

PROBLEMÁTICA DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA EN ENTORNOS URBANOS. CASO DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

SUÁREZ, J.; PUERTAS, J.; JÁCOME, A.; CAGIAO, J.; DÍAZ-FIERROS V., F.*; TEMPRANO, J**.;
TEJERO, I.**

Universidad de A Coruña, * Universidad de Santiago de Compostela, ** Universidad de Cantabria

Se agradece la colaboración y apoyo prestado por el Excmo. Concello de Santiago de Compostela,
AQUAGEST Galicia y a la CICYT, proyecto AMB95-0997-C02 y HID-98-0286.

Universidad de La Coruña
Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
(ETSI Caminos, Campus de Elviña s/n, 15.071,
A Coruña, La Coruña-España
E.Mail: suarez@iccp.udc.es).

RESUMEN

En la presente ponencia se lleva a cabo una reflexión sobre los conceptos básicos que definen la forma en que se genera la contaminación de la escorrentía urbana, cómo es lavada de las superficies y cómo se ve transportada por la red de saneamiento. Si estas aguas no se controlan y/o tratan se produce un aporte de contaminación al medio receptor tan importante que no permite alcanzar los objetivos de calidad del agua para usos básicos e impiden la recuperación de los ecosistemas, además de alterar y desequilibrar el resto del sistema de saneamiento (red de alcantarillado y estación depuradora de aguas residuales). Se realiza también una reflexión sobre los modelos de simulación en base al estudio que se está realizando sobre la problemática concreta de la ciudad de Santiago de Compostela, singular por su elevada pluviometría y por la escasa capacidad del río Sar para recibir vertidos.

Al englobar todos estos aspectos se llega a la conclusión de que es necesario realizar una revisión global del sistema de saneamiento y "rediseñarlo" aplicando criterios de "gestión integral" de las aguas y de contaminación (tanto en tiempo seco como en tiempo de lluvia), asumiendo la necesidad de incorporar a la red nuevas infraestructuras de control y tratamiento (SCTR), asumiendo los costes que esto implica.

1.- INTRODUCCIÓN

Los primeros esfuerzos en depuración de aguas residuales se centraron en el control de los vertidos puntuales de origen urbano e industrial. Después de un fuerte desarrollo en sistemas de tratamiento se comprobó que en muchos países la calidad de las aguas no era todavía satisfactoria (Ellis, 1991). Se observó que una gran parte del problema era originado por los vertidos intermitentes que se producían durante y después de las lluvias desde los alcantarillados unitarios de los núcleos urbanos. Este tipo de vertidos se denominan "reboses de alcantarillado unitario" (RAU), descargas de sistemas unitarios (DSU), alivios de tormenta (C.H.N., 1995), o "Combined Sewer Overflows" (CSO), en la literatura anglosajona. Fue en EE.UU. donde por primera vez se reconoció la importancia de este problema en la "Federal Water Control Act Amendments" de 1972. Después de años de estudios de caracterización de este tipo



de sucesos se propusieron las medidas de control pertinentes y se comprobó el elevado coste económico que suponía minorar la contaminación que era vertida al medio acuático a través de este tipo de vertidos ("Cost Methodology of Combined Sewer Overflows and Storm Discharges", EPA-430/9-79-003). A pesar de que desde esos años se llevan invertidos muchos recursos en el conocimiento y control del problema todavía hoy sigue siendo una de las principales causas de contaminación del agua (Moffa, 1990; Malgrat, P., 1995; Witte, J., 1997).

En Europa el control de la contaminación del agua de origen urbano siguió pautas similares a las de EE.UU. y concluyó también, al término de la década de los 80, que la eliminación o minimización de los reboses de los sistemas unitarios debía considerarse como objetivo prioritario en los planes de saneamiento y mejora de la calidad del agua de los sistemas acuáticos (Ellis, 1991). La Directiva 91/271 sobre tratamiento de aguas residuales es, sin embargo, poco explícita en relación con este problema. Sólo cita de forma genérica que todo tipo de agua que entre en una red unitaria deberá ser tratada y cita de forma explícita la necesidad de minimizar los vertidos de las aguas de tormenta. Deja a los estados miembros la libertad de limitar la contaminación del agua de los reboses mediante el establecimiento de una determinada dilución en un momento del vertido o la imposición de un número máximo de reboses al año (Valirón, F., Tabuchi, J, 1992).

En España, en donde predomina el alcantarillado unitario, el problema es evidente. Sin embargo, sólo muy recientemente, como en el "workshop" realizado en Benicassim en 1995, se destacó la importancia de este problema (Malgrat, P. 1995); asimismo, el MOPTMA diseñó a partir de los consejos del grupo "Grupo Avanzado de Drenaje Urbano (GADU)" de la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS), el "Programa Nacional para la Medida de la Calidad de las Descargas de Alcantarillado Unitario a los Medios Receptores", que tiene prevista su aplicación a diferentes ciudades españolas.

Actualmente, se admite que el control de los RAU debe realizarse bajo el principio de la "Gestión Integrada", considerando todas las relaciones que se establecen entre: A) lluvia, C) superficie de cuenca C) sistema de colectores; C) estación depuradora; D) medio receptor (Marsalek-Sttimhar, 1994) aplicando siempre las que son definidas como "métodos de gestión racional" (BMP- "Best Management Practices") (Horner, Skupien, 1994). Para poner en práctica estas medidas se necesita tener un buen conocimiento de los siguientes puntos:

1. Objetivos de calidad del agua en el medio receptor.
2. Medida y análisis de las lluvias
3. Modelos de transformación de lluvia-escorrentía
4. Caracterización (caudales, concentraciones, distribución granulométrica de los sólidos) y modelado de los reboses



5. Comportamiento de la estación depuradora frente a variaciones de caudal y carga
6. Capacidad autodepuradora del medio receptor

Los impactos de los R.A.U. pueden ser muy negativos. Determinan una pérdida muy importante de la eficacia del sistema, cuyo fin es la protección del medio acuático receptor. Las insuficiencias de la red de drenaje frente a la lluvia da lugar a inundaciones en la cuenca, con las consiguientes molestias al ciudadano y los demás problemas que en general conllevan. La incorporación de sistemas de control y tratamiento de estos reboses, determina una nueva relación entre las fuentes de contaminación y caudal, los sistemas de transporte y el medio receptor.

Una visión integral de la gestión del sistema que minimice los impactos y permita alcanzar los objetivos de transporte y mantenimiento de la calidad del agua fijados obliga a desarrollar una estrategia de control total de la contaminación. La contaminación que se permita entrar a la red de saneamiento desde la cuenca (por escorrentía o por aguas residuales urbanas), las transformaciones que dicha contaminación sufra en la red, la capacidad de transporte de la red y las diluciones que se permitan en los reboses, los sistemas de control y tratamiento que se implanten a lo largo de la red, determinarán qué tipo de aguas residuales, caudales y cargas recibirá la EDAR, que condicionarán su diseño y sus estrategias de explotación (Suárez,J.; Tejero, I.; 1995). La gestión de los R.A.U va a ser siempre difícil tal y como se pone de manifiesto analizando simplemente uno de los factores, la lluvia, de naturaleza estocástica, por lo que será imposible una protección absoluta del medio receptor.

Por otra parte, la concentración de actividades humanas genera deposición de polvo, suciedad, arenas, materia orgánica, nutrientes, metales pesados, tóxicos y contaminación bacteriológica sobre las superficies. Estos materiales son lavados y arrastrados por la escorrentía superficial, y al final acaba aumentando la contaminación de las aguas receptoras. Al depositarse los materiales que iban en suspensión los organismos mueren al quedar enterrados. Los nutrientes contribuyen a la mejora de la productividad pero pueden generar problemas de eutrofización. La materia orgánica biodegradable genera descensos en los niveles de oxígeno disuelto. Los metales pesados, los hidrocarburos y la sal pueden ejercer efectos crónicos o de toxicidad aguda sobre los ecosistemas acuáticos. El vertido de contaminación bacteriológica por las aguas de escorrentía puede generar riesgos para la salud. Todos estos impactos perturban los posibles usos de la masa de agua receptora.

Las cargas contaminantes anualmente vertidas al medio receptor por las aguas de escorrentía son del mismo orden de magnitud que las vertidas por la red de aguas residuales tras tratamiento convencional, al menos para contaminantes como los sólidos en suspensión. Los vertidos de nutrientes y metales pesados desde sistemas separativos y por R.A.U. desde sistemas unitarios son comparables, calculados por área de superficie pavimentada.



2.- CARACTERÍSTICAS DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA

2.1.- FUENTES DE CONTAMINACIÓN DIFUSA URBANA

En general, las fuentes de contaminación pueden ser clasificadas en dos categorías: fuentes puntuales y fuentes difusas. Se habla de fuentes puntuales cuando la contaminación es aportada al medio través de un colector o canal en un lugar concreto; son vertidos de fácil localización y su origen puede ser determinado relativamente bien. Las fuentes difusas, o no localizables, son aquellas cuya contaminación se origina, y se encuentra dispersa, en zonas muy extensas; su control, ya sea en su generación, o en su acceso a los sistemas acuáticos, es muy difícil.

Una fuente clara de aporte de contaminación a los sistemas acuáticos es la escorrentía superficial. La escorrentía, generada a partir de los sucesos de lluvia, disuelve y arrastra los materiales de todo tipo que se encuentran depositados en la superficie. Evidentemente, como consecuencia de las diferentes actividades y usos que se realizan en ellas, una cuenca natural, una cuenca rural, una cuenca urbana o una cuenca industrial, tendrán aguas de escorrentía con muy diferentes tipos y cargas de contaminación. En el primer caso, en una cuenca natural, se podría hablar de impurificación natural.

La contaminación difusa se caracteriza por (Novotny, 1991 y Deutsch, 1989):

- Acceder al medio receptor a través de vertidos intermitentes que están ligados a un fenómeno de naturaleza aleatoria: la lluvia.
- Contaminación procedente de zonas muy extensas, incluso aunque se suponga la existencia de lugares de almacenamiento como las cunetas o la misma red de drenaje.
- Vertidos con una alta variabilidad en concentraciones tanto en el tiempo, durante un mismo suceso, como de un suceso a otro. Las concentraciones medias pueden variar en una relación de 1 a 40 para un mismo parámetro y en una misma cuenca vertiente.
- Contaminación muy difícil de muestrear en origen.
- Las materias en suspensión transportadas por las aguas pluviales son de naturaleza esencialmente mineral (su fracción orgánica es del orden del 30%).

En las últimas décadas se ha producido un intenso movimiento de concentración de la población en las zonas urbanas, a la vez que se han ido incrementando las actividades industriales. En dichas áreas se produce una gran cantidad de contaminación difusa que luego accede a los medios receptores sobrepasando en la mayoría de los casos su capacidad de asimilación o autodepuración. La escorrentía superficial urbana no es



mas que una muestra representativa de dicho fenómeno y a ella están asociados todos los parámetros de conducta y comportamiento de la urbe hacia su entorno físico.

Son muy diversas las causas de la contaminación de la escorrentía superficial urbana. La lluvia y la nieve atrapan contaminantes presentes en la atmósfera en su caída; una primera fracción de la misma se emplea en mojar las superficies, otra se evapora y otra queda atrapada en huecos y depresiones del terreno. Si sigue lloviendo, el agua se moviliza hacia los puntos de recogida, drenando las superficies y, a su vez, limpiando y transportando en disolución o en suspensión los contaminantes acumulados.

La contaminación de la escorrentía urbana llega a los sistemas receptores a partir de dos tipos de vertidos: los directos desde la red de pluviales de un sistema de saneamiento separativo y los vertidos procedentes de sistemas de saneamiento unitario. Cuando se producen los reboses de los sistemas de alcantarillado unitario, además de la contaminación propia de la escorrentía superficial urbana, se vierte al medio receptor contaminación de las aguas residuales urbanas de tiempo seco (parte de la que ya estaba siendo transportada por los colectores y parte de la que se había depositado en los mismos como consecuencia del régimen hidráulico existente en tiempo seco; ésta última será resuspensionada y arrastrada ante las nuevas condiciones hidráulicas).

A continuación se analizan brevemente cada una de las posibles focos de la contaminación de la escorrentía urbana

Contaminación atmosférica:

Los contaminantes presentes en la atmósfera, de una forma u otra, son atrapados por la lluvia a su caída y transportados por la escorrentía por las superficies impermeables. Numerosos autores han obtenido datos de contaminación de agua de lluvia comparando zonas sin contaminación con zonas urbanas (contaminadas). Las tablas siguientes muestran la variabilidad que puede presentar la calidad del agua de lluvia por efecto de su contaminación al atravesar la atmósfera.

Calidad de agua de lluvia (Thomas, 1993)

Parámetro	Unidades	ZONA RURAL	ZONA URBANA	ZONA INDUSTRIAL
Ph	-	6.9	6.8	6.7
Conductividad	µS/cm	25	30	20
Turbidez	NTU	0.2	0.2	0.8
SS	mg/L	2.0	3.0	6.0
CF	UFN/100 mL	0.0	0.0	0.0
Nitratos	mg/L	0.23	0.21	0.05
Zinc	mg/L	0.0	0.0	0.5
Plomo	mg/L	0.0	0.0	0.0



Algunos autores afirman que la principal causa de deterioro de la calidad del agua de lluvia por efecto de la contaminación atmosférica se debe al nitrógeno y sus formas, por lo que el aporte de nutrientes en la escorrentía superficial no es despreciable. Whipple, et al. (1983), Kluesner, (1974), citados por Huber (1988), mencionan que en las aguas de lluvia las cargas de nitrógeno y sus formas pueden ser superiores a las presentes en el suelo por contaminación difusa.

El empleo del plomo en el combustible de los automóviles puede ocasionar que en el agua de lluvia de las ciudades se alcancen concentraciones de aproximadamente 1 mg Pb/m³.

Calidad del agua de lluvia (Valiron, 1992)

Parámetro	Unidades	Valor
pH	-	4 - 7
DQO	mg/L	20 - 30
SO ₄	mg/L	2 - 35
Ca	mg/L	0.5 - 2.0
Na	mg/L	0.5 - 2.0
Zn	mg/L	0.02 - 0.08
Pb	mg/L	0.0 - 0.15

Calidad del agua de lluvia en ciudades europeas (Deutsch, et. Al., 1989)

Cuenca	SST (mg/L)	NTK (mg/L)	P (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
Göteborg (Suecia)	-	-	0.04 - 0.12	0.03 - 0.06	0.005 - 0.15
Munich (Alemania)	-	-	4.95	0.110	0.08
Maurepas (Francia)	4	0.6	-	0.008	0.022
Les Ulis Nord (Francia)	5	1.3	0.05	0.009	0.051

Contaminación de la superficie de la cuenca:

Residuos animales:

En el medio urbano los mamíferos más abundantes son los perros y los gatos; las aves, más comunes las palomas y los gorriones (en algunas ciudades gaviotas y estorninos), también representan una población significativa. Todos los animales que viven en los centros urbanos, de una u otra manera, generan residuos que, por lo general, se depositan en las calles, plazas, y aceras. Al llover, las superficies son lavadas y la escorrentía arrastra estos residuos transportándolos al sistema de drenaje. Los residuos de animales aportan bacterias, virus, y gran cantidad de nutrientes a las aguas de escorrentía. Los microorganismos pueden incluir patógenos que pueden causar enfermedades a los seres humanos, sin embargo su presencia no está asegurada al utilizar como indicadores los



coliformes fecales y los estreptococos como indicadores. Según el *NURP (US-EPA, 1993)*, las aguas de escorrentía urbana contienen entre 10^4 y 10^5 UFC/100 mL, por lo que la presencia de patógenos es bastante probable.

Basura y residuos:

Las zonas urbanas se caracterizan por ser fuentes de producción a gran escala de residuos sólidos. Las actividades diarias de las ciudades ocasionan el depósito sobre las superficies de las calles de materiales como papeles, cartones, residuos textiles, madera, goma, vegetales, hojas, colillas, botellas y vidrios rotos, latas, plásticos, y polvo en general. Una vez depositados, por un proceso de degradación física y/o química, dichos residuos se disgregan y su transporte por las aguas de escorrentía se ve facilitado.

Tráfico rodado:

El plomo y el zinc son los metales pesados más abundantes en la escorrentía urbana. Chistensen (1979), demostró que el zinc presente en los neumáticos de los vehículos es una significativa fuente de este metal en la escorrentía urbana. Por lo general, los metales pesados presentes en este tipo de aguas se deriva de fuentes tales como: el tráfico de vehículos, la corrosión de fachadas, cubiertas y tejados. El zinc y el plomo presentes pueden relacionarse con la cantidad de tráfico. Así, Chistensen (1979), valoró que se deposita un promedio de 0.0030 g Zn/vehículo.Km y 0.0049 g Pb/vehículo.Km. Como consecuencia del tráfico de vehículos también aparecen aceites, combustibles y fluidos hidráulicos. Pitt y Army (1973), citados por Wanielista (1979), demostraron que en áreas industriales se pueden producir cargas contaminantes de aceites y grasas del orden de 9.26 Kg/Km de cuneta y día; en áreas residenciales de 5.25 Kg/Km de cuneta y día, y en zonas comerciales de 1.38 Kg/Km de cuneta y día. Del uso y deterioro de los vehículos pueden generarse también residuos de plástico y vidrio.

Erosión de los pavimentos.

Posibles actividades agrícolas y de jardinería:

Ningún entorno urbano está completamente delimitado. En el cinturón que rodea las ciudades es posible observar terrenos dedicados a prácticas agrícolas e inclusive pecuarias. Los jardines y parques de nuestras ciudades representan actividades agrícolas dentro de los núcleos urbanos. En dichos terrenos se utilizan fertilizantes, pesticidas y herbicidas.

Uso de sal para el deshielo de la nieve:

El deshielo de la nieve es un mecanismo adicional que genera aguas de escorrentía. A pesar de que los caudales que se deducen de este fenómeno son bajos, estos permanecen en el tiempo durante varios días y eliminan una fracción significativa de los contaminantes depositados en las superficies. Los principales contaminantes que pueden acompañar a la nieve son los cloruros y el plomo. En las calles y carreteras se pueden alcanzar concentraciones superiores a 20.000



mg/L de cloruros siendo su rango común entre 1.000 y 10.000 mg/L. Adicionalmente, en la nieve, las concentraciones de plomo oscilan entre 1 a 10 mg/L, y alcanzan valores extremos de 100 mg/L; proceden del combustible de los vehículos. En general el problema de la contaminación por nieve está asociado a la presencia de sólidos en suspensión.

Superficies no protegidas:

En muchas zonas urbanas existen terrenos en donde no existe edificación alguna o simplemente se encuentran abandonados o en espera de una nueva edificación. Por lo general el suelo está expuesto a procesos de erosión.

Terrenos con obras:

La cantidad de sedimentos en los vertidos de aguas de tormenta que proceden de zonas con terrenos en construcción pueden variar considerablemente. Estudios recientes han demostrado que en dichas zonas las cargas de sedimentos pueden ser del orden de 85 a 110 Tm/Ha/año. Los sedimentos en las aguas de escorrentía de terrenos en obras de edificación son generalmente de 10 a 20 veces de aquellos que se generan en terrenos agrícolas, y de 1000 a 2000 veces aquellos que ocurren en zonas forestales. En un periodo de tiempo pequeño estos terrenos pueden contribuir con más sedimentos a los medios receptores que los que normalmente ocurrirían en varias décadas (ASCE, 1993). El polvo generado en estos terrenos por lo general suele estar acompañado de aceites y lubricantes de la maquinaria utilizada en la construcción; también pueden estar presentes residuos de la corrosión de materiales y lixiviados de la basura (Lázaro, 1990; Whipple, 1983).

Aportación de contaminantes según fuentes

CONTAMINANTE	CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE FONDO	EROSIÓN DEL SUELO	DETERIORO DE VEHÍCULOS Y RODADURA	EMISIONES GASEOSAS DE VEHÍCULOS	PRODUCTOS INDUSTRIALES	COMBUSTIBLES FÓSILES	QUÍMICOS USADOS EN CÉSPED Y JARDINES	AVES Y MASCOTAS
SS	P	M	M			P		
MO		M	M	P				M
N	P	P		M		M	M	M
P		M		P			M	M
HIDROCARBUROS			M	M	M			
BACTERIAS Y VIRUS								M
Fe		M						
Mn		M						
Zn		P	M		P		P	
Pb	P			M	P			
Cu			M		M			



CONTAMINANTE	CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE FONDO	EROSIÓN DEL SUELO	DETERIORO DE VEHÍCULOS Y RODADURA	EMISIONES GASEOSAS DE VEHÍCULOS	PRODUCTOS INDUSTRIALES	COMBUSTIBLES FÓSILES	QUÍMICOS USADOS EN CÉSPED Y JARDINES	AVES Y MASCOTAS
Cr			M		M			
Ni			P		M			
Cd			P		M	M		
Sulfuro	P			P		M		M
Ácido Nítrico	P			M		M		
Ácido Sulfúrico	P							
Pesticidas, insecticidas, herbicidas							M	

M...mucho aportación
 P...poca aportación

2.2.- EL FENÓMENO DE ACUMULACIÓN DE CONTAMINACIÓN EN LA SUPERFICIE DE LA CUENCA

Sartor, Boyd y Agardy (1974) realizaron una de las investigaciones pioneras en este campo; sus conclusiones sobre la acumulación de suciedad en la superficie de una cuenca han servido de guía para los investigadores posteriores. Estas conclusiones fueron:

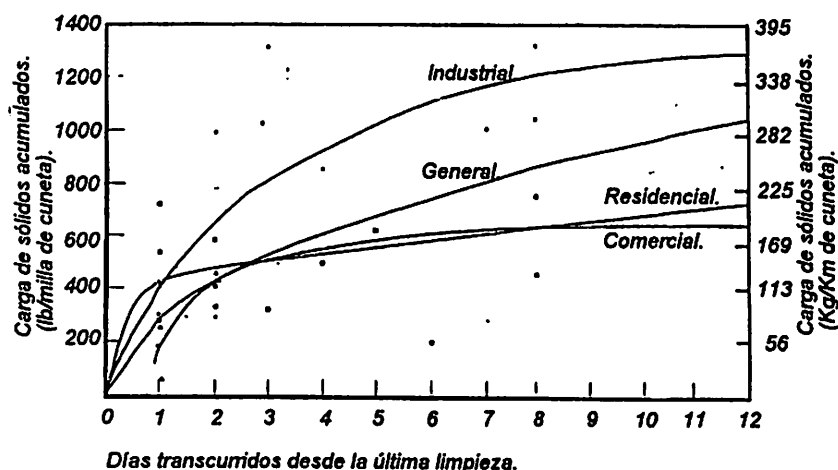
- La escorrentía procedente de la superficie de las calles, generalmente, está muy contaminada.
- El constituyente principal de los contaminantes en la superficie de las calles es inorgánico, material mineral, similar a arena o limo.
- La cantidad contaminante que hay en esa zona depende del tiempo transcurrido desde la última vez que el área fue limpiada, bien manualmente bien por un aguacero.
- La cantidad contaminante presentes en diferentes calles es muy diferente.
- Una gran parte de la contaminación potencial está asociada con la fracción fina de los sólidos presentes en las calles.
- El cálculo de la DQO proporciona una buena base para estimar la demanda potencial de oxígeno.
- Los contaminantes no se distribuyen uniformemente a lo largo de las calles.
- La velocidad a la que un aguacero levanta la materia en forma de partículas de la superficie de la cuenca depende de tres factores: intensidad del aguacero, características de la superficie de la calle y tamaño de las partículas.
- Las prácticas habituales de limpieza son, fundamentalmente, para lograr propósitos estéticos. Incluso mediante una correcta operación y con unos programas de limpieza adecuados su eficiencia en la eliminación de la fracción fina de la suciedad de las calles es baja. El esfuerzo necesario en la limpieza



varia para eliminar la fracción más fina de la suciedad es varias veces el esfuerzo habitual en las operaciones de limpieza.

- Los imbornales con depósito son efectivos para la eliminación de sólidos inorgánicos gruesos (arena gruesa y gravilla) procedentes de la escorrentía, pero son ineficaces en la eliminación de los sólidos finos y de la mayor parte de la materia orgánica.

Diferentes autores han investigado la evolución en el tiempo de los depósitos acumulados en las superficies impermeables de las calles. En la figura siguiente se muestra esta acumulación como función del tipo de cuenca y del tiempo transcurrido desde la última limpieza o lluvia.



**Acumulación de suciedad para diferentes tipos de cuencas
 (Sartor y Boyd, 1972, modificadas por Temprano, 1996)**

Sutherland y McCuen (1976) propusieron las expresiones que figuran en la tabla siguiente:

Ecuaciones de acumulación (Sutherland y McCuen, 1976).

Uso de la cuenca	Coefficiente de correlación	Ecuación
Industrial	0.91	$P_I = 391.1 \cdot (1 - e^{-0.190 \cdot t})$
Comercial	0.71	$P_C = 140.9 \cdot (1 - e^{-0.335 \cdot t})$
Residencial	0.49	$P_R = \frac{306.9 \cdot t}{1 + 1.3 \cdot t}$

Tanto la figura como la tabla proporcionan la cantidad de polvo y suciedad acumulada en una cuenca determinada tras un cierto número de días de tiempo seco. Para calcular la cantidad de un cierto contaminante presente en ese polvo y suciedad es



preciso recurrir a estudios de caracterización de campo. En la tablas siguientes se muestran los resultados de varios de ellos.

Miligramos de contaminante por cada gramo de polvo y suciedad en Chicago (APWA, 1969).

Parámetro	Tipo de cuenca			
	Residencial unifamiliar	Residencial	Comercial	Industrial
DBO ₅	5	3.6	7.7	3
DQO	40	40	39	40
CT	1.3*10 ⁶	2.7*10 ⁶	1.7*10 ⁶	1.0*10 ⁶
N Total	0.48	0.61	0.41	0.43
P Total	0.05	0.05	0.07	0.03

Contaminación asociada con polvo y suciedad en cuencas (citada en Novotny and Chesters, 1991).

Contaminante	Ref.	Residencial (mg/g)	Industrial (mg/g)	Comercial (mg/g)	Autopistas (mg/g)
DBO ₅	2	9.19	7.50	8.33	2.3
DQO	2	20.82	35.71	19.44	54
Sólidos volátiles	2	71.67	53.57	77.00	51
NTK	2	1.666	1.392	1.111	0.156
PO ₄ -P	2	0.916	1.214	0.833	0.61
NO ₃ -N	3	0.050	0.064	0.500	0.079
Pb	3	1.468	1.339	3.924	12
Cr	3	0.186	0.208	0.241	0.08
Cu	3	0.095	0.055	0.126	0.12
Ni	3	0.022	0.059	0.059	0.19
Zn	3	0.397	0.283	0.506	1.5
CT (UFC/100 mL)	2	160.000	82.000	110.000	-
CF (UFC/100 mL)	2	16.000	4.000	5.900	925

2) Sartor et al., 1974

3) Amy, et al., 1975

Cano y Tejero (1996) midieron en una cuenca urbana de Santander los valores que se presentan a continuación. Obsérvese que , en general, los valores son muy parecidos a los que se presentan en la tabla anterior.



Fracciones de diferentes contaminantes presentes en el polvo y suciedad acumulados en una cuenca urbana de Santander (Cano, 1996).

Contaminante	Media	Rango
POLVO Y SUCIEDAD (Kg/Km cuenta/día)	35	25-42
DBO (mg/g)	3.32	
DQO (mg/g)	50.06	45.92 – 54.55
N-NH ₄ (mg/g)	0.003	0.001 – 0.006
NO ₃ -N (mg/g)	0.005	0.0049 – 0.0052
NO ₂ -N (mg/g)	0.0009	0.0002 – 0.0013
PO ₄ -P (mg/g)	0.083	0.060 – 0.115
CT (UFC/gramo)	2.5*10 ⁶	

2.3.- LAVADO DEL POLVO Y LA SUCIEDAD ACUMULADA EN LA CUENCA

Sartor y Boyd (1977) detallaron los diferentes mecanismos implicados en el lavado superficial de los contaminantes de las calles; en líneas generales el proceso consta de:

- Separación del contaminante de la superficie de la calle.
- Transporte de las partículas hacia las cunetas.
- Transporte de las partículas desde las cunetas hacia la alcantarilla.
- Transporte dentro de los conductos.

Los contaminantes son eliminados de la superficie por dos mecanismos que parecen actuar simultáneamente:

- Las fracciones solubles van en disolución y las posteriores gotas de lluvia originan una turbulencia que favorece la mezcla y proporcionan un aporte continuo de disolvente limpio.
- La materia en forma de partículas y con tamaños que van desde granos de arena hasta coloides se desagrega por el impacto del agua de lluvia que cae. Una vez desagregadas las partículas pueden mantenerse en un estado de pseudosuspensión debido a la turbulencia creada por las gotas de lluvia adicionales.

Estos autores sugieren que estos procesos pueden ser muy fácilmente descritos cualitativamente pero que era preciso, estamos en el año 1977, más información que



considere todas las variables implicadas para poder conseguir una descripción cuantitativa, lo cual es mucho más difícil.

Ranchet y Deutsch (1982) estiman que la influencia preponderante respecto a las concentraciones máximas de un contaminante en el polutograma se debe a la intensidad máxima de la lluvia y a la duración del tiempo seco previo a la misma.

La velocidad a la que un aguacero lava la materia en forma de partículas de la superficie de la cuenca depende de tres factores: intensidad del aguacero, características de la superficie de la calle y tamaño de las partículas. Sartor et al. (1974) propusieron la ecuación siguiente para evaluar el peso de materia correspondiente a un cierto tamaño lavada por una aguacero:

$$N_c = N_o \cdot (1 - e^{-k \cdot r \cdot t})$$

En donde:

N_o = Peso inicialmente acumulado de partículas de un cierto tamaño.

t = Duración del aguacero.

N_c = Peso de las partículas lavadas tras un tiempo "t".

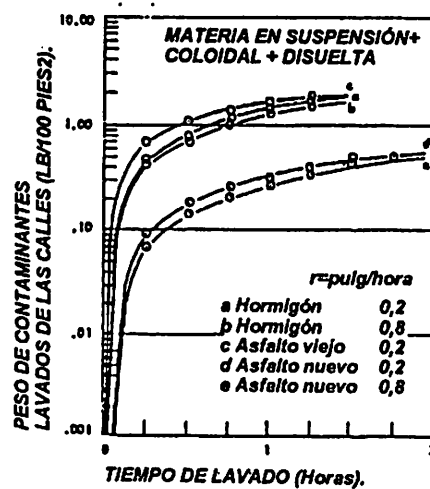
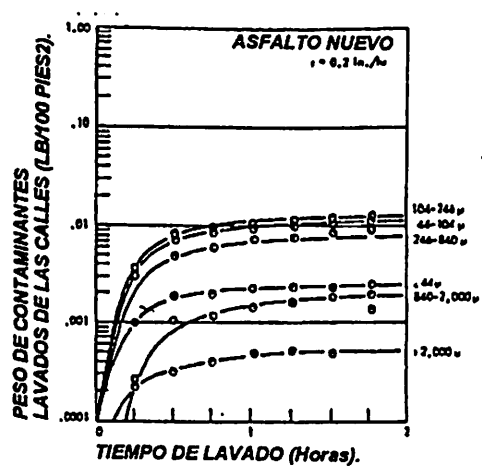
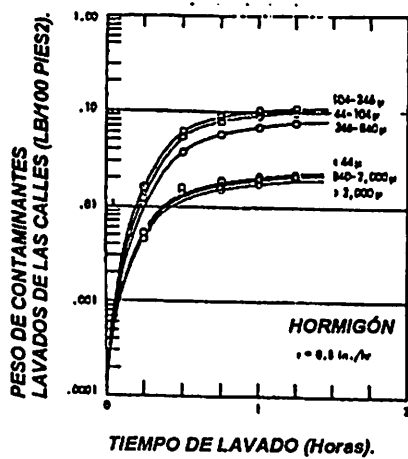
R = Intensidad de la lluvia.

k = Constante.

La constante "k" depende del tipo de superficie, pero parece ser independiente del tamaño de las partículas. Observaron que las superficies con pavimento rugoso muestran valores más elevados de N_c . Por ejemplo, las calles asfaltadas tienen cargas un 80% superiores a las del hormigón.

En la figura siguiente se muestran curvas de lavado, fruto de un trabajo experimental, para varios tipos de superficies e intensidades.





Curvas de lavado de sólidos acumulados en la superficie de la calle mediante un sistema de riego (Sartor y Boyd, 1972, modificadas por Temprano, 1996).

Overton y Meadows (1976) mencionan un estudio para la EPA de Amy et al. (1974) en el que se obtuvieron los resultados de la tabla siguiente. Ésta muestra el porcentaje de contaminantes eliminados de la superficie de la calle en función de la intensidad de la lluvia y de su duración. Los resultados deben interpretarse para una superficie de área elemental. Se puede observar que la eliminación es mayor en los momentos iniciales del aguacero (escorrentía) y que se reduce a medida que pasa el tiempo.



Intensidad (mm/h)	Duración de la escorrentía (horas)							
	0.25	0.5	1	2	3	4	5	6
2.5	10.9	20.5	36.0	60.1	74.9	84.1	90.0	90.0
5.1	20.5	36.9	60.1	84.1	>90.0	>90.0	>90.0	
7.6	29.1	49.8	74.9	>90.0				
10.2	36.9	60.1	84.1					
12.7	43.7	68.3	90.0					
15.3	49.8	74.8	>90.0					
17.8	55.3	80.0						
20.3	60.1	84.1						
22.9	64.5	87.4						
25.4	68.3	90.0						

Andren et. Al. (1975) estimaron que el porcentaje de eliminación depende de la lluvia total y no de la intensidad de la lluvia. La ecuación que propusieron es:

$$\% \text{ Eliminación} = \left(1 - e^{\frac{-P}{0.55}} \right) \cdot 100$$

En donde:

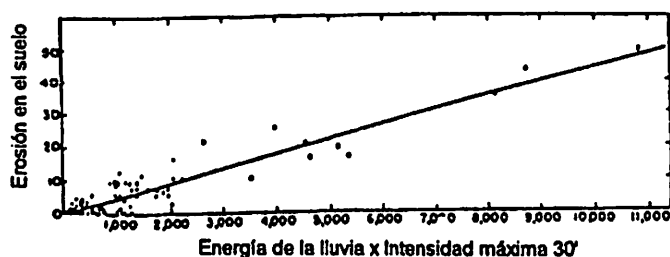
P = Centímetros totales de la lluvia

Para superficies diferentes a las de las calles hay que modificar el valor de 0.55. Es decir, para superficies más rugosas que las de las calles se necesita más agua (escorrentía) para eliminar la misma cantidad de material.

Barkdoll, Overton y Betson (1977) propusieron que las tasas de eliminación son específicas de cada contaminante y, por lo tanto, ningún modelo puede definir la eliminación de todos los contaminantes. La eliminación es función de la escorrentía total y está sólo parcialmente influenciada por la intensidad.

Akan (1989) estima que antes del comienzo del flujo superficial el impacto de las gotas de agua originará el "despegue" de los contaminantes de la superficie impermeable de la calle. La figura siguiente muestra la relación entre la energía-intensidad de la lluvia y la erosión del suelo. La energía cinética de la lluvia es función del diámetro de las gotas de lluvia y de la velocidad de estas al llegar a la superficie (Wischmeier y Smith, 1958)





Relación entre la energía-intensidad de la lluvia con su efecto erosivo sobre una superficie (Wischmeier y Smith, 1958).

2.4.- EL FENÓMENO DEL PRIMER LAVADO

Un fenómeno asociado con las características de la contaminación acumulada y con la lluvia es el fenómeno llamado "primer lavado" ("first flush" en la literatura anglosajona o "premier flot" en la francesa). Este fenómeno consiste en que una elevada proporción de la masa acumulada de contaminantes es lavada en la parte inicial de la lluvia.

Thornton y Saul (1996), así como Pearson et al. (1986) definen el primer lavado como el periodo inicial de un suceso de lluvia-escorrentía en el que la concentración de contaminante es significativamente superior a la observada durante las etapas posteriores del aguacero.

De entre los factores que influyen en el primer lavado cabe mencionar (Gupta et al., 1996):

- Hora del día
- Condiciones de tiempo seco
- Duración del periodo de tiempo seco previo
- Magnitud y características del contaminante en tiempo seco.
- Caudales de lluvia
- Características de la red de alcantarillado.
- Forma y área de la cuenca drenante
- Sedimentos acumulados en la red.

Gupta et al. (1996) estudiaron dos cuencas en el Reino Unido (Greatt Harwood y Clayton-Le-Moors). Las lluvias registradas en esas zonas, junto con los correspondientes polutogramas de escorrentía, permitieron establecer a estos investigadores las máximas concentraciones y flujos contaminantes de SST. En la tabla siguiente pueden observarse estos valores clasificados en función de la intensidad del aguacero y de la época del año.



Concentraciones y flujos contaminantes máximos para varias intensidades de lluvia en diferentes épocas del año (Gupta et al., 1996).

	Great Harwood				Clayton-Le-Moors			
	Conc.máx. SST (mg/L)		Flujo máx. SST (g/s)		Conc.máx.SST (mg/L)		Flujo máx. SST (g/s)	
Intensidad mm/h	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
> 15	1350	-	550	-	1000	-	575	-
10 – 15	-	-	-	-	600	500	250	250
5 – 10	700	1400	475	275	400	500	115	115
< 5	450	900	365	200	200	500	30	80

En ambas cuencas los aguaceros superiores a 15 mm/H se producían en verano y tenían periodos de retorno superiores a 4 meses. Por tanto, estos investigadores sugieren que además de usarse como lluvia de diseño para dimensionamiento hidráulico también se empleen para el control de la contaminación.

Un método muy sencillo (Griffin, 1980) para estimar si se produce el primer lavado consiste en representar en unos ejes cartesianos el porcentaje de volumen de escorrentía frente al porcentaje de masa de contaminación que ha atravesado la sección de control. Si los puntos se sitúan en una recta d 45° no hay primer lavado. El grado de alejamiento hacia la parte superior izquierda de dicha recta indica el grado de primer lavado existente.

Stahare y Urbonas (1990) sugieren que se da un primer lavado fuerte cuando el 20% de la escorrentía contiene el 80% de la masa de contaminante.

Esta curva puede ajustarse a una expresión del tipo:

$$Y=X^a$$

En donde:

Y = porcentaje de la carga contaminante.

X = porcentaje del volumen de escorrentía.

El valor de "a" caracteriza el grado de desviación de la curva respecto de la recta situada a 45°.

Saget et al. (1996) consideran que se origina primer lavado cuando, al menos, el 80% de la carga contaminante es transferida en el primer 30% del volumen, es decir,



$a < 0.185$. Estos autores, de un estudio de 80 aguaceros de 7 cuencas separativas, más 117 lluvias de 7 cuencas unitarias, elaboraron la tabla siguiente:

Rangos de valores del parámetro "a". Saget et al., 1996.

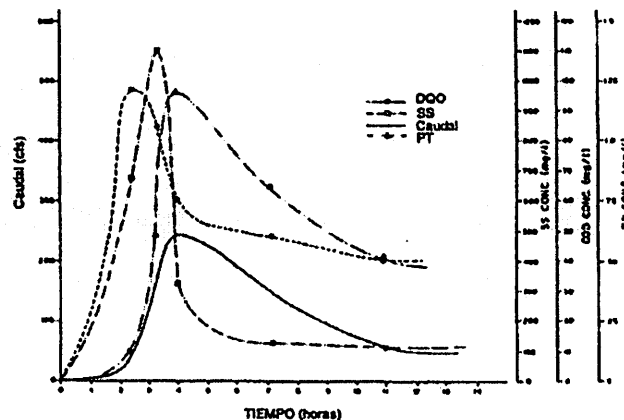
Contaminante	Tipo de alcantarillado	Mínimo	Medio	Máximo	Desviación estándar
SS	Pluviales	0.152	0.769	2.023	0.307
	Unitario	0.274	0.926	1.506	0.186
DQO	Pluviales	0.282	0.681	1.375	0.215
	Unitario	0.265	0.852	1.233	0.171
DBO5	Pluviales	0.271	0.669	1.379	0.238
	Unitario	0.449	0.832	1.203	0.170

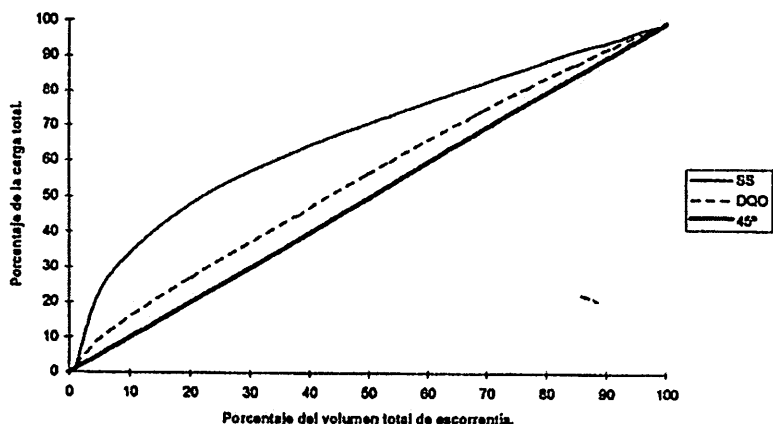
Esta tabla muestra que hay gran diferencia entre los valores reseñados, lo que indica que hay diferencias entre dos lluvias, es decir, las curvas de una cuenca no pueden sustituirse por una curva media sin una gran pérdida de información.

La mayoría de los parámetros "a" oscilan, en redes separativas, entre 0.185 y 0.862, y en redes unitarias, entre 0.185 y 1.159. De acuerdo con el criterio antes mencionado, estos autores sólo detectaron primer lavado en un único caso, concluyendo que este fenómeno es poco frecuente y no debe usarse para elaborar una estrategia de control y tratamiento.

Di Toro y Small (1979) proponen las relaciones entre concentraciones punta y finales de la tabla siguiente para cuantificar el lavado.

Efecto del primer lavado en función de las concentraciones punta y finales del polutograma (Di Toro y Samall, 1979).





2.5.- LOS SUCESOS DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS DE TORMENTA. CARACTERIZACIÓN.

En EE.UU. se toma como referencia que un suceso de tormenta es representativo si tiene las siguientes características:

- Más de 0.1 pulgadas (in) de lluvia total: Esto asegura que será generado un volumen significativo de escorrentía. Varios estudios de la EPA han establecido 0.1 pulgadas de lluvia como el mínimo para que el muestreo de la escorrentía sea significativo.
- Más de 72 horas desde el último suceso de más de 0.1 pulgadas de lluvia total. Este intervalo de tiempo permite acumular contaminantes sobre la superficie de la cuenca de drenaje y que el agua residual deposite también contaminación en colectores. No obstante, la contaminación aportada por tales fuentes debe ser medida.
- La duración de la tormenta y el volumen de lluvia total debe estar dentro de un rango del 50 por ciento arriba o abajo de la del "suceso medio" de lluvia de la zona. Este criterio debe ser aplicado donde se pueda. Los valores de la tabla siguiente son un ejemplo de los utilizados en EE.UU. para la lluvia media y la duración de la tormenta en regiones de EE.UU. (hay 15 definidas).

Región	Duración media (h)	Rango aceptable de duración (horas)	Volumen de la lluvia media (mm)	Rango de volumen aceptable (mm)
Atlántico Medio	10.1	5.1-15.1	16.3	8.15-24.5
Pacífico Central	13.7	6.9-20.5	14.7	7.35-22.0
Central	9.2	4.6-13.8	15.7	7.85-23.5



En EE.UU. para obtener permisos de vertido de aguas de escorrentía se deben realizar dos tipos de muestreos: un muestreo de "primer lavado" y una muestra compuesta ponderada con caudal.

La muestra de "primer lavado" se obtiene durante los treinta primeros minutos de la descarga. Esta fracción es generalmente la más contaminada porque puede contener la contaminación depositada sobre la superficie de la cuenca. Debe medirse el Ph y temperatura ya que proporcionarán información sobre la forma en que los metales son vertidos al medio receptor. Debería estudiarse en laboratorio los siguientes parámetros convencionales:

- Aceites y grasas. (30 mg/L es un valor típico alto)
- SST
- DBO₅
- DQO
- NTK
- NO₂⁻ y NO₃⁻
- P total

Los tipos de muestras que se pueden realizar:

Muestreo simple

Muestra compuesta proporcional a caudal:

Es una combinación de muestras simples al menos de 15 minutos o un mínimo de tres muestras por hora durante toda la descarga. De forma ideal deberían ser obtenidas cada 20 minutos. Es necesario medir el caudal durante el suceso. Las muestras simples son combinadas en proporción al caudal existente en el momento de ser obtenidas.

Este método proporciona una estimación de la concentración media y de la carga total del suceso de descarga. Después de que el suceso ha finalizado se analiza el hidrograma y se determina el máximo caudal y se define el volumen total de la muestra compuesta que se desea. El volumen a tomar de cada muestra simple será:

$$V=V_{\max} (Q/Q_{\max})$$

Muestra compuesta ponderada en el tiempo:

Los controles anuales o semianuales que exige la EPA pueden realizarse con este tipo de muestreos. Este tipo de muestras son más sencillas de obtener porque no se necesita medir caudal. Una vez fijado el volumen total de la muestra compuesta se toman partes iguales de cada muestra simple para hacer el volumen total.



2.6.- PARTICULARIDADES DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA Y EN LOS R.A.U.

De los estudios realizados en el NURP (EPA, 1983) se aportaban las siguientes conclusiones:

- La concentración media de SST presente en un aguacero varía en un rango de 3 a 5 veces sobre la concentración media. Aparentemente, la variación en la concentración media entre lluvias puede ser significativa, pero no fuera de lo normal dentro de este tipo de sucesos aleatorios.
- Para constituyentes diferentes a los SST la variación sobre la concentración media es de 2 a 3 veces.
- Aunque algunas ciudades mostraron valores de la concentración media superiores o inferiores a los de la media nacional estadounidense, para uno o varios constituyentes, no se apreciaron correlaciones geográficas en el estudio.
- El tipo de uso del suelo no proporciona una base estadística suficiente para predecir diferencias en la concentración media.
- Los Coliformes fecales varían de 300 a 3×10^5 organismos por cada 100 mL en tiempo templado, y de 20 a 3×10^3 organismos por cada 100 mL en tiempo frío.
- No se obtuvo correlación entre concentraciones medias y volúmenes de escorrentía, indicando que, en general, ambos factores son independientes.
- Los resultados parecen ser relativamente uniformes en los EE.UU. No obstante, los datos muestran amplios rangos de variación en la concentración media de todos los constituyentes.

Resultados de contaminación de la escorrentía superficial urbana. (EPA, 1983).

Constituyente (mg/L)	Tipo de zona			
	Residencial	Mixto	Comercial	Abierta. No urbana.
DBOs	10	7	9	-
DQO	73	65	57	40
SST	101	67	69	70
Pb	0.144	0.114	0.104	0.030
Cu	0.033	0.027	0.029	-
Zn	0.135	0.154	0.226	0.195
NTK	1.900	1.290	1.180	0.965
NO ₂ +NO ₃	0.736	0.558	0.572	0.543
P-Total	0.383	0.263	0.201	0.121



Naturaleza de los contaminantes transportados por la redes de saneamiento (OTV, 1994)

En redes separativas de pluviales:

- Las concentraciones de SS y DQO son muy importantes, y pueden ser superiores a las de las redes unitarias en tiempo seco y en tiempo de lluvia.
- Los SST tienen una composición fundamentalmente mineral (la fracción orgánica es del orden del 30%).
- La relación de biodegradabilidad (DQO/DBO₅) es débil, del orden de 4 a 6, contra los 2 a 2.5 de un agua residual de tiempo seco.
- Presencia muy importante de metales pesados y de hidrocarburos.
- Una gran parte de los contaminantes están fijados a los SS.
- La densidad de las partículas y velocidad de caída es mayor que las de las redes unitarias. Importante para los procesos de decantación. La escorrentía de pequeñas lluvias es menos decantable debido a que tienen una fracción orgánica superior.
- El tamaño de las partículas transportadas es grande en general, y es tanto mayor cuanto más aumenta la intensidad de la lluvia.

En redes unitarias en tiempo de lluvia:

- La fracción mineral de los SS es del orden del 40 al 60%. La relación entre SSV/SS disminuye durante el desarrollo del suceso. Se puede pasar de 70-80% en tiempo seco a 40% en tiempo de lluvia, lo que se traduce en un aumento del contenido mineral a lo largo de los sucesos.
- La relación entre DQO/DBO₅ es más elevada que para tiempo seco, pero inferior a la que se detecta en redes separativas, mostrando una cierta mayor biodegradabilidad los contaminantes de una red unitaria.
- El contenido global de contaminación es importante: comparado con aguas negras urbana, tienen concentraciones más altas en SS, DQO y metales, y están más diluidas en DBO₅ y ciertos contaminantes disueltos (nitrógeno y fósforo).
- Los metales pesados (Cd, Cu, Pb,...) están en una gran proporción fijados a los SS. Las cargas anuales de metales pesados son más importantes que las de las redes separativas menos para el Pb.

3.- OBJETIVOS DE LOS ESTUDIOS EN SANTIAGO DE COMPOSTELA

En el año 1.995, un equipo multidisciplinar de las Universidades de La Coruña y Santiago de Compostela, inició la primera toma de datos para llevar a cabo este tipo de estudios en la ciudad de Santiago de Compostela. El objetivo final del estudio es lograr el diseño de unas "Directrices de Gestión Integral del Saneamiento de Santiago de



Compostela" en las que se establezcan las medidas de actuación necesarias para conseguir una calidad de agua en el medio receptor de forma que se obtenga la mejor relación coste/beneficio ambiental.

Para ello se están desarrollando los siguientes aspectos:

- Análisis y recopilación de datos de la cuenca (cuenca hidrográfica y cuenca urbana).
- Medida y análisis de lluvias.
- Elaboración de modelos de simulación de la red de drenaje (transformación lluvia-caudal, generación y arrastre de contaminación en superficie, hidráulica y calidad en colectores).
- Caracterización de sucesos de rebose (frecuencia, hidrogramas, polutogramas, etc.).
- Estudios del comportamiento de la estación depuradora frente a variaciones de caudal y de carga. Elaboración de un modelo de la EDAR (propuesta de mejoras, cambios de diseño y explotación).
- Elaboración de un modelo de calidad de aguas del río Sar. Simulación de impactos por vertidos en tiempo seco y por sucesos de rebose en tiempo de lluvia. Análisis del cumplimiento de estándares de calidad (tiempo seco y de lluvia).

Es importante resaltar que la metodología empleada está basada en la utilización de modelos numéricos que simulan de forma continua los procesos físicos de tipo hidráulico y de transporte y reacción de contaminantes, y que una vez calibrados nos permitirán ensayar las mejoras necesarios que optimicen el sistema de saneamiento y que nos permitan alcanzar los niveles de calidad establecidos para el medio receptor (tanto en tiempo seco como en tiempo de lluvia).

Los objetivos científicos-técnicos de los trabajos que se están realizando actualmente son:

- Caracterización de la contaminación de las escorrentías superficiales urbanas en relación con los usos del suelo en subcuencas urbanas de la ciudad de Santiago de Compostela.
- Diferenciación entre la contaminación aportada en tiempo de lluvia al medio receptor por una cuenca urbana con red de alcantarillado separativo y una con red de alcantarillado unitario.
- Evaluación de los metales pesados movilizados en los sucesos de lluvia y diferenciación entre fracción asociada a fase disuelta y a fase particulada.
- Análisis y estimación del efecto del primer lavado.
- Desarrollo de modelos de acumulación y arrastre de la contaminación en superficie: calibración y validación de parámetros.
- Evaluación del efecto de diferentes variables de la cuenca (pendiente, coeficiente de escorrentía, densidad de población, superficie) en las



características de la contaminación movilizada y en el SCTR (Sistema de Control y Tratamiento de Reboses).

- Proposición de un método de determinación de polutogramas de cálculo en redes drenaje urbano.
- Evaluación del funcionamiento hidráulico y de los rendimientos de un sistema de control y tratamiento de reboses (SCTR).
- Modelización de un sistema de control y tratamiento de reboses.
- Diseño de SCTR para las subcuencas estudiadas de forma que se minimicen las cargas contaminantes vertidas. Desarrollo de criterios técnicos.
- Adquirir experiencia, mejorar tecnología y metodologías para la caracterización de sucesos de tormenta, sobre todo con sistemas de medición en continuo, válidos para control y alarma.

3.1.- METODOLOGÍA UTILIZADA EN SANTIAGO DE COMPOSTELA.

3.1.1.- Estudio de la cuenca

Santiago de Compostela es la capital de la Comunidad Autónoma de Galicia. Con una población creciente de más de 100.000 habitantes es la tercera ciudad de Galicia. Se encuentra situada entre dos ríos, el Sar y el Sarela, afluente del primero, que fueron el motivo de que surgiera el germen de la ciudad y que son en la actualidad los que más presión reciben de la misma.

La capital dispone de un sistema de saneamiento heterogéneo, como sucede en todas las ciudades que han ido consolidando su estado a lo largo de siglos: distintos materiales y distintos enfoques técnicos se han ido superponiendo hasta conformar la situación actual.

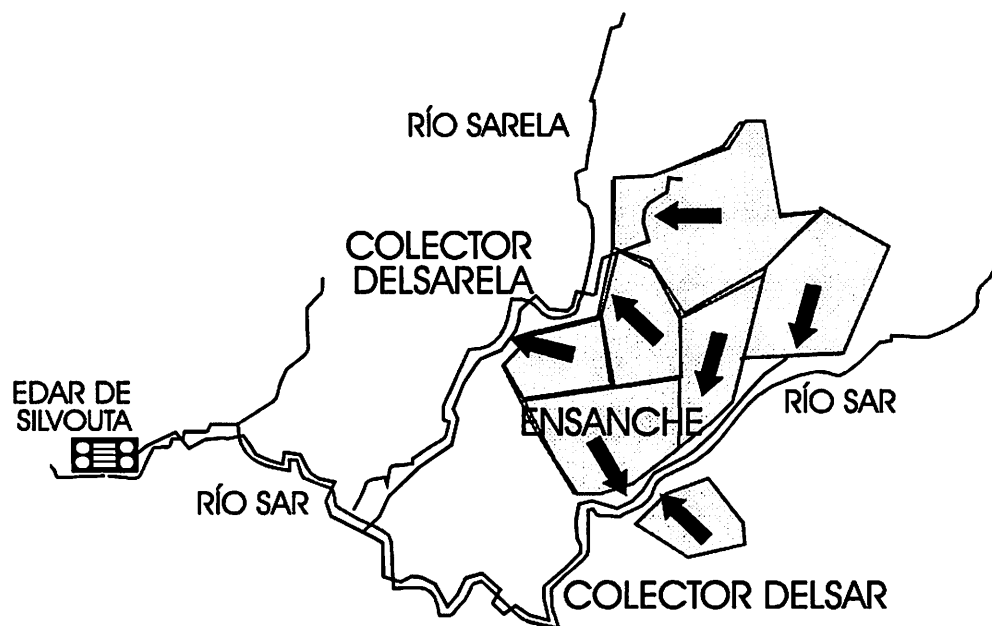
El sistema de saneamiento de Santiago es unitario a excepción de alguna nueva área urbanizada recientemente (Fontiñas). Se diferencian claramente tres zonas: el casco antiguo, zona del ensanche, y nuevos asentamientos (siete subcuencas en total). La cuenca urbana se podría describir de forma general en dos tipologías, una con urbanización cerrada de 3.9 km² (80% impermeable) y otra de urbanización abierta de 5.5 km² (20% impermeable).

El sistema es antiguo, con numerosas infiltraciones, manantiales incorporados a la red y entrada de aguas procedentes de achiques de sótanos. En los últimos años se han realizado importantes obras para eliminar esencialmente algunos problemas de inundaciones.

El sistema de colectores interceptores tiene forma de "Y" y discurre paralelo a los ríos Sar y Sarela, tal y como se observa en la figura siguiente. Su estado de conservación



no es bueno, permitiendo que aguas fluviales penetren en las conducciones en algunos puntos. Por supuesto, en época de lluvias, y a través de los numerosos aliviaderos, se vierten a los dos ríos las aguas que no pueden ser transportadas a la estación depuradora de aguas residuales (E.D.A.R.) de Silvouta. Un elevado volumen de agua, con una importante carga contaminante, se vierte sistemáticamente durante estos sucesos a ambos ríos.



Esquema general de la cuenca de drenaje de Santiago de Compostela

Ambos ríos, Sar y Sarela (este último afluente del primero) nacen en las proximidades de la ciudad, por lo que apenas son arroyos de menos de 4 metros de anchura y unos decímetros de profundidad cuando ya comienzan a recibir pequeños vertidos. Conforme van incorporando cuenca receptora van aumentando también sus caudales pero a la altura de la E.D.A.R., con un caudal medio de 400 l/s, el río Sar apenas lleva 500 l/s en verano. La calidad del efluente de la E.D.A.R. condiciona totalmente la calidad del agua del río. Los efectos de los sucesos de rebose de alcantarillado en época de lluvia, frecuentes en esta región, junto a la situación anteriormente comentada finalmente han degradado el ecosistema fluvial.

Las subcuencas que están siendo estudiadas actualmente son "El Ensanche" y "Fontiñas". "El Ensanche" está totalmente urbanizada (94.5% impermeable), con una superficie de 45 hectáreas y una población de unos 30.000 habitantes. Posee una pendiente media acusada (4-13%) y dispone de un sistema de saneamiento de tipo unitario de 10 Km de longitud. Se trata de una zona de alta densidad de población y fuerte tráfico rodado. La subcuenca drena al río Sar. En el punto de desagüe se situó una sección de control con instrumentación para medición de caudales y parámetros de



calidad. La subcuenca "Fontiñas" posee una red separativa con una superficie de 45 hectáreas, 65% urbanizado (uso residencial), y una pendiente media de un 6%.

3.1.2.- Datos de campo

Los datos de campo necesarios para nuestro estudio se dividen en dos tipos:

a) Datos de modelo, para introducir en el modelo hidráulico y de calidad, y son: lluvia, topografía de la superficie urbana, topología de la red de conductos, caudal base (aguas fecales y parásitas) y su caracterización durante tiempo seco, información sobre la acumulación de polvo y suciedad en superficie según usos del suelo, etc.

b) Datos de calibración del modelo, es decir, para el proceso mediante el cual se ajusta el modelo numérico para que los resultados simulados se asemejen a los observados (sección de control). Dichos datos son: caudales, para la calibración hidráulica, y parámetros de contaminación (SST, SSV, SDT, SDTV, DQO, DBO₅, metales pesados, hidrocarburos) para poder efectuar la calibración de calidad.

3.1.3.- Modelización

Para llevar a cabo la modelización de la cuenca se ha utilizado en primera instancia el programa llamado SWMM ("Storm Water Management Model") de la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA). Se trata de un modelo ampliamente contrastado durante más de 25 años por científicos e ingenieros de todo el mundo.

Dicho modelo está dividido en varios bloques que se traspasan información de uno a otro. Se han empleado los siguientes bloques: 1) RUNOFF, que genera los hidrogramas y polutogramas de la escorrentía a partir de los datos de lluvia y las características de contaminación en superficie; 2) EXTRAN, que simula el flujo hidráulico en la red de conductos empleando las ecuaciones completas de Saint Venant; 3) TRANSPORT, que simula el flujo de contaminantes a través de la red hasta nuestra sección de control.

Las razones que hacen del SWMM una buena herramienta son las siguientes:

- Los bloques del SWMM se adaptan a todas las partes de que consta el presente estudio (bloque de escorrentía, transporte y almacenamiento).
- Se trata de un programa que se usa con frecuencia en todo el mundo. En la literatura especializada aparece profusamente mencionado. La consecuencia de lo anterior es la gran cantidad de información disponible sobre el modelo.
- Es un programa abierto, es decir, los códigos fuente están presentes en la documentación inicial. Esto permite hacer modificaciones en el programa, bien



para corregir errores, bien para adecuar la salida ó entrada de resultados a las necesidades del usuario.

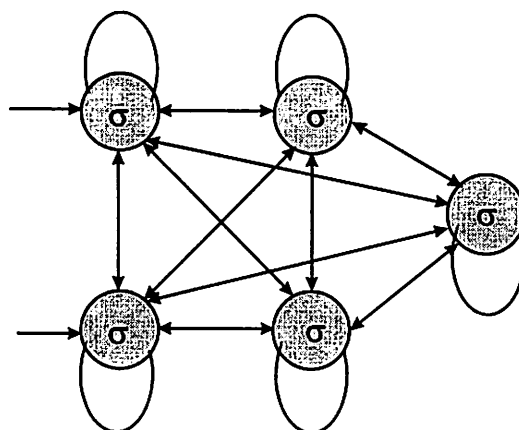
- Es un programa gratuito distribuido por la EPA.
- Es compatible con otros programas como el WASP. El fichero de salida de resultados del SWMM puede leerse como fichero de entrada por el WASP sin transformación alguna.

El proceso de calibración del modelo de las cuencas basado en el SWMM llevó a plantear un ajuste de parámetros y, en lugar de optar por un ajuste manual a estima se prefirió utilizar un modelo numérico de resolución del problema inverso; en particular el modelo PEST ("Parameter Estimation"), que utiliza el conocido método de Levenverg-Mardquardt.

Posteriormente a este análisis se ha analizado la conveniencia del uso de un modelo determinista tan complejo como el SWMM, y se ha realizado una nueva modelización basada en un sistema de red de neuronas artificiales.

Para el estudio de la transformación lluvia-escorrentía en la red de drenaje de Santiago de Compostela se ha propuesto una red de neuronas artificiales de tres capas y cinco neuronas, completamente recursiva (con objeto de modelar bien las colas de los hidrogramas cuando la lluvia ha cesado), y con dos celdas de entrada por las que se introduce el mismo dato de lluvia (se aumenta el número de ciclos efectivos para un mismo dato de entrada).

La red, a la que se alimenta con datos de lluvia en un instante determinado, proporciona en su neurona de salida el caudal en el mismo instante –la necesidad de almacenar información histórica justifica su recursividad-, tras un proceso de cálculo de dos ciclos (ensayos con uno y tres ciclos han llevado a la conclusión de que el valor obtenido en dos ciclos es estable, no siéndolo el de un ciclo).



Red de neuronas artificiales diseñada para este trabajo



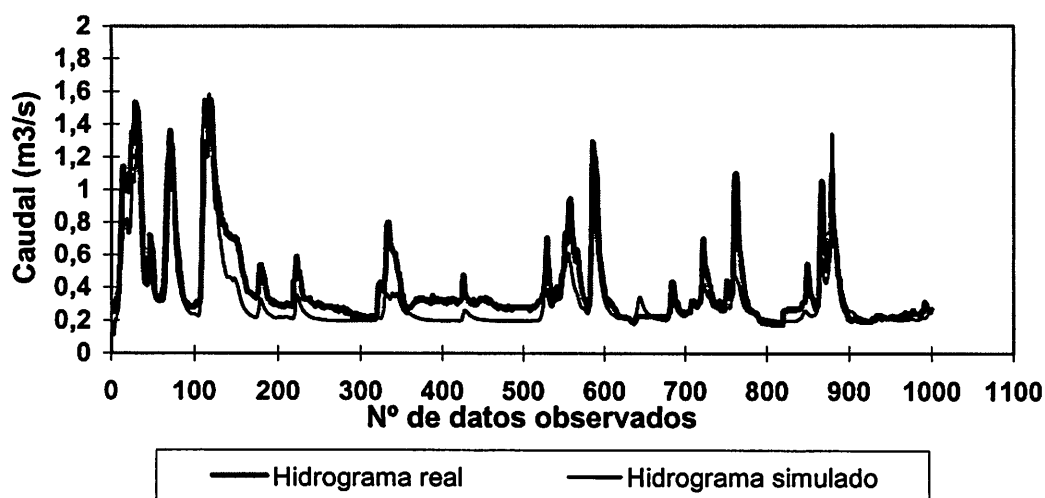
El tipo de funciones que se utiliza es la sigmoide en las neuronas y la identidad en las conexiones, y el proceso de entrenamiento utiliza registros de lluvia-escorrentía, que se ajustan utilizando como medida del error el valor absoluto de las diferencias entre el valor medido y el calculado –se prefiere esta medida al error cuadrático ya que éste tiende a ajustar bien los mayores picos en detrimento de los menores-, mediante algoritmos de optimización de tipo Newton y gradiente conjugado.

Se han estudiado redes con un menor grado de recursividad y otras con un mayor número de neuronas (3 y 4) en la capa oculta: en el primer caso no se obtuvo un resultado satisfactorio y en el segundo no se observó una mejora significativa.

3.2.- PRIMEROS RESULTADOS

3.2.1.- Hidráulica

Actualmente, el modelo hidráulico de la cuenca de “El Ensanche” está calibrado, según se desprende de la siguiente figura en la que se comparan los hidrogramas simulado y real en el punto de desagüe de la cuenca.



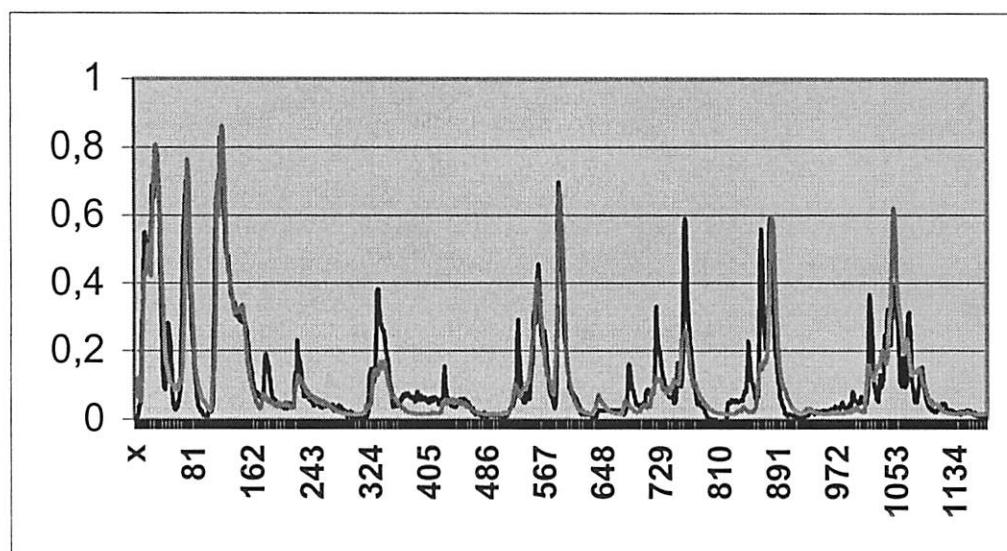
Ajuste de la escorrentía con el modelo SWMM en la cuenca “El Ensanche”.

Para el uso del modelo basado en redes de neuronas, los datos de lluvia y de escorrentía han sido normalizados dividiéndolos por el mayor registro obtenido en cada una de las dos series; de este modo, ambas series se mueven en el intervalo (0-1). Se considera esta normalización suficiente para el estudio que se presenta en esta ponencia, cuyo objeto es valorar la eficacia del método: de considerarse la red propuesta como elemento predictivo, la normalización debería realizarse previendo



mayores valores de lluvia y de escorrentía, ya que de lo contrario se saturaría para un rango mayor de valores.

De la aplicación del archivo de prueba utilizando como entrenamiento los 650 primeros datos y como fase de predicción los siguientes, se llega al siguiente resultado:

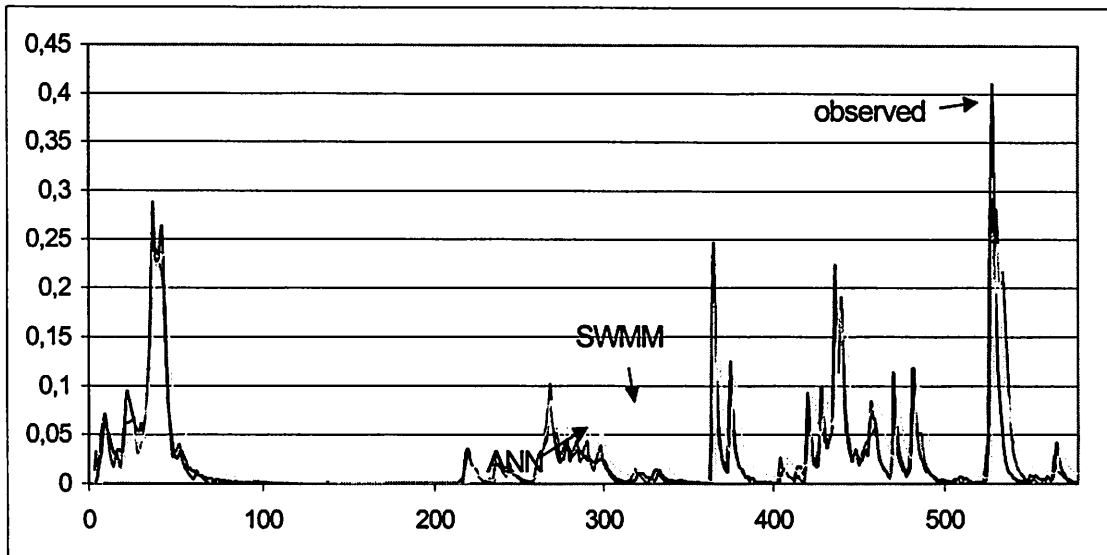


Ajuste de la escorrentía con un modelo basado en una red de neuronas artificiales en "El Ensanche".

De la observación de los archivos "datos de campo" y "calculados" se observa que algunos de los sucesos no son registrados por el modelo, lo que puede ser explicado por el hecho de que la lluvia no ha sido registrada en la misma posición que el caudal, y en algunos casos no existe una correspondencia entre ambos sucesos. En cualquier caso, sí se observa un seguimiento de las tendencias tanto en la fase de entrenamiento (hasta el dato 650) como en los datos predichos. Se puede apreciar que el grado de ajuste de este modelo es similar al obtenido mediante la aplicación de SWMM.

La red de drenaje de Fontiñas está en fase de calibración. Se dispone de menos antigüedad en los registros, pero ya se han obtenido resultados preliminares que ilustran un comportamiento similar:

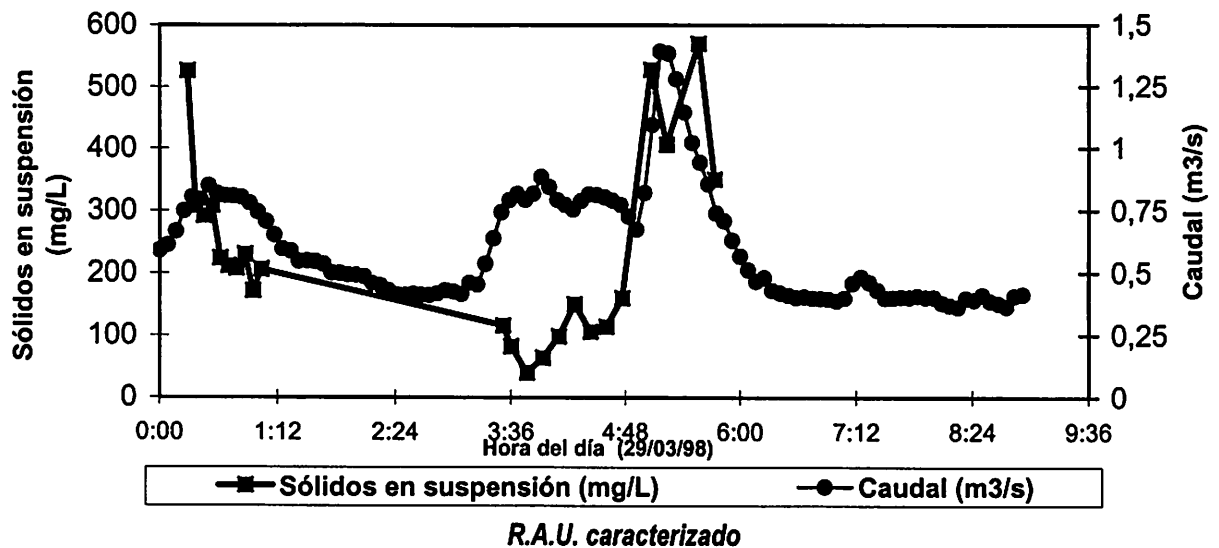




Ajuste de la escorrentía con un modelo basado en una red de neuronas artificiales en "Fontiñas".

3.2.2.- Contaminación

Se presentan la caracterización de un suceso de tormenta (RAU) que produjo un lavado de la ciudad, provocando que las concentraciones de SS, metales pesados e hidrocarburos aumentasen de una forma muy significativa.

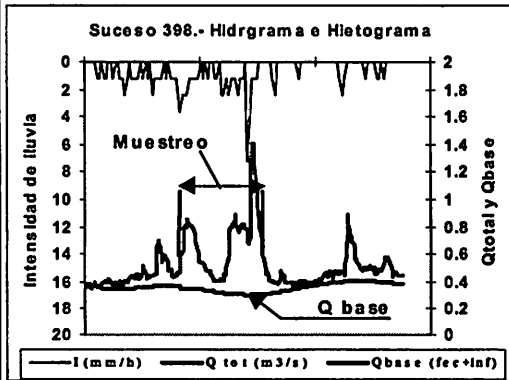


Se ha estandarizado el registro de sucesos en un formato de ficha tipo como la que se presenta a continuación, en la que se recoge la información de un suceso RAU.

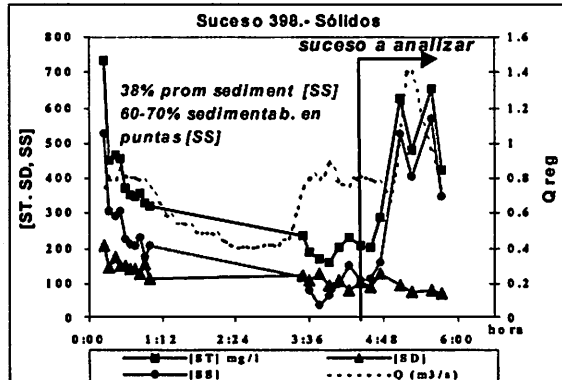


CHECKLIST		GENERAL		CUENCA DRENAJE	
Análisis LISA		Análisis SXAI		suceso global	
ST,SD,SS	si	metales		mes y año	mar-98
volátiles	si	(Cd, Zn, Pb)	si	día y hora comienzo	28; 17:10
sedimentables	si	metales (SS,SD)	no	día y hora final	29; 16:00
DBO	no	COT	no	suceso muestreado	
DQO	no	COT (org, Inorg)	no	día y hora comienzo	29; 0:15
Coliformes	no	HCB's	si	día y hora final	29; 5:45
Cond, Turb,....	si			tipo	23 muestras simples
				intervalo variable	5-10-15 min
				ciudad.- S.de Compostela	
				cuenca.- Ensanche	
				tipo red.- unitaria (10Kms)	
				área.- 45 hectáreas	
				pendiente media.- 4.16%	
				urbano.- 94.5%	
				población.- 30.000 hab	
				s.control.- Pontepedriña	

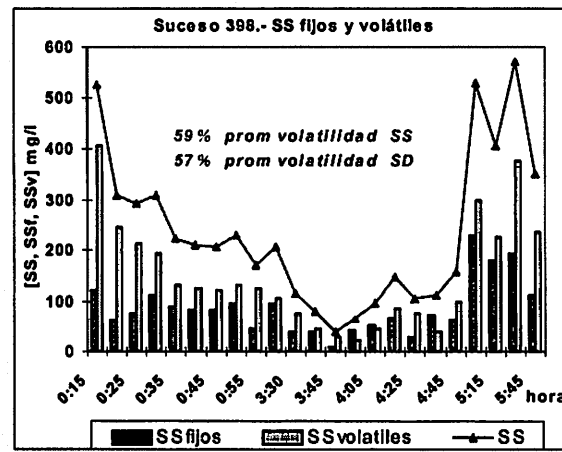
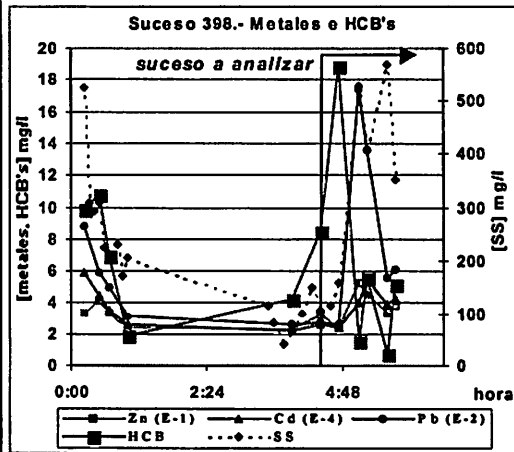
HIDRÁULICA



CONTAMINACIÓN



CONTAMINACIÓN



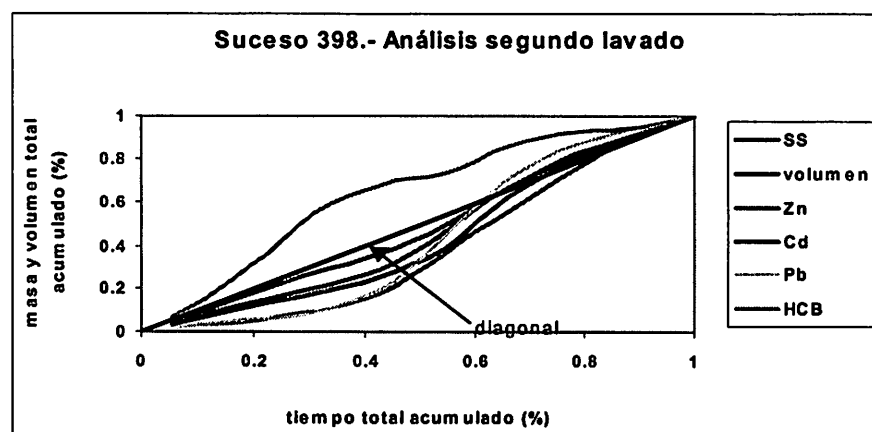
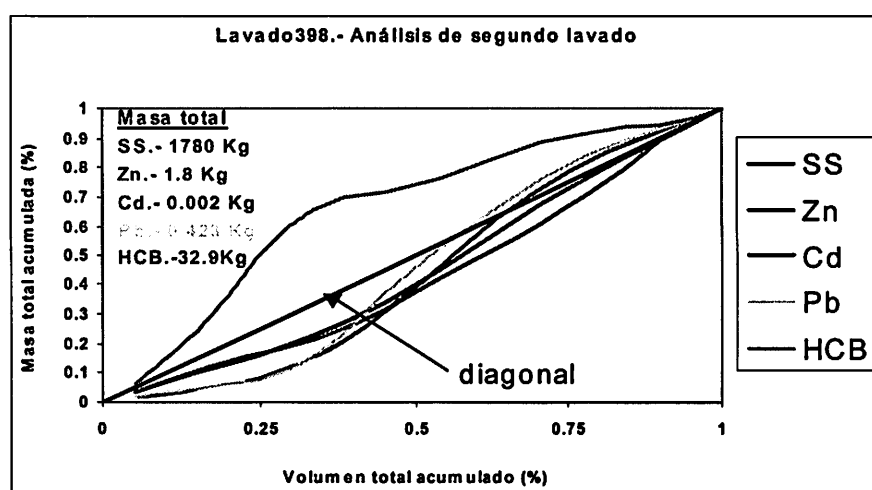
PARÁMETROS PARA ANÁLISIS CORRELACIONAL

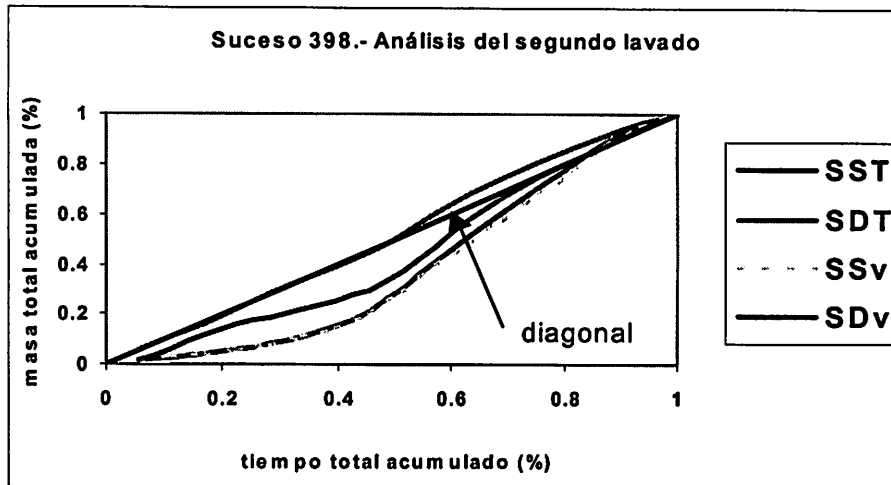
"suceso a analizar"			
Lluvia (mm)	Int.lluvia (mm/h)	Duración y ADWD	Vol tot (l/m2) y Q (m³/s)
P	19.2	0 Duración (h)	1.33 V _w
	I ⁺	7.2 DTSP (días)	0.16 Q ⁺ , Q ⁻
	I medio	19.2	Q medio
			10.76
			1.4, 0.67
			0.95
Masa SS	(mg/l)	(microg/l)	Conduct (microS/cm)
SS _m = M _{ss} /V _w	368 M _{ss} (g/m ²)	368 CM S _{ss} (mg/l)	Cond -
SS _{min}	106 Q _{ss medio} (g/s)	350 CM S Zn,Cd,Pb	382,0.39,87.4
SS _{max}	570 Q _{ss+} (g/s)	659 CM S HCB (mg/l)	6.78
			Cond+
			180
			C media
			156



Como se puede observar en la ficha tipo, de cada suceso se calculan unos parámetros específicos que facilitarán la realización de un análisis correlacional de todos los sucesos de tormenta registrados, permitiendo obtener unas tendencias y parámetros que definan la movilización y vertido de contaminantes en tiempo de lluvia, tanto en cada cuenca como en la ciudad. Esta fase es fundamental para posteriormente definir las estrategias de control de cada cuenca.

A continuación se presentan gráficos que describen el fenómeno de movilización de sólidos y contaminantes del suceso anteriormente presentado.





4.- CONCLUSIONES

Del contenido de la presente comunicaciones se pueden aportar las siguientes conclusiones:

- Es necesario el control de la contaminación difusa aportada por las aguas de escorrentía urbana y los R.A.U. si se quieren proteger con garantías, o restaurar, los usos de los sistemas acuáticos receptores.
- Si bien el comportamiento hidrológico-hidráulico de una cuenca urbana se puede conocer "relativamente" bien con un coste "asumible", el comportamiento en cuanto a lavado, transporte y transformación de la contaminación durante los sucesos de lluvia precisa de una mayor inversión en esfuerzos y dinero. Esfuerzos y dinero que ya han sido asumidos por otros países de nuestro entorno hace décadas.
- Los modelos de simulación numérica no pueden, ni deben, sustituir a la caracterización de campo, ya que es necesario calibrar dichos modelos y, además, porque cada cuenca tiene un comportamiento singular que debe ser analizado, por lo menos, en un número mínimo de fenómenos (primer lavado, granulometrías de los sólidos, concentración medias de sucesos, etc.).
- Ante una estrategia de implantación de un sistema de control y/o tratamiento (bien en la superficie de la cuenca, en la red de alcantarillado ó en la EDAR) es preciso un conocimiento "exhaustivo" del comportamiento de la cuenca drenante en cuanto a hidráulica y a movilización de los contaminantes (tipos, flujos máxicos, forma en que se presentan, etc.). Aplicar criterios de diseño de forma sistemática puede conducir a soluciones que no resuelvan los problemas.



BIBLIOGRAFÍA MÁS RELEVANTE

BANNERMAN, R.T.; OWENS, D.W.; DODDS, R.B.; HORNEWER, N.J.; (1993); "Sources of pollutants in Wisconsin stormwater"; *Wat.Sci.Tech.*, 28 (3-5), pag. 241-259.

CANO, A.; TEJERO, I.; (1996); "Contaminación de la escorrentía superficial en un área metropolitana de la ciudad de Santander"; Tesina de Máster de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, E.T.S. de Ing. de Caminos, C. y P., Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria.

CAGIAO, J.; DÍAZ-FIERROS, F.; JÁCOME, A.; PUERTAS, J.; SUÁREZ, J.; (1998); "The early stages in the CSO characterisation in the city of Santiago de Compostela (Spain)"; UDM '98; Fourth International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling; 21-24 september; IAWQ, IAHR, UNESCO, vol. 2; pag. 643-648.

CAGIAO, J.; DÍAZ-FIERROS, T.; PUERTAS, J.; SUÁREZ, J.; (1998); "A numerical and experimental model of an urban catchment in the north of Spain: parameter fitting and analysis of its behaviour"; UDM '98; Fourth International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling; 21-24 september; IAWQ, IAHR, UNESCO, vol. 1; pag. 643-648.

CAGIAO, J.; VAZQUEZ, F.; PUERTAS, J.; DIAZ-FIERROS, T.; SUAREZ, J.; (1998); "La problemática de los reboses de alcantarillado unitario en entornos urbanos: caso de Santiago de Compostela y su incidencia en la calidad de las aguas del río Sar"; CIMA98; V Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente; 17-20 noviembre (Ciudad La Habana, Cuba).

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL NORTE DE ESPAÑA; (1995); "Metodología de estudio de los saneamientos litorales"; Oviedo, diciembre de 1995; 200 páginas.

DEBO, T.N.; REESE, A.J.; (1995); "Municipal Storm Water Management "; Lewis Publishers; ISBN 087371.981.6.

ELLIS, J.B.; (1991); "Measures for control and treatment of urban runoff quality"; Rep. DT3PL/FV/JB; Agence de léau Seine-Normandie.

GUPTA, K.; SAUL, A.J.; (1996); "Suspended solids in combined sewer flows"; *Wat.Sci.Tech.*, 33 (9), pags. 93-99.

HORNER, R.R.; et al.; (1994); "Fundamentals of Urban Runoff management: Technics and Institutional Issues.; Terrene Inst.; USEPA; Washington D.C.

MALGRAT, P.; (1995); "Panorámica general de la escorrentía de aguas pluviales como fuente de contaminación. Actuaciones posibles"; "Calidad de aguas e impacto en medios receptores por vertidos procedentes de drenajes urbanos y agrícolas"; Workshop Benicassim, 28 Nov. 1 Dic..

MOFFA, P.E.; (1990); "Control and treatment of combined sewer overflows"Environmental Engineering Series; Van Nostrand Reinhold; ISBN 0-442-26491-7; Nueva York, 229 págs.

NOVOTNY, V; WITTE,V.W.; (1997); "Ascertaining aquatic ecological risks of urban stormwater discharges"; *Water Res.* 31, 10; 2573-2585.



OTV (1994); "Depolluer les eaux pluviales. Contribution a lélaboration dune stratégie." Lavoisier TEC & DOC, Francia, 350 págs., ISBN 2-87777-417-1.

SAGET, J.D.; CHEBBO, G.; Bertrand-Krajewski, J.L.; "The firts flush in sewer systems"; Wat.Sci.Tech., 33 (9); pags. 101-108.

SHUELER, T.R.; (1993); "Stormwater pond and wetland options for stormwater quality control"; National Conference on Urban Runoff Management: Enhancing Urban Watershed Management at the Local County, and State Levels; Seminar Publication; March 30 to April 2, Chicago, Illinois; EPA/625/R-95/003.

SUÁREZ, J.; TEMPRANO, J.; JIMÉNEZ, R.; TEJERO, I; (1995); "Depuración de aguas residuales urbanas en tiempo de lluvia. Panorámica general"; "Calidad de aguas e impacto en medios receptores por vertidos procedentes de drenajes urbanos y agrícolas"; Workshop Benicassim, 28 Nov. 1 Dic.

SUÁREZ, J.; PUERTAS, J.; JÁCOME, A.; DÍAZ-FIERROS, T.; DÍAZ-FIERROS V., F.; (1998); "Reboses del alcantarillado en Santiago de Compostela. Su incidencia en la calidad del agua del río Sar"; Tecnología del Agua, nº 182, noviembre, ISSN 211/8173, pags. 33-45.

TEMPRANO, J.; CERVIGNI, M.; SUÁREZ, J.; TEJERO, J.I.; (1996); "Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia. Control en origen"; Revista de Obras Públicas, Marzo de 1996; nº 3352; Madrid; pag. 45-57.

TEMPRANO, J.; SUÁREZ, J.; TEJERO, J.I.; (1997); "Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia. Control de vertidos"; Revista de Obras Públicas, Enero de 1997; nº 3361; Madrid; pag. 47-57.

TEMPRANO, J.; SUÁREZ, J.; TEJERO, J.I.; (1998); "Dimensionig criteria for storm water tanks for Santander. The case of ocean combined sewer overflow discharge."; European Water Management; pag. 55-60, volume 1, number 4; EAWPCA; ISSN 1461-6971.

VALIRON, F.; TABUCHI, J.P.; (1992); "Maitrise de la pollution urbaine par temps de pluie. État de l'art."; AGH-TM; Tec-doc; París, ISBN 2-85206-863-X.

YAMADA, K.T.; UMEHARA, T.; ICHIKI, A.; (1993); "Study on statistical characteristics of nonpoint pollutants deposited in a urban area"; Wat. Sci.Tech.; 28 (3-5), 283-290.

