SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

PROPIEDADES DE LOS SÓLIDOS TRANSPORTADOS POR LAS AGUAS LLUVIA. SANTIAGO CHILE.

IGNACIO TORO L.[1]
BONIFACIO FERNÁNDEZ L.[2]
PABLO PASTÉN G.[3]

RESUMEN

Este estudio presenta un análisis de sedimentación de aguas lluvia de la ciudad de Santiago y los compara con valores encontrados en Estados Unidos y Francia. Se pone especial atención en el tamaño de los sólidos a los que se encuentran asociados los metales y la composición química de los coloides.

Los resultados de este estudio muestran que: (i) las curvas de sedimentación presentan una alta variabilidad, (ii) el Al, Fe y Mn se encuentran asociados a partículas de origen natural, mientras que el As, Cr y Zn se encuentran asociados a partículas mayores de origen antropogénico, (iii) el Al, Fe, Mn, Cu y Zn se encontraron en el sobrenadante después de un día de sedimentación y (iv) la fase coloidal del escurrimiento urbano está compuesta principalmente por silicatos y concentraciones disueltas de carbonatos, sulfatos y haluros.

Estos resultados muestran la importancia de reducir el escurrimiento urbano sobre superficies erosionables para evitar la contaminación de las aguas lluvia, utilizando un volumen de captura para derivar parte importante del flujo hacia sistemas de infiltración y remoción de contaminantes en el lugar de origen.

[1] Profesor Instructor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC – mail: itorol@ing.puc.cl
[2] Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC – mail: bfernand@ing.puc.cl
[3] Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC – mail: ppasten@ing.puc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano y el crecimiento de las grandes ciudades generaron durante el siglo XX grandes problemas de contaminación en los recursos hídricos. Recientemente en Chile se ha abordado con importantes recursos el tratamiento de aguas servidas (SISS, 2004) y se visualiza que en la medida que este proceso se complete, el tema de la contaminación difusa, y en especial el de la calidad de las aguas lluvia, cobrará mayor importancia. En grandes ciudades como New York en EE.UU. se ha detectado hace años que la escorrentía urbana aporta la principal contribución de metales a los cauces naturales (Klein et. al., 1974). Newell et al. (1991) indican que cerca del 40% de los sólidos suspendidos que entran a la bahía de Galveston provienen del área metropolitana de Houston, EE.UU.

Entre las técnicas de disposición local más empleados están los sistemas de remoción de contaminantes por separación sólido-liquido ya que se ha visto una fuerte relación entre la concentración de muchos contaminantes y la cantidad de sólidos suspendidos. En estos sistemas la velocidad de sedimentación de los sólidos arrastrados tiene un rol fundamental en la eficiencia alcanzada (Roger et al., 1998; Dean et al., 2002).

Para el diseño de estos sistemas es fundamental lograr tiempos de retención adicionales ya que si son muy breves sólo logran remover los contaminantes asociados a las partículas mayores, pero no logran remover los contaminantes disueltos y los que se encuentran en la fase coloidal que son los que pueden ser transportados grandes distancias y tienen una mayor biodisponibilidad (Hong et al., 2002). Esta preocupación se ve reforzada por estudios que indican que la concentración de algunos contaminantes, como los metales pesados, tienen una mayor concentración en las partículas de menor tamaño (Dean et al., 2002; Tanizaki et al., 1992 y Sartor y Boyd, 1972).

También es frecuente recurrir a una combinación en serie de elementos de retención y algún sistema de infiltración del agua en el suelo. Un esquema de este tipo fue empleado en Santiago por el MOP para disminuir los aportes superficiales de cuencas urbanas de tamaño relativamente importante. El sistema consistía en uno o más pozos de infiltración que toman el agua desde la cuneta. Cada pozo infiltra cerca de 15 l/s del agua proveniente de cuencas urbanas de 0,6 ha a 627 ha y cuentan con un pequeño sedimentador de 10 m^2 para evitar la colmatación de los pozos. La infiltración del escurrimiento urbano ha despertado la preocupación por la calidad de las aguas a infiltrar ya que la contaminación de las aguas infiltradas podría llegar al acuífero (MOP, 2001a).

La preocupación por la contaminación difusa de los cauces superficiales es un tema incipiente en Chile, pero se sabe que altas concentraciones de sólidos provocan daños ambientales si son arrojados a cauces superficiales (Burton y Pitt, 2001), de manera que se espera que la contaminación difusa se encuentre dentro de los temas de relevancia nacional en los próximos años.

Ante la imposibilidad práctica de solucionar mediante plantas de tratamiento aguas abajo de las ciudades los problemas de contaminación de las aguas lluvia, debido a los grandes caudales que se generan y lo esporádico de su operación, se han propuesto técnicas de disposición local conocidas desde la década de 1960 como Prácticas de Gestión mejorada, BMP por sus siglas en inglés (Best Management Practices) (Urbonas y Roesner, 1992).

Estas técnicas se basan en disponer de un volumen de captura de las aguas lluvia generada localmente, el que es tratado mediante pequeños elementos de almacenamiento e infiltración a nivel local. Este tipo de técnicas ha tenido amplia difusión e incluso en Chile han sido propuestas como soluciones por el MINVU (1996).

En 2001 el MOP realizó análisis a la calidad de las aguas en 12 cuencas urbanas de Santiago en el que se midieron 38 parámetros. De los 38 parámetros medidos, hubo 12 que se encontraron en concentraciones mayores al límite fijado para las fuentes puntuales de residuos líquidos en, al menos, una ocasión. Los valores se compararon con las concentraciones permitidos por la Norma de emisión de fuentes puntuales continuas (D.S. Nº 46/2002) ya que en Chile no existe una normativa que regule la contaminación de fuentes difusas. Estos parámetros se muestran en la Tabla 1 junto a los sólidos suspendidos, la DQO y el cobre (MOP, 2001b).

Tabla 1: Concentraciones de los parámetros detectados en niveles significativos (mg/l)

Parámetro	Concentración (mg/l)				% de eventos sobre norma
	Promedio	Mín	Máx	Norma	
Aluminio	13,1	0,62	59,5	5	78,0%
Arsénico	0,008	< 0.005	0,026	0,01	33,0%
Cromo VI	0,01	< 0.01	0,07	0,05	3,0%
Hierro	11,66	< 0.01	37	5	69,0%
Manganeso	0,52	< 0.01	3	0,5	36,0%
Plomo	0,08	< 0.03	0,44	0,05	36,0%
Zinc	1,6	0,06	14,5	3	14,0%
NKT	6,12	1,1	15,5	15	3,0%
Amoniaco	1,06	< 0,05	4,11	1	31,0%
Cianuro	<0,05	< 0,05	0,24	0,2	3,0%
Nitrato	3,96	< 0,1	3	10	6,0%
Aceites y Grasas	28	< 1	444	10	25,0%
SS	504	27	1976	nsa	nsa
DQO	143	10	905	nsa	nsa
Cobre	0,12	< 0.01	0,46	1	0,0%

nsa: no se aplica

En el mismo estudio se analizó el porcentaje disuelto de diversos contaminantes para ver cuales presentaban un mayor riesgo de llegar al acuífero. Esta medición mostró que los metales se encontraban asociados al material particulado, lo que favorece su remoción por separación sólido-líquido. Esta medición, se realizó sin embargo en 5 lugares durante 1 sola tormenta. Debido a la alta variabilidad que muestra la contaminación en las aguas lluvias se hace necesario analizar estos resultados con cautela. Los valores detectados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Porcentaje disuelto de contaminantes que muestra el bajo porcentaje asociado a la fase disuelta de los metales

	As	Cr	Mo	Ni	Pb	Al	Fe	Mn	Zn	B	Cu	NKT	DBO_5	P	DQO
Promedio	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,1	2,9	6,1	8,3	8,8	9,7	32,1	33,5	38,7
Máximo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	2,2	14,3	14,6	33,3	20,0	17,9	65,5	84,2	42,9
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	4,3	2,9	1,2	10,3	26,1

Estudios de la DGA (2000) en los cauces superficiales de la cuenca de Santiago, muestran que las concentraciones de Cu detectadas en las aguas lluvias son mayores a las detectadas en el río Maipo (0,064 mg/l), pero menores a las detectadas en el Mapocho (1,764 mg/l), mientras que las

concentraciones de Fe de las aguas lluvias superan a los dos cauces naturales y las de As se encuentran dentro de los valores reportados en estos cauces.

En este artículo se caracterizan las propiedades de los sólidos suspendidos y los metales que se han encontrado en concentraciones significativas en el escurrimiento de aguas lluvia en Santiago con los siguientes objetivos generales:

1. Analizar las velocidades de sedimentación de los sólidos transportados por el escurrimiento urbano y estimar los tiempos de retención necesarios para disminuir la carga contaminante por medio de la fuerza gravitacional.
2. Analizar a qué tipo de partículas se encuentran asociados los 7 metales que se encuentran en altas concentraciones.
3. Caracterizar los elementos y minerales que conforman la fase coloidal y los sólidos que no sedimentan por métodos gravitacionales de remoción.

2. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Las muestras de escorrentía fueron tomadas en la cuneta a la salida de dos cuencas urbanas con un alto nivel de impermeabilización del suelo y una superficie de 627 ha y 272 ha cada una (Lo Espejo y Sótero del Río). Ambas combinan zonas residenciales con zonas industriales y tienen una alta intensidad de tráfico. En cada tormenta se realizaron 20 tomas de 5 litros cada una. Las muestras incluyeron la totalidad de los sólidos y fueron llevadas al laboratorio inmediatamente finalizada la lluvia para su análisis posterior.

Durante los años 2003 y 2004 se muestrearon 7 tormentas, cuyas características se indican en la Tabla 3.

Tabla 3: Características de las tormentas

Año	**2003**				**2004**		
Fecha	**01-Ago**	**04-Ago**	**06-Sep**	**27-Sep**	**20-May**	**19-Jun**	**12-Jul**
Nº	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Pp (mm)	2,70	4,50	2,80	14,90	6,00	7,90	42,70
Duración (h)	3,00	11,00	11,50	14,00	7,50	5,50	24,00
I_{prom} (mm/h)	0,90	0,41	0,24	1,06	0,80	1,60	1,78
I_{max} (mm/h)	1,60	1,40	0,80	2,80	6,10	6,10	4,00

3. METODOLOGÍA UTILIZADA

No existe un protocolo único para medir velocidades de sedimentación. Aiguier et al. (1996, 1998) comparan 4 protocolos propuestos por distintos investigadores (Aston University (UK), Cergrene, Camp y el Umwelt – und Fluid – Technik).

La metodología utilizada para estudiar las velocidades de sedimentación es la propuesta por la United States Environmental Protection Agency (USEPA, 1986) la cual es similar a la propuesta por Camp. (Aiguier et al., 1996).

Fue escogida por las siguientes razones:

- Incluye la velocidad de sedimentación de la totalidad de los sólidos arrastrados en la escorrentía.
- El volumen requerido permite realizar un análisis granulométrico a los SS.
- U.S. E.P.A propone una curva de velocidades de sedimentación para el diseño de sistemas de remoción por separación sólido-líquido en las escorrentías urbanas que sirve para comparar los valores detectados en Chile.

La metodología consiste en observar el comportamiento de los sólidos en una columna llena con agua en la que se mide los sólidos suspendidos mediante puertos de medición a distintas alturas. Al llenar la columna se mide la concentración inicial de sólidos suspendidos en cada uno de los puertos, luego se procede a tomar muestras a distintos intervalos de tiempo y se vuelve a medir la concentración de sólidos suspendidos. El porcentaje de sólidos que ha sido removido deberá tener una velocidad de sedimentación mayor o igual a la velocidad necesaria para ser removida, la cual se calcula como $V_s = {}^{d}\!/_{T}$, donde d es la distancia entre la superficie del agua y el puerto de medición y T el tiempo transcurrido.

Se utilizaron dos columnas de sedimentación circulares de 18,5 cm de diámetro y 190 cm de altura. Ambas columnas constan de 4 puntos de medición ubicados a 20, 60, 100 y 140 cm del fondo. El punto de toma del agua de cada puerto se ubica en el centro de la columna para evitar influencias de la pared.

Las columnas fueron llenadas con muestras compuestas en proporción a la intensidad de la tormenta, por lo que las concentraciones encontradas de los distintos contaminantes así como el porcentaje de remoción están tomados sobre las concentraciones medias por evento (CME) (Montt, 2000).

Figura 1: Columnas de Sedimentación

4. CME DE SS, SD Y TURBIDEZ

Al inicio del proceso se procedió a tomar muestras para análisis de SS, SD y turbidez en cada uno de los 4 puertos de la columna. El promedio de los 4 puntos de muestreo fue el valor considerado como concentración inicial. Dichos valores se ilustran en la Tabla 4.

Se observa una gran variabilidad en la concentración inicial de sólidos suspendidos entre tormentas y lugares. No obstante se observa que: (1) en 6 de 7 tormentas la concentración de SS fue mayor en el sector del Sótero del Río y (2) en Sótero del Río se observa una menor concentración de SS en las tormentas de mayor magnitud, mientras en Lo Espejo la mayor concentración se observa en la de mayor magnitud. La variabilidad en sólidos disueltos y turbiedad fue menor.

Tabla 4: Concentraciones iniciales de SS, SD y turbidez que muestra la alta variabilidad de los parámetros medidos

	Lugar	**Sótero del Río**			**Lo Espejo**		
	Contaminante	**SS**	**SD**	**Turb.**	**SS**	**SD**	**Turb**
Nº	**Fecha**	**(mg/L)**	**(mg/L)**	**(NTU)**	**(mg/L)**	**(mg/L)**	**(NTU)**
1	01-Ago-03	1462	226	439	nsm	nsm	nsm
2	04-Ago-03	nsm	nsm	nsm	379	408	404
3	06-Sep-03	1530	481	436	295	338	292
4	27-Sep-03	880	133	430	356	282	300
5	19-May-04	1340	391	437	893	552	472
6	20-Jun-04	587	nsm	351	439	nsm	376
7	12-Jul-04	544	nsm	nsm	989	nsm	nsm
	Promedio	**1057**	**308**	**419**	**559**	**395**	**369**
	D. Típica	**443**	**157**	**38**	**301**	**117**	**75**

nsm: no se midió

Un estudio realizado por Bf Ingenieros Civiles (DGA, 1993) midió la concentración de SS en condiciones normales en el río Maipo y el Mapocho. La concentración máxima alcanzada fue de 527 mg/l. Es natural que este valor sea sobrepasado por las aguas lluvias, ya que éstas lavan las cuencas urbanas arrastrando los sólidos depositados en ella.

5. REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS POR FUERZA GRAVITACIONAL

En la Figura 2 se muestra la concentración de sólidos suspendidos en función del tiempo de sedimentación transcurrido. Se observa también la concentración permitida por la norma de descargas continuas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales (D.S. Nº 90/2000).

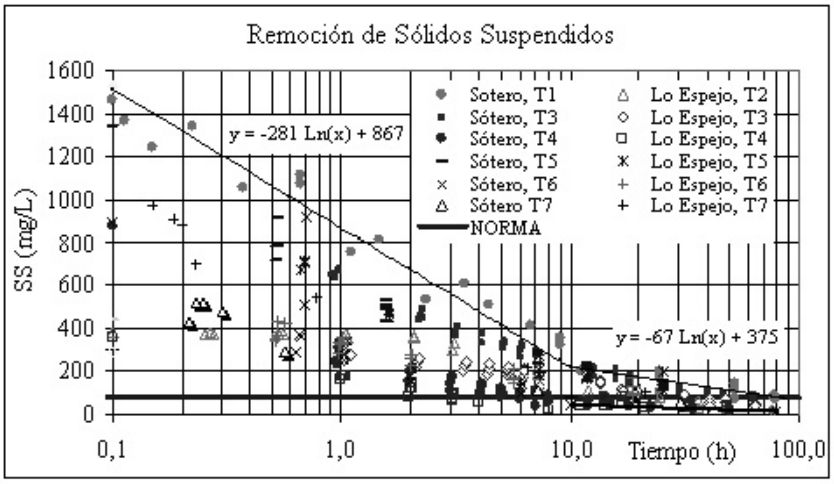

Figura 2: Remoción de sólidos suspendidos que muestra el cambio en la tasa de remoción cerca de la décima hora de sedimentación

La remoción de SS se puede modelar por dos curvas logarítmicas (rectas en el gráfico) de la forma:

$$SS(mg/L) = C_1 \cdot \ln(t) + C_2 \tag{1}$$

donde t es el tiempo en horas.

Para las primeras diez horas el valor de C_1 está entre -281 y -89, observándose que a mayor concentración inicial, mayor tasa de remoción. La diferencia en la tasa de remoción para las horas siguientes es menor, con C_1 entre -67 y -63, lo que indica que la tasa de remoción se encuentra menos afectada por la particularidad de cada tormenta y la magnitud hace que los métodos de remoción gravitacionales a partir de este tiempo de sedimentación sean menos efectivos.

Para tiempos de retención cercanos a las 10 horas, la concentración de SS se reduce a valores cercanos a los 200 mg/L en todos los casos.

El D.S. Nº 90/2000 establece para las descargas de residuos líquidos de fuentes puntuales a flujos de agua superficiales un límite máximo de 80 mg/L, por lo que para obtener valores similares a los permitidos por esta norma se requeriría retener el agua lluvia en un sedimentador por aproximadamente 40 horas si se emplea sólo la fuerza gravitacional como elemento de remoción.

A partir de la décima hora, la concentración de sólidos se puede suponer relativamente constante (Ver Figura 2). Para conocer las propiedades de dichos sólidos, en la tormenta 5 se realizó un análisis al sobrenadante.

6. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE SS

Las velocidades de sedimentación y el porcentaje correspondiente de sólidos que tienen una velocidad de sedimentación menor se pueden ver en la Figura 3.

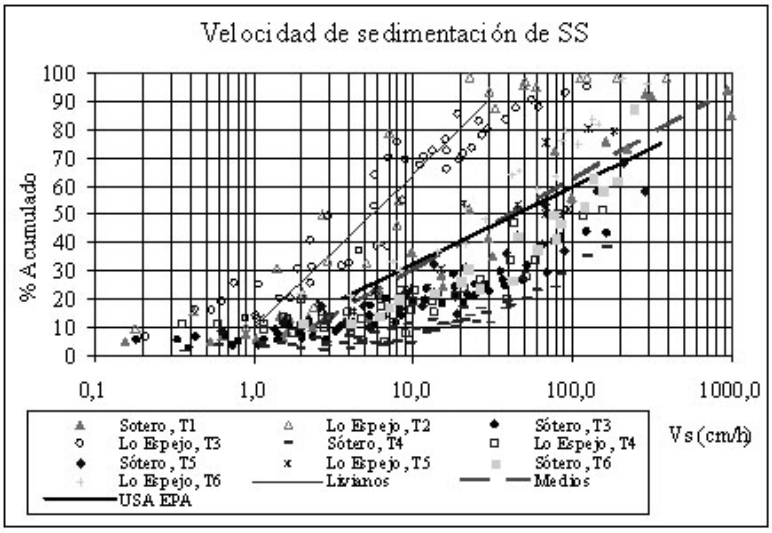

Figura 3: Velocidades de sedimentación de sólidos suspendidos que muestra la alta variabilidad de las mediciones y las curvas de sedimentación propuestas

Se observa que la Vs de los SS tiene una alta variabilidad (Figura 3), lo que resulta en una alta variabilidad en la eficiencia de los métodos de remoción por separación sólido-líquido.

Se proponen dos curvas de sedimentación, las que abarcan la variabilidad entre todas las muestras e indican el caso en que los sólidos transportados tienen bajas velocidades de sedimentación o velocidades de sedimentación medias. La curva propuesta por la USEPA (1986) se ajusta muy bien a la propuesta en este estudio para las Vs medias, pero las muestras de bajos escurrimientos arrastran sólidos de menores velocidades de sedimentación (las Vs pueden variar hasta en un orden de magnitud).

Las dos tormentas que presentaron sólidos con bajas velocidades de sedimentación fueron tormentas de baja intensidad que generaron un bajo escurrimiento en el sector Lo Espejo. Esto indica que la cantidad de agua que escurre y su capacidad erosiva del suelo son uno de los factores que influyen en la velocidad de sedimentación de los SS.

Las dos curvas de sedimentación propuestas permiten tener una mejor adaptación a las condiciones locales. La curva de sólidos “livianos” se debe emplear en el diseño de sistemas de remoción de contaminantes en cuencas pequeñas que presentan bajos escurrimientos, mientras que la de sólidos “medios” se pueden emplear para diseñar sistemas de remoción aguas abajo de grandes cuencas urbanas que generen grandes escurrimientos.

La dispersión de los datos coincide con la gran variabilidad de los datos reportados. Un estudio realizado durante 8 tormentas en una autopista de Francia (Andral et al., 1999) muestra que el 50% de las partículas tenían velocidad menor a 3,3 m/h.

Montt et al. (2003) realizaron un estudio de la distribución de tormentas en Santiago donde obtuvieron que el 25% del volumen anual de agua caída lo hace en tormentas menores a 15 mm,

el 14% lo hace en tormentas menores a 10 mm y que sólo el 6% lo hace en tormentas menores a 5 mm.

Asumiendo que las tormentas menores generan escurrimientos menores en una misma cuenca y que por lo tanto transportan sólidos con menores velocidades de sedimentación, la curva de velocidades de sedimentación de los sólidos "livianos" sirve de cota mínima ya que representa velocidades de sedimentación mínima de los sólidos en tormentas que representan más del 94% del volumen anual en cuencas con bajos escurrimientos. La curva de sólidos "medios", en cambio, comprenden cerca del 86% del volumen anual escurrido. Estos porcentajes se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Muestra el porcentaje del volumen anual de agua escurrida que sería tratado con la eficiencia de diseño al utilizar cada una de las curvas propuestas

Curva de Diseño	% del volumen anual
Livianos	94
Medios	86

Así, el diseño de sistemas de remoción de SS de las aguas lluvias deberá incluir el porcentaje del volumen anual de agua escurrida a ser tratado con la eficiencia buscada y el porcentaje de remoción de SS en las aguas lluvia.

7. DISTRIBUCIÓN DE METALES EN LAS PARTÍCULAS DE DISTINTOS TAMAÑOS

En la tormenta 7, se estudió el porcentaje de metal asociado a las partículas de distintos tamaños. Para esto se tomó un valor inicial de la concentración de los metales en el agua y se volvió a medir la concentración a distintos intervalos de tiempo. La diferencia entre la concentración inicial y la nueva medición se consideró asociada a las partículas que habían sedimentado. Para evitar la adsorción de metales en las paredes de las columnas, se procedió a enjuagar las columnas con agua del mismo origen de la que se iban a realizar las mediciones.

Al suponer que la concentración de sólidos disueltos se mantiene constante durante el experimento (20 a 30 horas de duración), se puede obtener la concentración de metales asociados a las partículas de distintas velocidades de sedimentación por medio de la ecuación 2.

$$\begin{array}{c} C_{ST,100} = C_{SS,100} + C_{SD,100} \\ C_{ST,10} = C_{SS,10} + C_{SD,10} \\ \hline C_{ST,100} - C_{ST,10} = C_{SS,100} - C_{SS,10} \\ C_{ST,100-10} = C_{SS,100-10} \end{array} \qquad (2)$$

Donde $C_{ST,x}$ es la concentración total de la muestra con partículas de V_s = x cm/h.

$C_{SS,x}$: Concentración asociada al material particulado con V_s = x cm/h.

$C_{SD,x}$: Concentración asociada a fase disuelta en la muestra con partículas de V_s=x cm/h.

$C_{ST,x-y}$: Concentración total de la muestra asociada al rango y = V_s = x cm/h.

$C_{SS,x-y}$: Concentración asociada al material particulado del rango y = V_s = x cm/h.

Se analizó el porcentaje asociado a cuatro distintos tipos de partículas: (i) Partículas con Vs<1 cm/h y fase disuelta, (ii) Partículas con 1<Vs<10 cm/h, (iii) Partículas con 10<Vs<100 cm/h y (iv) Partículas con Vs>100 cm/h.

La Figura 4 muestra el porcentaje de cada uno de los metales asociado a cada tipo de partículas. En ambas cuencas se observa un comportamiento similar.

La concentración promedio de los metales en los sólidos con Vs<1 cm/h indicaría la concentración máxima posible, ya que los antecedentes indican que sólo un bajísimo porcentaje de los metales se encuentran en forma disuelta (Tabla 2).

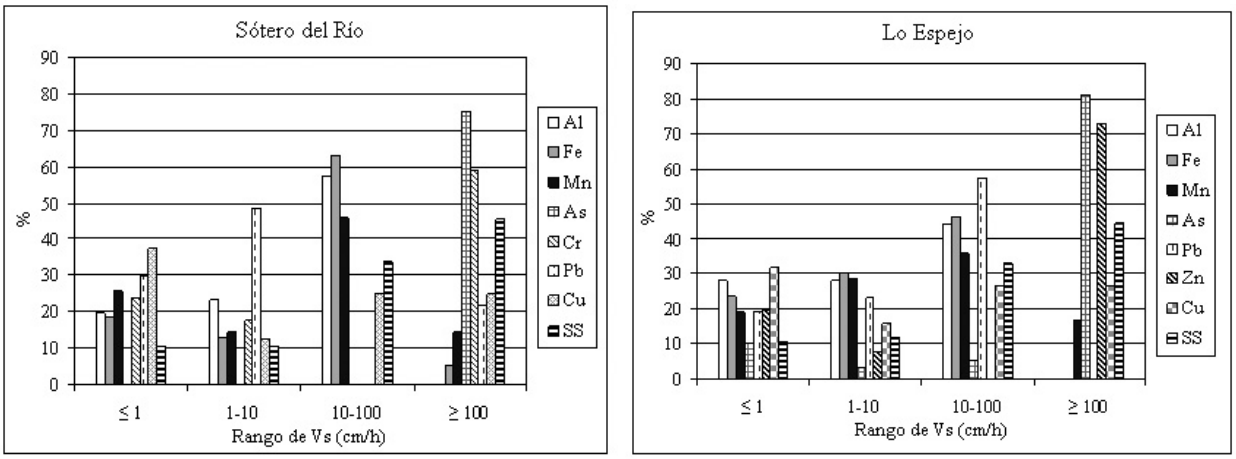

Figura 4: Distribución de metales y SS en distintos tipos de partículas

La concentración en los SS (ppm) del Al, Fe y Mn fue despreciable en los sólidos con Vs>100 cm/h. En los sólidos con Vs<100 cm/h se encontraron en concentraciones considerablemente mayor al resto de los metales analizados. La concentración de estos metales se muestra en la Tabla 6 y la concentración del resto de los metales se muestra en la Figura 5.

Tabla 6: Concentración de los metales en los SS (ppm)

	Lo Espejo			Sótero del Río		
V (cm/h)	Al	Fe	Mn	Al	Fe	Mn
= 100	0	0	306	0	3122	226
10-100	26640	29703	919	36359	44833	875
1-10	48012	53939	2061	47771	30124	891
= 1	53429	46857	1524	39825	42281	1579

El porcentaje que representan los metales de la masa total de SS aumenta a medida que la Vs de los SS disminuye (Tabla 7). Estos valores son aportados básicamente por el aluminio y el hierro. El resto de los contaminantes contribuye como máximo con un 0,4%.

Tabla 7: Porcentaje de los sólidos compuesto por metales

V_s (cm/h)	**Sótero**	**Lo Espejo**
= 100	0,1%	0,0%
10-100	8,2%	5,7%
1-10	7,9%	10,5%
= 1	8,6%	10,4%

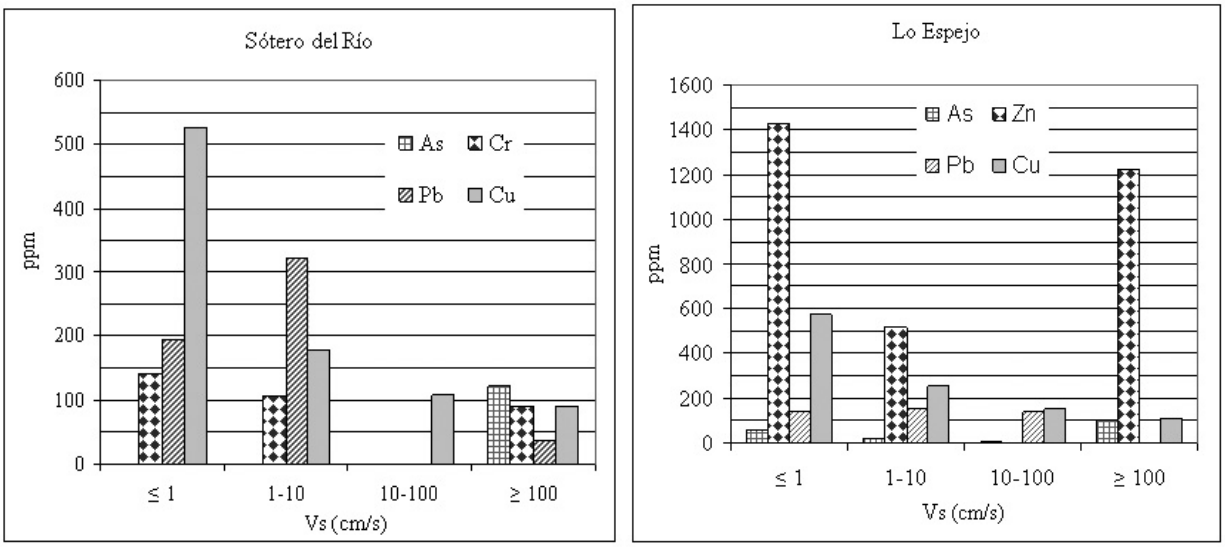

Figura 5: Concentración (ppm) de metales secundarios en los distintos tipos de partículas (que muestra la preferencia del cobre por adherirse a partículas de bajas Vs).

El Al, Fe y Mn son elementos que se encuentran fuertemente asociados a la erosión de suelos y las concentraciones en que se encontraron fueron superiores a los otros metales. El que se encuentren asociados a los mismos tipos de partículas (Ver Figura 4) refuerza el origen natural de estos contaminantes. Las partículas producidas por la erosión del suelo tienen velocidades de sedimentación menor a 100 cm/h.

El As, Cr y Zn se encuentran asociados a las partículas con Vs mayor a las que contienen Al, Fe y Mn. Esto es un indicador del origen antropogénico de tales contaminantes. El As y Cr se utilizan en la industria del vidrio y en las aleaciones con Fe y Pb. El Zn es ampliamente utilizado en aleaciones y como recubrimiento protector de metales.

El Pb se encuentra en todas las partículas, pero con un mayor porcentaje en los sólidos con Vs entre 1 y 10 cm/h. Las partículas con menores Vs pueden estar asociados a subproductos de la combustión de derivados del petróleo.

El Cu se encontró uniformemente distribuido en los 4 grupos.

La concentración del As en los sólidos con Vs mayores alcanza valores cercanos a 150 ppm y el Cr tiene una mayor concentración en los sólidos con menores Vs (~150 ppm) a pesar de que la mayoría del Cr se encuentra asociado a los sólidos con altas Vs.

La gran concentración del Zn (ppm) en los sólidos con altas Vs (1200 ppm) y en los sólidos con bajas Vs (1400 ppm) indica que el Zn se encuentra asociado a partículas de altas Vs, pero que es fácilmente disuelto, lo que favorece su adsorción en partículas de bajas Vs.

8. ANÁLISIS DEL SOBRENADANTE Y LA FASE COLOIDAL

En la tormenta 5 se realizó el análisis de la fase coloidal a las partículas que seguían en suspensión luego de 1 día de iniciada la sedimentación. Para esto se tomaron dos muestras de 125 ml en botellas que habían sido lavadas con detergente, enjaguadas tres veces con agua destilada y luego con una solución de HCl al 10%. Finalmente se enjaguaban tres veces con agua ultra pura millipore.

La muestra de una botella se dejó secar a 37ºC y luego se realizó difracción y fluorescencia de rayos X.

A los coloides de la otra botella se le realizó microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de energía dispersiva (EDS) para observar la forma y los elementos que constituyen la fase coloidal. Para esto la muestra fue filtrada y luego ultra centrifugada. La filtración se realizó con membranas de celulosa de nitrato de 0,45 μm y 47 mm de diámetro (Sartorius, Cellulose Nitrate Filter 11406—47----ACN) montadas sobre un equipo de filtración Sartorius 16510 conectado a una bomba de vacío Rietschle Thomas modelo 905CD18. Las membranas antes de ser usadas fueron lavadas con una solución de HCl al 10% y luego enjuagadas tres veces con agua ultra pura millipore y secadas a 37 ºC.

El agua filtrada, es luego, almacenada a 4 ºC hasta realizar la centrifugación en una ultra centrífuga Beckman L5-40 a 28.000 rpm, con un rotor TY35 (127.000 g) durante 8 h a 5ºC. Entre la filtración y la ultra centrifugación transcurrieron menos de 18 horas.

Luego de la centrifugación el sobrenadante fue sacado cuidadosamente con una pipeta y se eliminó. El aglomerado, formado por la fase coloidal, fue recogido con una micropipeta y depositado en una película de carbón donde se dejó secar a 37 ºC. Luego se le realizaron varias observaciones por SEM y 13 mediciones de EDS.

La difracción de rayos X arrojó la existencia de los minerales que se muestran en la Tabla 8. El Sr, Cu, Zn, Ba, P, Ti, K, no fueron detectados en la difracción de rayos X por la baja concentración en que se encontraban.

Tabla 8: Compuestos encontrados en sólidos del sobrenadante

Tipo	Compuesto	Composición Química
Haluro	Halita	$NaCl$
Carbonato	Calcita	$CaCO_3$
Silicatos	Cuarzo	SiO_2
	Anortita sódica	$(Ca,Na)(Al,Si)_2Si_2O_8$
	Clinocloro	$(Mg_5Al)(Si,Al)_4\ O_{10}(OH)_8$
	Gismondina	$CaAl_2Si_2O_8$
	Hidro siliciuro de Ca-Mn hidratado	$CaMn_4Si_5O_{14}(OH)_2\ H_2O$
Sulfatos	Yeso	$CaSO_4\ 2H_2O$
	Sulfato de sodio-calcio hidratado	$Na_2Ca_5(SO_4)_6\ 3H_2O$
	Sulfato de hierro-aluminio hidratado	$FeAl_2(SO_4)_4\ 22H_2O$
	Sulfato de sodio-calcio hidratado	$CaO_{0.98}NaO_{0.03}SO_{47}\ H_2O$

La fluorescencia entregó una serie de elementos que se encontraban en una alta concentración en los sólidos del sobrenadante (>5%) y elementos que se encontraban en menor concentración. Los principales consituyentes del sobrenadante son el O (44%), Ca (24%), C (7%), Si (6%), Cl (5%) y Na (5%). Entre los elementos secundarios se encuentra el Al (3%), Mg (2%), S (2%), K (1%), Fe (1%), Mn (0,1%), Ti (0,1%), P (0,08%), Ba (0,03%), Zn (0,02%), Cu (0,01%) y Sr (0,01%).

Las observaciones de SEM muestran la morfología del aglomerado formado durante la ultra centrifugación. Se realizaron observaciones con distintos niveles de magnificación. En la Figura 6 se muestran los coloides con una magnificación de 250x y de 10kx.

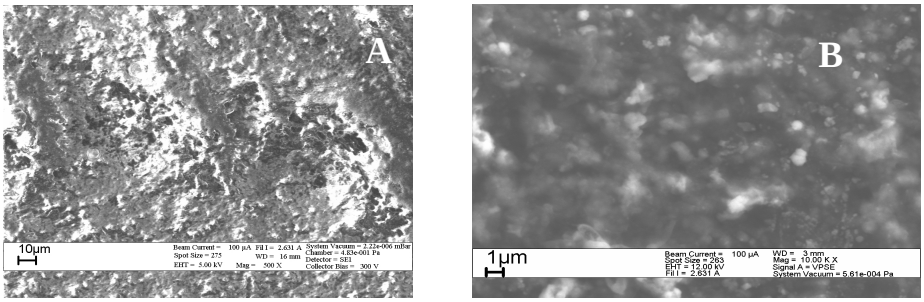

Figura 6: Coloides con magnificación 250x (A) y 10kx (B)

Por medio de EDS se encontró los elementos que componen la fase coloidal. Se realizaron 6 mediciones de EDS sobre una zona ampliada con 250x (semejante a la Figura 6-A) y 7 mediciones a partículas en una zona de magnificación 10kx (semejante a la Figura 6-B). Los elementos detectados se muestran en la Tabla 9 junto al porcentaje de detección (de un total de 13 observaciones) y al porcentaje en peso en que se encontró.

Tabla 9: Elementos detectados en los coloides

Elemento	% de detección	% Peso		
		Mín	Promedio	Máx
C	100	36,7	48,4	61,8
O	100	22,6	29,5	34,4
Ca	100	3,6	5,1	7,7
Cl	100	0,3	6,3	14,2
Na	100	1,0	4,7	9,1
S	100	1,2	2,0	3,2
K	71	0,8	2,1	4,0
Si	71	0,3	1,4	5,8
Mg	86	0,3	0,4	0,6
P	100	0,2	0,4	0,5
Al	57	0,4	0,8	1,9
Fe	29	0,3	0,7	1,1
Mn	14	0,5	0,5	0,5

El 85% de los sólidos del sobrenadante está formado por C, O y Ca y el 15% por Cl, Na, S, K y Si. Entre los elementos que se encuentran en un porcentaje menor están 5 de los 7 metales de interés de acuerdo a la norma de emisión a aguas subterráneas. Estos metales son el Al, Fe, Mn y el Zn y Cu. Los tres primeros están asociados a un origen natural por lo que el Zn y el Cu presentan un mayor interés en cuanto al riesgo ambiental. Sólo el Al y Fe superaron en concentración al 1% de los SS del sobrenadante. El resto de los metales representa menos del

0,2% cada uno. Esto indica que las concentraciones de metales pesados no deberían presentar un riesgo ambiental en los sistemas de infiltración de las aguas lluvias.

Algunos de los minerales encontrados se formaron a medida que se evaporaba la muestra con los elementos que se encontraban inicialmente de manera disuelta. Los minerales que se encontraban inicialmente en el escurrimiento fueron silicatos. Los minerales que contienen C, K, Ti, P, Ba, Zn, Cu y Sr no se detectaron, por encontrarse bajo el nivel de detección del equipo.

Los coloides presentaron una composición similar a los sólidos mayores que aún quedaban en suspensión. Sin embargo no se encontró Ti, Ba, Zn, Cu ni Sr. La cantidad de Na, K y Cl se ve aumentada por los cristales de NaCl y KCl que se formaron durante la evaporación de la muestra.

A pesar de que al inicio de la sedimentación el NKT se encontraba en 7,9 mg/l y de que se ha encontrado como máximo un 17,9% en la fase disuelta, no se encontró en el sobrenadante ni en los coloides. Esto indicaría que el nitrógeno se encuentra asociado principalmente a sólidos que sedimentan antes de 24 horas. De haber nitrógeno de manera disuelta se adsorve fácilmente en los SS.

El As y el Pb también se encontraban al inicio de la sedimentación (0,067 mg/l y 0,056 mg/l respectivamente) y no se encontraron en el sobrenadante.

9. CONCLUSIONES

La curva de velocidades de sedimentación propuesta por la USEPA (1986) se ajusta muy bien al comportamiento de los sólidos promedio en las grandes cuencas urbanas en Santiago de Chile, pero existe una gran dispersión de los valores. En particular el comportamiento de las cuencas más pequeñas (que generan escurrimientos menores) difiere enormemente, arrastrando sólidos con velocidades de sedimentación un orden de magnitud menores.

El Al, Fe y Mn se encuentran asociados principalmente a partículas con velocidades de sedimentación menor a 100 cm/h. que provienen de la erosión del suelo. Sin embargo el As, Cr, Pb, Cu y Zn muestran un comportamiento diferente lo que podría deberse a su origen antropogénico.

A pesar de que el As, Cr y Zn se encuentran principalmente asociados a partículas de grandes velocidades de sedimentación (Vs>100 cm/h) se refuerza la necesidad de tratar gastos menores de agua en los lugares en que se generan las aguas lluvias, evitando el escurrimiento urbano.

La remoción del Pb y Cu requeriría mayores tiempos de retención ya que se encuentran asociados, en un gran porcentaje, a partículas de menor tamaño, lo que hace necesario realizar algún tratamiento de floculación para remover estos contaminantes o utilizar otro medio para ello, como filtración.

Cerca del 25% del As, Cr y Zn y del 80% del Pb y Cu se encuentran asociados a partículas menores (Vs<100 cm/h). Sin embargo el análisis del sobrenadante muestra que se encuentran presentes juntos a carbonatos y alumino-silicatos, lo que hace que las concentraciones de Al, Fe,

y Mn sean mayores, los que podrían reaccionar con el resto de los metales disminuyendo su biodisponibilidad.

Sólo el Al y Fe superaron en concentración al 1% de los SS del sobrenadante luego de un día de sedimentación. El resto de los metales representa menos del 0,2% cada uno. Esto indica que las concentraciones de metales pesados no deberían presentar un riesgo ambiental en los sistemas de infiltración de las aguas lluvias ya que un bajísimo porcentaje se encuentra asociado a las partículas de bajas velocidades de sedimentación, quedando retenidas en el suelo. El riesgo ambiental es mayor si estos metales son vertidos en escurrimientos superficiales ya que pueden ser transportados grandes distancias sin ser retenidos.

Para poder dimensionar la biodisponibilidad de los metales transportados por las aguas lluvias es necesario conocer la reactividad de los metales asociados a las partículas menores. Para esto se propone hacer experimentos de extracción secuencial de tales metales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado a través del proyecto FONDEF D00I1011 “Sistemas estandarizados de drenaje de aguas lluvias para urbanizaciones y viviendas” y a la Sociedad de canalistas del Maipo por la beca Arturo Cousiño Lyon otorgada al primer autor.

REFERENCIAS

AIGUIER E., CHEBBO G., BERTREAND-KRAJEWSKI J.L., HEDGEST P. y TYACK N. (1996) Methods for determining the settling velocity profiles of solids in storm sewage. Wat. Sci. Tech. Vol 33, Nº9, 117-125.

AIGUIER E., CHEBBO G., BERTREAND-KRAJEWSKI J.L., GAGNE B. y HEDGEST P. (1998) Analysis of the methods for determining the settling characterisitcs of sewage and stormwater solids. Wat. Sci. Tech. Vol 37, Nº 1, 53-60.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (1998). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington, DC.

ANDRAL, M.C., ROGER, S., MONTRÉJAUD-VIGNOLES M., HERREMANS L. (1999). Particle size distribution and hydrodynamic characteristics of solid matter carried by runoff from motorways. Water Environment Reserarch Vol 71, Nº4, 398-407.

BURTON, A. G. y PITT R. E. (2001). Stormwater Effects Handbook. A Toolbox for Watershed Managers, Scientists, and Engineers. Florida, Lewis Publishers, Inc.

CONAMA R.M. (1995) Programa de Monitoreo de Calidad de Agua del Sistema Río Maipo, elaborado por CADE-IDEPE.

DEAN C., BLAZIER A., KRIELOW E., CARTLEDGE F., TITTLEBAUM M., SANSALONE J. (2002). What You Did Not Know About Storm Water Chemistry And Were Afraid to Ask. Global Solutions for Urban Drainage: 9ICUD, 8-13 Septiembre 2002, Oregon.

DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS, M.O.P. (2000) Modelo de simulación hidrológico operacional. Cuencas de los ríos Maipo y Mapocho. Realizado por Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. S.I.T. Nº62. Santiago

D.S. Nº 46/2002 (2003). Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile

D.S. Nº 90/2000 (2001). Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile.

HONG, L., WALL, L. y SANSALONE, J. (2002). Aggregation of Stormwater Particulates - Suspended Particle Gradations and Settling Column Analysis. *Global Solutions for Urban Drainage: 9ICUD*, 8-13 Septiembre 2002, Oregon.

KLEIN, L.A., LANG, M., NASH, N. y KIRSCHNER, S.L. (1974). Sources of metals in new York City wastewater. *J. Water Pollution Control Fed.* Vol 46, Nº12, 2653-2662.

MINVU (1996) Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos. Guía de Diseño.

MONTT, J. P. (2000). Antecedentes empíricos y modelación de la calidad de las aguas lluvias urbanas. M. Sc. Thesis, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

MONTT, J. P., RIVERA P. I. y FERNÁNDEZ B. (2003) Distribución probabilística de la precipitación y su relación con la eficacia de obras de infiltración o tratamiento de aguas lluvias. Aplicación en Santiago. XVI Congreso chileno de ingeniería hidráulica, Santiago.

MOP (2001a). *Análisis de la Calidad de las Aguas Lluvias Urbanas en Pozos de Infiltración en la Ciudad de Santiago. Informe Final*.

MOP (2001b). *Análisis Experimental en Pozos de Infiltración de Aguas Lluvias en Hospital Sótero del Río y aeródromo de Tobalaba. Medición de Caudales y Análisis de Calidad. Informe Final*.

NEWELL, C. J., RIFAI, H.S. y BEDIENT, P.B. (1991). Characterization of Non-Point Sources and Loadings to Galveston Bay. *Galveston Bay Nat. Estuary Program*, Webster, Texas.

ROGER S., MONTRÉJAUD-VIGNOLES M., ANDRAL, M.C., HERREMANS, L. y FORTUNÉ, J.P. (1998). Mineral, Physical and Chemical Analysis of the Solid Matter Carried by Motorway Runoff. Water Research, Vol 32, Nº4, 1119-1125.

SARTOR, J. D, BOYD, G.B. (1972). Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants. *EPA-R2-72-081, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency*, Washington, DC.

SISS, SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (2004) Informe de Gestión del Sector Sanitario

TANIZAKI, Y., SHIMOKAWA, T., YAMAZAKI, M. (1992). Physico-chemical speciation of trace elements in urban streams by size fractionation. *Water Research*, Vol 26, Nº1, 55-63.

URBONAS B. R., ROESNER L A. (1992). Hydrologic design for urban drainage and flood control. Capítulo 28 en: MAIDMENT D. R., Handbook of hydrology, McGraw-Hill, Inc.

USEPA (1986). Methodology for Analysis of Detention Basins for Control of Urban Runoff Quality. EPA440/5-87-001.