

ANÁLISIS DE LA MOVILIZACIÓN DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN UNA CUENCA URBANA SEPARATIVA MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MUESTREO EN CONTINUO DE LA TURBIDEZ

José Anta, Juan Cagiao, Joaquín Suárez, Enrique Peña

Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente

Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña

Campus de Elviña s/n, 15071 A Coruña

janta@udc.es

Resumen: En este trabajo se analiza la movilización de sólidos en suspensión en una red separativa de aguas pluviales de una cuenca urbana situada en el noroeste de España. En el texto se presentan resultados de la caracterización de los sólidos movilizados por la escorrentía con métodos de muestreo directos e indirectos. El método directo, más convencional, ha consistido en realizar el análisis de muestras de agua recogidas durante varios episodios de lluvia con un tomamuestras automático. Con el método indirecto de caracterización se han analizado los registros en continuo de turbidez obtenidos con la ayuda de una sonda multiparamétrica ubicada en la misma sección de control que el tomamuestras. Los polutogramas de sólidos en suspensión obtenidos con ambos métodos muestran una buena correlación. Además, los registros en continuo han sido empleados para realizar una mejor estimación de varios parámetros de contaminación (concentración media de suceso y carga neta movilizada) ya que en los sucesos analizados el método de muestreo directo tiende a subestimar estos parámetros si no se dispone de un registro completo de todo el evento.

INTRODUCCIÓN

En mayor o menor medida, en los procesos de urbanización se cubren grandes áreas de territorio con superficies impermeables. La consecuencia inmediata de este proceso es un cambio en la hidrología de la zona y un incremento de la contaminación difusa de origen urbano.

Si el sistema de saneamiento es separativo y no se contempla ningún tipo de tratamiento para el agua de escorrentía, la contaminación que es arrastrada por estas aguas será vertida directamente al medio receptor, pudiendo causar impactos significativos. Si la red es unitaria, y no se articulan medidas correctoras, se producirán reboses de la red a través de los aliviaderos, conocidas como Descargas de Sistemas Unitarios (DSU), que verterán a los medios receptores cargas de contaminación procedentes de los caudales de aguas residuales, de la superficie de la cuenca y de la resuspensión de sedimentos acumulados en la red durante el tiempo seco.

Por lo tanto, para la protección de los medios

acuáticos receptores de este tipo de contaminación es necesario el empleo de Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TDUS), denominadas *Best Management Practices* (BMP) en la literatura anglosajona. En este tipo de técnicas se pueden incluir tanto infraestructuras tradicionales para el control y tratamiento de reboses, como los depósitos anti-DSU, y técnicas encaminadas a reducir la escorrentía en origen y técnicas para su control aguas abajo (Puertas *et al.*, 2009).

El proceso de selección y diseño de las TDUS apropiada a cada sistema de saneamiento depende de gran número de parámetros, entre los que destacan las características de la contaminación movilizada y como se incorpora la escorrentía en el medio receptor. Estos factores están íntimamente relacionados con las características de la cuenca analizada: morfología, sistema de drenaje, tipología de red de saneamiento, el nivel de actividad de la cuenca, régimen pluviométrico, etc. Para una correcta caracterización de estos parámetros de cara al diseño de las TDUS se

hace necesario realizar campañas de campo para disponer de datos hidrológicos y de contaminación (Cagiao *et al.*, 2009).

Ya desde los primeros estudios de caracterización de la escorrentía urbana (Sartor y Boyd, 1972; US-EPA, 1983), hasta los más recientes (p.ej. Chebbo y Gromaire, 2004), se ha constatado que una gran parte de la contaminación difusa urbana movilizada en los episodios de lluvia está asociada a las fracciones de sólidos en suspensión. Por este motivo, una de las principales estrategias empleadas en las campañas de campo consiste en caracterizar los sólidos en suspensión totales (SST) como trazador de otros contaminantes asociados.

En este trabajo se analiza el proceso de caracterización de los sólidos en suspensión movilizados en sucesos de lluvia en una cuenca urbana separativa. Para determinar las concentraciones de este parámetro se han empleado dos métodos de muestreo: uno directo, que consistió en el análisis en laboratorio de muestras de agua recogidas en campo con un tomamuestras automático, y otro indirecto, determinando en este caso los SST a partir de los registros de turbidez proporcionados por una sonda de medida en continuo.

METODOLOGÍA

Descripción de la cuenca urbana

La cuenca urbana analizada “Fontiñas” es de tipo separativo. Está situada en la capital gallega, Santiago de Compostela. Esta ciudad, de clima templado, es una de las ciudades más lluviosas de toda España, con una precipitación media anual de 1886 mm y un total de 141 días con lluvia al año (datos de la AEMET para el periodo 1971 y 2000). La Figura 1 se presenta un esquema de la cuenca analizada en este trabajo.

Esta zona, urbanizada hace unos veinte años, es de tipo comercial y residencial, y cuenta con un nivel de actividad que puede considerarse bajo. La extensión de la cuenca es de unas 55 ha, con un 70 % de área impermeable y el resto formado por parques y jardines. El coeficiente medio de escorrentía es aproximadamente de 0.65. La pendiente media de la cuenca es de un 6 %, por lo que los hidrogramas recogidos en la sección de control son muy apuntados (Cagiao, 2002).

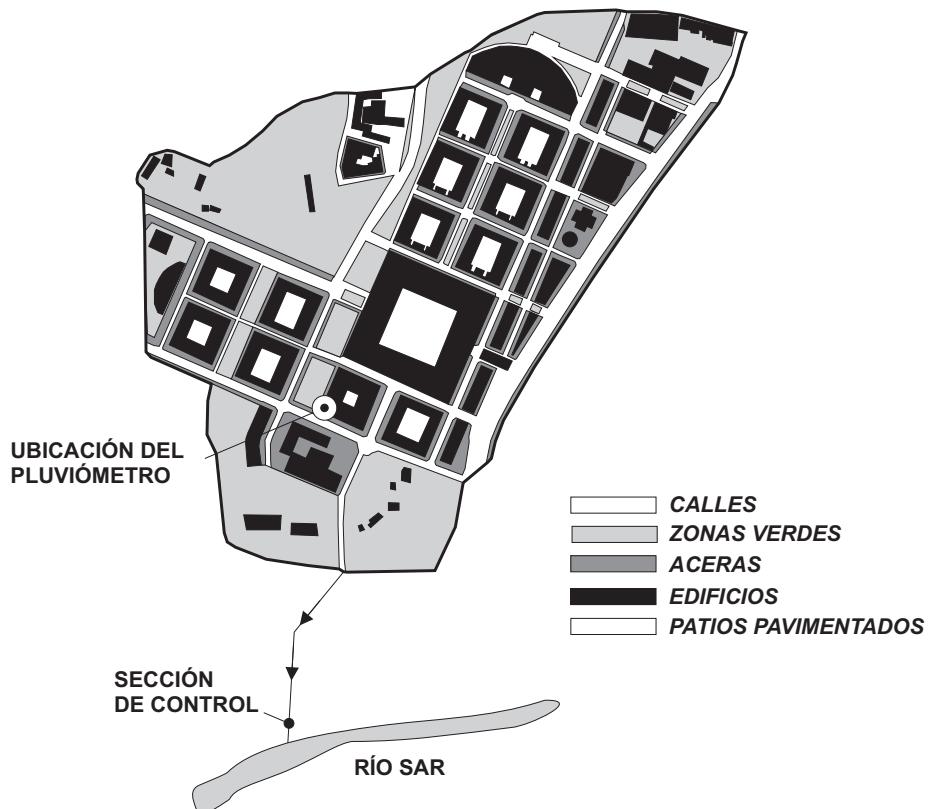


Figura 1. Esquema de la cuenca urbana Fontiñas

Descripción de la sección de control

El Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente ha realizado varias campañas de medida en la cuenca analizada. La sección de control se situó siempre en el punto de vertido de la red separativa de aguas pluviales hacia el río Sar. Se empleó un pluviómetro de balancín ARG100 situado en las inmediaciones de la sección de control para caracterizar las lluvias. Para el registro de caudales se empleó un caudalímetro SIGMA 950, equipado con un sensor de nivel de ultrasonidos y un velocímetro doppler. La precisión de estos instrumentos es de unos 3 mm y 0.3 cm/s respectivamente.

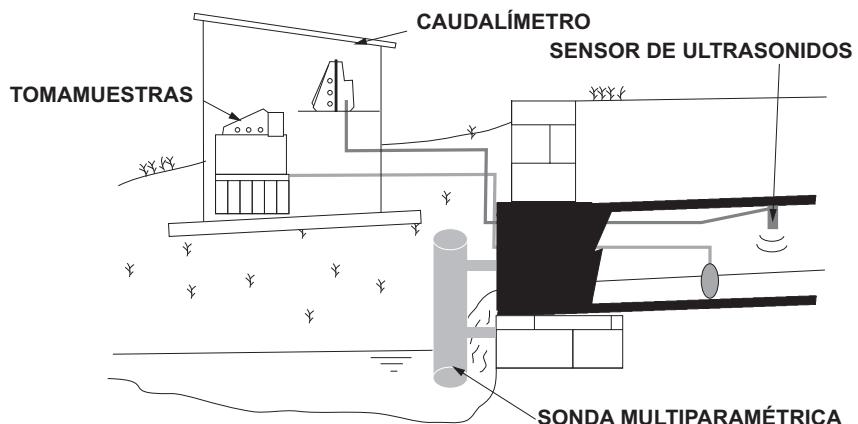
Para caracterizar la contaminación movilizada

en los sucesos de lluvia se empleó un tomamuestras automático SIGMA 900. Este equipo cuenta con un contenedor de 24 botellas de plástico y un brazo motorizado que llena secuencialmente las botellas en intervalos de 5 minutos. Se realizaron dos campañas de campo entre Febrero de 1999 y Marzo de 2000 (Cagiao, 2002) y desde Mayo a Octubre de 2003 (Anta, 2004) en las que se recogieron 14 sucesos de lluvia. En la Figura 2 se presenta un esquema de la instrumentación empleada en la sección de control.

La monitorización de la contaminación en continuo se realizó con la ayuda de una sonda multiparamétrica YSI 9020. Se determinaron la turbidez, conductividad y temperatura del flujo cada 5 minutos.



- vista frontal -



- sección longitudinal -

Figura 2. Fotografía y esquema de la instrumentación empleada en la sección de control

Caracterización de la contaminación

Las muestras recogidas fueron analizadas en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Escuela de Caminos de la Universidad de Coruña. Los parámetros analizados en este trabajo son la turbidez (UNT) y conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) así como los sólidos totales (ST) y sus fracciones disueltas (SDT) y en suspensión (SST), todos ellos medidos en mg/L . Para la realización de las analíticas se emplearon los *Standard Methods* (Greenberg *et al.*, 1999).

Además de la información proporcionada por la evolución de los contaminantes a lo largo de cada suceso de lluvia, graficada como polutogramas, es conveniente analizar otro tipo de parámetros como la Concentración Media de Suceso (CMS), o Event Mean Concentration (EMC) en la literatura anglosajona, o la carga movilizada, expresada como gramos de contaminante por ha efectiva o impermeable.

La CMS se calcula como el cociente de la masa movilizada de cada contaminante y el volumen de escorrentía (US-EPA, 1983)

$$\text{CMS} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{Q}_i \bar{C}_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \bar{Q}_i \Delta t_i} \quad (1)$$

donde N es el número de muestras y \bar{Q}_i y \bar{C}_i son los caudales y concentraciones medias del contaminante durante el intervalo de tiempo Δt_i .

La CMS se emplea habitualmente para evaluar los efectos de la escorrentía sobre el medio acuático receptor, caracterizados por tiempos de respuesta altos en comparación con la alta variabilidad que puede presentar la concentración de un contaminante durante el suceso de lluvia (Chaberneu y Barret, 1998).

Por último, para analizar el fenómeno del primer lavado o "first flush" se pueden emplear distintas aproximaciones. El método más común consiste en graficar curvas normalizadas de movilización, en las que se presenta en abscisas el volumen acumulado de escorrentía y en ordenadas, la masa acumulada del contaminante analizado, ambos relativos al comienzo del suceso (Sansalone y Cristina, 2004). En la parte final de este artículo se aplicarán este tipo de curvas a los registros medidos en la cuenca analizada.

Determinación de la turbidez

Aunque la turbidez no es un parámetro que represente directamente ninguna propiedad física del agua, es una medida que proporciona una estimación indirecta de las partículas en suspensión a partir de la medida de la reflexión de un haz de luz que incide sobre las mismas. Así, cuando un rayo de luz interfiere con una partícula, una parte de la intensidad de luz es absorbida y, el resto, es reflejado en todas las direcciones. Para partículas esféricas, un porcentaje constante de la luz es reflejado con un ángulo de 90 respecto al haz incidente. Los equipos que registran la turbidez se basan en la medida de la intensidad de luz reflejada a 90 (Bukata *et al.*, 1995).

La turbidez es un parámetro que depende de muchos factores, aunque los fundamentales son las características de las partículas en suspensión presentes en el agua (forma, color, tamaño o la relación entre la fracción orgánica e inorgánica). Estas características dependen, por una parte, del tipo de cuenca urbana y por la otra, del momento temporal en el que se realiza la muestra, p.ej., durante tiempo seco o durante un suceso de lluvia (Henckes *et al.*, 2002).

Existen numerosos estudios que demuestran que existe una buena correlación entre la turbidez y los SST (p.ej. Tomanovic y Maksimovic, 1996; Henckes *et al.*, 2002). Bertrand-Krajewski (2004) analizó la correlación existente entre la turbidez y los SST en varias redes unitarias en condiciones de tiempo seco. Este autor encontró buenas correlaciones lineales entre estos parámetros, mostrando así que la turbidez es un buen indicador de los SST presentes en las aguas residuales urbanas (Bertrand-Krajewski, 2004).

Así, con el registro en continuo de la turbidez sería posible obtener registros en continuo de los SST, y de este modo realizar estimaciones más precisas de las masas de SST movilizadas (Sutherland y Jelen, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización hidráulica y de la contaminación

En este apartado se presenta un resumen de los principales parámetros hidráulicos y de contaminación de 14 sucesos de lluvia recogidos en varios trabajos realizados en esta cuenca. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos de los sucesos registrados.

En la Tabla 2 se presenta un resumen estadísti-

co de los valores de la CMS y la carga movilizada por hectárea neta de los contaminantes analizados en este estudio. Estos parámetros se han calculado a partir de la masa de contaminación y volumen del suceso muestreado. Los valores obtenidos para las CMS muestran la gran variabilidad que presenta este parámetro en los diferentes sucesos analizados. Hay que señalar que aunque se presenten 14 sucesos, únicamente se dispuso de la sonda de medida de turbidez en los últimos 5 sucesos.

En la Tabla 3 se presenta una comparación de la contaminación movilizada en la cuenca analizada con los valores referenciados en la literatura internacional. Los valores expuestos de metales pesados, DBO5 y DQO para la cuenca analizada provienen de estudios anteriores (Anta *et al.*, 2006), y por tanto, no se analizan aquí. La comparación expuesta tiene objetivos más cualitativos que cuantitativos ya que no se pueden comparar directamente las características de contaminación de cuencas de diferentes tipologías,

pendientes, pluviometría, etc. Sin embargo, se puede apreciar como los valores registrados en Fontiñas son del mismo orden de magnitud que los que se encuentran en la literatura.

Análisis de los resultados obtenidos con la sonda multiparámetrica

A continuación se analizan en detalle los cinco sucesos de lluvia en los que se disponían datos registrados con la sonda multiparámetrica (sucesos número 10 a 14). En primer lugar, se realizó un análisis de la correlación existente entre: (a) los registros de turbidez obtenidos en campo con la sonda multiparámetrica (TC) y los determinados en laboratorio de las muestras recogidas con el tomamuestras automático (TL) con las concentraciones de SST; (b) los registros de conductividad de campo (CC) y de laboratorio (CL) con las concentraciones de SDT. En la Tabla 4 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos.

Identificador de suceso	Precipitación total (mm)	Intensidad (mm/h)		Caudal (m ³ /s)		Volumen (m ³)	
		Max	Medio	Max	Medio	Muestreado	Total
01	2.7	4.8	2.9	273	0.076	273	306
02	5.6	3.6	2.4	1534	0.161	1534	1611
03	1.1	1.2	1.1	230	0.057	230	334
04	2.1	3.6	2.1	507	0.117	507	—
05	2.6	3.6	2.4	553	0.114	553	636
06	0.9	1.2	0.8	464	0.155	464	659
07	—	—	—	234	0.112	234	314
08	—	—	—	532	0.082	532	638
09	3.8	4.8	1.1	1402	0.202	1402	1570
10	0.6	2.4	2.4	179	0.050	179	183
11	2.8	9.6	0.9	400	0.081	400	488
12	4.0	9.6	2.7	1038	0.224	1038	1090
13	2.6	7.2	1.7	637	0.112	637	688
14	3.8	4.0	2.7	696	0.138	696	800
Valor medio	2.7	4.6	1.9	620	0.120	620	702
Desviación típica	1.5	2.8	0.8	424	0.052	424	443

Tabla 1. Resumen de los parámetros hidráulicos de los sucesos de lluvia muestreados

Parámetro	Contaminante	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Medio	Desviación Típica
Concentraciones Medias de Suceso (CMS)	SST (mg/L)	590	50	219	149
	SDT (mg/L)	223	70	130	56
	ST (mg/L)	721	120	348	173
	Turbidez (UNT)	193	7	187	58
Carga movilizada por hectárea neta	Conductividad (μ S/cm)	100	11	54	33
Carga movilizada por hectárea neta	SST(kg/ha-neta)	8.58	0.58	3.13	2.53
	SDT (kg/ha-neta)	4.22	1.68	1.86	1.14
	ST (kg/ha-neta)	11.89	0.66	4.98	3.29

Tabla 2. Resumen de las CMS de los parámetros de contaminación analizados

CONTAMINANTE	REFERENCIA				
	Este estudio	US-EPA (1983)	Marsalek y Schroeter (1998)	Metcalf y Eddy (1991)	Novotny y Olem (1994)
SST (mg/L)	50-590 (219)	(100)	—	67-101	3-11000 (650)
DQO (mg/L)	26-180 (89)	(65)	86-119	40-73	—
DBO ₅ (mg/L)	22-95 (50)	(9)	—	8-10	10-250 (30)
Pb ($\mu\text{g}/\text{L}$)	13-280 (58)	(140)	(146)	27-330	30-3100 (300)
Zn ($\mu\text{g}/\text{L}$)	136-432 (225)	(160)	(490)	135-226	—

Tabla 3. Características de la contaminación de la escorrentía urbana. Rango de variación y valores medios (entre paréntesis)

Identificador de suceso	Conductividad		Turbidez	
	CL-SDT	CC-SDT	TL-SST	TC-SST
10	0.33	0.23	0.76	0.75
11	0.03	0.02	0.95	0.98
12	0.22	0.04	0.62	0.23
13	0.34	0.21	0.91	0.93
14	0.58	0.58	0.99	0.99

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre la turbidez y la conductividad medida en campo y laboratorio con los SST y los SDT

No se encontró correlación entre los SDT y la conductividad. Hay que señalar que aunque la presencia de iones originados por la presencia de compuestos disueltos orgánicos en las aguas de escorrentía es muy baja, su existencia podría afectar a las relaciones existentes entre la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos. Por este motivo, se realizaron análisis similares entre los sólidos disueltos fijos (la fracción inorgánica) y la conductividad, aunque siguieron sin encontrarse correlaciones significativas entre estos parámetros.

Sin embargo, el análisis realizado con la turbidez si que ofreció buenos resultados. Si se excluyen del análisis los sucesos 12 y 13, se puede apreciar en el cuadro 4 como existe una alta correlación entre los registros muestreados. La escasa correlación obtenida en los sucesos 12 y 13 se debe a problemas detectados en la calibración de la sonda (suceso 12) y a un fallo del cabezal de limpieza de la misma respectivamente (suceso 13). Por estos motivos, estos dos sucesos se han excluido del análisis detallado que se presenta a continuación.

Con la ayuda del método de los mínimos cuadrados se ha ajustado una recta de regresión con todos los registros de turbidez de campo, los obtenidos en laboratorio con otro turbidíme-

tro y las concentraciones de sólidos en suspensión totales y sólidos totales. En la Figura 3 se muestran las rectas y el coeficiente de correlación obtenidos entre la turbidez determinada en laboratorio (TL) y las concentraciones de SST y ST ($R^2 = 0.92$ y $R^2 = 0.94$ respectivamente). Realizando el mismo análisis para los registros de turbidez de la sonda multiparamétrica los valores de R^2 obtenidos fueron de 0.93 y 0.94 para los SST y ST respectivamente. A la vista de los resultados, la correlación entre los valores de TC y TL se puede esperar alta, y de hecho el R^2 obtenido fue de 0.96.

Análisis de los registros en continuo de SST en los sucesos de lluvia

Una vez establecidas las relaciones entre la turbidez registrada con la sonda multiparamétrica, TC, y los SST, se presenta a continuación el análisis de la movilización de la contaminación en los sucesos 10, 11 y 14. En la Figura 4 se presentan los hidrogramas y los polutogramas de SST de estos sucesos obtenidos a partir de las muestras recogidas en campo (SST-TM) y con los valores de sólidos en suspensión inferidos a partir de la turbidez registrada en continuo (SST-TC).

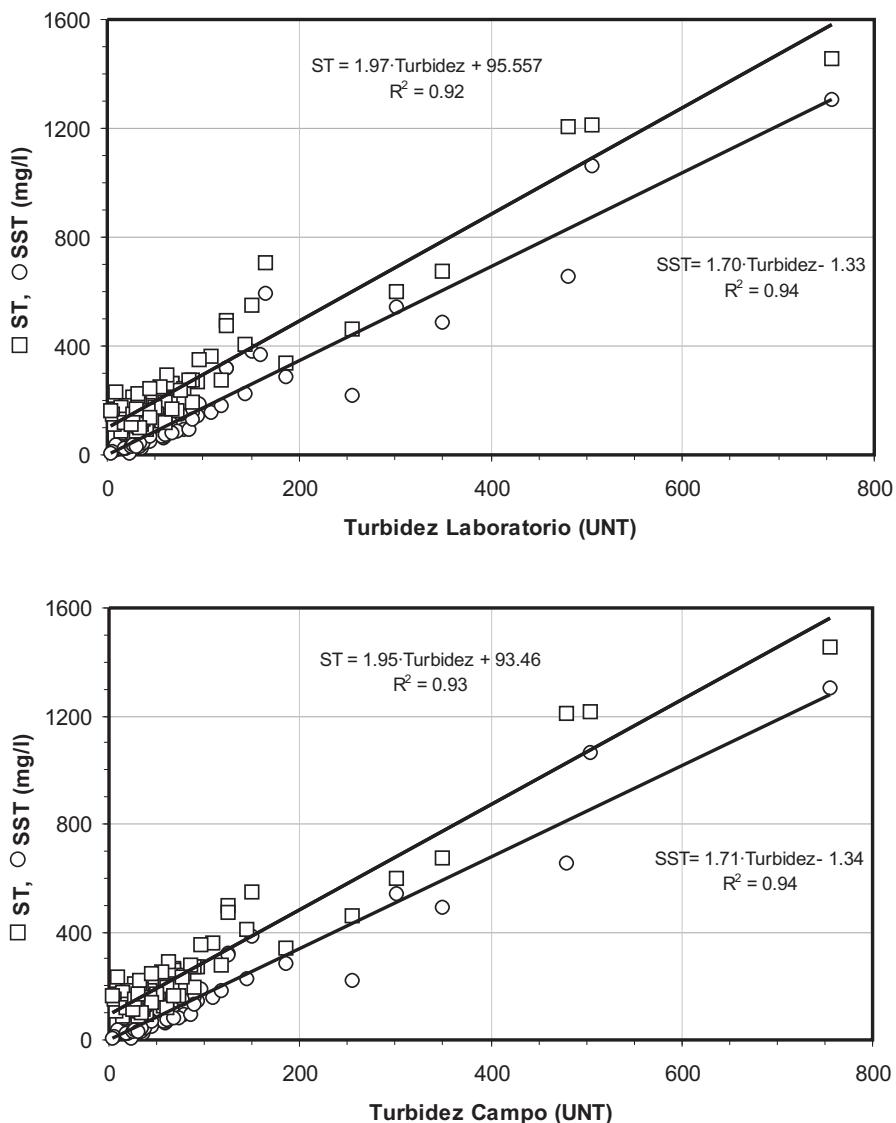


Figura 3. Rectas de regresión obtenidas entre la turbidez medida en laboratorio y en campo y los sólidos en suspensión y los sólidos totales

En las gráficas se puede apreciar la excelente correlación existente entre los registros de SST obtenidos con el tomamuestras y los valores inferidos del registro de turbidez. Además, y quizás más importante, se puede ver como el registro obtenido a partir de la turbidez cubre la totalidad del suceso de lluvia, y de esta forma, es posible obtener una determinación más precisa de los parámetros que caracterizan la movilización de la contaminación.

En la Figura 5 se presenta el efecto que una caracterización incompleta del suceso puede producir en la determinación de los parámetros de contaminación del mismo. Se muestra un diagrama típico de recogida de datos en campo con un tomamuestras automático que comienza el muestreo a partir de un valor umbral de caudal

o nivel. De este modo, en la determinación de las masas movilizadas no se contempla la influencia de las primeras cargas contaminantes. En consecuencia, cuando el polutograma va adelantado con respecto del hidrograma, las CMS y las cargas movilizadas tienden a subestimarse.

Cuando el polutograma acompaña o va retrasado con respecto del hidrograma, el efecto de la determinación de la CMS con un registro incompleto provocaría el efecto contrario, es decir, se sobreestimaría este parámetro. Sin embargo, no es habitual que el polutograma vaya retrasado respecto del hidrograma. De hecho, los miembros del GEAMA han participado en la instrumentación y medida de la contaminación de más de 10 cuencas piloto urbanas (unitarias y separativas) en toda la geografía española, y nunca

han encontrado polutogramas retrasados, siendo los más habituales los de tipo adelantado, y en menor medida, acompañados (ver p.ej. Ca-

giao, 2002; Beneyto, 2003; Anta, 2004; Suárez y Puertas, 2004; Anta *et al.*, 2006; Suárez *et al.*, 2008).

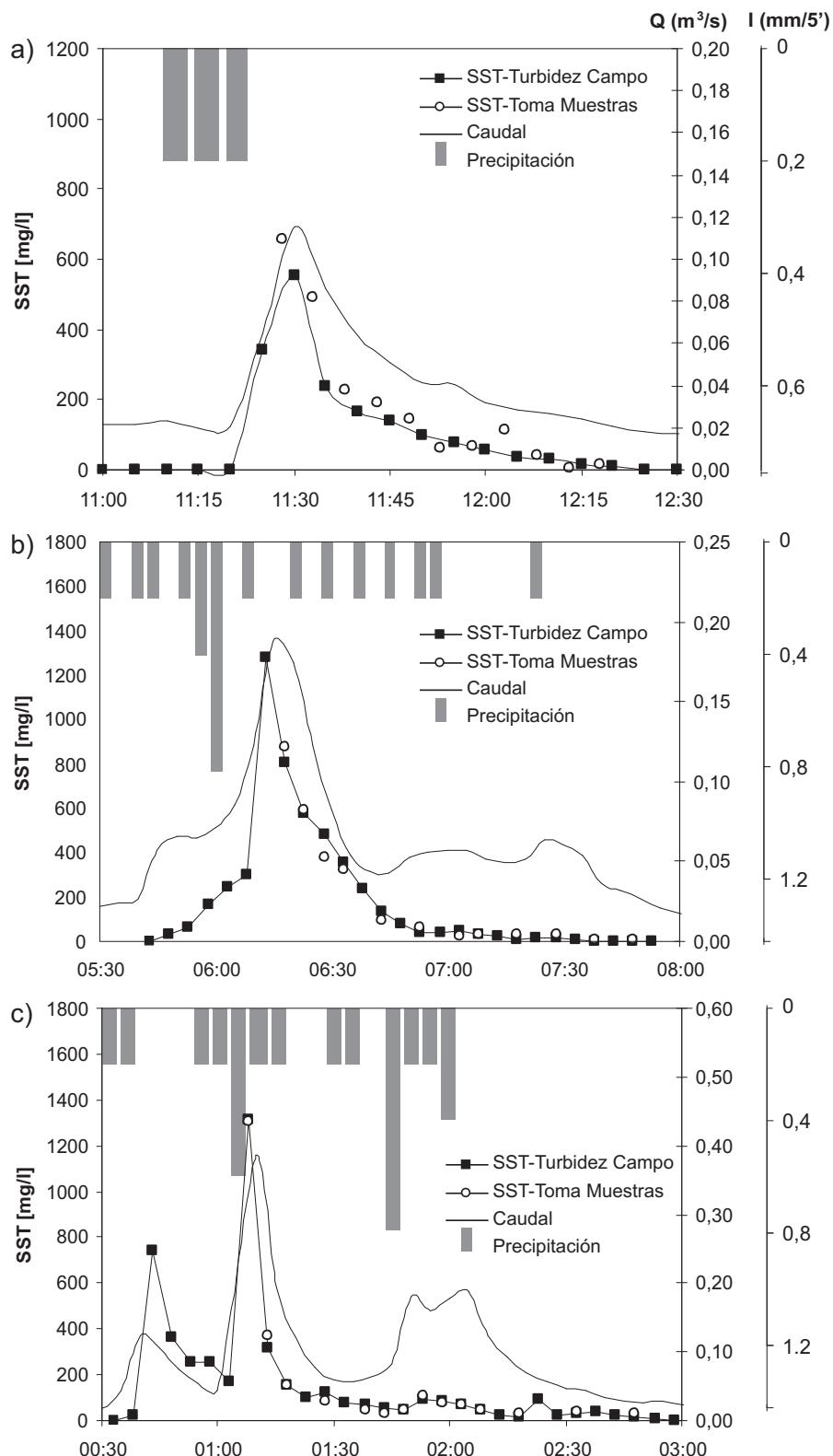


Figura 4. Hidrogramas y polutogramas de los sucesos 10 (a), 11 (b) y 12 (c)

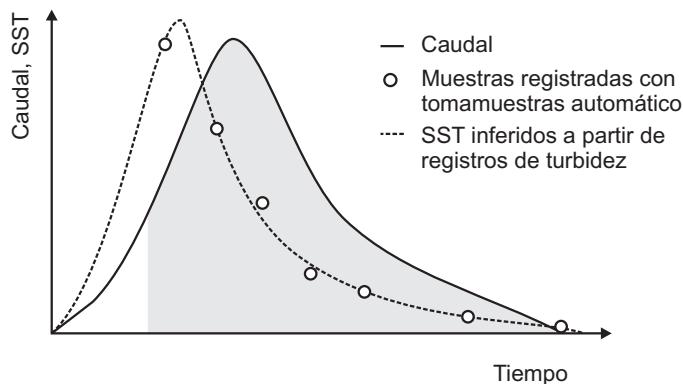


Figura 5. Esquema típico de registro de la contaminación con un tomamuestras automático con alarma de inicio tras superar cierto umbral de caudal o nivel de agua

Identificador de suceso	Método de muestreo	Volumen de escorrentía (m ³)	SST (mg/L)			Carga movilizada (kg/ha-neta)
10	Tomamuestras	179	656	6	264	1.25
	Sonda multiparámetrica	185	552	8	230	1.07
11	Tomamuestras	399	875	6	278	3.19
	Sonda multiparámetrica	501	1280	15	370	4.88
14	Tomamuestras	695	1307	31	230	4.22
	Sonda multiparámetrica	877	1313	3	292	6.75

Tabla 5. Comparación entre los parámetros característicos de SST determinados con el tomamuestras automático y con la sonda multiparámetrica

En una primera aproximación, y con objeto de cuantificar este fenómeno, la Tabla 5 proporciona información sobre el volumen del suceso representativo para las muestras disponibles, las concentraciones máximas, mínimas y medias de suceso de los SST así como la carga neta movilizada durante cada episodio de lluvia. Los resultados se han calculado a partir de las determinaciones de sólidos realizadas en laboratorio e inferidas con el registro de turbidez.

Como era previsible, la caracterización incompleta del suceso modifica los valores obtenidos para los sucesos analizados a excepción del número 10, ya que ambos registros son similares. Si se analiza la CMS de los sucesos 11 y 14 se puede apreciar como los valores del registro incompleto son un 25 % y un 23 % inferiores a los obtenidos con los datos de contaminación de todo el suceso. La carga neta movilizada se reduce en un 40 % y un 38 % respectivamente. Estas diferencias son significativas, y como se verá a continuación, también afectan a las curvas adimensionales de movilización del contaminante.

En la Figura 6 se presentan las curvas de movilización de los tres sucesos analizados, realizadas a partir de los registros recogidos con el tomamuestras automático y los inferidos a partir de las lecturas en continuo de la turbidez.

Se puede apreciar como prácticamente no existen diferencias en las curvas de movilización del suceso 10, aunque en los sucesos 11 y 14, las curvas obtenidas son considerablemente distintas. Analizando estos datos, se puede comprender la importancia de monitorizar el suceso completo ya que, si por ejemplo, este tipo de diagramas se empleasen para el diseño una estructura de retención que retuviese cierta fracción de la masa de sólidos en suspensión se podría incurrir en grandes errores. Así, si se analizase la figura 6 b), y considerando la curva proporcionada por el tomamuestras automático, se podría asumir que el 30 % del volumen de escorrentía contiene aproximadamente el 80 % de la masa de sólidos en suspensión, cuando en realidad, no se retendría más del 50 %.

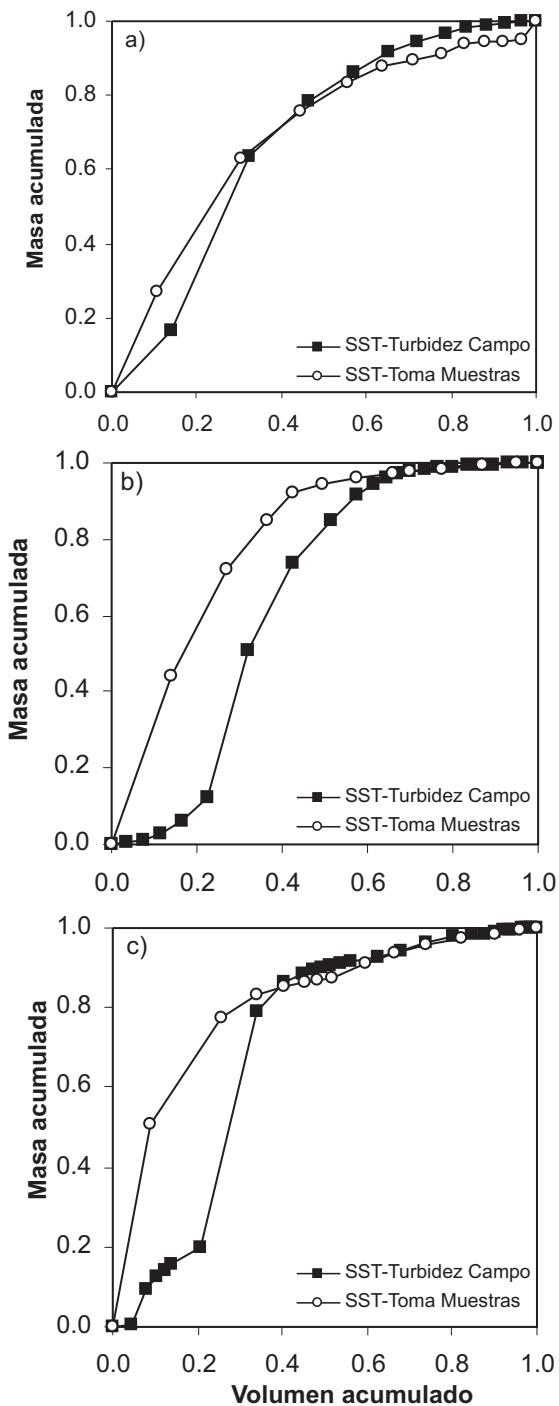


Figura 6. Curvas normalizadas de movilización obtenidas a partir de los datos del tomamuestras automático y de la sonda multiparámetrica en los sucesos 10 (a), 11 (b) y 14 (c)

CONCLUSIONES

Este estudio presenta las características más importantes de los sólidos en suspensión presentes en la escorrentía urbana de una red de saneamiento separativa. La cuenca analizada tiene una superficie de unas 55 ha, siendo el 70 %

impermeable (38.5 ha-netas), y una pendiente media de un 6 %. Se recogieron un total de 14 sucesos de lluvia con la ayuda de un tomamuestras automático. Además, en los últimos cinco sucesos se dispuso de los registros en continuo de turbidez y conductividad gracias a una sonda multiparámetrica.

Los resultados obtenidos muestran una gran variabilidad de los parámetros descriptores de los sucesos de lluvia: caudales, concentraciones medias de suceso y carga movilizada por hectárea neta. Los valores de contaminación registrados se han comparado con otros recogidos en estudios de referencia. La comparación muestra que la contaminación movilizada en la cuenca analizada se encuentra, en términos generales, en los valores medios de los rangos de variación dados por la bibliografía.

Se ha realizado un análisis detallado de los registros obtenidos con la sonda multiparámetrica. En este sentido, no se ha encontrado ninguna correlación entre la conductividad determinada en continuo o a partir de las muestras tomadas en campo con la fracción de sólidos totales disueltos. Sin embargo, se ha expuesto la correlación existente entre los valores de sólidos en suspensión totales y los sólidos totales con la turbidez en varios sucesos recogidos. De este modo, se puede considerar que la determinación de la turbidez en continuo es un método apropiado para estimar las cargas de sólidos en suspensión presentes en la escorrentía urbana.

Por último, se ha mostrado la variabilidad de los parámetros de contaminación de un suceso (CMS y carga neta movilizada) con la disponibilidad del registro completo de la evolución del contaminante a lo largo del mismo. Así, se ha probado, que para los sucesos analizados, las estrategias convencionales de caracterización de contaminantes con tomamuestras automáticos pueden subestimar los valores característicos de CMS y cargas movilizadas, así como las curvas normalizadas de movilización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo proporcionado por el Ministerio de Educación y Ciencia (Programa Nacional de Recursos Hídricos, CICYT HID99-0310), la Xunta de Galicia (Plan Galego de Investigación e Desenvolvemento PGIDT-00PXi11803PN, Financiación de Grupos de Referencia Competitivos, Fondos FEDER 2007-2013) y la empresa AQUAGEST, encargada de la gestión del sistema de saneamiento de Santiago de Compostela.

LISTA DE SÍMBOLOS

Δt_i : Duración del intervalo de tiempo sobre el que se promedia el caudal y la concentración en la determinación de la CMS (s)

\bar{C}_i : Concentración media de un contaminante en el intervalo de tiempo i -ésimo (mg/L)

\bar{Q}_i : Caudal medio de la escorrentía en el intervalo de tiempo i -ésimo (L/s)

N : Número de muestras disponibles para determinar la CMS

CC: Conductividad registrada en campo con la ayuda de la sonda multiparámetrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

CL: Conductividad determinada en laboratorio a partir de las muestras recogidas en campo ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

CMS: Concentración media de suceso (mg/L)

SDT: Sólidos disueltos totales (mg/L)

SST: Sólidos en suspensión totales (mg/L)

ST: Sólidos totales (mg/L)

TC: Turbidez registrada en campo con la ayuda de la sonda multiparámetrica (UNT)

TL: Turbidez determinada en laboratorio a partir de las muestras recogidas en campo (UNT)

REFERENCIAS

Anta, J., Peña, E., Suárez, J. y Cagiao, J., (2006). A BMP selection process based on the granulometry of runoff solids in a separate urban catchment. Water SA, XXXII (3), 419–418.

Anta, J., (2004). Estudio de las cargas movilizadas de sólidos por la escorrentía en una cuenca urbana separativa. Análisis de los modelos de acumulación, lavado y arrastre. Tesina de Investigación, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Universidade da Coruña, A Coruña.

Beneyto, M., (2003). Evaluación de los rendimientos de depósitos de detención aliviadero en redes de saneamiento unitarias en cuencas de la España húmeda. Tesis Doctoral, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Universidade da Coruña, A Coruña.

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.

- Bukata, R.P., Jerome, J.H., Kondratyev, K.Y. y Pozdnyakov, D.V., (1995). Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters. CRC Press, Boca Raton, 384 pp.
- Cagiao, J., (2002). Estudio del funcionamiento hidráulico y de la movilización de la contaminación durante sucesos de lluvia de una cuenca unitaria y una separativa en el Noroeste de España. Tesis Doctoral, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Universidade da Coruña, A Coruña.
- Cagiao, J., Suárez, J., Puertas, J., Anta, J., Peña, E. y Molina, J., (2008). Caracterización de la contaminación movilizada en los sistemas de saneamiento y drenaje. Capítulo 6 en Contaminación asociada a las aguas de escorrentía urbana. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano, J. Puertas, J. Suárez y J. Anta (Eds.), Serie Azul, M-98 CEDEX, Ministerio de Fomento, 600 pp.
- Chaberneu, R.J. y Barret, M.E., (1998). Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads. Water Environmental Research, LXX (7), 1295–1302.
- Chebbo, G. y Gromaire, M.C., (2004). The experimental urban catchment 'Le Marais' in Paris: what lessons can be learned from it?. Journal of Hydrology, CCIC (3-4), 312–323.
- Greenberg, A.E., Eaton, A.D. y Cleseri, L.S., (1999). Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th Edition, APHA American Public Health Association, Washington D.C., 1325 pp.
- Henckens, G.J.R., Veldkamp, R.G. y Schuit, T.D., (2002). On monitoring of turbidity in sewers. American Society of Civil Engineers, Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Drainage, Portland.
- Marsalek, J. y Schroeter, H.O., (1998). Annual loadings of toxic contaminants in urban runoff from the Canadian Great Lakes Basin. Water Pollution Research Journal of Canada, XXIII (2), 360–378.
- Metcalf y Eddy, (1991). Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse. McGraw-Hill Inc, Singapore, 1 334 pp.
- Novotny, V. y Olem, H., (1994). Water quality: Prevention, identification and management of diffuse pollution. Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1072 pp.
- Puertas, J., Suárez, J. y Anta, J., (2008). Diseño de sistemas de saneamiento y drenaje: nuevos objetivos y conceptos. Capítulo 1 en Contaminación asociada a las aguas de escorrentía urbana, Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano, J. Puertas, J. Suárez y J. Anta (Eds.), Serie Azul, M-98 CEDEX, Ministerio de Fomento, 600 pp.
- Sansalone, J.J. y Cristina, C.M., (2004). First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 130 (11), 1301–1314.
- Sartor, J.D. y Boyd, G.B., (1972). Water pollution aspects of street surface contaminants, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.
- Suárez, J. y Puertas, J., (2004). Determination of COD, BOD and Suspended Solids Amounts During CSO Events in Some Combined Catchments in Spain. Ecological Engineering, 24 (3), 199–217
- Suárez, J., Anta, J., Cagiao, J. y Jácome, A., (2008). La contaminación de las aguas pluviales. Capítulo 2 en Contaminación asociada a las aguas de escorrentía urbana, Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano. J. Puertas, J. Suárez y J. Anta (Eds.), Serie Azul, M-98 CEDEX, Ministerio de Fomento, 600 pp.
- Sutherland, R.C. y Jelen, S.L., (1996). Sophisticated Stormwater Quality modelling is worth the effort, en Advances in modelling the management of Stormwater Impacts, W. James (Ed.), CHI, Ontario.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L. y Stensel, H.D., (2002). Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse. Metcalf and Eddy, 4th ed., McGraw Hill, Nueva York, 1848 pp.
- Tomanovic, A. y Maksimovic, C., (1996). Improved modelling of suspended solids discharge from asphalt surface during storm event. Water Science and Technology, XXIII (4-5), 363–369.
- US-EPA, (1983). Results of Nationwide Urban Runoff Program, Volume 1, Final Report, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.