenos al ambiente o también llamados antropogénicos) como químicos, basuras, metales pesados y grasas que son una consecuencia de la desmesurada demanda de energía y recursos por parte de las poblaciones humanas cerca a las fuentes hídricas como por ejemplo los vertimientos y demás introducciones sintéticas contaminantes (Environmental Protection Authority, 2003).

Los sólidos presentes en el agua pueden dividirse en suspendidos y disueltos y subdividir en volátiles y no volátiles. La mayor parte de la fracción volátil es biodegradable. Se pueden clasificar por su tamaño (de menor a mayor) en

sólidos disueltos ( $<10^{-3}$   $\mu\text{m}$ ), coloidales y suspendidos ( $> 1$   $\mu\text{m}$ ). El concepto de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) algo arbitrario pero que generalmente se refiere a la porción de ST retenida en un filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro de 1  $\mu\text{m}$ . (Water Environment Federation.; Environmental and Water Resources Institute (U.S.); NetLibrary, Inc., 2006).

Los SST son partículas transportadas durante el periodo de lluvia. Esto se debe a un fenómeno de lavado en los tejados y las calzadas de la ciudad; al ser depositados en las diferentes fuentes de agua, conducen al desarrollo de depósitos de fango y aumentan las condiciones anaerobias de las zonas de vertido (Glynn, Henry J y Heinke, Gary W., 1999).

La turbiedad es una expresión de las propiedades ópticas de un líquido que hace que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de transmitirse en línea recta a través de una muestra. La materia particulada en una muestra de agua causa que la luz incidente se disperse en diferentes direcciones sobre la muestra. La luz dispersada que regresa al detector provoca una respuesta relacionada con el nivel de turbidez de la muestra. Un mayor nivel de luz dispersa que llega al detector implica un valor mayor de turbidez. La medición de turbidez no tiene una relación directa con una cantidad específica de partículas o forma de las mismas (Sadar, 2002). Sin embargo, se reconoce que el aumento de turbiedad se debe a la presencia de materia disuelta suspendida como arcilla, limo, materia orgánica fina, plancton y otros organismos microscópicos, ácidos orgánicos y colorantes (ASTM International, 2003a). Debido a lo anterior, se han desarrollado métodos que relacionan valores de turbiedad en continuo con concentraciones de contaminantes, en particular SST y eventualmente DQO (Bertrand-Krajewski, 2004; Bertrand-Krajewski et al., 2007; Torres et al., 2011)).

## **1.2. Primer Lavado (Tomado de Torres, 2004)**

El primer lavado se puede definir como la presencia de alta descarga de contaminantes durante la primera proporción del volumen, o en otras palabras, el volumen inicial de escorrentía de un evento lluvioso. Es comúnmente aceptado asumir que éste volumen contiene la proporción principal de la carga de polución que es transportada durante el evento, no obstante, no existe una definición formal para "primera proporción del volumen" y existen divergencias entre distintos autores que han estudiado el tema.

La cantidad de proyectos de investigación dirigidos al entendimiento de la manera en que se distribuyen los contaminantes ha aumentado en los años recientes, probablemente, debido a la alta incidencia que tiene el fenómeno de primer lavado en la contaminación de los cuerpos de agua receptores (Novtony y Chesters, 1981). Kaczala et al. (2011) llevaron a cabo un estudio

en Suecia, en el cual caracterizaban y correlacionaban contaminantes con el fenómeno del Primer Lavado.

El estudio desarrollado por Kaczala et al. (2011) contempló el análisis de 8 eventos lluviosos, los cuales fueron utilizados para construir curvas M(V) (ver Ilustración 1) y determinar correlaciones entre contaminantes evaluando el coeficiente de Spearman. En el estudio se concluyó que las variables hidrometeorológicas juegan un papel importante sobre la calidad del agua lluvia. Los autores recomiendan implementar estrategias que permitan retener los sólidos suspendidos que se transportan en la escorrentía urbana para lograr disminuir la cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua.

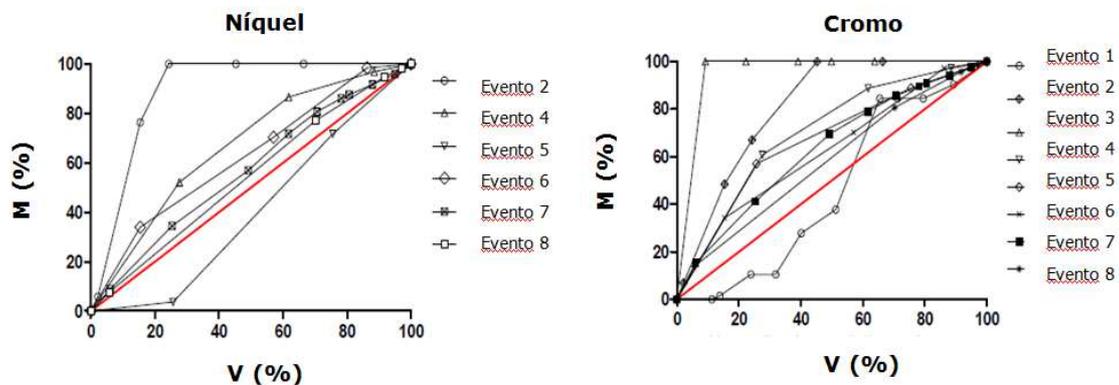


ILUSTRACIÓN 1. CURVAS M(V) CONSTRUIDAS POR KACZALA ET AL. (2011)

Kaczala et al.(2011) intentaron encontrar una relación entre el periodo seco antecedente (*ADWP*) y la concentración de metales pesados sobre la cuenta de una vía , así como a 1 m de la misma, la cual hacía parte del campus universitario Riccarton perteneciente a la universidad Heriot-Watt en el Reino Unido. El estudio encontró que la concentración de metales pesados sobre la cuneta era inversamente proporcional al *ADWP*, mientras que a 1 m de la misma la relación con el *ADWP* era directamente proporcional. Lo anterior indica que la ubicación del punto de muestreo incide en la relación de concentración de contaminantes y *ADWP*.

Un estudio realizado por Bonhomme et al. (2011) relacionó la influencia que tiene la intensidad de lluvia junto con la pendiente y granulometría de una vía sobre el Primer Lavado de Sólidos Suspendidos Totales (SST). El Primer lavado se caracterizó mediante la construcción de curvas M(V) (ver Ilustración 2) y resultó estar estrechamente relacionado con la granulometría de la vía. La relación entre Primer Lavado con intensidad del evento y pendiente de la vía, no arrojó conclusiones contundentes.

Una manera de determinar si se presentó primer lavado es recurriendo a las Curvas M(V): Masa de contaminantes versus volumen de las cuales se tratará a continuación.

### 1.2.1. Curvas M (V)

Las curvas M(V) permiten relacionar la distribución de contaminantes en un evento lluvioso y sirven para comparar las masas de contaminantes producidas por diferentes aguaceros. Dicha representación consiste en construir la curva que proporciona la variación de la masa acumulada de contaminantes dividida por el total de la masa de contaminantes en el eje Y, en relación con el volumen acumulado dividido por el volumen total en el eje X. Conociendo el número de mediciones  $N$  de caudal,  $Q_i$  y de concentración  $C_i$ , a cada intervalo  $\Delta t$ , y asumiendo que  $Q$  y  $C$  varían linealmente entre dos mediciones, la curva M(V) puede construirse de la siguiente manera:

$$\frac{\sum_{i=1}^j C_i * Q_i * \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N C_i * Q_i * \Delta t_i} = f \left( \frac{\sum_{i=1}^j Q_i * \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N Q_i * \Delta t_i} \right) = f \left( \frac{\sum_{i=1}^j V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \right)$$

ECUACIÓN 1

donde  $j$  es el índice de 1 a  $N$  y  $V_i$  es el volumen de descarga durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

Es común trazar una línea bisectriz que parta el plano en dos mitades iguales desde el origen, con el siguiente comportamiento:

$$f(V) = V$$

ECUACIÓN 2

De igual forma es posible modelar matemáticamente una curva M(V) a partir de una función potencial:

$$M(V) = aV^b$$

ECUACIÓN 3

El valor del parámetro  $b$  caracteriza la distancia entre la curva M (V) y la bisectriz. Entre menor sea  $b$ , mayor será la distancia por encima de ésta línea, para valores de  $b$  mayores a 1 la distancia entre la curva M(V) será gradualmente mayor por debajo de la bisectriz. Según lo anterior, la curva más alta se presenta con el mínimo valor de  $b$ , mientras que la curva más baja se presenta para el máximo valor de  $b$ . Los valores máximos y mínimos del parámetro  $b$  fueron calculados a partir de 197 eventos lluviosos en 6 alcantarillados pluviales y en 6 alcantarillados combinados con diferentes características y difieren entre sí según sea el tipo de sistema de alcantarillado (Bertrand-Krajewski et al., 1998)

Resulta importante recalcar que el parámetro  $b$  varía significativamente entre distintos eventos lluviosos, lo que sugiere que probablemente existe alguna

relación entre las variables hidrológicas de dichos eventos con el valor de  $b$ . Aparentemente, el valor de este parámetro no tiene ninguna relación con la superficie o pendiente del terreno. Lo mismo sucede con la altura de agua, intensidad máxima, o periodo seco anterior (Torres, 2004).

Los valores máximos de concentración de sólidos en suspensión están esencialmente ligados a picos de intensidad de lluvias (Bertrand-Krajewski, 1992), sin embargo no es conveniente hacer ninguna generalización al respecto. Por otro lado cabe notar que los histogramas que incluyen varios picos sucesivos tienden a presentar curvas  $M(V)$  cercanas a la bisectriz. En un estudio realizado por Saget y Chebbo en 1995, se concluyó que bajos valores de  $b$  tienden a ocurrir con más frecuencia cuando largos periodos secos antecedentes y altas intensidades de lluvias ocurren simultáneamente.

### 1.2.2. Definición de Gupta y Saul (1996)

Gupta y Saul definen primer lavado como aquella parte de la lluvia que está por encima de la divergencia máxima entre el porcentaje acumulado de masa contaminante y el porcentaje acumulado de volumen, graficado contra el porcentaje acumulado de tiempo. A partir de mediciones realizadas en cuencas inglesas propusieron el siguiente modelo:

$$M_{ff} = \alpha * D^{\beta} * I_{max}^{\gamma} * ADWP^{\sigma}$$

#### ECUACIÓN 4

donde  $M_{ff}$  (kg) es la masa de contaminante transportada en el primer lavado,  $D$  (min) es la duración de la lluvia en minutos,  $I_{max}$  (mm/h) es la intensidad máxima de lluvia,  $ADWP$  es el periodo seco antecedente en horas y finalmente  $\alpha, \beta, \gamma$  y  $\sigma$  son coeficientes numéricos empíricos.

La aplicación de este modelo arrojó coeficientes de correlación entre 0.5 y 0.7 para eventos en las cuencas inglesas. (Gupta y Saul, 1996).

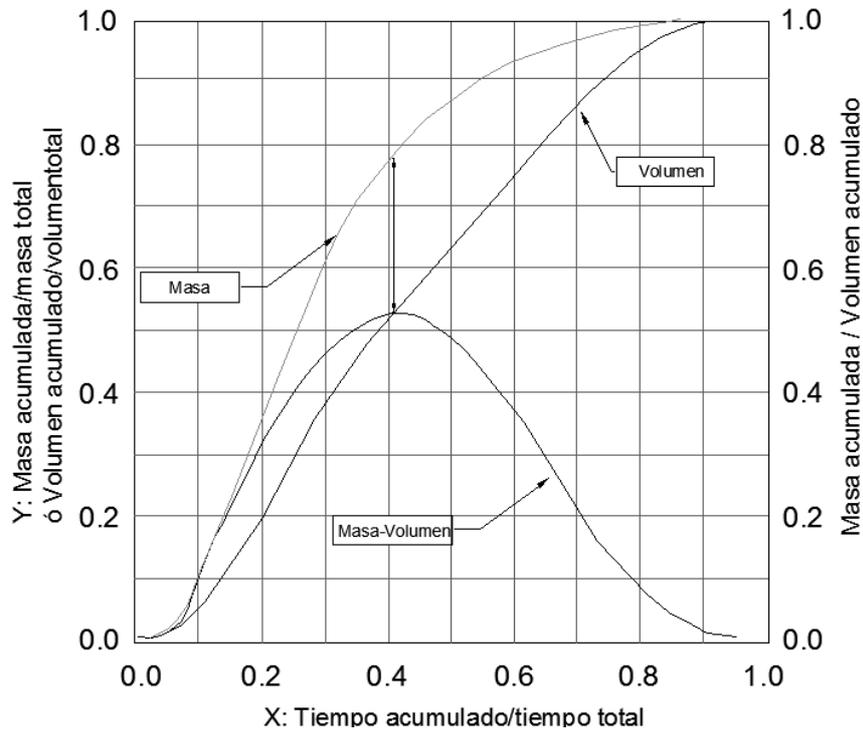


ILUSTRACIÓN 1-2 DEFINICIÓN PRIMER LAVADO GUPTAY SAUL (1996)

Para determinar la divergencia máxima entre el porcentaje de masa acumulada total y el porcentaje de volumen acumulado total es recomendable graficar el comportamiento de estos dos parámetros en función del porcentaje de tiempo acumulado total (ver Ilustración 1-2) para facilitar el entendimiento de la distribución de masa y volumen a lo largo del evento. En el caso particular de la Ilustración 1-2 se puede inferir que la divergencia máxima tratada en el párrafo anterior se presenta cuando ha transcurrido aproximadamente el 40% del tiempo total, el porcentaje de masa está alrededor del 80% y el porcentaje de volumen es aproximadamente 50% (Gupta y Saul, 1996).

### 1.2.3. Definición de Bertrand-Krajewski, Cheboo y Saget (1998)

Los investigadores Bertrand-Krajewski, Cheboo y Saget (1998) propusieron el método llamado "primer lavado 30/80", que es puramente cualitativo, el cual plantea la hipótesis de que "por lo menos el 80% de masa contaminante es transportada en el 30% inicial de volumen". Lo anterior corresponde a valores de  $b$  por debajo de 0.185. Los valores 30 y 80 fueron escogidos arbitrariamente, sin embargo, el contar con estos valores hace que el método sea explícito y fácil de usar además de permitir el cálculo de un fenómeno que hasta ahora era considerado de manera cualitativa o descriptiva.

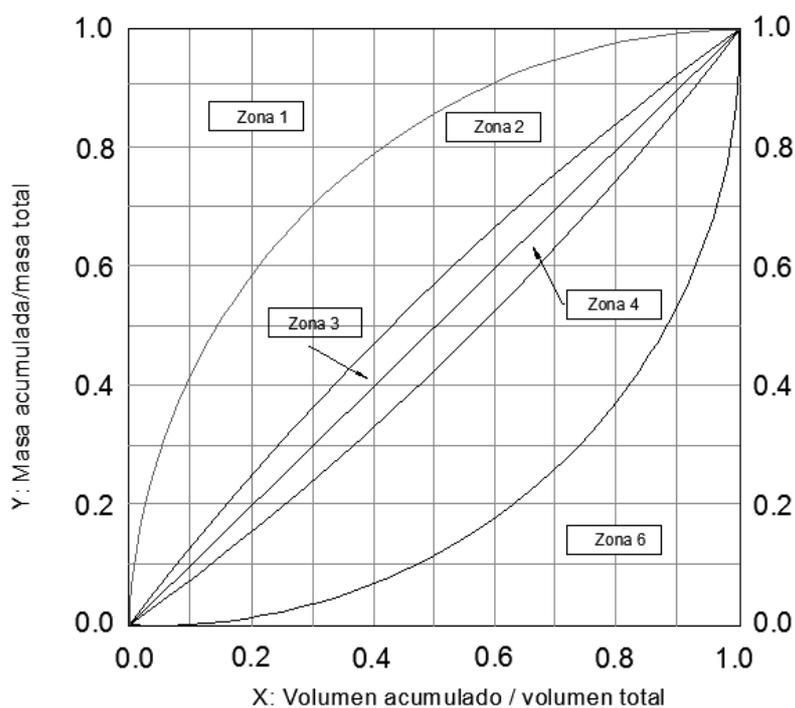
Se han reconocido diferentes zonas en el gráfico  $M(V)$ , en función del valor del parámetro  $b$  como se muestra a continuación.

**TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE ACUERDO AL PARÁMETRO  $b$**

VALOR DE $b$		ZONA N°	ESPACIO ENTRE LA CURVA $M(V)$ Y LA BISECTRIZ	
$b < 1$	$0 < b \leq 0.185$	1	Espacio positivo	Espacio positivo alto
	$0.185 < b \leq 0.862$	2		Espacio positivo medio
	$0.862 < b \leq 1.000$	3		Espacio positivo insignificante
$b > 1$	$1.000 < b \leq 1.159$	4	Espacio negativo	Espacio negativo insignificante
	$1.156 < b \leq 5.395$	5		Espacio negativo medio
	$5.395 < b < \infty$	6		Espacio negativo alto

Fuente: Bertrand-Krajewski, et al. 1998

La Tabla 1 se divide principalmente en dos grandes grupos; Espacio positivo y Espacio negativo, los cuales corresponden a valores de  $b < 1$  y  $b > 1$  respectivamente. Adicionalmente se identifican 6 zonas en la curva  $M(V)$  las cuales se distribuyen como se muestra en la siguiente ilustración.



**ILUSTRACIÓN 1-3 REPRESENTACIÓN DE LAS ZONAS PARA UN GRÁFICO  $M(V)$**

## **2.2. Definiciones hidrológicas (Chow Ven Te, 1994)**

La profundidad de lluvia  $P$ , se puede definir como la altura de la lámina de agua formada en  $1 \text{ m}^2$  de superficie plana y uniforme, debido a un evento de precipitación, esta se mide en mm.

La intensidad  $I$ , Es la profundidad de lluvia registrada en un intervalo de tiempo arbitrario. Para establecer la intensidad máxima ( $I_{max}$ ) se deben calcular las intensidades a lo largo de todo el evento y seleccionar la mayor. La intensidad media ( $I_m$ ) es el promedio de las intensidades del evento.

El Periodo de tiempo seco antecedente  $ADWP$ , puede definirse como el periodo de tiempo seco entre dos eventos de precipitación, es decir el intervalo de tiempo (pueden ser minutos, horas, días o meses) en que la profundidad de lluvia permanece en 0 mm.

La duración del evento  $D$ , es el tiempo que dura un evento de precipitación. Puede expresarse en unidades de horas o de minutos.

## **2.3. Hidráulica (F.M., White 1998)**

A continuación se mencionan los principios básicos de la hidráulica de tuberías a presión usados para los aforos de caudal.

### **2.3.1. Conservación de la masa**

Este principio establece que en un volumen de control, la masa de fluido que entra (*in*) es igual a la masa de fluido que sale (*out*) del mismo.

$$\sum_i (\rho_i A_i V_i)_{in} = \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{out}$$

ECUACIÓN 1-5

El agua, se puede asumir como un fluido incompresible, por lo tanto la expresión se puede reducir a la siguiente expresión, también conocida como la ecuación de continuidad.

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{constante}$$

ECUACIÓN 1-6

### 2.3.2. Ecuación general de la energía

$$\left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z\right)_{in} = \left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z\right)_{out} + h_f - h_p + h_t$$

ECUACIÓN 1-7

donde  $\frac{p}{\gamma}$  es la cabeza de presión,  $\frac{v^2}{2g}$  es la cabeza de velocidad y  $z$  es la cabeza de energía potencial.

Esta expresión relaciona la cabeza de energía disponible aguas arriba (*in*) con la cabeza de energía aguas abajo (*out*). Esta última puede verse afectada por pérdidas de fricción  $h_f$  debido a la viscosidad del fluido y la interacción fluido-tubería. También puede verse afectada positivamente por adición de cabeza de energía  $h_p$ , en el caso de una bomba en el sistema, o por el contrario puede verse afectada negativamente por extracción de cabeza de energía  $h_t$  de la masa de agua, en el caso de una turbina.

### 2.3.3. Número de Reynolds

El Número de Reynolds (*NR*) permite establecer el régimen de flujo en el que se encuentra el fluido. Se tiene entonces que :

$$NR = \frac{\rho V d}{\mu}$$

ECUACIÓN 1-8

donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido,  $d$  es el diámetro de la tubería,  $V$  es la velocidad del flujo en la tubería.

Dependiendo de la magnitud del *NR*, el flujo se puede clasificar como se muestra a continuación:

TABLA 2 CLASIFICACIÓN DE RÉGIMENES DE FLUJO

NR	Régimen
$0 < NR < 2000$	Laminar
$2000 < NR < 4000$	Transición
$NR > 4000$	Turbulento

### 2.3.4. Ecuación de Darcy-Weisbach

La ecuación de Darcy-Weisbach (ECUACIÓN 1-9) permite calcular las pérdidas de cabeza de energía debido a la fricción en flujo en tuberías a presión, en cualquier régimen.

$$h_f = f \frac{L V^2}{d 2g}$$

ECUACIÓN 1-9

donde  $L$  es la longitud de la tubería,  $d$  es el diámetro de la tubería,  $V$  es la velocidad del fluido y  $f$  es el factor de fricción.

## **2.4. Herramientas matemáticas**

A continuación se hace una breve introducción a las herramientas matemáticas utilizadas para el análisis de datos, con el apoyo de la herramienta computacional R.

### **2.4.1. Teoría de clúster**

Los análisis de Clústeres, conocidos también como Análisis por Taxonomía Numérica, Análisis de Conglomerados o Reconocimiento de Patrones, se utilizan para reunir un conjunto de objetos en diversos grupos, de forma tal que las características de los objetos pertenecientes a un mismo grupo sean muy similares entre sí (cohesión interna del grupo) y diferentes a las de los demás grupos o clústeres (aislamiento externo del grupo). Los análisis de clústeres no miden la igualdad de los datos incluidos, sólo analizan la similitud entre unos puntos y otros (Figueras, 2001)

Es una técnica que se utiliza comúnmente para realizar análisis estadísticos de diferentes ramas del conocimiento. El criterio para la formación y posterior designación de un grupo es variable y puede comprender una gran cantidad de juicios que en datos altamente dispersos y no uniformes puede llegar a ser casi aleatorio para el ser humano, teniendo en cuenta que las relaciones no son evidentes a simple vista (Rand, 1971).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, la implementación de clústeres para un conjunto de datos permite hallar relaciones complejas entre los componentes de un grupo, lo que facilita el análisis de la información disponible.

Un ejemplo que ilustra cómo pueden formarse los clústeres es el siguiente: Una baraja de cartas españolas se puede dividir de distintas maneras; en cuatro clústeres (los cuatro palos), en ocho clústeres (los cuatro palos y según sean figuras o números), o en dos clústeres (figuras y números). Según esto, todo depende de lo que sea considerado como similar (Marín Díaz Araque, 2009).

Esta teoría se utilizó para hacer una aproximación gráfica a la relación entre los eventos y las variables hidrológicas consideradas (Profundidad, Intensidad media, Intensidad máxima, Periodo Seco Antecedente y Duración) la cual facilitara la descripción de los eventos en función de sus características.

### **2.4.2. Análisis de Componentes Principales (PCA)**

El análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés) es una técnica bien conocida de análisis lineal para problemas multivariados. La idea central del PCA es reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos, conservando tanto como sea posible la variabilidad en dicho conjunto. A partir de esta idea, el PCA se ha aplicado a muchos campos, incluyendo la compresión de datos, análisis gráfico multivariado, reconocimiento de patrones, regresión y predicción de series temporales.

El análisis de componentes principales, es una herramienta que permite identificar de forma gráfica y cualitativa, las fuentes de variabilidad entre individuos de una muestra. La finalidad del PCA es buscar la posibilidad de representar adecuadamente información multivariada con un número menor de variables artificiales construidas como combinaciones lineales de las originales.

Según lo anterior se puede decir que la regresión PCA busca reducir la dimensionalidad de las variables que intervienen en un problema, representándolas por un subconjunto de variables ficticias. Es usual que para variables altamente dependientes, con un pequeño número de variables artificiales (menos del 20% de las originales) se logre explicar la mayor parte (más del 80%) de la variabilidad original (Tripping y Bishop, 1999).

Un PCA puede llevarse a cabo si existen altas correlaciones entre las variables, ya que esto es indicativo de que existe información redundante y, por tanto, pocos factores explicarán gran parte de la variabilidad total. La escogencia de los componentes debe hacerse de tal forma que el primer componente sea capaz de explicar la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo componente debe recoger la máxima variabilidad posible no explicada por el primero (remanente) y así sucesivamente. El total de factores, o componentes principales, se elige según el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente.

La metodología de componentes principales Jolliffe (1986), aunque sus orígenes se encuentran en los ajustes ortogonales por mínimos cuadrados introducidos por K. Pearson (1901). Es una técnica utilizada frecuentemente para análisis estadísticos en diversas ramas del conocimiento, sin embargo ha venido perdiendo popularidad entre los estadísticos debido a la aparición y divulgación de la Regresión por mínimos cuadrados parciales.

Frank y Friedman (1993) afirman que la regresión PLS es fuertemente promocionada y usada por especialistas en Quimiometría, pero desconocida por estadísticos; mientras que el PCA es bastante conocido pero muy pocas veces recomendado por estadísticos. Es frecuente realizar el análisis por componentes principales en software computacional, para el caso que nos ocupa, el PCA se realizó desde la plataforma R.

### 2.4.3. Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (Regresión PLS)

La idea de mínimos cuadrados parciales (PLS por sus siglas en inglés) fue formalizada por Herman Wold en un artículo relacionado con el análisis de componentes principales (Wold, 1966) donde se formuló por primera vez, el algoritmo iterativo no lineal por mínimos cuadrados (NILES por sus siglas en inglés). Con el transcurso de los años el algoritmo NILES evolucionó hasta que en el año 1979 Wold lo rebautizó con el nombre de PLS.

Inicialmente la metodología PLS fue desarrollada para ser aplicada en ciencias económicas y sociales. Sin embargo, gracias a las contribuciones realizadas por su hijo Svante Wold, ha ganado popularidad en Quimiometría, disciplina que utiliza métodos estadísticos y matemáticos en los problemas químicos, con el objetivo de extraer la máxima y más útil información. La regresión por mínimos cuadrados parciales es especialmente útil en problemas que se caracterizan por tener muchas variables predictoras, con problemas de multicolinealidad, y pocas unidades experimentales, como observaciones o mediciones reales.

La metodología PLS generaliza y combina características y propiedades del Análisis de Componentes Principales (PCA) y Análisis de Regresión Múltiple. La demanda por esta metodología va en aumento gracias a que ha demostrado ser una herramienta fiable, lo cual ha hecho que sea utilizada en diversas ramas de la ciencia (Fornell y Cha, 1994).

El principio de PLS parte de la suposición de que un conjunto de variables puede ser resumido en una única variable latente (ficticia), la cual se relaciona linealmente con otras variables del mismo tipo compuestas por diferentes elementos o variables reales (Guinot, 2001).

En general, la regresión PLS está compuesta por dos pasos fundamentales. Primero, se transforma a la matriz de variables (predictoras)  $\mathbf{X}$  de orden  $n \times p$ , con ayuda del vector de respuestas  $\mathbf{Y}$  de orden  $n \times 1$ , en una matriz de variables latentes no correlacionadas,  $\mathbf{T}=(T_1, \dots, T_p)$  de orden  $n \times p$ , llamadas componentes PLS. Segundo, se calcula el modelo de regresión estimado usando el vector de respuestas original y como predictoras, se utilizan los componentes PLS (Wold, 1979). El número de componentes necesarios para el análisis de regresión debe ser muy inferior al número de predictoras para disminuir la dimensión del problema y así lograr que la solución converja en un menor número de iteraciones. La reducción de la dimensión puede ser aplicada directamente sobre los componentes ya que estos son ortogonales.

Comúnmente se utiliza software matemático para realizar regresiones por PLS. Durante muchos años el único programa utilizado para hacer este tipo de regresiones fue LVPLS 1.8 el cual fue desarrollado por Lohmöller (1989). En la

actualidad se pueden llevar a cabo este tipo de regresiones mediante el paquete descargable pls de R.

#### 2.4.4. Correlación por Rangos de Spearman

El método de Spearman permite calcular correlación, pero sólo entre dos variables y es una excelente opción cuando los datos no tienen distribución normal bivalente, especialmente si hay valores extremos.

La correlación de Spearman, o por rangos, es una prueba estadística que permite medir la correlación o asociación de dos variables. Se basa en reemplazar los valores originales, de dos variables, por números enteros positivos, comenzando desde 1 en adelante, que correspondan a su ordenamiento de menor a mayor magnitud (rangos). Para ello, es necesario que los valores reales de cada una de las variables hayan sido ordenados previamente de menor a mayor por separado y reemplazados por los rangos (Guilford y Fruchter 1984).

De este modo cada par de variables tiene su respectivo par de rangos. Posteriormente se calcula la diferencia entre los rangos de las dos variables como una resta entre el rango de la variable dependiente y el rango de la variable independiente y dicha diferencia se eleva al cuadrado, para posteriormente aplicar la siguiente ecuación que determina el coeficiente de correlación de Spearman.

$$r_s = 1 - \frac{6 * \sum D^2}{N(N^2 - 1)}$$

ECUACIÓN 10

donde  $r_s$  es el coeficiente de correlación de Spearman,  $D^2$  es el cuadrado de las diferencias entre los rangos de las dos variables y  $N$  es el número de parejas de variables.

El coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ) se rige por las reglas de la correlación simple de Pearson. Sus valores oscilan en una escala de  $-1$  a  $1$ . Si de  $\rho$  es  $0$  significa que no existe correlación entre las variables estudiadas, mientras que los dos extremos denotan la correlación máxima (correlación máxima negativa y correlación máxima positiva respectivamente).

Para evaluar el grado de significancia del coeficiente de Spearman  $\rho$ , se recurre a evaluar el  $P$ -value de la regresión. El  $P$ -value se encuentra entre  $0$  y  $1$ , entre menor sea su magnitud y más próximo esté a  $0$  es posible inferir que la regresión estadística es más significativa que en casos para los cuales este

coeficiente sea mayor. Para efectos del presente trabajo se consideró que existe significancia cuando se presenta un *P-value* menor a 0.05.

### **3. Materiales y Métodos**

En este capítulo se encuentra la información referente a la localización del sitio de estudio, características del sumidero elegido, protocolo de campo, y protocolo de laboratorio. Las fotos tomadas y los cálculos efectuados se encuentran en el anexo 1.

#### **3.1. Localización del sitio de estudio**

Para definir la ubicación del sumidero de trabajo se tuvieron en cuenta diversos criterios tales como: cercanía a la Universidad, seguridad del sector, características del sumidero y magnitud de tráfico vehicular entre otras. Luego de recorrer las vías con mayor tránsito vehicular cerca de la Universidad Javeriana; Calle 45, Carrera Séptima, Avenida Circunvalar, Carrera 13 y Calle 39 se pudo seleccionar los sumideros que estaban mejor calificados según los criterios mencionados anteriormente.

Posteriormente se hizo una inspección más detallada a los potenciales lugares de trabajo en condiciones de lluvia donde pudo evidenciarse el comportamiento y funcionamiento de cada uno de ellos. Se tomó evidencia fotográfica de cada uno de ellos y finalmente se seleccionó un sumidero ubicado en la calle 39 entre la Carrera Séptima y Carrera 13, costado oriente-occidente con coordenadas  $4^{\circ}37'37.66''N$  ,  $74^{\circ} 4'0.50''O$ . En las siguientes imágenes tomadas de Google Maps y Google Earth respectivamente, se muestra el sitio de trabajo indicado con el Punto A.

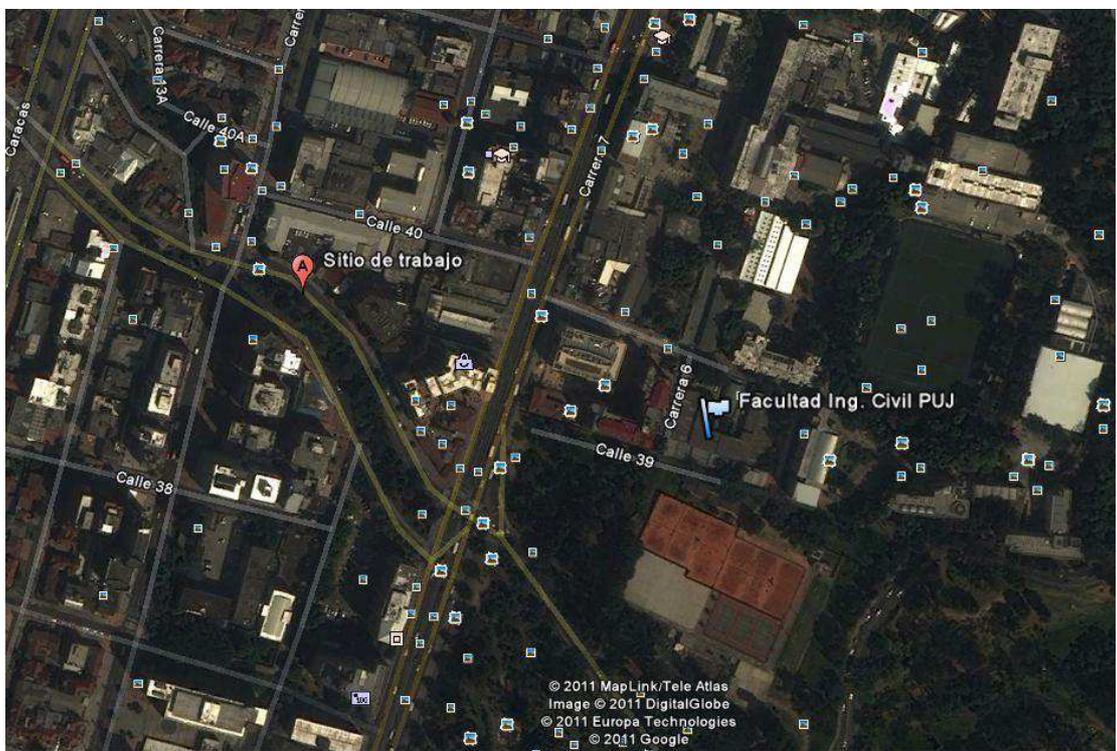
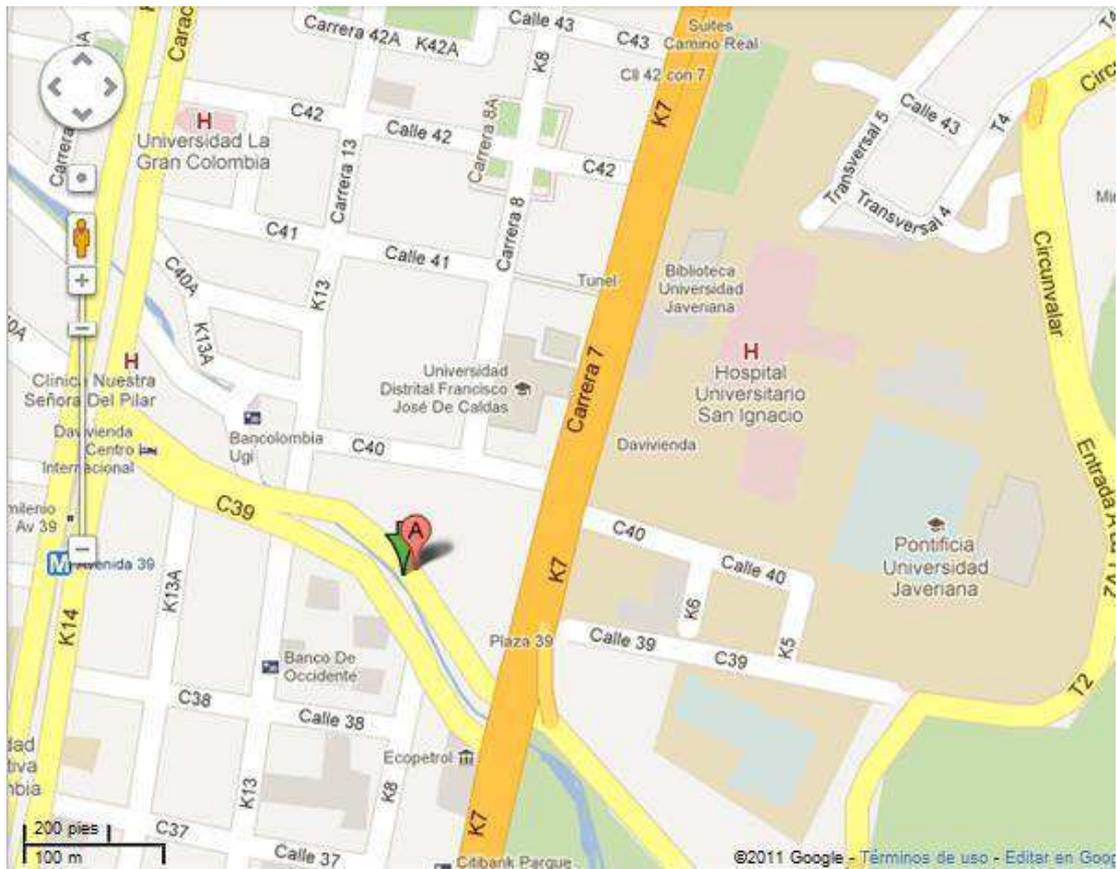
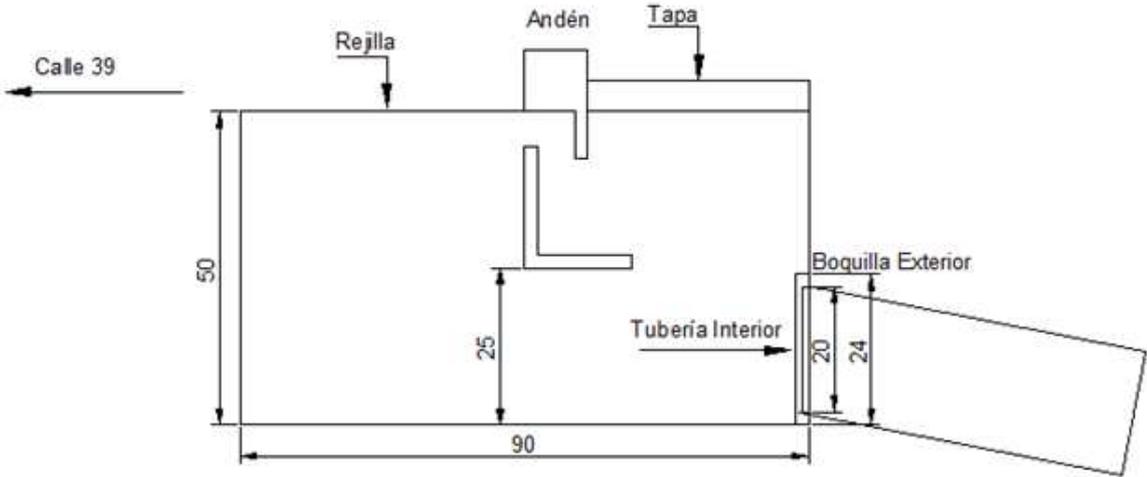
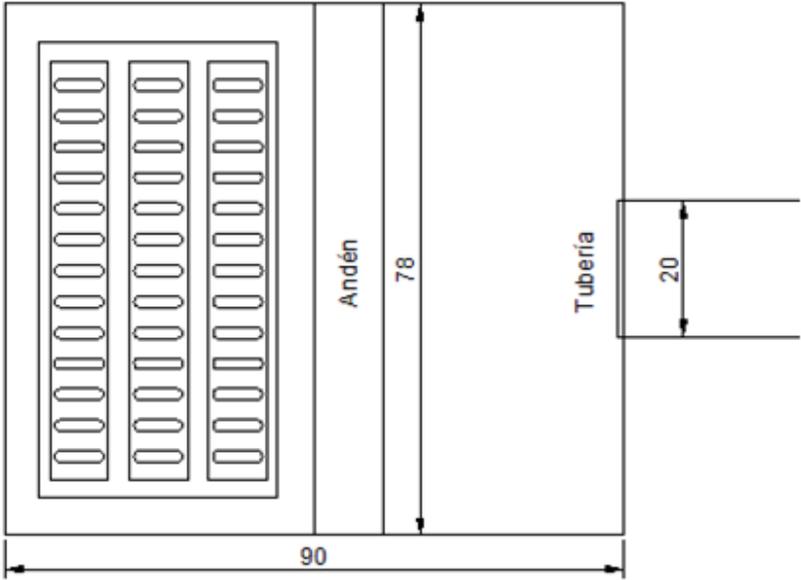


ILUSTRACIÓN 3-1 LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE ESTUDIO

El sumidero seleccionado (ver Ilustración 3-2) descarga el agua lluvia de escorrentía recogida directamente en el Río Arzobispo, por medio de una tubería de gres de 7.5 m de longitud y 20 cm de diámetro interno. Las características geométricas del mismo se presentan en la siguiente ilustración:



PERFIL SUMIDERO



PLANTA SUMIDERO

ILUSTRACIÓN 3-2 ESQUEMA DE CARACTERIZACIÓN DEL SUMIDERO, MEDIDAS EN CM.

### 3.2. Protocolo de campo

En esta sección se consignan los protocolos definidos para la efectucción del trabajo en campo.

#### 3.2.1. Nivelación topográfica

La nivelación topográfica es un método directo que permite determinar distancias verticales entre diferentes puntos de interés del terreno. Es el método más preciso para determinar diferencias de nivel y es uno de los más usados.

Este método se utilizó para hallar la diferencia de alturas entre las bateas de entrada y salida de la tubería de desagüe, con el fin de realizar el cálculo del caudal teórico por medio de Darcy-Weisbach. Para medir la longitud de la tubería se utilizó un decámetro.

Los materiales utilizados fueron: Nivel SOKIA C41, mira de aluminio, trípode, decámetro San Tyau.

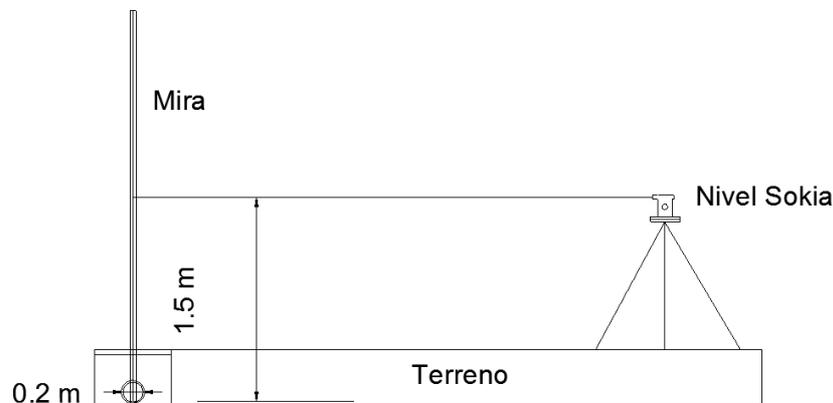
Procedimiento para efectuar la nivelación:

Situar el nivel en un punto de referencia cercano al sumidero y verificar que esté nivelado, luego apoyar la mira sobre la batea de entrada de la tubería (dentro del sumidero), y tomar la lectura de la altura A con el nivel 3 veces (ver Ilustración 3-3). Repetir lo anterior para tomar la lectura sobre la batea de salida (B). Finalmente medir la distancia horizontal entre los puntos de entrada y de salida de la tubería utilizando el decámetro.

Los resultados de la nivelación se encuentran consignados a continuación:

**TABLA 3 RESULTADOS NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA DE LA TUBERÍA**

<b>Diferencia de cota (m)</b>	<b>Longitud de la tubería (m)</b>
1.5	7.5



**ILUSTRACIÓN 3-3 ESQUEMA DE NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA**

### 3.2.2. Mediciones de caudal

Las mediciones se realizaron considerando la estructura del sumidero como un tanque con un caudal de entrada y un caudal de salida. Al taponar la tubería de salida, se obtiene un volumen de agua provocado únicamente por el caudal de entrada. Una vez caracterizadas las dimensiones del recipiente (ver Ilustración 3-2), se logró establecer la variación del volumen almacenado como una función de la altura de la lámina de agua (ver Tabla 4). Esto se realizó con el fin de facilitar la medición en campo del volumen almacenado en la estructura del sumidero.

Para el aforo de caudales se utilizaron: una regla laminada (fijada a una pared del sumidero) (ver Ilustración 3-4), un tapón impermeable y una grabadora de voz.



ILUSTRACIÓN 3-4 MATERIALES PARA AFORO DE CAUDAL

Para registrar el tiempo en el que dicho volumen variaba durante un evento lluvioso se utilizó una grabadora de voz, la cual llevó tanto el registro del tiempo inicial y final de los aforos, como el recuento del tiempo total del evento. Con esto la construcción de los hidrogramas fue más fácil y precisa.

Para efectuar estas mediciones se estableció el siguiente protocolo:

Colocar el tapón y asegurarse que la lámina de agua esté en nivel 5cm. Realizar las lecturas de altura de nivel hasta que ésta llegue a un nivel de 25 cm de acuerdo a la Tabla 5: Si el caudal es muy pequeño, realizar las lecturas cada centímetro, si es medio realizar lecturas cada 5 centímetros, y si es alto realizar lectura hasta los 25 centímetros. Cada lectura se registra en la grabación de voz.

Cuando la lámina alcance los 25 cm, sacar el tapón de la tubería y esperar a que el sumidero se vacíe hasta llegar al nivel 5 cm o se estabilice en un nivel igual o superior a este. Inmediatamente se procede a colocar el tapón

nuevamente. Se deben registrar el nivel de descarga y la lectura del nivel inicial.

H (cm)	V (litros)
5	35
6	42
7	49
8	56
9	63
10	70
11	77
12	84
13	91
14	98
15	105
16	112
17	119
18	126
19	133
20	140
21	147
22	154
23	161
24	168
25	176

**TABLA 4 RELACIÓN ALTURA-VOLUMEN**

En ciertas ocasiones es posible que el caudal sea tan grande que no se pueda aforar volumétricamente (ver Ilustración 3-5). Esto sucede cuando la lámina de agua está por encima de la clave de la tubería y el sistema comienza a funcionar a presión. En este caso únicamente se registra en la grabación que el nivel está al máximo.

**TABLA 5 CRITERIOS PARA INTERVALOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL**

Caudal	$\Delta h$ (cm)
Alto	20
Medio	5
Bajo	1



**ILUSTRACIÓN 3-5 SISTEMA FUNCIONANDO A PRESIÓN**

Los aforos se realizaron por encima del nivel 5 cm para lograr una mayor precisión, debido a que el fondo del sumidero presentaba algunas irregularidades.

Cuando el caudal era demasiado grande, resultaba imposible realizar el aforo de manera volumétrica, entonces se optó por asumir que el sumidero estaba en su capacidad máxima, la cual no pudo ser determinada experimentalmente, pues la ubicación de la tubería no se prestaba para realizar aforos volumétricos debido al potencial peligro de caer al río Arzobispo.

La capacidad máxima se intentó determinar teóricamente con la ecuación de Darcy-Weisbach ya que el flujo era a presión. Al realizar este ejercicio resultaron caudales hasta 5 veces mayores que el máximo registrado de manera mencionada anteriormente, y se pensó que utilizarlos afectaría la precisión de los aforos volumétricos. Por lo mencionado anteriormente se decidió que cuando el sumidero comenzara a funcionar a presión, se alcanzaba un valor pico constante hasta que nuevamente fuera posible aforar volumétricamente, dicho pico se asumió como el máximo valor de caudal aforado de manera volumétrica registrado en todos los eventos.

### **3.2.3. Toma de muestras**

Para realizar el muestreo se utilizó una nevera de icopor, 40 frascos de plástico rotulados de 1 a 40, hielo y una grabadora de voz para llevar el registro de tiempo en el que cada muestra fue tomada, lo cual facilitó la posterior construcción de los polutogramas asociados a cada evento.

En la toma de muestras se estableció el siguiente protocolo:

Purgar el frasco con la misma agua de la vía, y tomar la muestra en el punto que indica la Ilustración 3-6, justo en la entrada debajo de la rejilla y registrar en la grabación el número de frasco utilizado. Luego almacenar inmediatamente la muestra en la nevera con hielo para preservarla por debajo de los 4 grados Celsius. Al finalizar el muestreo, se lleva la nevera con las muestras al laboratorio para su posterior análisis que debe realizarse lo más pronto posible.

El intervalo de tiempo el muestreo se decide dependiendo del caudal de la escorrentía, teniendo como criterio que entre menor es el mismo, se transporta menos masa de contaminante y no es necesario tomar muestras de manera continua. Por lo contrario si el caudal es de medio ó alto se realizan muestreos cada 1-5 minutos.



**ILUSTRACIÓN 3-6 IMAGEN SUPERIOR: PRESERVACIÓN DE LAS MUESTRAS DURANTE EL MUESTREO, IMAGEN INFERIOR: EJEMPLO DE TOMA DE UNA MUESTRA**

### **3.3. Protocolo de laboratorio**

En este apartado está consignada la manera en que los ensayos de laboratorio fueron llevados a cabo. Para obtener unos resultados confiables es muy importante seguir el protocolo establecido a continuación.

#### **3.3.1. Ensayos de turbiedad**

Para efectuar los ensayos de turbiedad se utilizó un turbidímetro de mesa marca ORBECO-HELLIGE (ver Ilustración 3-7), celdas estándar de calibración de 0 NTU, 100 NTU, 200 NTU y 400 NTU, 6 celdas de muestreo y toallas de papel.



**ILUSTRACIÓN 3-7 TURBIDÍMETRO DE MESA**

El procedimiento del ensayo se describe a continuación:

Encender el turbidímetro y esperar 30 minutos, por recomendación de fábrica. Ajustar la perilla central para lecturas entre 0-999 NTU debido a que las muestras se encuentran en éste rango. Luego de realizar lo anterior se procede a verificar con la celda de 0 NTU la lectura, y si es necesario, ajustar con la perilla Zero. Posteriormente se debe ajustar la perilla Standarize con las celdas de calibración de 100, 200 o 400 NTU de acuerdo a la magnitud de la turbiedad de la muestra.

Para las lecturas se debe agitar la muestra, luego introducirla en el lector del turbidímetro y tomar la medición más alta. Luego volver a colocar la celda de 0 NTU y verificar que la medida sea igual a 0 NTU. Realizar las mediciones 3 veces para cada muestra.

### 3.3.2. Ensayos de SST

Para realizar los ensayos de SST se utilizaron crisoles de porcelana de 24mm de diámetro, filtros de fibra de vidrio Whatman de 24 mm de diámetro, erlenmeyer con desprendimiento lateral, bomba de vacío, probeta de 50 ml, pinzas metálicas, desecador de vidrio, horno, balanza analítica con una precisión de  $\pm 0.0001$  g marca OHAUS Corp



ILUSTRACIÓN 3-8 MATERIALES PARA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE SST

El procedimiento de la realización de los ensayos fue el siguiente:

Colocar los filtros en los crisoles y realizar un lavado de los mismos con agua destilada. Luego se someten a secamiento en horno a  $103^{\circ}$ -  $105^{\circ}\text{C}$  durante una hora. Una vez pasada la hora, extraer con pinzas los crisoles del horno y depositarlos hasta su utilización, en un desecador de vidrio. También con las pinzas, pasar cada cápsula a la balanza analítica y obtener su peso A en gramos, con cuatro cifras decimales. Para el filtrado, mezclar apropiadamente la muestra de agua y medir en una probeta de 10 a 40 ml, para agregarlos al crisol poco a poco hasta pasar toda la muestra. Una vez filtrada la muestra, con pinzas colocar el crisol en el horno a  $103^{\circ}$ -  $105^{\circ}\text{C}$  durante una hora, al término de este tiempo, extraer el crisol del horno utilizando las pinzas, y colocarlo en el desecador de vidrio, cuando esté frío pesar en la balanza analítica para obtener el peso B en gramos.

Los sólidos se calculan con la siguiente ecuación:

$$C = \left( \frac{B - A}{V} \right)$$

ECUACIÓN 3-1

donde C es la concentración de SST en g/ml, si se desea obtener en mg/l, se debe multiplicar por 1'000.000. Para la realización de los ensayos de SST, las

muestras debieron ser preservadas a menos de 4°C durante un tiempo máximo de 3 días desde la toma hasta el análisis de las mismas.

### 3.4. Herramienta Computacional R

R es un lenguaje de programación para análisis estadístico y gráfico, que provee una gran variedad de técnicas estadísticas (modelamiento lineal y no lineal, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series temporales, clasificación, etc.) y gráficas.

Además es un software libre (disponible de manera gratuita) bajo los términos de Free Software Foundation's GNU General Public License en forma de código fuente. Puede ser corrido en plataformas UNIX, Windows y MacOS. Su instalación es sencilla y cuenta con un amplio soporte en línea.

Para el análisis estadístico de este trabajo se utilizaron las librerías *ade4* y *pls* (ver Tabla 6), las cuales fueron las herramientas para realizar PCA y la regresión PLS respectivamente. Estas librerías también están disponibles en línea de manera gratuita.

TABLA 6 LIBRERIAS DE R UTILIZADAS

Librería	Descripción
<b>ade4</b>	Este paquete fue desarrollado en el Biometry and Evolutionary Biology Lab (UMR 5558) –University Lyon. Contiene funciones de análisis de datos para analizar información ecológica y ambiental en el marco de métodos exploratorios Euclidianos, de ahí el nombre de <i>ade4</i> . Esta librería se caracteriza por: (i) la implementación de funciones estadísticas y gráficas, (ii) la disponibilidad de datos numéricos, (iii) la inclusión de referencias bibliográficas.
<b>pls</b>	Este paquete fue desarrollado por Ron Wehrens y Bjørn-Helge Mevik e implementa la regresión PLS y regresión PCR. (i) Contiene algoritmos como: Orthogonal Scores PLS, Kernel PLS, Wide Kernel PLS, Simpls. (ii) Soporta modelos multirespuesta (aka PLS2). (iii) Validación cruzada flexible. (iv) Funciones de extracción para coeficientes, resultados y pesos de los coeficientes (v) Estima MSEP, RMSEP y R <sup>2</sup>

Tomado de: <http://cran.r-project.org/>

A continuación se nombran las principales funciones de R utilizadas en la realización de este trabajo:

**TABLA 7 FUNCIONES PRINCIPALES UTILIZADAS EN R PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Función	Descripción
<b>RMSEP</b>	Calcula el RMSEP del modelo
<b>Plsr</b>	Realiza la regresión PLS
<b>dudi.pca</b>	Análisis PCA
<b>kmeans</b>	Realiza clústeres por k-means
<b>Nls</b>	Realiza regresión por mínimos cuadrados no lineales
<b>approx</b>	Función de interpolación
<b>cor.test</b>	Realiza prueba de correlación entre 2 vectores
<b>Plot,</b>	Función para graficar X-Y

## 4. Resultados y Discusión

En esta sección se presentan las curvas  $M(V)$ , hidrogramas y polutogramas construidos a partir de los ocho eventos estudiados. Adicionalmente contiene los resultados y discusiones llevadas a cabo con base en la relación Turbiedad- $SST$ , el análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés), la correlación de Spearman, el modelo propuesto por Gupta y Saul (1996) y el modelo PLS elaborado a partir del análisis de las curvas  $M(V)$  de acuerdo con lo propuesto por Bertrand-Krawjeski et al. (1998). Finalmente, se plantea una propuesta de aplicación de los resultados obtenidos, analizando una serie de eventos no monitoreados. Los cálculos y los programas de R se encuentran en el anexo 2.

En la siguiente tabla se encuentran la fecha y hora de ocurrencia de cada lluvia:

**TABLA 8 FECHA Y HORA DE LOS EVENTOS**

Evento	Fecha-Hora
1	04/10/2011 12:30:00
2	04/10/2011 14:10:00
3	06/10/2011 12:10:00
4	11/10/2011 11:20:00
5	12/10/2011 14:30:00
6	08/11/2011 12:20:00
7	10/11/2011 13:30:00
8	10/11/2011 16:20:00

En las ilustraciones 4-1 y 4-2 están los hietogramas de precipitación para cada uno de los 8 eventos.

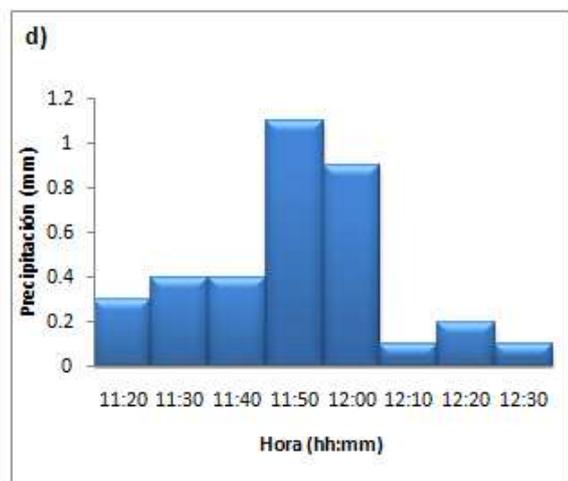
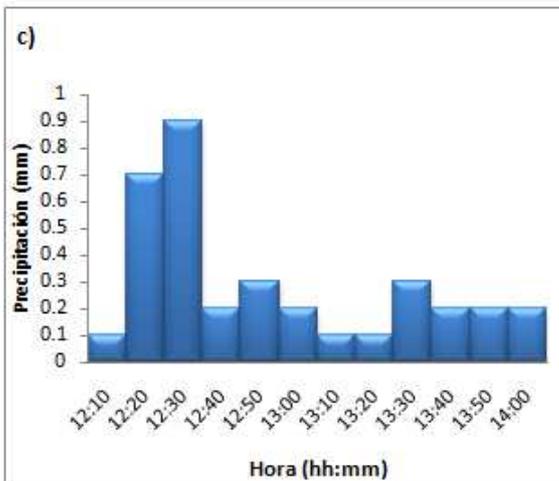
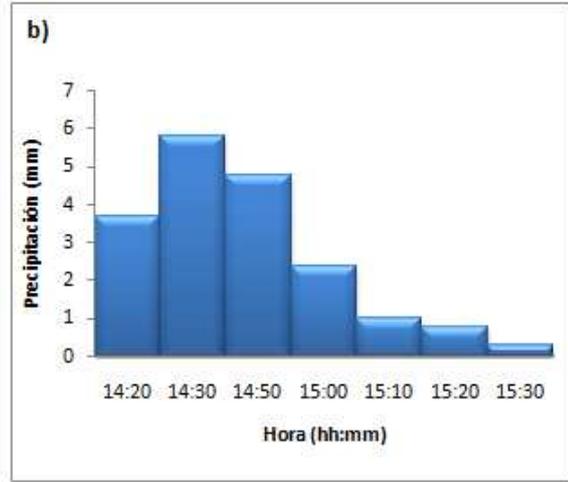
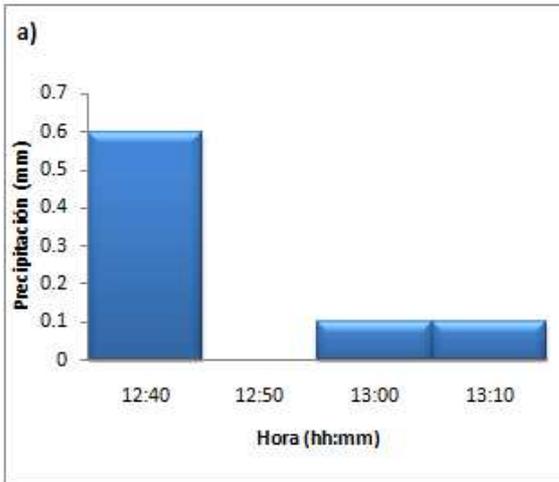
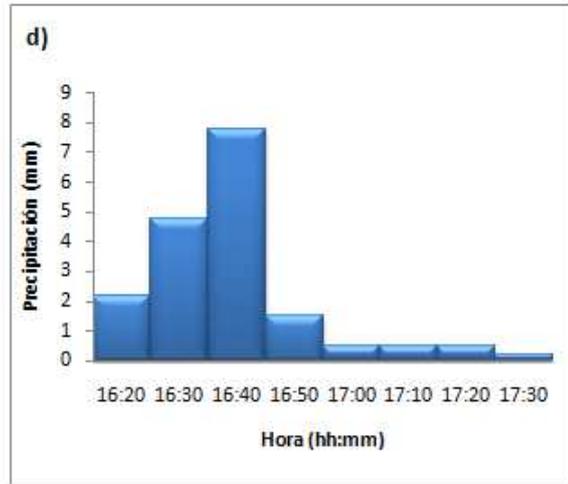
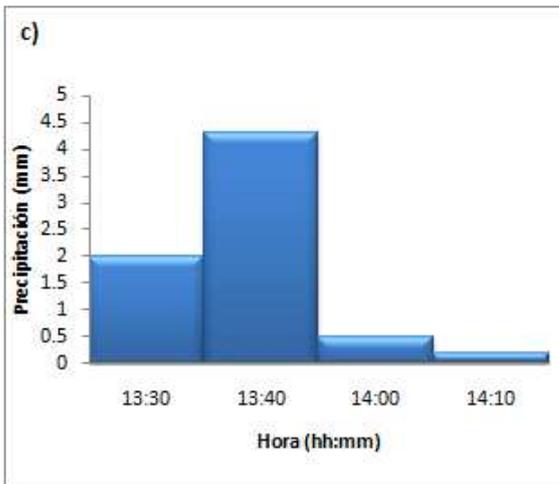
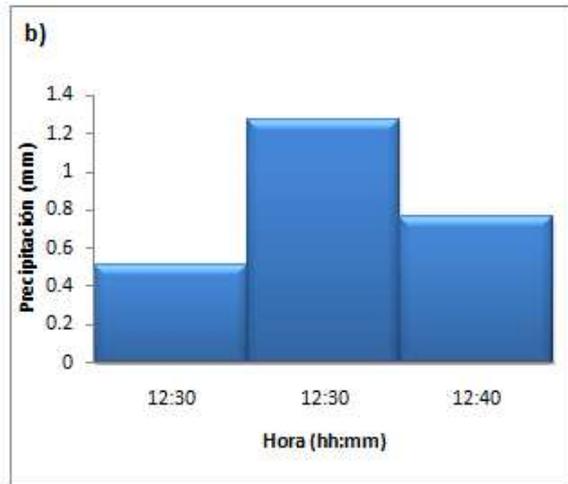
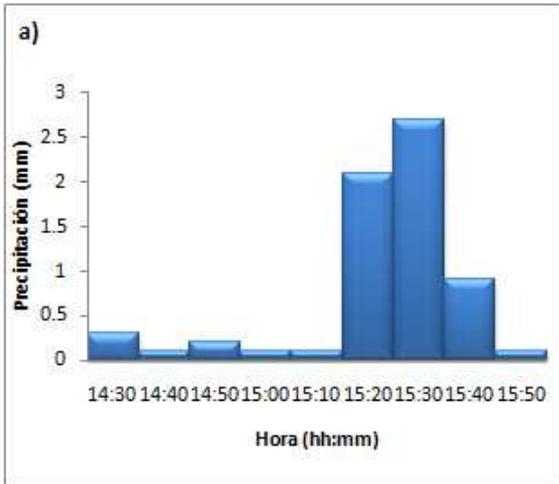


ILUSTRACIÓN 4-1 HIETOGRA MAS: EV 1-4 de octubre (a) EV 2-4 de octubre (b) EV 3-6 de octubre (c) EV 4-11 de octubre (d)



**ILUSTRACIÓN 4-2 HIETOGRA MAS: EV 5-12 de octubre(a) EV 6-8 de noviembre (b) EV 7-10 de noviembre (c) EV 8-10 de noviembre (d)**

#### 4.1. Relación Turbiedad-SST

Inicialmente se pretendió encontrar una relación turbiedad-SST, con el fin de obtener las concentraciones de estos últimos, a partir de mediciones de turbiedad, y así reducir el número de ensayos de SST, puesto que el límite de ensayos a realizar acordados con la Universidad fue de 120.

A continuación se presenta un gráfico de dispersión de todas las mediciones efectuadas durante el presente trabajo, el cual permite observar que no hay una tendencia clara y concluyente que establezca una relación suficientemente fiable para el fin mencionado anteriormente.

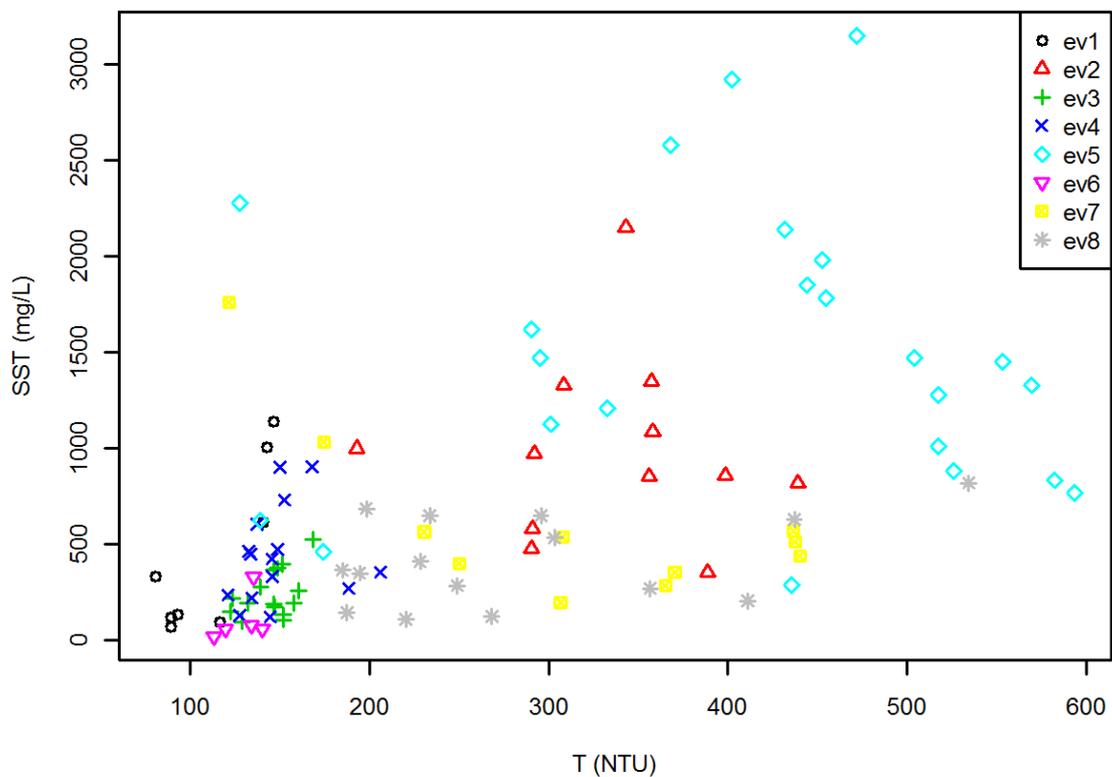


ILUSTRACIÓN 4-3 GRÁFICO DE TURBIEDAD-SST (ev: EVENTO)

Se intentó realizar un análisis de Clústeres, agrupando los puntos de la gráfica anterior en cinco grupos como se muestra en la siguiente gráfica.

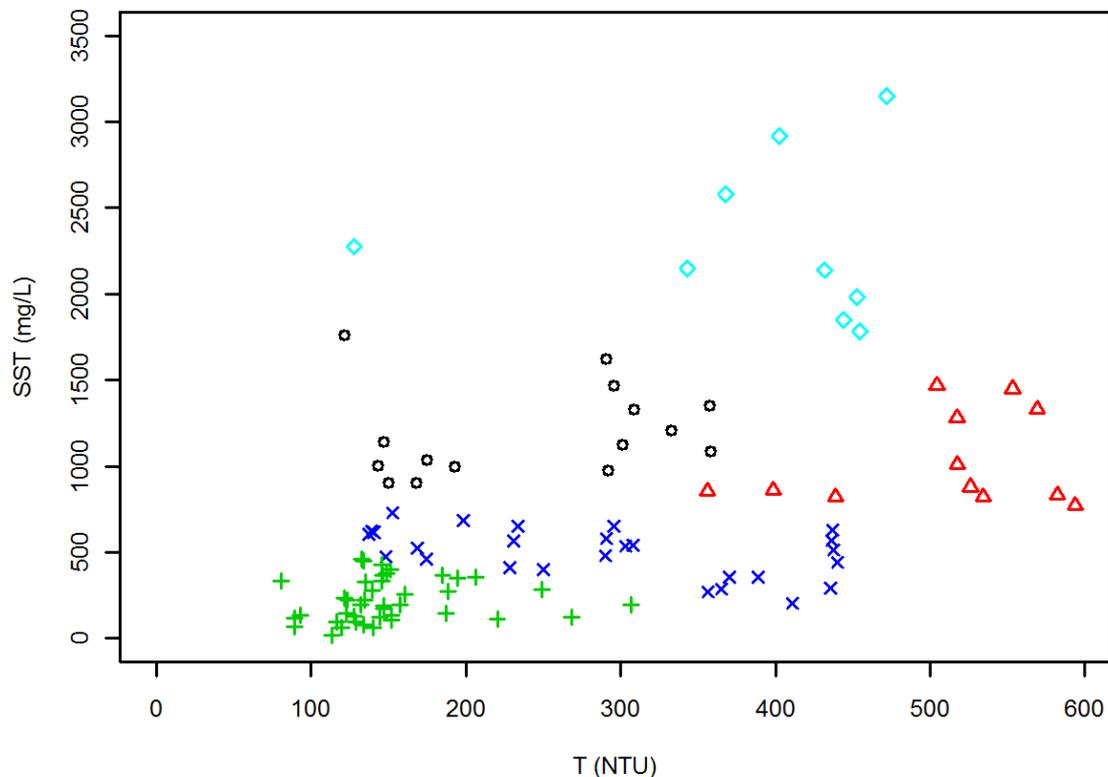


ILUSTRACIÓN 4-4 AGRUPACIÓN EN CLÚSTERES DE DATOS DE TURBIEDAD-SST

La Ilustración 4-4 muestra que no es posible evidenciar una distribución definida en la agrupación de los clústeres, que sugiera alguna alternativa para trazar líneas de tendencia. Por lo tanto se optó por descartar la búsqueda de una relación Turbiedad-SST, y se continuó utilizando únicamente las mediciones directas de SST, sin utilizar réplicas por muestra.

#### **4.2. Hidrogramas, Polutogramas y Análisis de curvas M(V) mediante la definición de Bertrand-Krajewski et al. (1998).**

Este análisis se realizará con los datos obtenidos de 8 eventos lluviosos, los cuales ocurrieron entre los meses de octubre y noviembre del año 2011. Para cada uno de estos se construyó un hidrograma, un polutograma y una curva M(V). El resumen de los parámetros hidrológicos (Periodo seco antecedente  $ADWP$ , Profundidad de lluvia  $P$ , Intensidad media  $I_m$ , Intensidad máxima  $I_{max}$ , Duración  $D$  y los parámetros  $a$  y  $b$  asociados a cada evento se encuentra consignado en la Tabla 12.

### 4.2.1. Análisis de hidrogramas y polutogramas

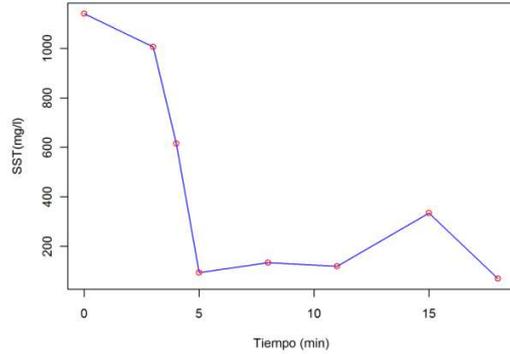
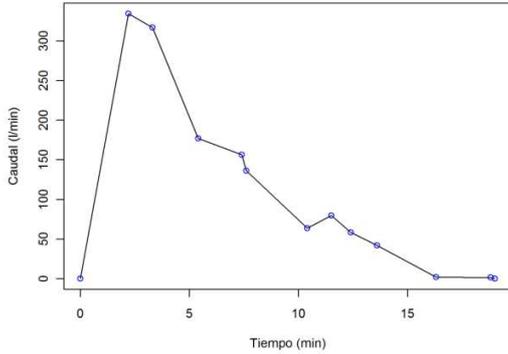
En las ilustraciones 4-5 y 4-6 se encuentran los hidrogramas y los polutogramas contruidos para cada evento, a la izquierda y la derecha respectivamente. Más adelante se presenta la discusión de estos resultados.

En la Tabla 9 se encuentra un breve resumen de los hidrogramas, polutogramas y la hidrología asociados a los eventos.  $SST_{max}$  y  $SST_m$  son las concentraciones de  $SST$  máxima y media del polutograma en mg/l, respectivamente.  $Q_{max}$  es el caudal pico del hidrograma en l/min,  $Vol_{total}$  es el volumen total de agua del evento en litros,  $Masa_{total}$  es la masa total de  $SST$  transportará durante el evento en kg.

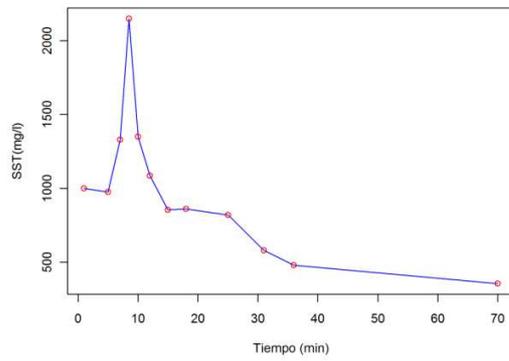
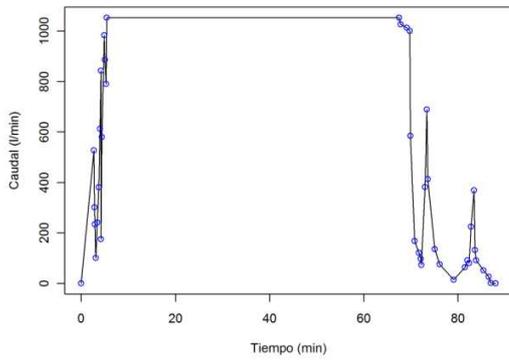
**TABLA 9 RESUMEN DE POLUTOGRAMAS, HIDROGRAMAS E HIDROLOGÍA DE CADA EVENTO  $SST_{MAX}$ ,  $SST_M$ ,  $SST$  EN mg/L,  $Q_{MAX}$  L/MIN,  $VOL_{TOTAL}$  EN LITROS,  $MASA_{TOTAL}$  KG, D EN HORAS, INTENSIDADES EN mm/H**

Evento	$SST_{max}$	$Q_{max}$	$SST_m$	$Vol_{total}$	$Masa_{total}$	ADWP	P	$I_m$	$I_{max}$	D
1	1140	334.3	439.38	1932.3	0.7	251.50	0.80	1.20	3.60	0.67
2	2150	1053	1044.09	68891.6	49.0	0.83	18.80	16.11	34.80	1.42
3	525	31.9	253.54	926.1	0.2	4.50	3.50	1.75	5.40	1.80
4	905	32.4	441.25	744.1	0.4	7.83	3.50	2.63	6.60	1.17
5	3150	1053	1500.37	28775.7	45.3	6.6	6.6	4.4	16.2	1.33
6	330	18.3	110.00	158.5	0.0	40.12	2.55	5.08	7.62	0.5
7	1760	155.18	555.00	1932.6	1.1	21.00	7.00	10.50	25.80	0.67
8	820	1053	415.67	7073.4	4.6	2.0	18	13.5	46.8	1.17

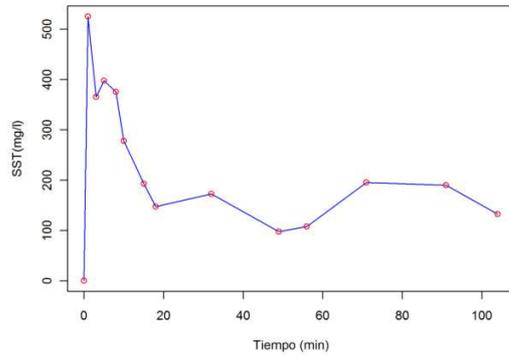
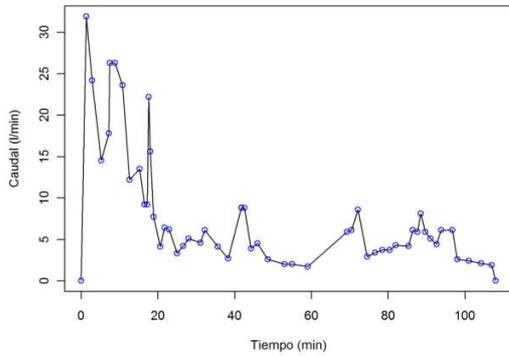
**Evento 1- 4 de octubre, P: 0.8 mm, D: 0.67h, ADWP: 251 h**



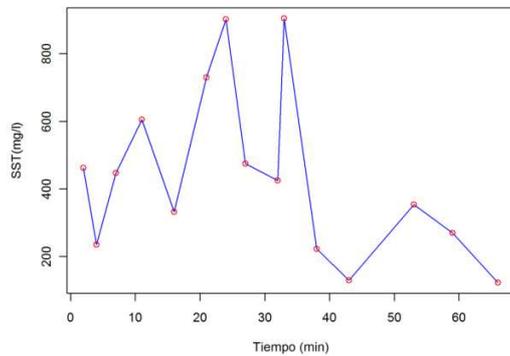
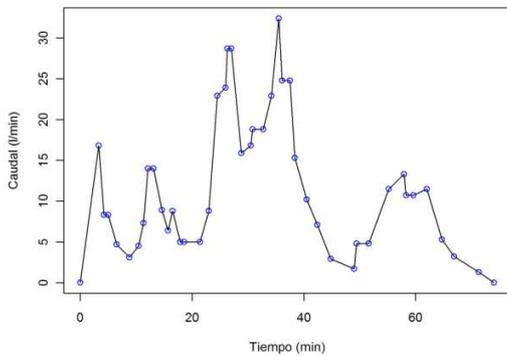
**Evento 2-4 de octubre, P: 18.8 mm, D: 1.42 h, ADWP: 0.83 h**



**3-6 de octubre, P: 3.5 mm, D: 1.8 h, ADWP: 4.5 h**

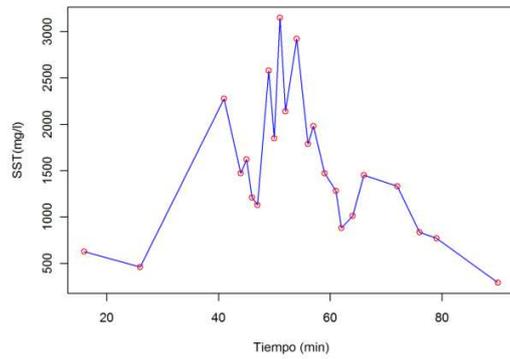
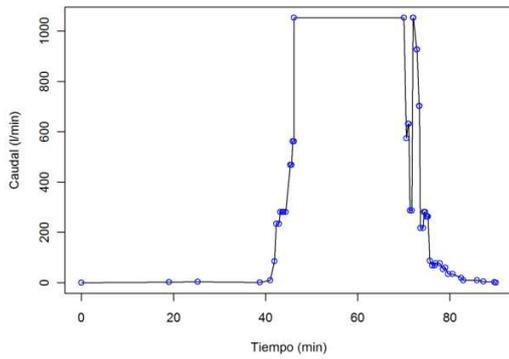


**4- 11 de octubre, P: 3.5 mm, D: 1.17 h, ADWP: 7.83 h**

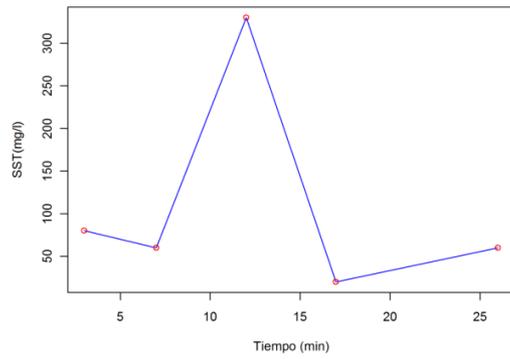
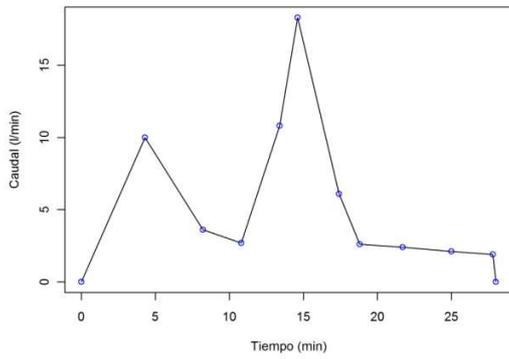


**ILUSTRACIÓN 4-5 HIDROGRAMAS (IZQUIERDA) Y POLUTOGRAMAS ( DERECHA) PARA LOS EVENTOS 1 AL 4. (P: ALTURA TOTAL PRECIPITADA ; D: DURACIÓN DEL EVENTO, ADWP: PERIODO SECO ANTECEDENTE)**

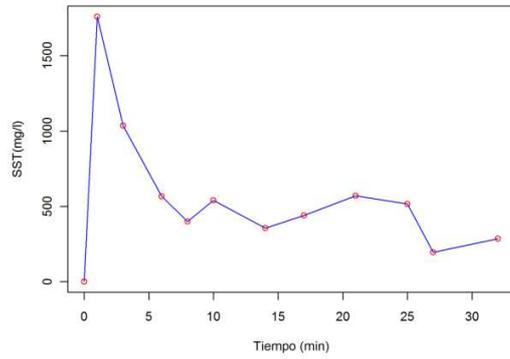
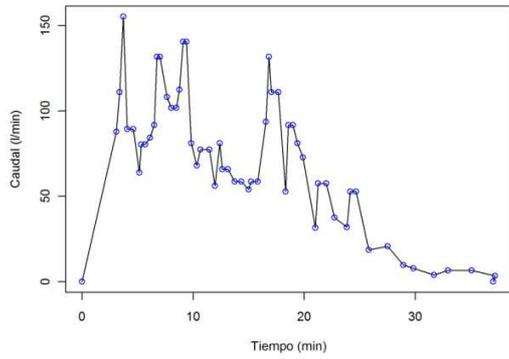
**Evento 5- 12 de octubre, P: 6.6 mm, D: 1.33 h, ADWP: 6 h**



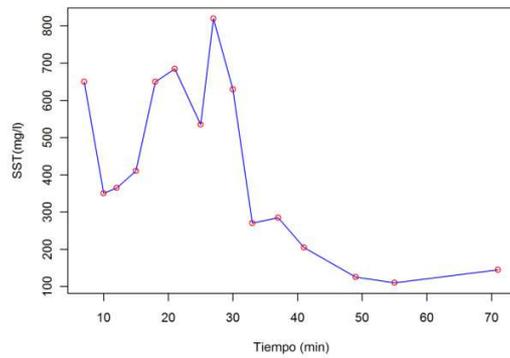
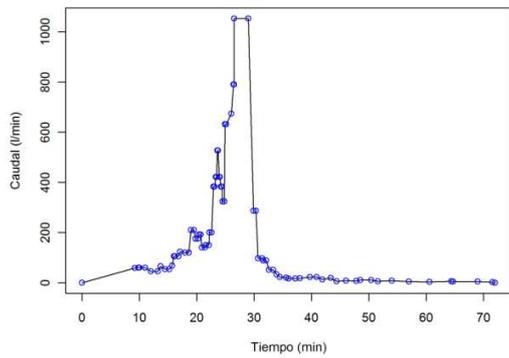
**Evento 6- 8 de noviembre, P: 2.55 mm, D: 0.5 h, ADWP: 40.12 h**



**Evento 7- 10 de noviembre, P: 7 mm, D: 0.67 h, ADWP: 21 h**



**Evento 8- 10 de noviembre, P: 18 mm, D: 1.17 h, ADWP: 2 h**



**ILUSTRACIÓN 4-6 HIDROGRAMAS (IZQUIERDA) Y POLUTOGRAMAS (DERECHA) PARA LOS EVENTOS 5 AL 8. (P:ALTIMETRA TOTAL PRECIPITADA ; D: DURACIÓN DEL EVENTO, ADWP: PERIODO SECO ANTERECEDENTE)**

Zhang *et al.* (2010) establecieron que la concentración de *SST* en la escorrentía está en función del tipo de zona, teniendo concentraciones medias  $SST_m$  para la zona residencial entre 480-724 mg/l y para la zona comercial 808-1343 mg/l. Las  $SST_m$  encontradas en la escorrentía de la avenida 39, la cual se encuentra en una zona que se puede clasificar entre residencial y comercial, están dentro de estos rangos: entre 110 y 1500 mg/l.

Al observar los hidrogramas y polutogramas de cada evento, se encuentra una aparente relación entre éstos; el comportamiento del primero parece influenciar al del segundo. Una muestra de ello es la ocurrencia de los picos de concentración de *SST*, los cuales se presentan casi al mismo tiempo en que ocurren los picos de caudal en los hidrogramas (ver Ilustraciones 4-5 y 4-6). Adicionalmente, los eventos con picos más altos de caudal ( $Q_{max}$ ) presentan mayores valores máximos de concentraciones de *SST* ( $SST_{max}$ ), lo que sugiere que los eventos con *P* e intensidades  $I_{max}$  e  $I_m$  más altos son los que pueden llegar a presentar mayores niveles de concentración de *SST* y por lo tanto un mayor transporte de masa contaminante (Ver Tabla 9).

El evento 1, el cual presentó la menor *P* (0.8 mm) y el mayor *ADWP* (251 horas), presentó una concentración pico de 1140 mg/l, lo cual conlleva a pensar que el *ADWP* también puede estar relacionado con  $SST_{max}$ .

Para comprobar lo anterior, se realizó una prueba de correlación de Spearman (ver Tablas 10 y 11) para determinar si existe una correlación entre la hidrología y el comportamiento de los hidrogramas y polutogramas. Las variables utilizadas para la hidrología fueron: *P*, *D*,  $I_{max}$ ,  $I_m$  Y *ADWP*. Para los hidrogramas fueron  $Q_{max}$ , y  $Vol_{total}$ , y para los polutogramas fueron  $SST_{máx}$ ,  $SST_m$  y  $Masa_{total}$ .

**TABLA 10 VALORES DE LA CORRELACIÓN DE SPEARMAN ENTRE LA HIDROLOGIA, LOS HIDROGRAMAS Y LOS POLUTOGRAMAS**

	<b>SST<sub>max</sub></b>	<b>SST<sub>m</sub></b>	<b>Q<sub>max</sub></b>	<b>Vol<sub>total</sub></b>	<b>Masa<sub>total</sub></b>
<b>SST<sub>max</sub></b>	1.00	0.98	0.73	0.79	0.83
<b>SST<sub>m</sub></b>	0.98	1.00	0.68	0.74	0.81
<b>Q<sub>max</sub></b>	0.73	0.68	1.00	0.93	0.95
<b>Vol<sub>total</sub></b>	0.79	0.74	0.93	1.00	0.98
<b>Masa<sub>total</sub></b>	0.83	0.81	0.95	0.98	1.00
<b>ADWP</b>	-0.19	-0.26	-0.51	-0.62	-0.57
<b>P</b>	0.46	0.52	0.65	0.78	0.78
<b>I<sub>m</sub></b>	0.21	0.26	0.44	0.55	0.57
<b>I<sub>max</sub></b>	0.29	0.33	0.59	0.64	0.67
<b>D</b>	0.27	0.31	0.33	0.47	0.39

**TABLA 11 P-VALUE PARA LA CORRELACIÓN DE SPEARMAN (TABLA 10)**

	<b>SST<sub>max</sub></b>	<b>SST<sub>m</sub></b>	<b>Q<sub>max</sub></b>	<b>Vol<sub>total</sub></b>	<b>Masa<sub>total</sub></b>
<b>SST<sub>max</sub></b>	1.00	<0.01	0.04	0.03	0.02
<b>SST<sub>m</sub></b>	<0.01	1.00	0.06	0.05	0.02
<b>Q<sub>max</sub></b>	0.04	0.06	1.00	<0.01	<0.01
<b>Vol<sub>total</sub></b>	0.03	0.05	<0.01	1.00	<0.01
<b>Masa<sub>total</sub></b>	0.02	0.02	<0.01	0.00	1.00
<b>ADWP</b>	0.66	0.54	0.19	0.11	0.15
<b>P</b>	0.26	0.19	0.08	0.02	0.02
<b>I<sub>m</sub></b>	0.62	0.54	0.28	0.17	0.15
<b>I<sub>max</sub></b>	0.50	0.43	0.13	0.10	0.08
<b>D</b>	0.53	0.45	0.42	0.24	0.35

Las tablas presentadas anteriormente contienen los valores de correlación  $\rho$  y su respectivo  $p$ -value, para la prueba de Spearman entre las variables mencionadas anteriormente. Para poder establecer que existe una correlación confiable (más del 95%), el  $p$ -value ligado a esta debe ser menor a 0.05.

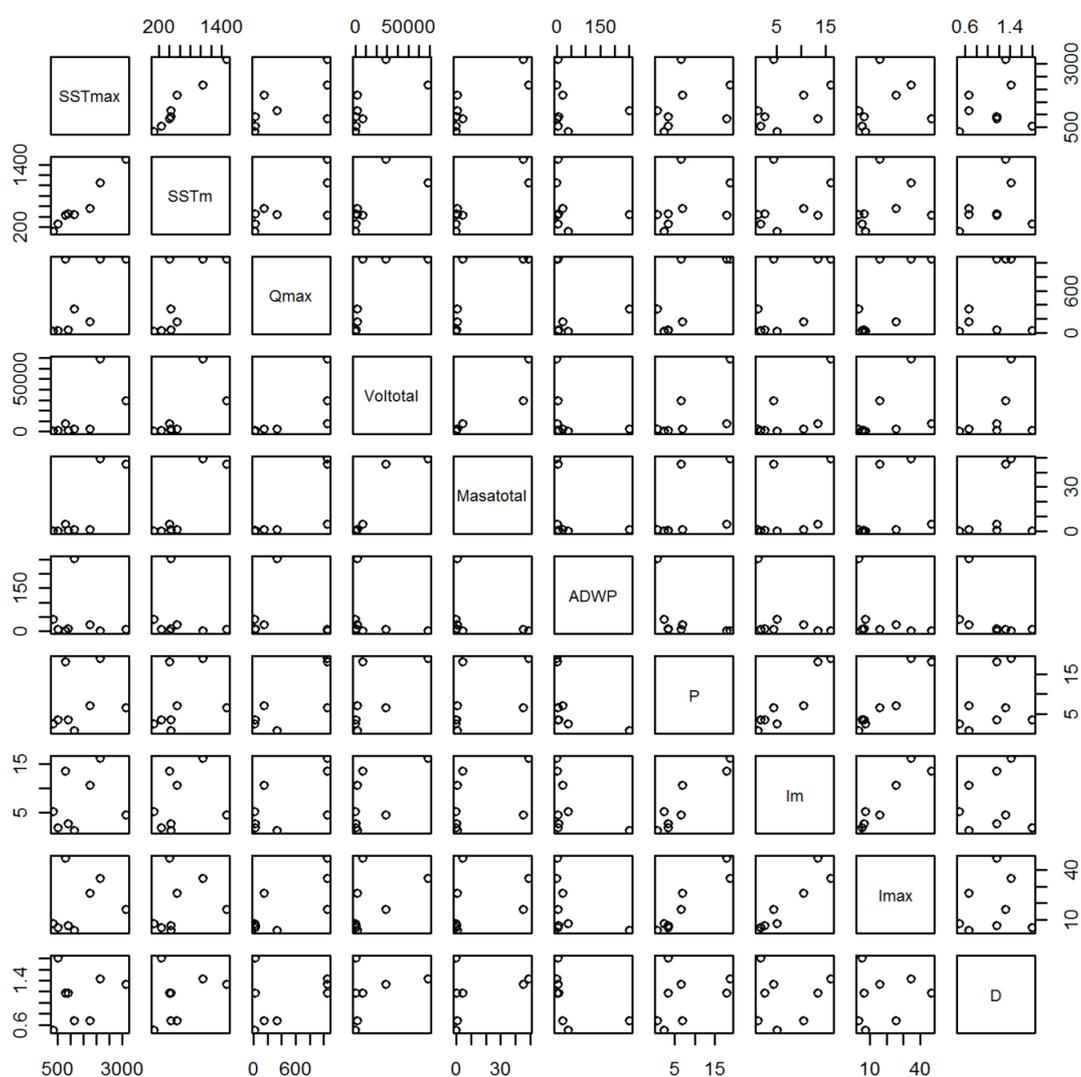
De estos resultados se puede concluir que  $P$  es la única variable que está correlacionada positivamente con  $Vol_{total}$  ( $\rho$ : 0.78 con  $p$ -value: 0.02) y con  $Masa_{total}$  ( $\rho$ : 0.78 con  $p$ -value: 0.02). El resto de las variables hidrológicas no parecen estar relacionadas ni con los hidrogramas y ni con polutogramas.

A pesar de esto, se confirma la relación mencionada anteriormente entre los hidrogramas y los polutogramas. Por ejemplo la  $SST_{max}$  está positivamente correlacionada con  $Q_{max}$  ( $\rho$ : 0.73 con  $p$ -value: 0.04) y con  $Vol_{total}$  ( $\rho$ : 0.79 con  $p$ -value: 0.03). También existe una correlación positiva de  $SST_m$  con  $Vol_{total}$  ( $\rho$ : 0.74 con  $p$ -value: 0.05), y  $Q_{max}$  ( $\rho$ : 0.68 con  $p$ -value: 0.06).

Adicionalmente, la masa total de SST transportada en un evento  $Masa_{total}$  está altamente correlacionada con  $Q_{max}$  ( $\rho$ : 0.95 con  $p$ -value: 0.0002) y  $Vol_{total}$  ( $\rho$ : 0.98 con  $p$ -value: 0.0004).

Lo anterior quiere decir que aguaceros con caudales de escorrentía altos presentan concentraciones elevadas de SST. Esto podría deberse a que la fuerza de arrastre y transporte de contaminantes sobre la superficie están relacionados con la magnitud del caudal.

La siguiente ilustración contiene la representación gráfica de las correlaciones entre las variables analizadas.

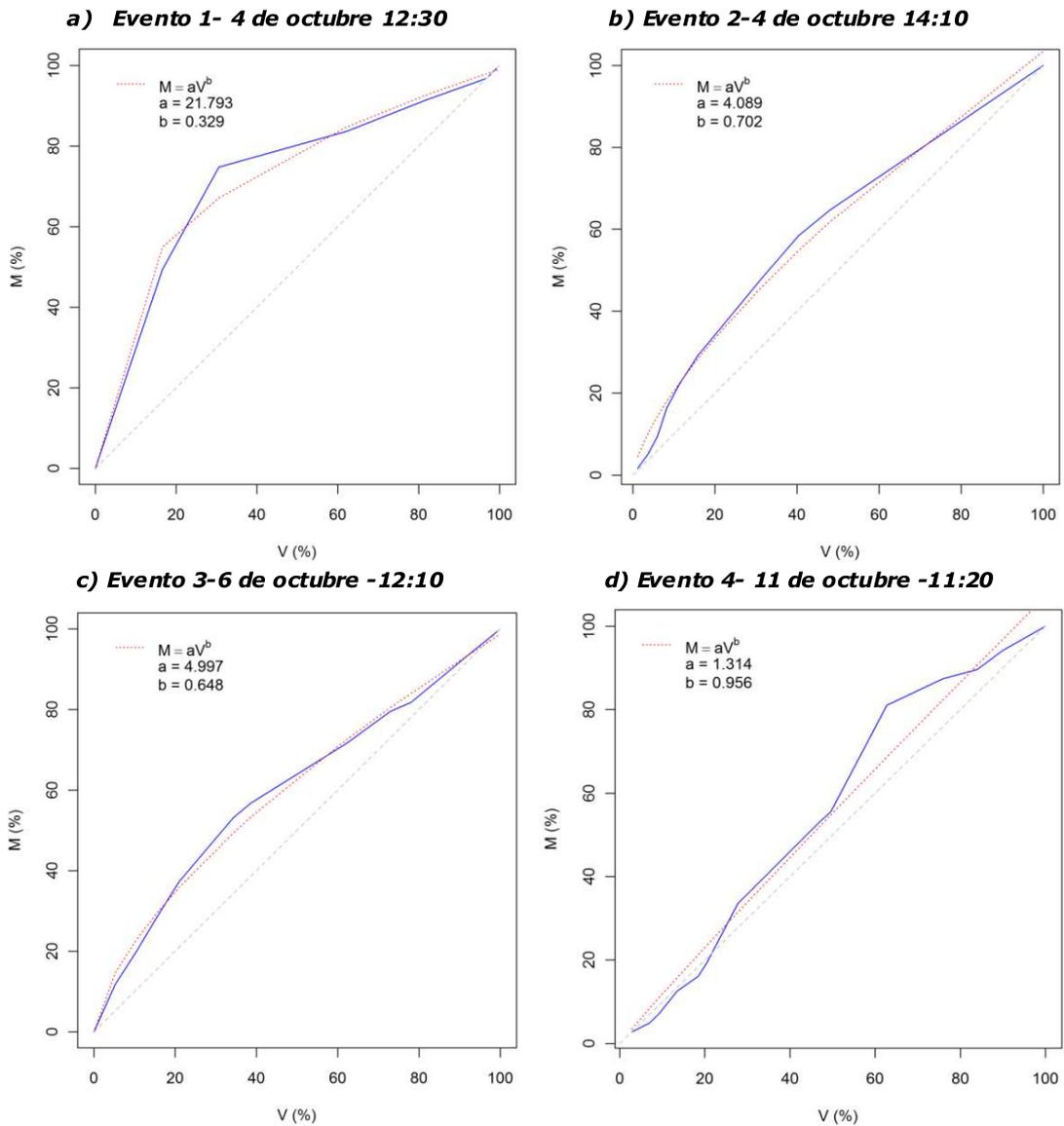


**ILUSTRACIÓN 4-7 RELACIÓN ENTRE LA HIDROLOGÍA, LOS POLUTO GRAMAS Y LOS HIDROGRAMAS**

#### **4.2.2. Análisis de curvas M(V).**

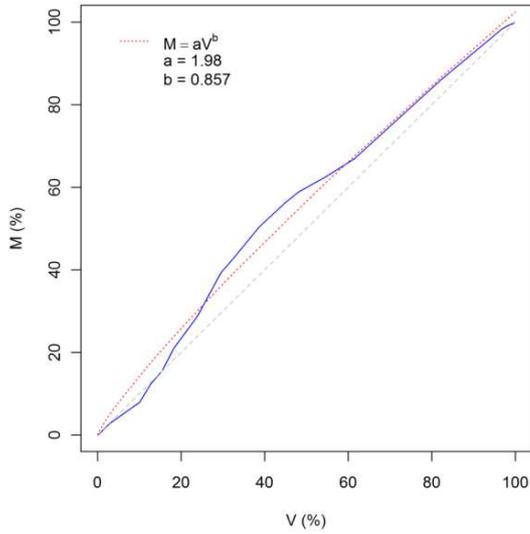
En este apartado está consignado el análisis de las curvas M(V) de acuerdo a la propuesta de Bertrand-Krajewski et al. (1998), la cual plantea que cada curva M(V) se puede ajustar a una forma  $M(V) = aV^b$ , donde V es el volumen acumulado en %, M es la masa acumulada en %, y los parámetros a y b son característicos de cada evento. Mediante estos dos últimos es posible determinar la ocurrencia y magnitud del primer lavado (ver numeral 2.2.3 y Tabla 1).

Adicionalmente, los parámetros a y b son claves para estudiar la relación que tienen las variables hidrológicas y el fenómeno del primer lavado. Que es el objeto de estudio de este trabajo. Las curvas M(V) construidas para cada evento se muestran a continuación:

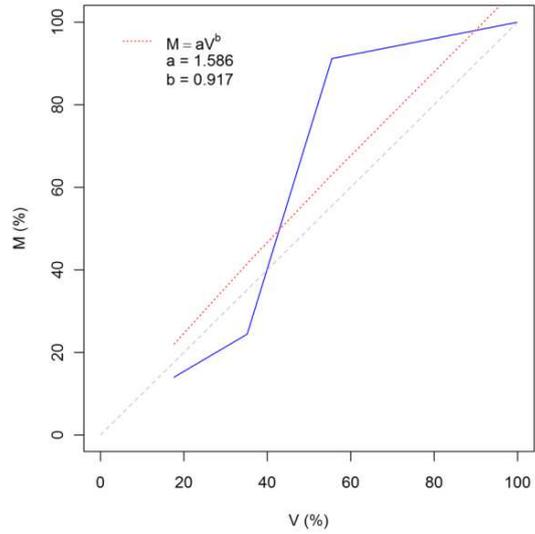


**ILUSTRACIÓN 4-8 CURVAS M(V), FECHA Y HORA DE LOS EVENTOS 1 AL 4**

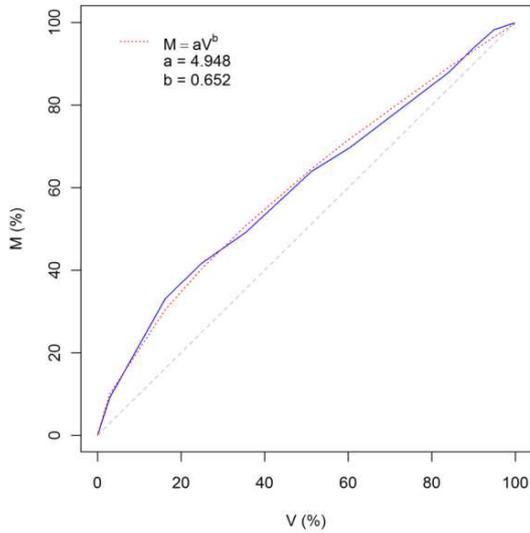
**a) Evento 5- 12 de octubre 14:30**



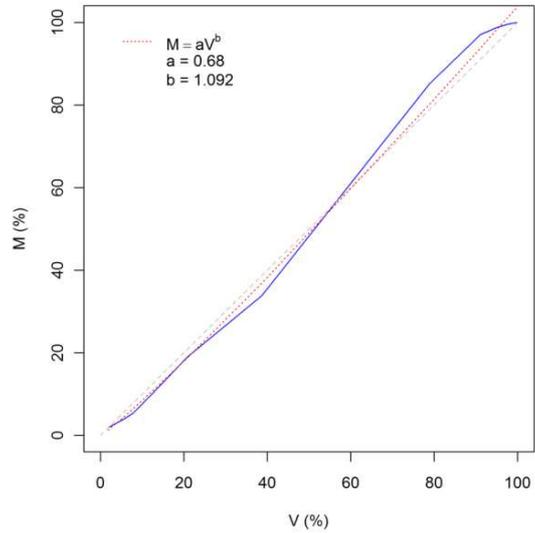
**b) Evento 6- 8 de noviembre 12:20**



**c) Evento 7- 10 de noviembre 13:30**



**d) Evento 8- 10 de noviembre 16:20**



**ILUSTRACIÓN 4-9 CURVAS M(V), FECHA Y HORA DE LOS EVENTOS 5 AL 8**

De las Ilustraciones 4-8 y 4-9, se observa que los parámetros  $a$  y  $b$  varían entre 0.68-21.79, y 0.33-1.09 respectivamente, los valores concuerdan con lo reportado por Bertrand-Krajewski et al. (1998).

El evento 1 (Ilustración 4-8 (a)), presentó los mayores valores de  $a$  (21.793) y  $ADWP$  (251.5 h), esto podría indicar que tal vez exista una relación entre estos, este tema se tratará más adelante en la sección 4.3. Por otro lado en este evento se puede observar que el valor de  $b$  se encuentra en la zona 2, es decir un Primer Lavado positivo medio. Lo que indica que sí se presentó un Primer Lavado de  $SST$ , y se podría decir que el 50 % de  $SST$  se transportó en el primer 12 % del volumen.

Los eventos 2,3 y 7 (ver Ilustración 4-8 (b),(c) e Ilustración 4-9 (d)), presentaron curvas  $M(V)$  similares, las cuales indican que se transportó el 50% de los  $SST$  del evento en el primer 35% del volumen, por otro lado de acuerdo con la clasificación de las zonas de la curva  $M(V)$ , estos eventos se encuentran en la zona 2, lo cual se traduce en un primer lavado positivo medio. Sin embargo a pesar que los valores de  $a$  y  $b$  para estos eventos son similares, las características hidrológicas son muy diferentes (ver Tabla 12 resumen de la hidrología y los parámetros A y B de cada evento).

Del evento 5 (ver Ilustración 4-9 (a)) se puede observar que parámetro  $b$  está justo en el límite entre las zonas 2 y 3, pero obedeciendo estrictamente la clasificación propuesta se encuentra en la zona de Primer Lavado positivo medio. En este evento al igual que los eventos 2,3 y 7, el 50 % de la masa de  $SST$  fue transportada en el 35% del volumen inicial del evento.

En la curva  $M(V)$  del evento 4, se observa que el modelo no se ajustó correctamente, esto es un indicio de que la forma  $M(V) = aV^b$  no es representativa para cualquier evento lluvioso. Sin embargo, se realizó el ejercicio de clasificación, encontrando que el parámetro  $b$  se encuentra en la zona 3, es decir hubo un Primer Lavado positivo insignificante. Además se puede encontrar que entre aproximadamente el 48 % y el 82 % del volumen hay un aumento entre la distancia de la curva  $M(V)$  y la bisectriz (ver Ilustración 4-8 (d)), lo que puede indicar que en esa zona el Lavado de  $SST$  fue más evidente. Esto podría llevar a pensar que el Lavado de una masa contaminante, puede presentarse no solamente en cualquier instante, además del inicial.

En el caso del evento 6, al observar la curva  $M(V)$  (ver Ilustración 4-9 (b)), se puede evidenciar que el modelo  $M = aV^b$  no se ajustó bien al comportamiento real, lo que hace que el parámetro  $b$  pueda tener una baja representatividad. Realizando la clasificación del mismo, se encuentra que  $b$  está en la zona 3, es decir, hubo un Primer Lavado positivo insignificante, lo cual no es del todo cierto, pues mirando las ordenadas de la gráfica, acotando entre aproximadamente el 38 % y el 55 % del volumen, se observa que se transportó aproximadamente el 70 % de  $SST$ , es decir un 17 % del volumen del evento fue el que transportó esa masa.

Observando la curva M(V) del evento 8 (ver Ilustración 4-9 (d)), se puede notar a primera vista que no hubo Primer Lavado. Esto lo confirma el parámetro  $b$ , el cual está en la zona 4, es decir Primer Lavado negativo e insignificante.

A continuación en la Tabla 12 y la Tabla 13 se presenta el resumen de la hidrología, los parámetros  $a$ ,  $b$  y la clasificación de las zonas de la curva M(V) para cada evento:

**TABLA 12 RESUMEN DE LA HIDROLOGÍA Y LOS PARÁMETROS  $a$  Y  $b$  DE CADA EVENTO**

Evento	ADWP (h)	P (mm)	$I_m$ (mm/h)	$I_{max}$ (mm/h)	D (h)	$a$	$b$
1	251.5	0.8	1.2	3.6	0.67	21.793	0.3286
2	0.83	18.8	16.11	34.8	1.42	4.0887	0.7016
3	4.5	3.5	1.75	5.4	1.8	4.997	0.6477
4	7.83	3.5	2.63	6.6	1.17	1.3142	0.9556
5	6	6.6	4.4	16.2	1.33	1.9804	0.8568
6	40.12	2.55	5.08	7.62	0.5	1.586	0.917
7	21	7	10.5	25.8	0.67	4.948	0.652
8	2	18	13.5	46.8	1.17	0.68	1.092

**TABLA 13 CLASIFICACIÓN DEL PARÁMETRO  $b$  EN LAS ZONAS DE LAS CURVAS M(V)**

Evento	$b$	Zona	Espacio entre la curva M(V) y la bisectriz
1	0.3286	2	Primer lavado positivo medio
2	0.7016	2	Primer lavado positivo medio
3	0.6477	2	Primer lavado positivo medio
4	0.9556	3	Primer lavado positivo e insignificante
5	0.8568	2	Primer lavado positivo medio
6	0.9170	2	Primer lavado positivo e insignificante
7	0.6520	2	Primer lavado positivo medio
8	1.0920	4	Primer lavado negativo e insignificante

La siguiente ilustración resume las curvas  $M(V)$  de todos los eventos medidos:

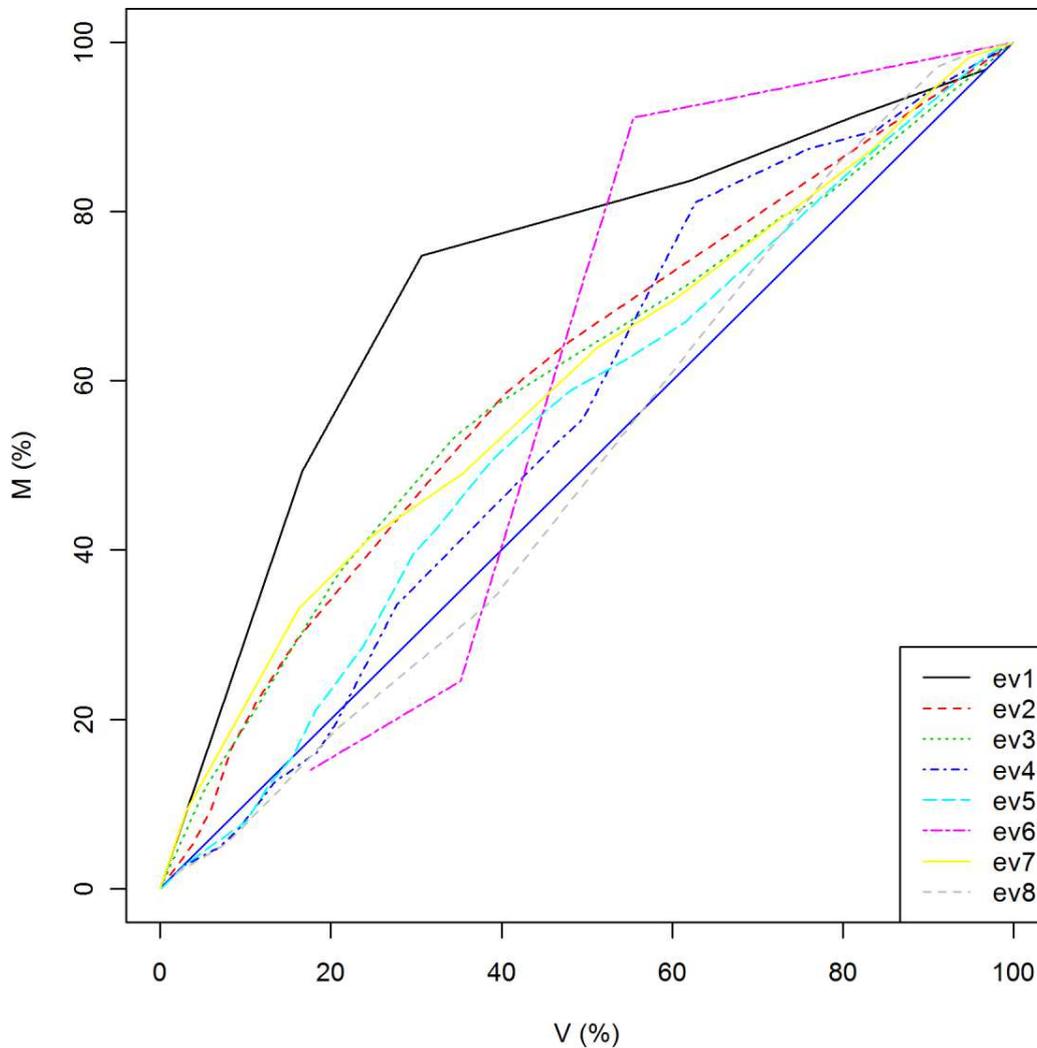


ILUSTRACIÓN 4-10 GRÁFICAS  $M(V)$  PARA LOS EVENTOS DEL 1 AL 8

En la Ilustración 4-10, puede apreciarse la alta variabilidad de las curvas  $M(V)$ . Además se observa que casi todos los eventos presentaron primer lavado.

### 4.3. Relaciones del primer lavado con las características de los eventos lluviosos

Las relaciones entre el primer lavado y las características hidrológicas de los eventos fueron determinadas a partir de los métodos expuestos en esta unidad que serán presentados en detalle en esta sección: PCA, prueba de correlación, PLS, método de Gupta y Saul (1996).

#### 4.3.1. Análisis por Componentes Principales (PCA)

El PCA fue la herramienta seleccionada para realizar con un análisis cualitativo preliminar. En la Ilustración 4-11 se presentan los resultados del análisis mediante las dos componentes principales: componente 1 en eje X y componente 2 en eje Y. Esta figura permite evaluar la influencia o peso de las variables hidrológicas sobre la variabilidad de los eventos lluviosos observados.

La siguiente ilustración contiene los eventos 1 a 8 y su clasificación por clústeres.

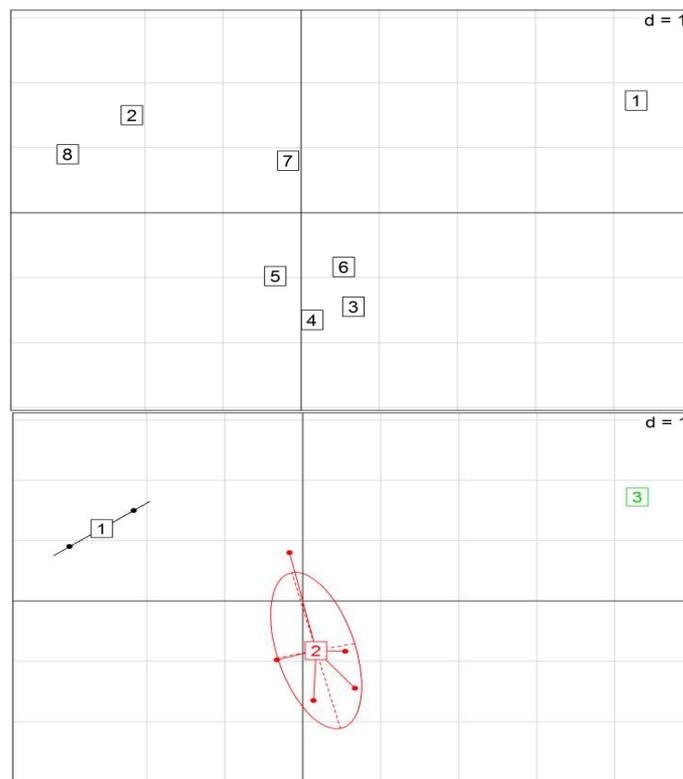


ILUSTRACIÓN 4-11 CLASIFICACIÓN DE LOS EVENTOS CON PCA

En la figura anterior se observa que hay tres grupos distintos entre los cuales hay una gran diferencia en la componente X. Realizando un análisis más detallado se encuentra que:

El grupo 1 está conformado por los eventos 8 y 2 que fueron los eventos de mayor magnitud: con mayores  $I_{max}$ ,  $I_m$  y  $P$ . Lo anterior podría sugerir que estas 3 variables tienen un peso considerable sobre la variabilidad de los eventos estudiados.

El grupo 2 está conformado por los eventos 3, 4, 5, 6 y 7. De estos los eventos 3 a 6 presentaron características hidrológicas similares y esto se puede apreciar en la cercanía que tienen entre sí (ver Ilustración 4-11). Por otro lado el evento 7 presentó una magnitud mayor en términos de  $I_{max}$ ,  $I_m$  y  $P$ , y es diferente a los demás del grupo 2 (ver Ilustración 4-5). Teniendo en cuenta lo mencionado sobre el grupo 1, lo anterior podría ayudar a confirmar que estas 3 variables tienen un peso significativo.

El grupo 3 está compuesto únicamente por el evento 1, el cual es bastante diferente de los demás. Esto puede deberse a que fue el de mayor  $ADWP$  (251 horas), y como se pudo ver en el análisis de las curvas  $M(V)$  (ver capítulo 4.4.1), presentó primer lavado a pesar de ser uno de los de menor magnitud. Lo anterior sugiere que el  $ADWP$  podría ser una variable hidrológica importante. Además, volviendo a analizar el grupo 2, el evento 7, el cual es diferente a los demás, fue el tercero en magnitud de  $ADWP$  (21 horas).

La Ilustración 4-12 indica la incidencia que tienen las variables sobre las componentes principales 1 y 2 (ejes X y Y respectivamente): entre más cercana esté la variable al eje y entre mayor sea su magnitud proyectada sobre este, más importancia tiene sobre la componente correspondiente. En este caso se puede notar que  $I_{max}$ ,  $I_m$ ,  $P$ , y  $ADWP$  tienen importancia similar y en general no hay una tendencia marcada que permita establecer una conclusión. Por lo anterior, se concluye que el análisis de PCA no otorga resultados concluyentes. Esto puede deberse a que la base de datos utilizada es muy pequeña.

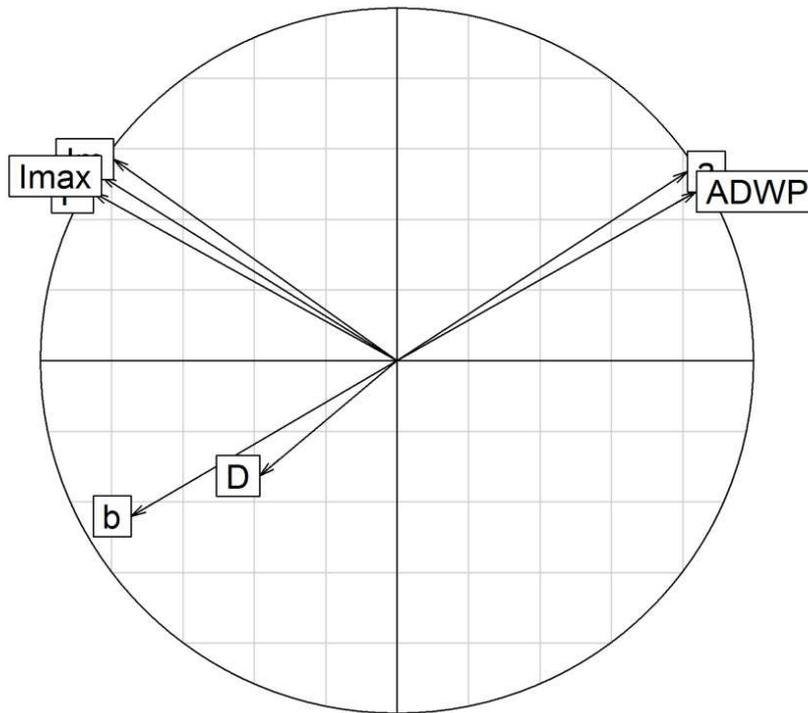


ILUSTRACIÓN 4-12 INCIDENCIA DE LAS VARIABLES SOBRE LAS COMPONENTES 1(EN X) Y 2(EN Y)

#### 4.3.2. *Análisis de correlación por rangos de Spearman*

Para evaluar la correlación por rangos de Spearman se tomaron las cinco variables hidrológicas tenidas en cuenta en el presente trabajo (*ADWP*, *P*, *I<sub>m</sub>*, *I<sub>max</sub>* y *D*) además de las dos variables adicionales *a* y *b* que según Bertrand-Krajewski et al. (1998) sirven para caracterizar el Primer Lavado.

En la gráfica presentada a continuación se muestra la forma en la que se relacionan las variables mencionadas anteriormente entre sí, gracias a ello es posible realizar una aproximación visual al comportamiento entre variables para los ocho eventos tenidos en consideración.

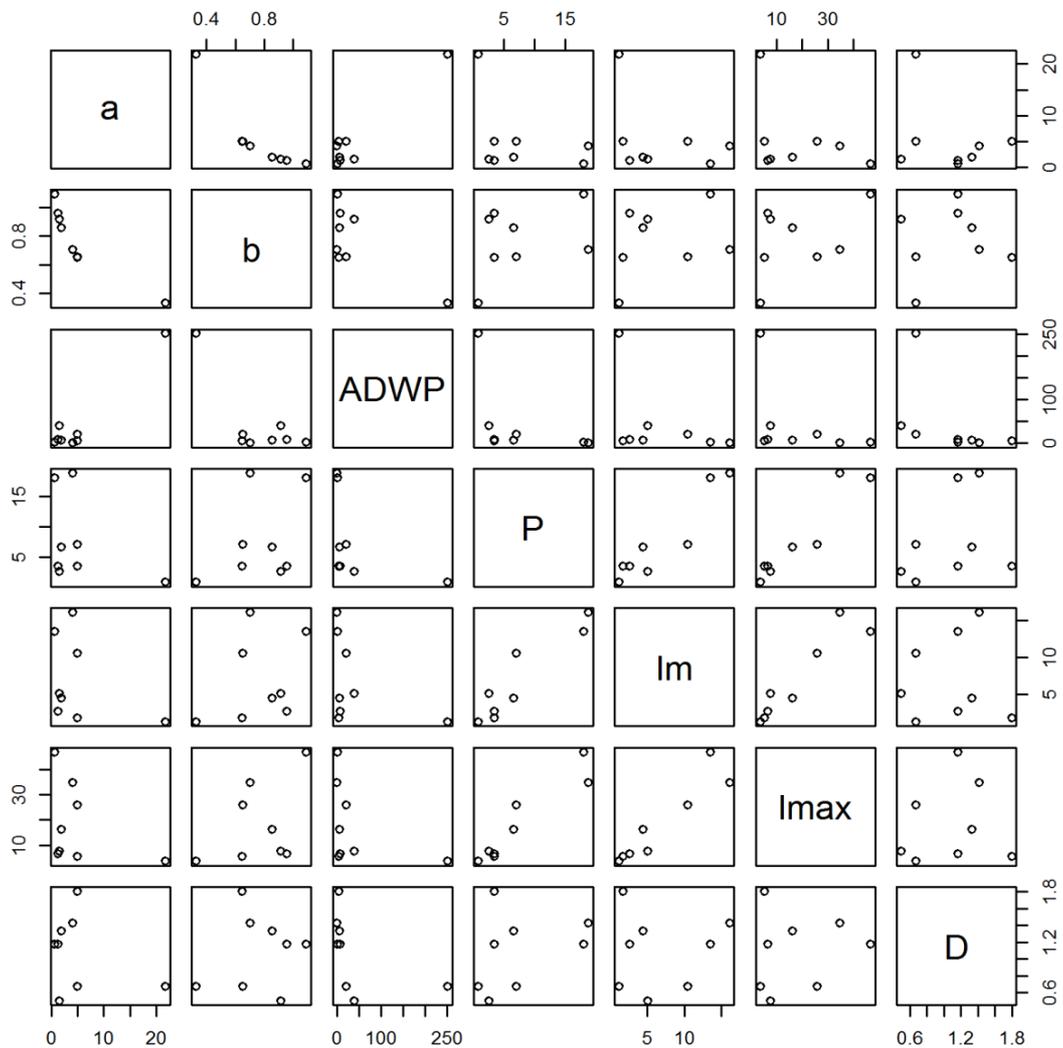


ILUSTRACIÓN 4-13 CORRELACIÓN POR RANGOS DE SPEARMAN

De la ilustración 4-13 es posible inferir que a pesar de que no es posible determinar una relación evidente entre los parámetros  $a$  y  $b$  con las variables hidrológicas consideradas en este trabajo, sí surgen algunas relaciones potenciales tales como  $I_{\max}$  con  $P$ ,  $a$  con  $b$  e  $I_m$  con  $I_{\max}$ .

Es importante mencionar que uno de los objetivos de este trabajo es establecer si existe una relación entre los parámetros artificiales  $a$  y  $b$  y las variables hidrológicas, razón por la cual se prestó mayor atención a éstas últimas.

La Tabla 14 muestra los valores del coeficiente de Spearman hallados para evaluar la correlación existente entre cada par de variables.

**TABLA 14 COEFICIENTE DE SPEARMAN,  $\rho$**  (*a* y *b* son parámetros artificiales, *ADWP* es periodo seco antecedente, *P* profundidad total, *I<sub>m</sub>* es intensidad media, *I<sub>max</sub>* es intensidad máxima y *D* es duración total del evento.)

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>ADWP</b>	<b>P</b>	<b>Im</b>	<b>Imax</b>	<b>D</b>
<b>a</b>	1,00	-1,00	0,31	0,32	0,48	-0,55	0,11
<b>b</b>	-1,00	1,00	0,31	0,32	0,48	0,55	0,11
<b>ADWP</b>	0,31	0,31	1,00	0,81	0,57	0,62	0,81
<b>P</b>	0,32	0,32	0,81	1,00	0,85	0,90	0,45
<b>Im</b>	0,48	0,48	0,57	0,85	1,00	0,95	0,04
<b>Imax</b>	0,55	0,55	0,62	0,90	0,95	1,00	0,10
<b>D</b>	0,11	0,11	0,81	0,45	0,04	0,10	1,00

La Tabla 14 permite evidenciar una correlación inversa perfecta entre *a* y *b*, permite evidenciar una correlación inversa perfecta entre *a* y *b*. Adicionalmente muestra bajos coeficientes de correlación ( $\rho < 0.6$ ) entre las variables hidrológicas y los parámetros *a* y *b*.

La prueba de significancia se realizó a partir del *p-value* (ver Tabla 15). Se muestra que los valores de correlación obtenidos a partir de la regresión de Spearman no son significativos (*p-value* > 0.05) en la gran mayoría de casos, lo cual no resulta muy concluyente para motivos del presente trabajo. Sin embargo cabe resaltar las correlaciones existentes entre *P* e *I<sub>m</sub>*, *P* e *I<sub>max</sub>*, *I<sub>m</sub>* e *I<sub>max</sub>* e *I<sub>m</sub>* y finalmente *ADWP* y *D*.

**TABLA 15 P-VALUE PARA CORRELACIÓN POR RANGOS DE SPEARMAN** (*a* y *b* son parámetros artificiales, *ADWP* es periodo seco antecedente, *P* profundidad total, *I<sub>m</sub>* es intensidad media, *I<sub>max</sub>* es intensidad máxima y *D* es duración total del evento.)

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>ADWP</b>	<b>P</b>	<b>Im</b>	<b>Imax</b>	<b>D</b>
<b>a</b>	1,00	<0,01	0,46	0,44	0,24	0,17	0,80
<b>b</b>	<0,01	1,00	0,46	0,44	0,24	0,17	0,80
<b>ADWP</b>	0,46	0,46	1,00	0,01	0,15	0,12	0,02
<b>P</b>	0,44	0,44	0,01	1,00	0,01	<0,01	0,26
<b>Im</b>	0,24	0,24	0,15	0,01	1,00	<0,01	0,93
<b>Imax</b>	0,17	0,17	0,12	<0,01	<0,01	1,00	0,82
<b>D</b>	0,80	0,80	0,02	0,26	0,93	0,82	1,00

A continuación se muestra una tabla de resultados del método de correlación por rangos de Spearman en la cual las correlaciones significativas (*p-value* < 0.05) están representadas por el número uno (1) y las poco significativas (*p-value* > 0.05) están representadas por el número cero (0).

**TABLA 16 SIGNIFICANCIA DE MÉTODO DE CORRELACIÓN POR RANGOS DE SPEARMAN. (*a* y *b* son parámetros artificiales, *ADWP* es periodo seco antecedente, *P* profundidad total, *I<sub>m</sub>* es intensidad media, *I<sub>max</sub>* es intensidad máxima y *D* es duración total del evento.)**

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>ADWP</b>	<b>P</b>	<b>I<sub>m</sub></b>	<b>I<sub>max</sub></b>	<b>D</b>
<b>A</b>	0	1	0	0	0	0	0
<b>B</b>	1	0	0	0	0	0	0
<b>ADWP</b>	0	0	0	1	0	0	1
<b>P</b>	0	0	1	0	1	1	0
<b>I<sub>m</sub></b>	0	0	0	1	0	1	0
<b>I<sub>max</sub></b>	0	0	0	1	1	0	0
<b>D</b>	0	0	1	0	0	0	0

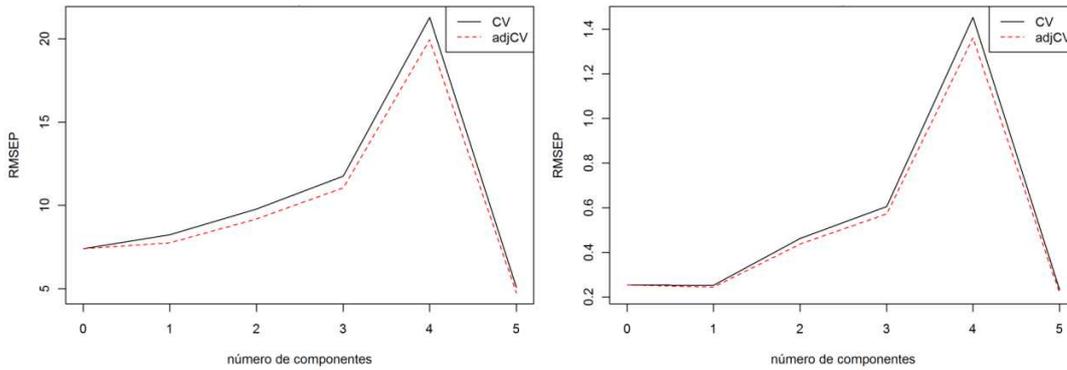
### **4.3.3. Análisis PLS**

Se llevaron a cabo dos simulaciones por PLS mediante el programa R, utilizando la librería pls. La primera para analizar la relación entre las variables hidrológicas consideradas en este trabajo y el coeficiente *a* y la segunda para determinar la relación existente entre dichos parámetros hidrológicos y el factor *b*, que según Bertrand-Krajewski et al. (1998) sirve para caracterizar el fenómeno de primer lavado. Para que la regresión obtenga mejores resultados es importante determinar el número de componentes, o variables que se van a relacionar con el factor de interés.

El error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) es una medida que permite evaluar que tan acertado es un modelo. Para el desarrollo del presente trabajo, el RMSE se utilizó como criterio de selección para el número óptimo de componentes, obteniéndolo mediante validación cruzada de tipo Jackknife o LOO ("Leave One Out")

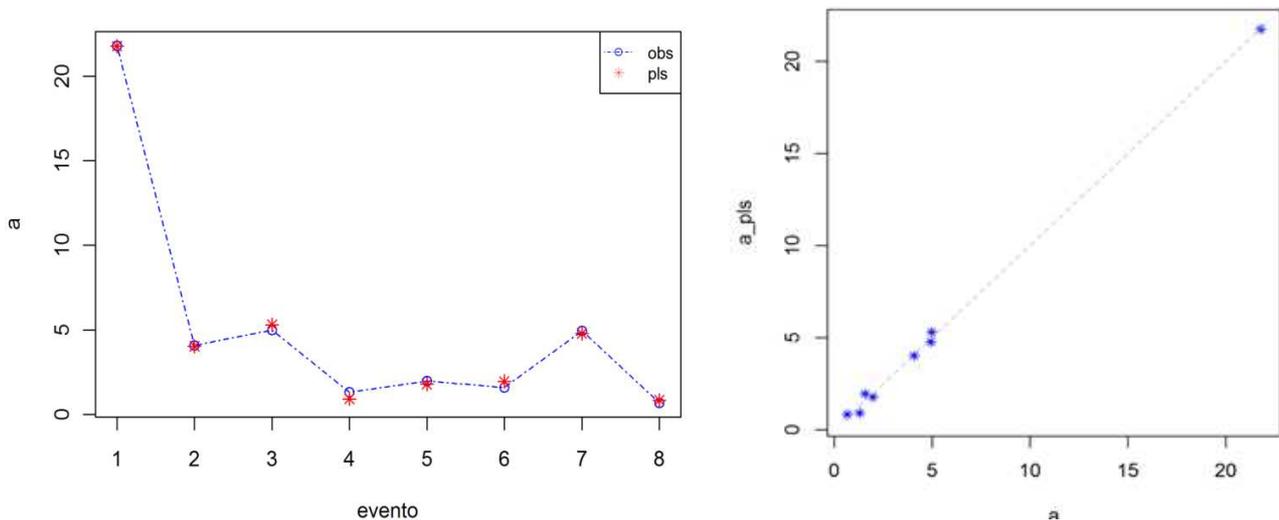
#### 4.3.4. Análisis PLS para coeficiente $a$ :

El número óptimo de componentes es 5, pues es el número con el que se presenta el mínimo RMSE como se ilustra en la siguiente imagen.



**ILUSTRACIÓN 14 SELECCIÓN DEL NÚMERO ÓPTIMO DE COMPONENTES PARA LOS COEFICIENTES  $a$  Y  $b$**

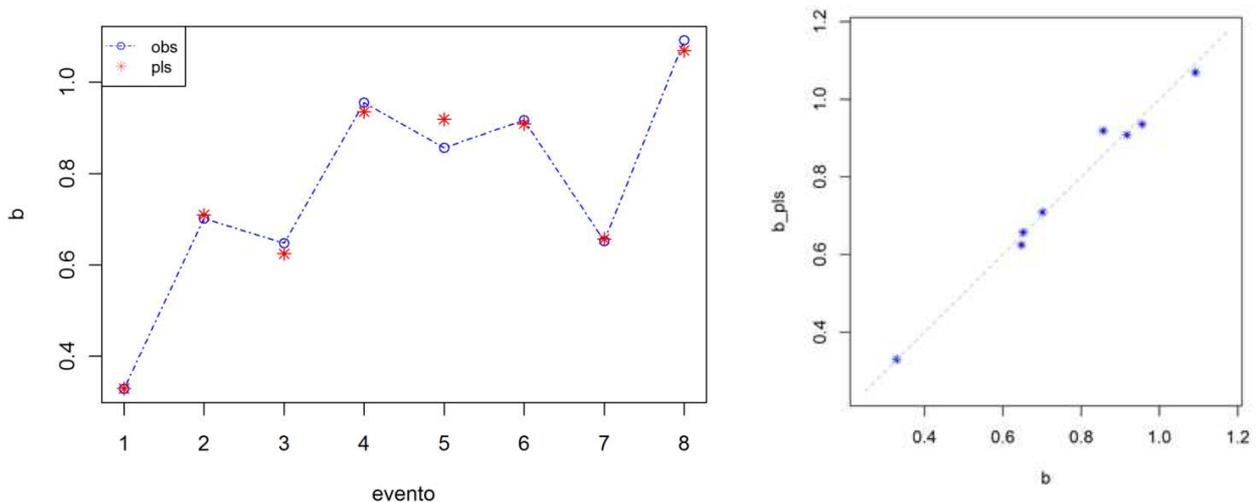
Una vez seleccionado el número óptimo de componentes se prosiguió a ejecutar el modelo de regresión PLS con el propósito de determinar la incidencia de las variables hidrológicas sobre los parámetros  $a$  y  $b$ . A continuación se presentan dos gráficas (ver Ilustración 15) que relacionan los coeficientes  $a$  observados ( $a$ ), obtenidos a partir de las curvas  $M(V)$  de cada evento y los coeficientes  $a$  simulados a partir de la regresión PLS ( $a_{pls}$ ).



**ILUSTRACIÓN 15 RELACIÓN ENTRE PARÁMETRO  $a$  SIMULADO ( $a_{PLS}$ ) Y PARÁMETRO  $a$  OBSERVADO ( $a$ ),  $r=0.999$ ;  $r^2=0.998$ ; RMSE (kg) = 0.244).**

La Ilustración 15 muestra que existe una estrecha relación entre los parámetros  $a$  observados ( $a$ ) y  $a$  simulados ( $a_{pls}$ ), con coeficiente  $r= 0.999$  y  $r^2=0.998$ . El orden de magnitud del error (0.244) es muy inferior al rango de valores en que se presentan los valores de  $a$  (aprox. 25) para los diversos eventos lluviosos. Además la gráfica permite evidenciar la similitud entre el parámetro  $a$  observado ( $obs$ ) de cada lluvia y el parámetro  $a$  simulado ( $pls$ ) para cada evento a partir de la regresión PLS.

A continuación se presentan dos gráficas (ver Ilustración 16), que relacionan los coeficiente  $b$  observados ( $b$ ), obtenidos a partir de las curvas  $M(V)$  de cada evento y los coeficientes  $b$  simulados a partir de la regresión PLS ( $b_{pls}$ ).



**ILUSTRACIÓN 16 RELACIÓN ENTRE PARÁMETRO  $b$  SIMULADO ( $b_{PLS}$ ) Y PARÁMETRO  $b$  OBSERVADO ( $b$ ),  $r=0.993$ ;  $r^2=0.986$ ; RMSE (kg) = 0.026).**

De la Ilustración 16 se puede inferir la existencia de una relación estrecha entre los puntos simulados y observados representada por coeficientes de correlación muy cercanos a 1, de igual forma es importante notar que el orden de magnitud del error (0.0261) es significativamente inferior al rango en que se presenta el parámetro  $b$  (aprox. 1.2). Además es posible evidenciar la similitud entre los valores de  $b$  simulados ( $pls$ ) a partir del modelo PLS y los valores de  $b$  observados ( $obs$ ), que fueron obtenidos a partir de las curvas  $M(V)$  de cada evento.

La siguiente tabla contiene los pesos, o grado de afectación que tienen las variables hidrológicas sobre el parámetro  $a$ , resultado del modelo de regresión PLS calibrado. Según lo anterior, la duración del evento es la que tiene mayor influencia sobre el coeficiente analizado seguido por la intensidad media, la profundidad de lluvia, el periodo seco antecedente y finalmente la intensidad máxima del evento.

**TABLA 17 RELACIÓN ENTRE VARIABLES HIDROLÓGICAS Y LOS PARÁMETROS  $a$  Y  $b$ .** ( $a$  y  $b$  son parámetros artificiales,  $ADWP$  es periodo seco antecedente,  $P$  profundidad total,  $I_m$  es intensidad media,  $I_{max}$  es intensidad máxima y  $D$  es duración total del evento.)

Variable	Afectación del parámetro $a$	Orden	Afectación del parámetro $b$	Orden
<b>ADWP</b>	0,100	4	-0,003	4
<b>P</b>	-1,116	3	0,095	3
<b><math>I_m</math></b>	1,169	2	-0,111	2
<b><math>I_{max}</math></b>	0,099	5	-0,001	5
<b>D</b>	9,306	1	0,670	1

Resulta importante mencionar que a pesar de que la profundidad total de la lluvia ocupa el tercer puesto en significancia sobre el parámetro  $a$ , el signo negativo indica una relación inversa entre  $P$  y  $a$ , lo que significa que entre mayor sea la profundidad de lluvia menor será el valor de  $a$ . Del mismo modo, existen relaciones inversas entre  $b$  y las intensidades, máxima y media de la lluvia, así como entre  $b$  y el periodo seco antecedente.

Adicionalmente de la Tabla 17 es posible extraer que a pesar de que la magnitud o grado de afectación de las variables hidrológicas sobre los modelos para simular  $a$  y  $b$  es diferente, se conserva el orden que éstas ocupan en ambos casos.

A continuación se presenta el modelo propuesto a partir de la regresión PLS para cada uno de los coeficientes  $a$  y  $b$ .

$$a = -10,571 + 0,100 * ADWP - 1,116 * P + 1,169 * I_m + 0,0989 * I_{max} + 9.306 * D$$

ECUACIÓN 2

$$b = 1,715 - 0,003 * ADWP + 0,095 * P - 0,111 * I_m - 0,001 * I_{max} - 0,670 * D$$

ECUACIÓN 3

#### 4.3.5. Implementación del modelo propuesto por Gupta y Saul (1996)

En el presente trabajo se utilizó el modelo propuesto por Gupta y Saul (1996) para apreciar su funcionamiento en Bogotá D.C., ya que este fue formulado a partir de mediciones en cuencas inglesas. Adicionalmente, con la regresión PLS se encontró que la variable  $D$  es la que tiene mayor peso sobre los parámetros  $a$  y  $b$  (parámetros que regulan el comportamiento de las curvas  $M(V)$ ).

Teniendo en consideración que para la realización del trabajo se contaba con la información necesaria (ver Tabla 12) para la puesta en práctica del modelo mencionado anteriormente, se decidió que era pertinente su implementación.

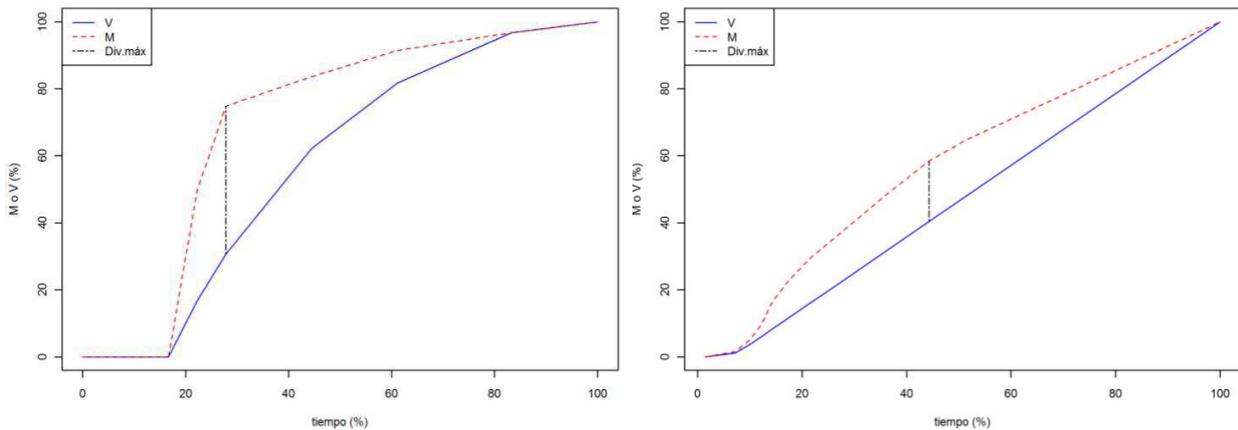
$$M_{ff} = \alpha * D^{\beta} * I_{max}^{\gamma} * ADWP^{\sigma}$$

Para utilizar el modelo de Gupta y Saul (1996) se deben conocer los valores de los parámetros  $D$ ,  $I_{max}$  y  $ADWP$  de cada evento, al igual que el momento en el cual se presenta la divergencia máxima entre el porcentaje de volumen acumulado y el porcentaje de masa de contaminante acumulado. Esto último porque el concepto de la divergencia máxima entre porcentaje de volumen y porcentaje de masa es la definición propuesta por Gupta y Saul (1996) para el Primer Lavado. A continuación se presenta una tabla resumen con las características de cada evento:

**TABLA 18 RESUMEN CARACTERÍSTICAS DE TRANSPORTE DE SST SEGÚN DEFINICIÓN DE GUPTA Y SAUL (1996)**  
(M<sub>ff</sub> es la masa del primer lavado, Volumen ff es el volumen del primer lavado)

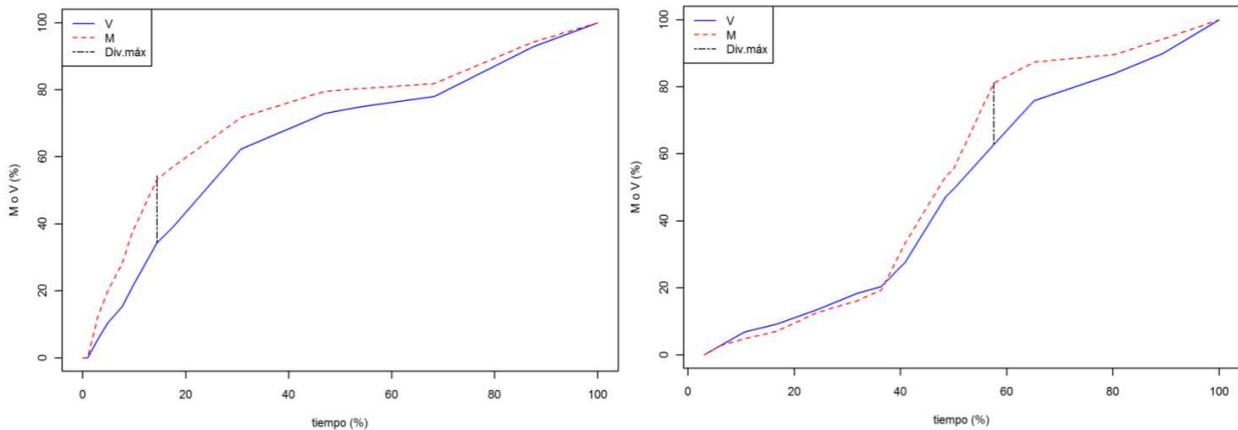
Evento	Masa total (kg)	M <sub>ff</sub> (kg)	Volumen total (l)	Volumen ff (l)
1	0,65	0,49	1932,33	591,63
2	49,00	28,5	68891,60	27824,60
3	0,22	0,12	926,07	317,79
4	0,35	0,28	744,12	466,67
5	45,29	22,85	28775,71	11130,65
6	0,016	0,015	158,531	87,945
7	1,11	0,37	1932,64	314,41
8	4,55	3,87	7073,39	5581,69

La divergencia máxima para el evento 1 se presenta cuando ha transcurrido un 27.78 % del tiempo del evento, y corresponde a la diferencia entre el 74.79 % de la masa y el 30,62 % del volumen. Para el caso del evento 2 la divergencia máxima se presenta para el 44.29 % del tiempo total del evento, para el cual se cuenta con el 58.47% de la masa total y el 40.39 % del volumen total del evento (ver Ilustración 17).



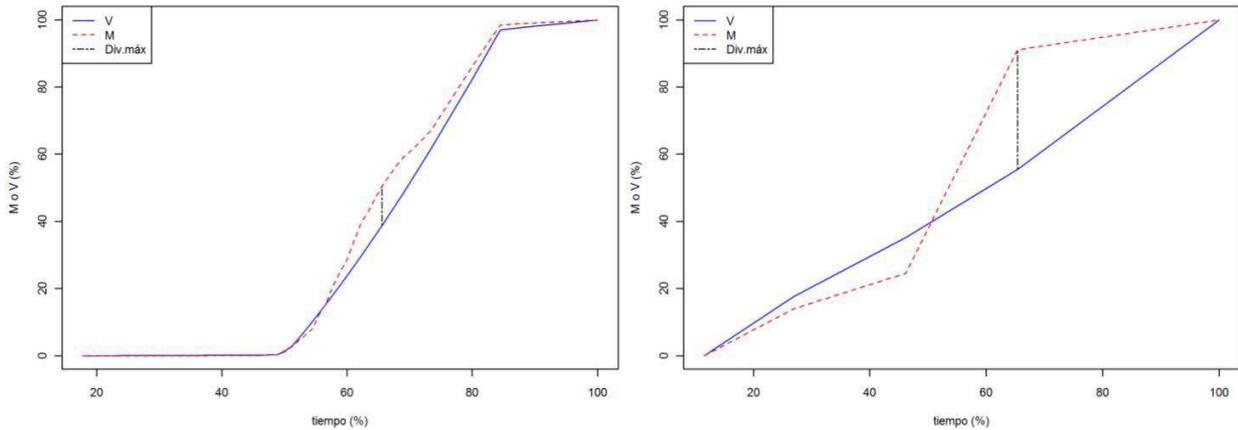
**ILUSTRACIÓN 17 DIVERGENCIA MÁXIMA M (%) Y V (%) EVENTOS 1 Y 2**

La divergencia máxima del evento 3 se presenta cuando ha transcurrido el 14.42 % del tiempo total del evento, tiempo para el cual se cuenta con 54.54 % de la masa total y 34.42 % del volumen total del evento. La divergencia máxima para el evento 4 se presenta en el 57.58 % del tiempo total, para valores de 81.09 % y 62.71 % de masa y volumen total respectivamente (ver Ilustración 18).



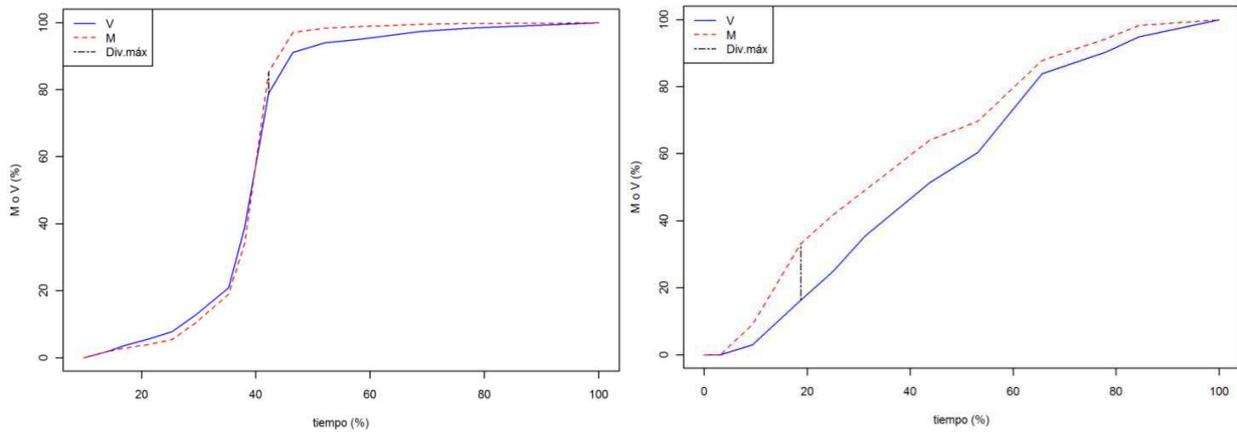
**ILUSTRACIÓN 18 DIVERGENCIA MÁXIMA M (%) Y V (%) EVENTOS 3 Y 4**

La divergencia máxima para el evento 5 se presenta cuando ha transcurrido 65.56 % del tiempo total del evento, tiempo para el cual la masa total y el volumen total han alcanzado 50.4 5% y 38.68 % respectivamente. En el evento 6 la divergencia máxima se presenta para el 65.38 % del tiempo total, entre el 91.14 % de la masa total y el 55.47 % del volumen total (ver Ilustración 19).



**ILUSTRACIÓN 19 DIVERGENCIA MÁXIMA M (%) Y V (%) EVENTOS 5 Y 6**

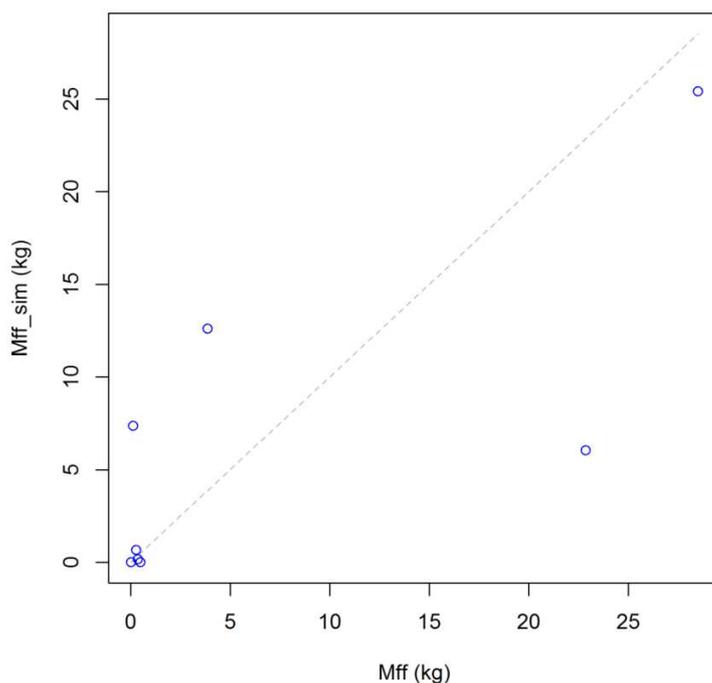
La divergencia máxima se presenta en el evento 7 cuando ha transcurrido 18.75 % del tiempo total del evento, para valores de masa y volumen iguales a 33.19 % y 16.27 % respectivamente. Para el evento 8 la divergencia máxima se presenta cuando ha transcurrido 42.25 % del tiempo total del evento, para valores de 85.18 % de masa total y 78.91 % de volumen total (Ilustración 20).



**ILUSTRACIÓN 20 DIVERGENCIA MÁXIMA M (%) Y V (%) EVENTOS 7 Y 8**

Luego de conocer el volumen de primer lavado parara cada evento, según la definición propuesta por Gupta y Saul (1996), la cual se basa en las máximas divergencias entre porcentaje de volumen acumulado y porcentaje de masa acumulada, se implementó el modelo con el cual se obtuvieron valores simulados de masa de primer lavado (Mff\_sim) y se graficaron en función de Mff, los cuales fueron calculados a partir de la definición mencionada anteriormente (ver Ilustración 21).

En la siguiente ilustración se puede observar que no existe una muy buena relación entre Mff y Mff\_sim, lo cual se ve representado por un  $r=0,75$ ,  $r^2=0.56$  y un RMSE de 7.26 kg, lo cual es considerable teniendo en cuenta el rango en el cual se presentan los valores Mff obtenidos. Al observar los coeficientes de correlación, llama la atención que éstos son similares a los obtenidos por Gupta y Saul (1996), toda vez que estos autores reportan coeficientes de correlación  $r$  entre 0.5 y 0.7 para eventos en las cuencas inglesas.



**ILUSTRACIÓN 21 CORRELACION ENTRE LA MASA DEL PRIMER LAVADO SIMULADA VS MASA DE PRIMER LAVADO SEGÚN DEFINICION PROPUESTA POR GUPTA Y SAUL (1996), ( $r=0.748$ ;  $r^2=0.559$ ; RMSE (kg) = 7.259).**

## 5. Implementación del modelo propuesto por los autores

Este trabajo propone la implementación de un modelo elaborado a partir de la regresión PLS, para definir el diseño y la frecuencia de mantenimiento de una estructura capaz de contener el 70 % de la masa de SST asociados al Primer Lavado, dentro de un sumidero (El detalle de los cálculos se encuentra en el anexo 3).

Como se mostró en la sección anterior, utilizando la regresión PLS es posible determinar los coeficientes  $a$  y  $b$  que definen el comportamiento de las curvas  $M(V)$  mediante la forma  $M(V) = aV^b$ , planteada por Bertrand-Krajewski et al. (1998).

Teniendo en cuenta que el modelo propuesto en la sección 4.4 para calcular  $a$  y  $b$  (ver Ecuación 2 y Ecuación 3) se realizó con los datos de los 8 eventos estudiados, no fue posible llevar a cabo la validación del mismo.

A raíz de lo anterior, surgió la necesidad de formular un modelo que pudiese ser calibrado y validado, para luego ser implementado en la propuesta mencionada al principio de este capítulo. Para la escogencia de este, se realizaron 28 simulaciones para  $a$  y  $b$ , compuestas por grupos de 6 eventos para calibración y 2 para validación, de tal manera que se estudiaron todas las combinaciones posibles.

El criterio de selección fue el error cuadrático medio normalizado (NRMSDP por sus siglas en inglés (Ecuación 4)), comparando los  $a$  y  $b$  simulados con los observados, de tal manera que la combinación que presentó el menor NRMSDP fue la seleccionada.

$$\text{RMSD}(\theta_1, \theta_2) = \sqrt{\text{MSE}(\theta_1, \theta_2)} = \sqrt{E((\theta_1 - \theta_2)^2)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}}$$
$$\text{NRMSD} = \frac{\text{RMSD}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

ECUACIÓN 4

La tabla a continuación contiene todas las combinaciones efectuadas con su respectivo valor de NRMSD.

**TABLA 19- COMBINACIONES Y NRMSDP PARA A (IZQUIERDA) Y B (DERECHA); V1 Y V2 SON LOS EVENTOS UTILIZADOS PARA LA VALIDACIÓN.**

Combinación	Eventos calibración						V 1	V2	<i>a</i> NRMSDP	<i>b</i> NRMSDP
1	2	3	4	5	6	7	1	8	88.1%	110.7%
2	1	3	4	5	6	7	2	8	53.5%	52.9%
3	1	2	4	5	6	7	3	8	119.2%	100.0%
4	1	2	3	5	6	7	4	8	297.3%	194.2%
5	1	2	3	4	6	7	5	8	105.2%	92.4%
6	1	2	3	4	5	7	6	8	410.8%	153.9%
7	1	2	3	4	5	6	7	8	32.1%	47.8%
8	2	3	4	5	6	7	1	7	130.9%	210.2%
9	1	3	4	5	6	8	2	7	297.8%	450.6%
10	1	2	4	5	6	8	3	7	5798.7%	5753.1%
11	1	2	3	5	6	7	4	7	38.5%	47.5%
12	1	2	3	4	6	7	5	7	38.3%	64.9%
13	1	2	3	4	5	7	6	7	85.2%	58.7%
14	2	3	4	5	7	8	1	6	46.3%	25.9%
15	1	3	4	5	7	8	2	6	121.0%	72.2%
16	1	2	4	5	7	8	3	6	92.3%	65.4%
17	1	2	3	5	7	8	4	6	1293.2%	476.5%
18	1	2	3	4	7	8	5	6	845.2%	213.6%
19	2	3	4	6	7	8	1	5	84.1%	70.5%
20	1	3	4	6	7	8	2	5	86.5%	86.2%
21	1	2	4	6	7	8	3	5	108.3%	78.7%
22	1	2	3	6	7	8	4	5	211.5%	113.1%
23	2	3	5	6	7	8	1	4	78.4%	66.2%
24	1	3	5	6	7	8	2	4	68.2%	56.2%
25	1	2	5	6	7	8	3	4	57.9%	53.7%
26	2	4	5	6	7	8	1	3	79.9%	57.8%
27	1	4	5	6	7	8	2	3	392.1%	468.8%
28	3	4	5	6	7	8	1	2	73.4%	69.8%

En la tabla anterior se observa que las combinaciones que presentan menor NRMSDP, son la 7 y la 14, para *a* y *b* respectivamente. Con esto se obtuvieron las siguientes expresiones:

$$a = 2.0633 + 0.0762 * ADWP - 0.0016 * P - 0.0013 * I_m - 0.0029 * I_{max} - 0.0001 * D$$

$$b = 0.7379 + 0.0017 * ADWP - 0.0012 * P - 0.0002 * I_m - 0.0035 * I_{max} - 0.00003 * D$$

**ECUACIÓN 5**

Utilizando las expresiones anteriores, es posible construir las curvas  $M(V)$  para cualquier lluvia ocurrida en el sitio de trabajo a partir de las características hidrológicas asociadas a este.

Para definir la capacidad necesaria para interceptar el 70 % de la masa de  $SST$ , así como el periodo de mantenimiento del sumidero, se analizaron 17 lluvias comprendidas entre los meses de agosto y noviembre.

Utilizando los modelos de la Ecuación 5 se hallaron los parámetros  $a$  y  $b$  asociados a cada uno de los 17 aguaceros (ver Tabla 20).

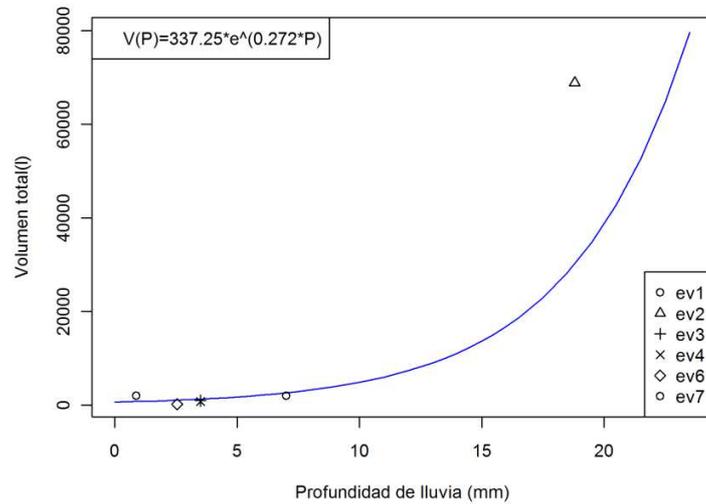
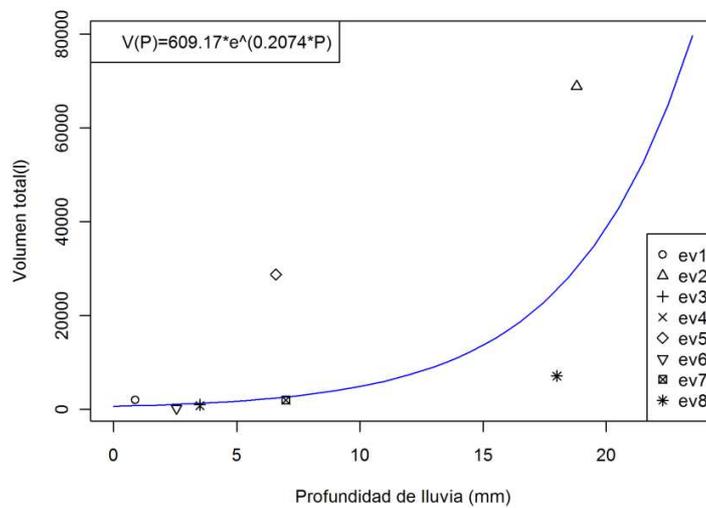
**TABLA 20 VARIABLES HIDROLÓGICAS Y PARÁMETROS  $a$  Y  $b$  ASOCIADOS A CADA EVENTO**

Fecha	Ev	ADWP	P	Im	Imax	D	a	b
12/08/2011 03:20	A1	97	1.5	1.8	3.0	0.83	9.445	0.589
19/08/2011 16:00	A2	180	3.6	7.1	10.7	0.50	15.741	0.481
20/08/2011 16:40	A3	24	5.1	7.6	13.7	0.67	3.835	0.753
22/08/2011 17:20	A4	48	1.3	0.0	1.5	0.83	5.716	0.665
23/08/2011 06:00	A5	12	4.1	0.1	9.1	0.83	2.945	0.754
23/08/2011 12:30	A6	6	8.9	0.2	29.0	0.83	2.422	0.839
23/08/2011 14:10	A7	1	3.0	0.1	4.6	0.83	2.121	0.756
13/09/2011 22:50	S1	8.17	9.7	2.9	9.1	3.33	2.640	0.768
26/09/2011 10:20	S2	15.5	15.2	6.1	13.7	2.5	3.172	0.779
28/09/2011 06:50	S3	42.17	6.1	2.2	4.6	2.83	5.252	0.691
19/10/2011 21:50	O1	1.0	6.2	3.1	6.0	2.00	2.108	0.765
23/10/2011 12:50	O2	2.0	21.8	8.7	32.4	3.50	2.075	0.874
24/10/2011 18:00	O3	1.0	10.0	4.6	20.4	2.17	2.058	0.820
03/11/2011 12:15	N1	211.3	10.6	21.2	32.4	0.50	18.030	0.516
03/11/2011 12:15	N2	2.0	16.0	4.4	36.0	3.67	2.079	0.879
06/11/2011 18:25	N3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	2.063	0.738
08/11/2011 18:35	N4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	2.063	0.738

Para hallar el volumen total de cada uno de los 17 eventos, se elaboró un modelo lluvia-escorrentía para el sumidero, a partir de los datos de campo obtenidos en la realización de este estudio (*Profundidad de lluvia y volumen total de agua*). Resulta importante mencionar que en el momento de hallar la relación lluvia-escorrentía, se evidenció una inconsistencia en los datos hidrológicos utilizados en este trabajo. En especial con los eventos 5 y 8 (ver Tabla 21 y la Ilustración 22)

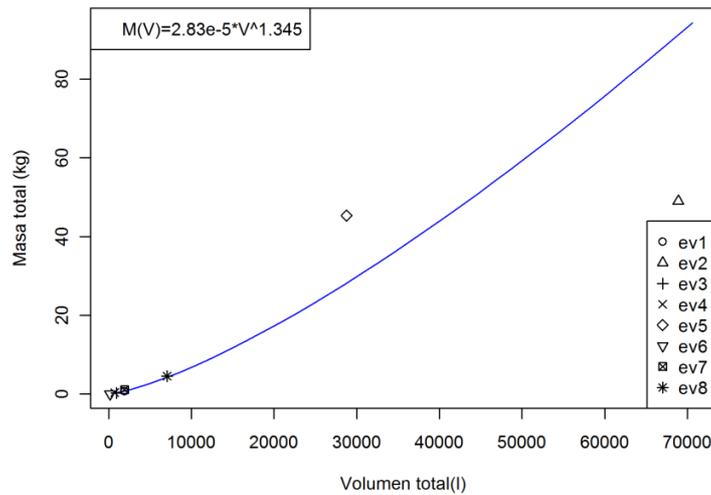
**TABLA 21 PRECIPITACIÓN VS VOLUMEN PARA LOS EVENTOS ESTUDIADOS**

Evento	P (mm)	V (l)
1	0.88	1932.3
2	18.8	68891.6
3	3.5	926.1
4	3.5	744.1
5	6.6	28775.7
6	2.55	158.5
7	7	1932.6
8	18	7073.4



**ILUSTRACIÓN 22 GRÁFICA DE V<sub>TOTAL</sub> EN FUNCIÓN DE P, CON TODOS LOS EVENTOS (SUPERIOR), R<sup>2</sup>= 0.52; SIN EVENTOS 5 Y 8 (INFERIOR), R<sup>2</sup>= 0.78.**

De acuerdo a la alta correlación encontrada entre el volumen total y la masa total de SST transportados en los eventos ( $\rho$ : 0.98 con  $p$ -value < 0.01). Se halló una expresión matemática que permitió conocer la masa total de SST a partir del volumen total de escorrentía (Ilustración 23).



**ILUSTRACIÓN 23 MASA TOTAL EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN TOTAL R=0.97**

Una vez conocidos la masa total, el volumen total y los parámetros  $a$  y  $b$  de cada evento, es posible determinar la cantidad correspondiente al 70 % de la masa total de SST. Asumiendo un valor típico de densidad para los SST de  $2.4 \text{ T/m}^3$ , es posible obtener el volumen que ocupan estos últimos. En la tabla a continuación se muestran los resultados para cada evento.

**TABLA 22 VOLTOTAL: VOLUMEN TOTAL DE AGUA; MTOTALSST: MASA TOTAL DE SST; V100 SST: VOLUMEN QUE OCUPA LA MTOTALSST; MOBJETIVO: PORCENTAJE DE SST A INTERCEPTAR ; VSST INTER: VOLUMEN QUE OCUPAN LOS SST INTERCEPTADOS POR EVENTO; VSST ACUM: VOLUMEN ACUMULADO DE SST**

Ev	V100 Agua	M100 SST (kg)	V100 SST (l)	Mobjetivo(%)	VSST inter (l)	VSST acum (l)
<b>A1</b>	510.54	0.124	0.05	70	0.0	0.0
<b>A2</b>	887.44	0.262	0.11	70	0.1	0.1
<b>A3</b>	1343.44	0.457	0.19	70	0.1	0.2
<b>A4</b>	476.45	0.113	0.05	70	0.0	0.3
<b>A5</b>	1018.98	0.315	0.13	70	0.1	0.4
<b>A6</b>	3788.07	1.843	0.77	70	0.5	0.9
<b>A7</b>	772.88	0.217	0.09	70	0.1	1.0
<b>S1</b>	4660.78	2.435	1.01	70	0.7	1.7
<b>S2</b>	21318.28	18.829	7.85	70	5.5	7.2
<b>S3</b>	1771.21	0.663	0.28	70	0.2	7.4
<b>O1</b>	1822.05	0.688	0.29	70	0.2	7.6
<b>O2</b>	127028.30	207.779	86.57	70	60.6	68.2
<b>O3</b>	5123.64	2.766	1.15	70	0.8	69.0
<b>N1</b>	6032.21	3.445	1.44	70	1.0	70.0
<b>N2</b>	26215.37	24.867	10.36	70	7.3	77.2
<b>N3</b>	337.25	0.071	0.03	70	0.0	77.3
<b>N4</b>	337.25	0.071	0.03	70	0.0	77.3

Analizando la tabla anterior, se puede definir el volumen necesario de la estructura retentora de SST. Su frecuencia de mantenimiento se define a partir del volumen de SST que se desee contener. A continuación se hacen 3 propuestas.

Si se desea almacenar 80 litros de SST, el mantenimiento debería realizarse cada 3 meses. En caso en que se presente un evento de la magnitud de O2, se recomienda realizar el mantenimiento inmediatamente después de su conclusión, pues a partir de la Tabla 22 se puede inferir que el evento es un caso especial que está fuera del promedio de los demás aguaceros y resultaría menos viable diseñar la estructura para soportar volúmenes de esta magnitud consecutivamente.

## 6. Conclusiones

Este trabajo de grado estuvo encaminado a caracterizar el Primer Lavado mediante mediciones en un sumidero localizado en la calle 39 con carrera 8va de la ciudad de Bogotá, el cual recibe agua de escorrentía de la altamente transitada Carrera 7ma. Las relaciones entre las características de las lluvias y el Primer Lavado se estudiaron a partir de la correlación de Spearman, del análisis por componentes principales, del modelo propuesto por Gupta y Saul (1996) y la regresión por mínimos cuadrados parciales. De éste último surgió un modelo que sirve para construir curvas  $M(V)$  con base en i) la profundidad total de lluvia; ii) Intensidad media; iii) Intensidad máxima; iv) periodo seco antecedente; y v) duración del evento.

El estudio fue realizado durante dos meses de temporada invernal, y en 6 de 8 eventos se presentó Primer Lavado de Sólidos Suspendidos Totales según la clasificación de Bertrand-Krajewski et al. (1998). Esto refuta la creencia comúnmente aceptada de que el Primer Lavado ocurre pocas veces al año y es exclusivo para lluvias con largos periodos secos antecedentes. Adicionalmente, los valores de concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales encontrados fueron del mismo orden de magnitud que las reportadas para estudios similares (escorrentía sobre calzadas urbanas) en otras partes del mundo (Zhang et al., 2010).

Con ocasión de esta investigación, se pudo establecer que la masa de Sólidos Suspendidos Totales está altamente relacionada con el caudal máximo asociado a los eventos lluviosos. Este resultado sugiere que para mitigar altas descargas de SST se debería centrar la atención en los puntos donde se presentan los máximos caudales de escorrentía.

Los resultados obtenidos a partir modelo planteado por Gupta y Saul (1996) en el presente trabajo son muy similares a los conseguidos por los investigadores en cuencas inglesas ( $0.5 < r < 0.7$ ). Esto sugiere que la forma matemática de dicho modelo presenta grados similares de ajuste independientemente del lugar en el que sea calibrado.

El ajuste de datos de volumen de agua y masa de contaminantes a la función  $M(V)=aV^b$  propuesto por Bertrand-Krajewski (1998) no resultó ser representativo para todos los casos estudiados. Por esta razón sería recomendable buscar formas alternativas para caracterizar el Primer Lavado. A pesar de que no se encontró una correlación entre las variables hidrológicas y el comportamiento de las curvas  $M(V)$ , con la regresión PLS se pudo apreciar el grado de influencia de las mismas, indicando que los eventos con largas duraciones e intensidades medias elevadas son más propensos a presentar Primer Lavado.

La relación entre los hidrogramas y los polutogramas asociados a cada evento fue evidenciada en este trabajo. Se podría decir que si se cuenta con datos

hidrológicos fiables y mediciones de caudal en campo, es posible definir un modelo lluvia-escorrentía, a partir del cual se puedan construir los polutogramas correspondientes a cada evento.

De otro lado, tras analizar los resultados obtenidos para los eventos estudiados no se encontró una relación entre las concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales y la turbiedad, como lo han reportado otros autores (Torres et al., 2011 y Packman et al., 2 ). Esto conlleva a pensar que la turbiedad no es un parámetro confiable para caracterizar los contaminantes del agua lluvia de escorrentía en una vía, y que preferiblemente los Sólidos Suspendidos Totales deben medirse directamente.

Mediante la metodología de mínimos cuadrados parciales se llegó a una propuesta de tipo técnica para implementar en sumideros, la cual está orientada a retener el 70 % de los Sólidos Suspendidos Totales asociados al fenómeno del Primer Lavado. Adicionalmente se hizo una propuesta de mantenimiento esta estructura basada en el volumen de SST acumulado tras varias lluvias. Lo anterior pretende servir como medida para disminuir la descarga de contaminantes sobre los cuerpos hídricos receptores.

## 7.Recomendaciones

Se recomienda a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Javeriana reforzar los temas de probabilidad y estadística que tienen una utilidad considerable especialmente en los proyectos de hidráulica e hidrología. Igualmente sería conveniente ofrecer una mayor variedad de cursos de aprendizaje y dominio de software y programas especializados, que instruyan al estudiante y le brinden mejores herramientas para desenvolverse mejor en su énfasis.

Para la realización de este tipo de estudios se recomienda contar con una fuente de información hidrológica confiable, pues es posible que existan relaciones más contundentes entre las características de las lluvias y la ocurrencia del Primer Lavado.

Para el estudio de la relación entre turbiedad y Sólidos Suspendidos Totales, es recomendable realizar los ensayos de laboratorio por triplicado, con el fin de efectuar análisis estadísticos más profundos que permitan concluir de manera más contundente si existe o no alguna relación entre estos parámetros.

Este trabajo se realizó sobre un sumidero y se encontraron masas de Sólidos Suspendidos Totales transportadas, hasta de 49 kg por evento. Si éste valor se multiplica por el número de sumideros que tiene una ciudad como Bogotá y teniendo en cuenta que hay zonas que presentan una mayor contaminación, se tiene que grandes cantidades de contaminantes están ingresando a los cuerpos hídricos receptores, deteriorando así su calidad. Se recomienda a las empresas encargadas de la infraestructura de drenaje en las ciudades invertir en estudios que permitan mitigar la entrada de esta cantidad de contaminantes a los ríos.

El fenómeno del Primer Lavado debe ser investigado más a fondo con el fin de controlar y disminuir la carga de contaminantes sobre los cuerpos hídricos receptores. Sería interesante realizar un estudio comparativo entre el costo asociado al manejo de contaminantes transportado durante el Primer Lavado, y el costo de plantas de tratamiento capaces de retirar esta misma cantidad de contaminantes del agua.

Con base en los resultados del presente trabajo se recomienda a las autoridades ambientales, centrar su atención en los puntos o lugares donde se presentan los máximos caudales de escorrentía para disminuir la descarga de Sólidos Suspendidos Totales sobre los cuerpos hídricos receptores.

## 8. Referencias

1. A.N. Menéndez y P.A. Tarela, (2000). *El problema de la contaminación en los recursos hídricos*, Buenos Aires, Argentina; s.e.
2. Anderson T. W. (2006). *An Introduction to Multivariate Statistical Analysis. Statistics and Economics*. Stanford University. Second edition. ed. John Wiley & Sons. pp 3(113).
3. Araújo Acosta J.M., González Acosta M. (2010). Metodología para estimar concentraciones de contaminantes en tiempo real a partir de mediciones de turbiedad. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería. 134 p.
4. Artina, S., Bardasi, G., Borea, F., Franco, C., Maglionico, M., Paoletti, A., Sanfilippo, S., 1999. Water quality modelling in ephemeral streams receiving urban overflows. The pilot study in Bologna. Proc. 8th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, ICUSD, Sydney, pp. 1589–1596.
5. ASTM International, (2003a). D1889–00 Standard test method for turbidity of water, in ASTM International, Annual Book of ASTM Standards, Water and Environmental Technology, 2003, v. 11.01, West Conshohocken, Pennsylvania, 6 p.
6. Bertrand-Krajewski J.-L. (2004). TSS concentration in sewers estimated from turbidity measurements by means of linear regression accounting for uncertainties in both variables. *Water Science and Technology*, 50(11), 81-88. ISSN 0273-1223.
7. Bertrand-Krajewski J.-L., Barraud S., Lipeme Kouyi G., Torres A., Lepot M. (2007). Event and annual TSS and COD loads in combined sewer overflows estimated by continuous in situ turbidity measurements. Proceedings of the 11th International Conference on Diffuse Pollution, Belo Horizonte, Brazil, 26-31 August 2007, 8 p.
8. Bertrand-Krajewski. (1992) A model for solid production and transport for small urban catchments: preliminary results, *Water Science and Technology* 25, no. 8 (1992): 29-35.
9. Bonhomme C. Small-scale physical modeling of runoff and particle transport on a road configuration, *12<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011*.
10. Chow, Ven Te. *Hidrología aplicada*. Mc Graw Hill. Colombia, 1994.
11. Duarte, Pilar "Propuesta Metodológica Para La Medición Y Análisis Del Fenómeno De Primer Lavado (FirstFlush) En Cuencas Urbanas- Campus Universidad Nacional De Colombia – Sede Bogotá" (Bogotá: Universidad Nacional De Colombia – Sede Bogotá, 2009). Tesis de maestría
12. Emmanuelle Lucas-Aiguier, Ghassan Chebbo, Jean-Luc Bertrand-Krajewski, Benoit Gagne, Peter Hedges, "Analysis of the methods for determining the

- settling characteristics of sewage and stormwater solids," *Water Science and Technology* 37, no. 1 (1998): 53-60.
- 13.Environmental Protection Authority (2003). *Stormwater Pollution, fact sheet developed by the Stormwater Pollution Prevention Projects*, 491/03, 3 p. Versión electrónica: [http://www.epa.sa.gov.au/pdfs/water\\_general.pdf](http://www.epa.sa.gov.au/pdfs/water_general.pdf).
  - 14.White F.M (1998), *Fluid Mechanics (4th Edition)*, McGraw Hill. New York, 1998 1023p.
  - 15.Figueras M., Salvador (2001). "*Análisis de conglomerados o clúster*", Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Estadística. Cursos virtuales. Documento en línea. <<http://www.5campus.org/leccion/cluster>> revisado en octubre 28 de 2010.
  - 16.Francis P.J., Wills B.J., 1999, Introduction to Principal Components Analysis, *ASP Conference Series*, 162, 363
  - 17.Frank, I.E.; Friedman, J.H. (1993) "A statistical view of some chemometrics regression tools", *Technometrics* 35:109–148.
  - 18.Glynn, Henry J y Heinke, Gary W., (1999). *Ingeniería Ambiental*. 2ª Edición. Capítulo 12, Aguas Residuales. Editorial Prentice Hall, México. Pág. 427
  - 19.Guilford JP, Fruchter B. 1984. Métodos y problemas especiales de correlación. En: *Estadística aplicada a la psicología y la educación*. Editorial MacGraw–Hill. p. 265–333
  - 20.Guio DY, "Influencia de los Parámetros de Calidad de agua y el Fenómeno del firstflush en el diseño de aliviaderos" (Bogotá: Universidad de Los Andes, 2006). Tesis de grado
  - 21.Gupta, K.; Saul, A.J. (1996). "Specific Relationships for the First Flush Load in Combined Sewer Flows". *Water Research* 30 (5): 1244–1252
  - 22.Hoskuldson, A. (1988). Pls regression methods. *Journal of Chemometrics*, 2, 211-228.
  - 23.Helland I.S. (1990). Pls regression and statistical models. *Scandinavian Journal of Statistics*, 17, 97–114.
  - 24.Helland, I. (1988) "On the structure of partial least squares regression", *Communications in Statistics, Simulation and Computation*, 17(2): 581–607.
  - 25.Iwona, Wagner., J. Marsalek., Pascal, B., *Aquatics Habitats in sustainable urban water management*, ed. Taylor and Francis Group. Paris: UNESCO 2002.
  - 26.Jean-Luc Bertrand-Krajewski, Ghassan Chebbo, y Agnes Saget (1998), "Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon," *Water Research* 32, no. 8 (Agosto 1998): 2341-2356.

- 27.Kaczala F, Salomon P, Marques, M, Graneli E, Hogland W. (2011). Effects from log-yard stormwater runoff on the microalgae *Scenedesmus subspicatus*: Intra-storm magnitude and variability. *J Hazard Mater*, 185(2-3),732-739.
- 28.Li-qing, LI YIN Cheng.qing., "Contribution of pollution load of storm runoff in urban areas of Hanyang, Wuhan City on the receiving water". *China Environmental Science*, 2007b. 27(3): 312-316.
- 29.Li-qing, YIN Cheng.qing., "First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China," *Journal of Environmental Sciences* 19, no. 3 (Marzo 2007a): 295-299.
- 30.Marín Díaz Araque, J.M. (2009). Análisis de Cluster y Árboles de Clasificación. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Estadística. Publicaciones en línea. Madrid-España.
- 31.Massy, W.F. (1965) "Principal Components Regression in Exploratory Statistical Research", *Journal of the American Statistical Association*, 60: 234-246.
- 32.Mulan Zhang et al., "Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization," *Journal of Environmental Sciences* 22, no. 1 (Enero 2010): 40-46.
- 33.Novotny, V. (1994).Diverse Solutions for Diffuse Pollution., *Water Quality International.*, Vol. 1, 1994, pp. 24-31.
- 34.Novotny, V., Chesters, G., 1981. *Handbook of Nonpoint Pollution, Sources and Management*. Van Nostrand Reinhold Co.
- 35.Robert Y. G. Andoh, "Urban Drainage and Wastewater Treatment for the 21," en *Urban Drainage 2002* (presented at the 9th International Conference on Urban Drainage, Portland, Oregon, USA, 2002), 252-252.
- 36.Sadar M. (2002). Turbidity instrumentation - an overview of today's available technology. *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*, April 30 – May 2, 2002, Reno, NV.
- 37.Sanz. Victoria, Chichizola. Franco, Naiouf. Marcelo, De Giusti. Laura, y De Giusti. Armando (2007). Super linealidad sobre Clusters. Análisis experimental en el problema del Puzzle N2 -1. Instituto de Investigación en Informática (III-LIDI) – Facultad de Informática – Universidad Nacional de La Plata. La Plata Argentina.
- 38.Steven J. Burian, "Historical Perspectives of Urban Drainage," en *Urban Drainage 2002* (presented at the 9th International Conference on Urban Drainage, Portland, Oregon, USA, 2002), 284-284.
- 39.Torres A., Araújo Acosta J.M., González Acosta M., Vargas Luna A., Lara Borrero J.M. (2011). Metodología para estimar concentraciones de contaminantes en tiempo real en hidrosistemas urbanos a partir de mediciones de turbiedad. *Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes*, ISSN 0121-4993. 8 p. (sometido).

40. Torres Abello, Andrés Eduardo. Apuntes de clase sobre hidrología urbana. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 2004.
41. Vladimir Novotny y Gordon Chesters, Handbook of Nonpoint Pollution: Source and Management (Van Nostrand Reinhold Company, 1981).
42. Water Environment Federation.; Environmental and Water Resources Institute (U.S.); NetLibrary, Inc. 2006. Biological nutrient removal (BNR) operation in wastewater treatment plants. New York: McGraw-Hill.
43. Wold, H. (1975) "Soft modeling by latent variables; the nonlinear iterative partial least square approach", Perspectives in Probability and Statistics, Papers in Honour of M.S. Bartlett.
44. Zhang, M. et al., 2010. Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization. *Journal of Environmental Sciences*, 22(1), págs.40-46