



PROGRAMA DE EVALUACIÓN Y MONITOREO DE LAS ESCORRENTIAS PLUVIALES CONTAMINADAS DE UN TRAMO DEL SEGUNDO CINTURÓN DE DONOSTIA-SAN SEBASTIÁN

**Niall Tynan Pascual (URGARBI Servicios Ambientales)
Joaquín Suárez López, José Anta Álvarez, Pablo Ures Rodríguez, Montserrat Recarey Pérez,
Manuel Regueiro Picallo, Aleh Hryshkevich, Zurab Jikia
(GEAMA – UNIVERSIDADE DA CORUÑA)**

1. INTRODUCCIÓN

En la última década la escorrentía superficial se ha identificado como una fuente clara e importante de contaminación de las masas de aguas superficiales y subterráneas. La administración pública, consciente de esta circunstancia, y empujada en varias ocasiones por la creciente demanda social, está promoviendo varios instrumentos normativos con el fin de minimizar la contaminación de los sistemas de drenaje y saneamiento en tiempo de lluvia.

A nivel estatal son el tanto el Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre (por el que se modifican el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas) como por la Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre (por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido), los que establecen claramente la necesidad de caracterizar las aguas de escorrentía, tanto de zonas urbanas como industriales, con el fin de valorar la posibilidad de generar impactos sobre los medios acuáticos. Si estas aguas transportan cantidades significativas de contaminantes se deben considerar “aguas residuales” y deben ser gestionadas como tales. Varios planes hidrológicos han incorporado algunas tímidas consideraciones respecto a las aguas de escorrentía contaminada.

Esta situación está impulsando la búsqueda de estrategias de gestión y tecnologías novedosas, y diferentes a las convencionalmente usadas en el diseño y construcción de los sistemas de drenaje. Las BMPs (*Best Management Practices*), denominadas MTDs (Mejores Técnicas Disponibles), son un conjunto de técnicas emergentes en nuestro país que representan una alternativa y/o complemento a la gestión convencional de las aguas pluviales. Otra denominación utilizada en España es la de Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TDUS) o Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

La autopista del Segundo Cinturón de Donostia-San Sebastián, en el tramo A8 Aritzeta-Enlace del Urumea, incluye el uso de TDUS para la gestión de las escorrentías pluviales en algunas de las cuencas del trazado. En enero de 2013 BIDEGI (Diputación Foral de Guipúzcoa) construyó y puso en funcionamiento un innovador sistema de tratamiento de las aguas de escorrentía de un tramo de la vía basado en un separador hidrodinámico y un sistema de filtración por membranas. Las soluciones implementadas fueron



encaminadas a corregir los efectos negativos derivados de la explotación de la infraestructura viaria, y tienen como referencia obligada la Declaración de Impacto Ambiental de la infraestructura, y los requisitos y criterios establecidos por la Agencia Vasca del Agua.

BIDEGI consideró de gran interés proceder a realizar un “PROGRAMA DE EVALUACIÓN Y MONITOREO DE LAS ESCORRENTIAS PLUVIALES PROCEDENTES DE LOS PK 21+745Y PK 22+125 DEL SEGUNDO CINTURÓN DE DONOSTIA-SAN SEBASTIÁN”, con el fin de comprender mejor los fenómenos de movilización de contaminantes asociados a viales de alta capacidad y al tráfico de vehículos, y conocer la efectividad en la reducción de contaminantes que se producían por la MPC implementada.

El objetivo principal del estudio que se presenta en esta comunicación de forma resumida fue caracterizar los flujos de escorrentía superficial, tanto en caudal como en contaminación, generados en el tramo A8 Aritzeta-Enlace del Urumea de la autopista Segundo Cinturón de Donostia-San Sebastián. Este tramo se caracteriza por tener una estación de servicio de combustibles con una amplia zona de aparcamiento asociada, en la cual se desarrolla un intenso tráfico de vehículos pesados. Un hecho que agravaba la posible existencia de flujos contaminados procedentes de la autopista era que las escorrentías superficiales de esta zona se incorporan al régimen subterráneo a través de una dolina.

Numerosos estudios internacionales han evaluado la eficiencia de las TDUS en la reducción de las concentraciones de contaminantes y volúmenes de escorrentía en infraestructuras lineales. Gracias a esto, este conjunto de técnicas y tecnologías emergentes son en muchos países medidas obligatorias en la planificación y ejecución del drenaje de cualquier desarrollo, y representan una solución, técnica y económicamente atractiva y viable, para afrontar los futuros retos en la gestión del agua pluvial y de las fuentes difusas de contaminación.

A nivel nacional la falta de experiencias, datos, guías e información sobre estas medidas representan una de las principales barreras para su aplicación y extensión. El estudio que se presenta a continuación tuvo, y tiene, como finalidad proveer datos e información real y contrastable sobre la efectividad de estas medidas.

URGARBI desarrolló el presente estudio con la colaboración del GEAMA (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente) de la Universidade da Coruña. El GEAMA cuenta con una amplia experiencia en la planificación y desarrollo de estudios sobre la movilización de contaminación en tiempo de lluvia, tanto en sistemas unitarios como separativos.

Se debe poner de manifiesto el carácter claro de “estudio piloto” del trabajo realizado. El grado de instrumentación de la instalación y los ambiciosos objetivos de caracterización de la contaminación lo hacen único a nivel nacional. La experiencia en el manejo de toda la instrumentación, la “fortuna” de que todo funcionase como debía funcionar en cada momento, y de que “lloviese como tenía que llover”, han determinado que la campaña de campo se extendiese más de lo previsto; los trabajos se desarrollaron durante los años 2013 y 2015.



Adicionalmente, la naturaleza propia de las aguas de escorrentía, fuente de contaminación no puntual o difusa, discontinua en el tiempo, sensible a los cambios de las condiciones climáticas, no concentrada y, en general sin una localización específica, siempre requiere de un esfuerzo considerable en su muestreo y caracterización. No obstante, y tal y como pone de manifiesto este estudio, el valor de la información recogida merece el esfuerzo ya que aporta datos fundamentales para la toma de decisiones futuras e implementación de estrategias de gestión.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del programa de evaluación y monitoreo fue obtener información sobre las escorrentías generadas en la cuenca de estudio, la operación y efectividad de las soluciones de tratamiento implementadas, así como valorar el cumplimiento de la calidad del vertido con las regulaciones y normativas aplicables. La iniciativa propuesta se centró en los siguientes puntos:

- Determinar los tipos de contaminación y los niveles de concentraciones aportados por las escorrentías pluviales en la cuenca de estudio y su variabilidad.
- Determinar la eficiencia en la remoción de contaminantes de las unidades de tratamiento.
- Determinar la variabilidad en la eficiencia de remoción para distintos contaminantes.
- Determinar la variabilidad en la eficiencia de remoción para sucesos de precipitación de distintas intensidades y duraciones.
- Determinar la calidad del efluente vertido y su impacto en el medio receptor.
- Determinar las necesidades reales de mantenimiento para la cuenca de estudio y las condiciones de operación

3.- CONTAMINANTES TÍPICOS EN AUTOPISTAS Y PROBLEMÁTICA

Las acciones y elementos asociados a la construcción y explotación de la red viaria de un territorio provocan alteraciones sobre los flujos de las aguas y sobre su calidad. La funcionalidad de una carretera y la organización de su sistema de drenaje implican que todo líquido (agua de lluvia, vertidos de combustibles y materias transportadas por los vehículos) que por cualquier razón cae sobre la calzada, sea evacuado fuera de la misma. Remover rápidamente toda el agua en la calzada, bajo el objetivo de mantener la seguridad de los vehículos y la integridad estructural de la carretera, puede tener incompatibilidades con la sostenibilidad de la infraestructura viaria.

El incremento en los volúmenes de tráfico en las redes viarias principales empeora la calidad química de las escorrentías. La escorrentía procedente de una carretera es una fuente difusa de contaminación, cuya forma de vertido y características contaminantes son muy específicas. Durante muchas décadas este tipo de contaminación ha pasado desapercibida o no se le ha prestado la importancia requerida, principalmente porque estas aguas suelen transportar, en la mayoría de los casos, bajas concentraciones de contaminantes en grandes volúmenes de agua.

Los orígenes de los contaminantes encontrados en el agua de escorrentía de las



carreteras son muy variados y pueden atribuirse principalmente a la deposición de emisiones del tráfico o de otras actividades cercanas, al lavado del pavimento, a operaciones de mantenimiento, vertidos accidentales y deposición de residuos. Esta gran variedad de contaminantes observada en las escorrentías de carreteras dificulta la predicción de las concentraciones y masas en un emplazamiento con respecto a otro, e incluso, entre diferentes sucesos de lluvia en un mismo lugar.

En la actualidad, según la Directiva Marco del Agua y la Instrucción de la Planificación Hidrológica, las aguas de escorrentía de calles, carreteras y autopistas deben ser consideradas como “presiones” a tener en cuenta y es preciso su análisis con el fin de valorar si generan impactos significativos sobre las masas de agua. Estados Unidos, mucho antes que Europa, estableció que entre el 4 y 11% de los impactos y presiones en las masas de aguas superficiales eran causados por las aguas pluviales.

Existen numerosos contaminantes potenciales que pueden ser arrastrados por la escorrentía en carreteras (tabla 1). Aunque la variabilidad de posibles contaminantes es muy amplia, existen algunos intentos de sistematización para clasificar e identificar los constituyentes de las aguas de escorrentía.

En la fase de explotación o funcionamiento de una carretera se pueden distinguir tres tipos de contaminación:

- **Contaminación crónica:** Es la más persistente y se genera por la circulación de vehículos (emisiones, corrosiones, rozamiento de neumáticos y frenos), así como por la erosión y degradación de las estructuras y superficies que forman parte de la carretera. Los contaminantes característicos, en este caso, son sólidos en suspensión, metales pesados (Zn, Pb), hidrocarburos y otros compuestos con propiedades oxidantes (caracterizables por su DQO).
- **Contaminación estacional:** Se produce en una determinada época del año y está asociada a diversos factores normalmente estacionales (hielo y nieve, vegetación y fauna indeseables) que implican el uso de fundentes (cloruros de sodio, calcio y magnesio, y acetato potásico, principalmente) y biocidas (especialmente herbicidas).
- **Contaminación accidental:** Asociada a los accidentes de vehículos que transportan sustancias peligrosas. Los tipos de materias peligrosas transportadas por carreteras son muy variados e incluyen hidrocarburos, compuestos orgánicos, sustancias corrosivas y otros.

Un análisis de la bibliografía internacional muestra que el país en donde más ha sido caracterizada la escorrentía de las autopistas ha sido EE.UU. En este país se han realizado importantes esfuerzos de caracterización y sistematización tanto desde la «*Federal Highway Administration*» como desde la “*Environmental Protection Agency*” (EPA). Un ejemplo de la gran cantidad de información ya disponible es, por ejemplo, la «*National Highway Runoff Water-Quality Data and Methodology Synthesis*». El tipo de vehículos, el tipo de combustibles, e incluso el tipo de pavimentos, pueden determinar diferencias entre unos países y otros.

Los factores que afectan a la calidad de las escorrentías de carreteras son numerosos y complejos. Las características climatológicas (frecuencia, intensidad y duración de la



precipitación, viento), porcentaje de zonas permeables e impermeables que mandan escorrentía a la calzada, edad y estado de los automóviles, normativa local en relación a las emisiones y acumulaciones de basura, políticas de mantenimiento, así como tipos y cantidad de vegetación en la zona de dominio forman complejas interrelaciones y afectan a la contaminación presente en las aguas de escorrentía de la carretera.

Tabla 1. Principales fuentes de contaminación en aguas de escorrentía urbana y en carreteras.

CONTAMINANTE	ORIGEN
PLOMO	Gasolinas con plomo, cubiertas de neumáticos, aceites lubricantes y grasas, compuestos empleados en sales de deshielo
ZINC	Caucho vulcanizado de la cubierta de los neumáticos, acero galvanizado, infraestructura, aceite del motor (aditivos estabilizantes), grasas
HIERRO	Óxidos de la carrocería del vehículo, estructuras de acero en carreteras (guardarrailes, puentes, etc.), parte móviles del motor
COBRE	Revestimientos metálicos, partes móviles del motor, pastillas de freno, fungicidas e insecticidas (operaciones de mantenimiento en carretera)
CADMIO	Neumáticos (material de relleno), insecticidas, superficies galvanizadas con zinc.
CROMO	Revestimientos metálicos, partes móviles del motor, pastillas de freno
NIQUEL	Gases de combustión del gasoil y aceites lubricantes, revestimientos metálicos, pastillas de freno y asfalto
MANGANESO	Partes móviles del motor
BROMO	Gases de combustión del vehículo
CIANURO	Compuestos anti-apelmazantes (féricos y ferro-cianuros, etc.) empleados para mantener la sal granulada
CLORUROS	Sales de deshielo
SULFATOS	Capas de la calzada, fuel, sales de deshielo
PETRÓLEO	Derrames y pérdidas de lubricantes del motor, anticongelante, fluidos hidráulicos, lixiviados de superficies asfálticas
PCBs	Sprays empleados en cunetas, deposiciones atmosféricas, catalizadores en neumáticos
CAUCHO	Cubiertas de neumáticos
SSV (sólidos suspensión volátiles)	Cubiertas de neumáticos y abrasión del asfalto
AMIANTO	Embrague y pastillas de freno

En la tabla 2 se muestran los valores de contaminantes en la escorrentía que cabe esperar encontrar en el ámbito de una autopista (adaptado de Dorman, 1996).

4.- MARCO NORMATIVO

Los aspectos y requerimientos relacionados con la gestión de las aguas de escorrentía en la legislación española son escasos y poco claros, y tienen como referencia obligada la Directiva Marco del Agua (DMA). La Directiva Marco de Aguas (DIRECTIVA 2000/60/CE) establece la necesidad de identificar y valorar las presiones e impactos que sufren las masas de agua. Para ello estableció la fecha de diciembre de 2004, en la cual los países miembros debían elaborar un informe en el que se identificasen las presiones en las demarcaciones hidrográficas. Entre las presiones a identificar estaban los vertidos de aguas residuales o aguas contaminadas, tanto puntuales como difusas.

Con el fin de orientar la identificación de presiones e impactos se elaboró la guía “*Common Implementation Strategy for the WFD (2000/60/ec). Guidance Document nº 3. Analysis of Pressures and Impacts*”, que fue trasladada, en parte, al contexto español mediante el documento “Manual para el análisis de presiones e impactos relacionados



con la contaminación de las masas de agua superficiales”. El manual presenta una tabla de valores umbral para identificar las presiones significativas procedentes de fuentes puntuales y otra de fuentes difusas. Estas tablas también figuran en el documento guía de referencia de la Unión Europea, aunque el documento español es relativamente corto. Considera como presiones puntuales los “vertidos urbanos de poblaciones mayores de 2000 h-e” y cita como último parámetro “efectos de la escorrentía urbana”, lo cual implica que los vertidos en tiempo de lluvia deben ser considerados.

Tabla 2. Clasificación y variación en las concentraciones de los contaminantes generalmente encontrados en las escorrentías pluviales de las carreteras (Fuente: Dorman, 1996).

GRUPO CONTAMINANTE	EJEMPLO	PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN (mg/L)	
			MEDIA	INTERVALO
PARTÍCULA	Polvo, piedras, arena, vidrio, plástico, metales, finos	TS	1147	145-21640
		TVS	242	26-1522
		TSS	261	4-1656
		VSS	77	1-837
METALES PESADOS	Plomo, zinc, hierro, cobre, níquel, cadmio, mercurio	Pb	0,96	0,02-13,1
		Zn	0,41	0,01-3,4
		Fe	10,3	0,1-45,0
		Cu	0,103	0,01-0,88
		Ni	9,92	0,1-49,0
		Cd	0,04	0,01-0,40
MATERIA ORGÁNICA	Vegetación, polvo, humus, aceites, carburantes	DBO5	24	2-133
		TOC	41	5-290
		COD	14,7	5-1058
		Aceites y grasas	9,47	1-104
PESTICIDAS/ HERBICIDAS	Plaguicidas	Dieldrin (ug/l)	0,005	0,002-0,007
		Lindano (ug/l)	0,04	0,03-0,05
		PCBs (ug/l)	0,33	0,02-8,89
NUTRIENTES	Nitrógeno, fósforo	NPK	2,99	0,1-14
		NO2 + NO3	1,14	1,01-8,4
		PO4	0,79	0,05-3,55

En cuanto a fuentes difusas, especifica como presiones significativas las autopistas y autovías (utiliza como umbral el % de terreno ocupado) y fija como parámetros el tipo de contaminantes, en especial hidrocarburos, HAPs, Plomo y herbicidas. Sin embargo, el documento original de la UE (Documento Guía nº 3) es más completo a la hora de identificar presiones e impactos. En presiones significativas de fuentes puntuales relacionadas con los vertidos en tiempo de lluvia identifica las aguas de escorrentía y los desbordamientos del alcantarillado, y en presiones significativas de fuentes difusas identifica las generadas por el drenaje urbano incluyendo las escorrentías, que incluiría entre otras las carreteras principales y autopistas.

El RD 1290/2012, ya citado anteriormente, trata el problema de la contaminación asociada a las aguas pluviales desde un doble enfoque: la problemática de los desbordamientos de los sistemas de saneamiento unitario en tiempo de lluvia y desde la problemática de la gestión de las aguas de escorrentía contaminadas que, a todos los efectos, pasan a ser aguas residuales que quedan sujetas a todo el procedimiento legal y



administrativo de cualquier agua residual.

Es en la Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, “por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido” en donde se aclaran los conceptos e ideas referentes al tratamiento de aguas de escorrentía contaminadas; aparece el concepto de “estación depuradora de aguas pluviales”. El objetivo perseguido por esta orden es establecer un modelo oficial de declaración de vertido que, por un lado, facilitara al titular del vertido la cumplimentación y presentación de la información necesaria para desarrollar el procedimiento administrativo de la autorización; y que, por otro lado, consiguiera que la información contenida en la declaración fuese homogénea, suficiente y precisa para elaborar el informe previo que se regula en el procedimiento y que esta información fuese coincidente con las características del vertido a autorizar. La Orden establece la necesidad de controlar y tratar los vertidos de aguas de escorrentía desde redes separativas y desbordamientos de sistemas de saneamiento.

Finalmente citar que el RD 400/2013, de 7 de junio, por el que se aprobó el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental, aplicable al ámbito de actuación de BIDEGLI, fijó por primera vez en nuestro país un límite a los valores de caudal que pueden evacuarse desde un nuevo desarrollo. Sus requerimientos obligan a implementar técnicas y medidas compensatorias que reproduzcan los hidrogramas previos al desarrollo de la infraestructura viaria. El RD 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de este Plan Hidrológico y otros recoge adicionalmente en el artículo 54.7 del Anexo II que las aguas de escorrentía pluvial que se recojan mediante infraestructuras de drenaje urbano o industrial y sean susceptibles de contaminar el medio receptor deberán someterse al procedimiento de autorización de vertido ante la Administración Hidráulica.

5.- DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA Y DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LA ESCORRENTÍA

5.1.- Descripción de la cuenca de aportación

La zona de estudio se sitúa en los límites municipales de Usurbil, Lasarte-Oria, Hernani y Donostia-San Sebastián, en Gipuzkoa. Se caracteriza por un elevado grado de antropización, derivado tanto por la presencia del Segundo Cinturón de San Sebastián como por las actividades agropecuarias de la zona.



Figura 1.- Vista general del tramo de vial estudiado.



Figura 2.- Área de aparcamiento y gasolinera en el tramo de estudio.

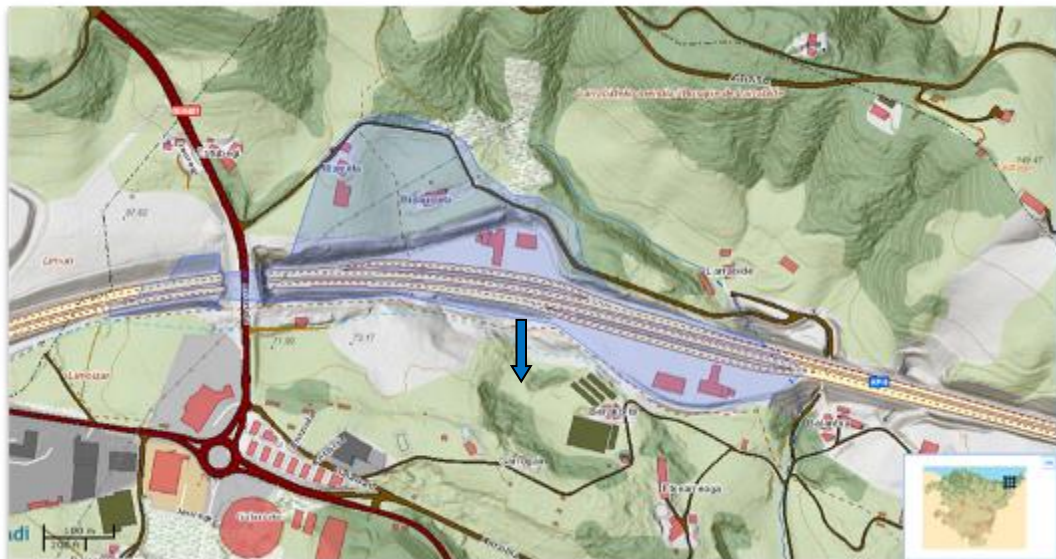


Figura 3.- Ubicación geográfica de la cuenca de aportación y delimitación de la misma (sombreado azul) y punto de drenaje final.

La cuenca aportante tiene una extensión de algo más de 12 hectáreas y un perímetro cercano a los 2.500 metros. Los límites de la cuenca se definen por la divisoria de aguas del drenaje natural y las cunetas y vaguadas propias del sistema de drenaje.

El tramo de viario que domina la cuenca, y la atraviese en sentido Este-Oeste, tiene una longitud de 700 metros, a lo largo de una accidentada topografía. La autopista, de doble sentido, consta de dos carriles por calzada, de 3,5 m de anchura cada uno, con arcenes exteriores de 2,5 m e interiores de 1 m, además de una berma de 0,75 m. Este tramo se caracteriza por tener dos gasolineras y una amplia zona de estacionamiento. El área total de las aéreas de servicio es de unas 3 ha.

El Segundo Cinturón de Donostia, y su integración con la AP-1 y AP-8, presentan una elevada intensidad de tráfico siendo la principal ruta internacional a través de Gipuzkoa y



la principal conexión vasca en el eje transnacional norte-sur. Esta infraestructura absorbe más de 40.000 vehículos diarios de la variante donostiarra, la mitad de su actual tráfico, principalmente transporte pesado y tráfico de paso por Gipuzkoa.

Tabla 3.- Características físicas de la cuenca.

PROPIEDADES	ZONA ESTUDIO
Área de la cuenca (ha)	12.27
Perímetro (m)	2.525
Pendiente media de la cuenca (m/m)	0.118
Longitud total de la cuenca (m)	3.321
IMD	40.000
Material capa rodadura viales	Asfalto
Área terraplenes (m2)	8.300
Área taludes (m2)	16.920
Usos del suelo (%)	
Viales	27
Aparcamientos y zonas de servicio	22
Agrícola	29
Residencial rural	4
Bosque	18
Características principales del sistema de drenaje	
Superficie impermeable drenando a cuneta revestida (ha)	1.81
Superficie impermeable drenando a cuneta vegetada (ha)	2.32
Superficie cuenca drenando a cuenca a cuneta vegetada (ha)	9.17

5.2.- Descripción del sistema de tratamiento

El sistema de tratamiento cuya eficiencia real se evaluó durante el presente estudio está compuesto por dos niveles de tratamiento compuestos por dos unidades o equipos diferentes:

- **Primer Nivel – Decantación:** Consiste en una decantación forzada por vortex mediante un separador hidrodinámico. Está diseñado para remover el 80 % de los sólidos suspendidos totales de hasta 200 micras, los sólidos flotantes y una parte de los hidrocarburos no emulsionados o en dispersión. El dimensionamiento del sistema se realizó en base al “caudal de calidad” de aguas, que se corresponde con el caudal que permite capturar y tratar el 90% de todo el volumen de escorrentía generado en la cuenca de estudio a lo largo de un año. El caudal de calidad de aguas para la cuenca de aportación se estimó en 250 L/s y el caudal máximo de tratamiento de la unidad es de 425 L/s.
- **Segundo Nivel – Filtración:** Parte del efluente tratado en el separador hidrodinámico se filtra para remover las fracciones más finas y proporcionar una mayor calidad al efluente vertido. Mediante un proceso de filtración ascendente se retiene aproximadamente el 90 % de partículas de hasta 20 micras. Se reduce el aporte de finos, metales pesados, nutrientes e hidrocarburos emulsionados hacia el medio receptor. Este segundo nivel está dimensionado para un caudal de 55 L/s, que equivale al 50% de todo el volumen de escorrentía anual generado. El caudal de entrada al equipo en esta aplicación se limita por la capacidad hidráulica del filtro. Cuando se alcanza el límite de tratamiento del equipo de filtración el flujo excedente es evacuado por un aliviadero intermedio.



En la siguiente figura 4 se presenta un croquis del sistema de tratamiento instalado en el Segundo Cinturón.

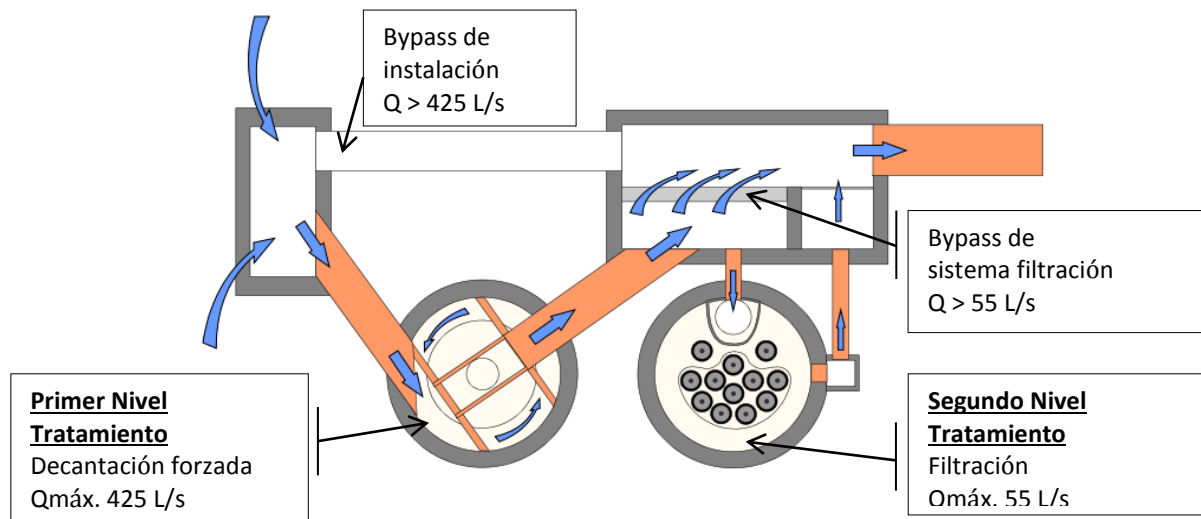


Figura 4.- Configuración general en planta de la instalación de tratamiento.

El separador hidrodinámico Urgarbi Downstream Defender® es un dispositivo avanzado de tratamiento de las aguas pluviales capaz de eliminar residuos flotantes, sólidos sedimentables e hidrocarburos en un solo proceso. La unidad proporciona altos rendimientos de separación de contaminantes asociados a las aguas pluviales en un espacio reducido y bajo un amplio rango de cargas y caudales. Esta etapa de tratamiento no requiere de energía externa para su funcionamiento y no tiene partes móviles. Su funcionamiento se basa en la generación de un vórtice de baja energía que fuerza la separación de los contaminantes asociados a las aguas. Los sedimentos almacenados se aíslan de la zona activa, o turbulenta, mediante una placa de asiento y un cono descendente, que minimizan la resuspensión. Los flotantes y aceites se dirigen hacia la superficie y se almacenan en otra zona de almacenamiento.

El filtro para escorrentía es un equipo pasivo y compacto, compuesto por un sistema de filtración de membranas. Este segundo nivel de tratamiento se ha enfocado para remover partículas finas, metales pesados y nutrientes de la escorrentía. El filtro funciona por diferencia de presiones y cargas hidrostáticas. La escorrentía pluvial entra en la unidad y choca con un deflector que retiene residuos flotantes y decanta partículas gruesas. Los materiales menos densos permanecen suspendidos y son forzados a pasar por las membranas de filtración gracias a la carga hidrostática que se genera por el propio diseño de la unidad. El agua con partículas en suspensión es así filtrada, permaneciendo las partículas en suspensión en la cámara de la unidad y adheridas a las membranas. El agua filtrada sale por los orificios superiores de los cartuchos y es evacuada hacia el tubo de salida para su vertido. La unidad cuenta con diversas medidas para favorecer la auto-limpieza de las membranas de filtración: efecto de retrolavado automático, pulsos vibratorios y el efecto de la gravedad.

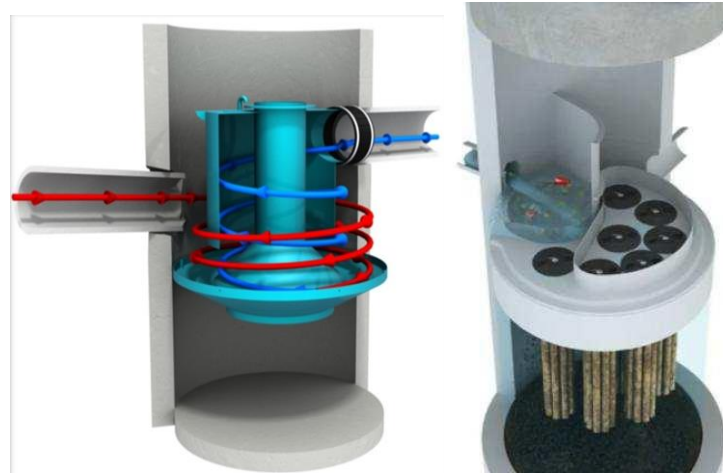


Figura 5.- Esquema del separador hidrodinámico y del filtro. La flecha roja representa las aguas pluviales entrando al equipo; las aguas deben ascender tal y como muestra la flecha azul por el interior de la unidad para pasar a la zona de filtros de membrana (a la derecha).

6.- CAMPAÑA DE MONITORIZACIÓN

6.1.- Objetivos

Los objetivos principales de la campaña de monitorización fueron la toma y análisis de muestras representativas de las escorrentías usando métodos y procedimientos de muestreo y análisis normalizados. Los datos obtenidos se procesaron para la obtención de las CMS (concentración media de suceso) de los contaminantes encontrados en las escorrentías. La CMS se ha empleado para poder determinar el ratio de eficiencia en la eliminación de contaminantes por las medidas de tratamiento implementadas.

Dentro de la estrategia de la campaña de monitorización se fijaron los siguientes objetivos hidráulicos:

- Medición de caudal en continuo y en tiempo real para el afluente y efluente.
- Medición de la precipitación *in situ*.
- Creación de modelo numérico hidrológico/hidráulico de simulación mediante el programa informático SWMM.
- Ajustes y comparativa de caudales teóricos y reales en la cuenca de estudio.
- Cálculo de hidrogramas para diferentes eventos lluvia.
- Estudio de los procesos de transformación lluvia - escorrentía generada en la cuenca.
- Estudio del “caudal de calidad” de aguas para la zona.
- Estimación de pérdidas de carga para las unidades de tratamiento.

La estrategia final de la campaña siguió el estudio tipo de nivel III, variación de la concentración durante un suceso de lluvia, establecido en el manual “*Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*” de la ASCE-WEF (1993). Este enfoque permitió describir la evolución temporal de la concentración de contaminantes



para cada suceso. La obtención de varias muestras simples en diferentes instantes de una lluvia, y establecer relaciones entre factores como la intensidad, IMD y otros factores externos en el mismo suceso, a diferencia de una única muestra compuesta, permitió obtener los polutogramas asociados a los sucesos de lluvias. Esta estrategia de monitorización más completa favoreció la obtención de:

- Datos discretos y continuos de la contaminación movilizada.
- Estimación de rendimientos de eliminación de contaminantes para las soluciones implementadas y su variabilidad en un mismo suceso y entre sucesos diferentes.
- Polutogramas para cada suceso de lluvias.
- Establecer de forma más precisa la masa de contaminación vertida al medio durante un periodo de tiempo y sus concentraciones.
- Puntos y zonas de la cuenca con mayor aporte de contaminación.

Los objetivos específicos de medida de contaminación fueron:

- Medición de la turbidez en continuo de entrada y salida a las unidades de tratamiento con sodas de turbidez.
- Medición discreta de la contaminación en tiempo de lluvias mediante el empleo de tomamuestras automáticos.
- Toma y gestión de muestras en campo.
- Determinación de parámetros analíticos en laboratorio.
- Tratamiento y parametrización de los datos obtenidos en campo.

6.2.- Secciones de control

La sección de control se define como el punto de la cuenca o de la infraestructura de tratamiento en el que se caracteriza la contaminación movilizada por las aguas de escorrentía.

La instrumentación colocada se especifica en la figura 6.

6.3.- Medición y registro de las precipitaciones

El registro de las precipitaciones que se produjeron durante la realización de la campaña de monitoreo se llevó a cabo a través de un pluviómetro de intensidad instalado sobre una de las casetas de control. Los datos de lluvia se almacenaron en un registrador de pulsos conectado al pluviómetro que se descargó periódicamente. El intervalo de registro de los mm de lluvia fue variando durante el estudio conforme se fue conociendo el comportamiento hidrológico de la cuenca, y se estableció finalmente en 10 minutos coincidiendo con los datos de intensidades diezminutarias disponibles en la estación de Euskalmet más cercana (Lasarte, a unos 5 km de distancia).

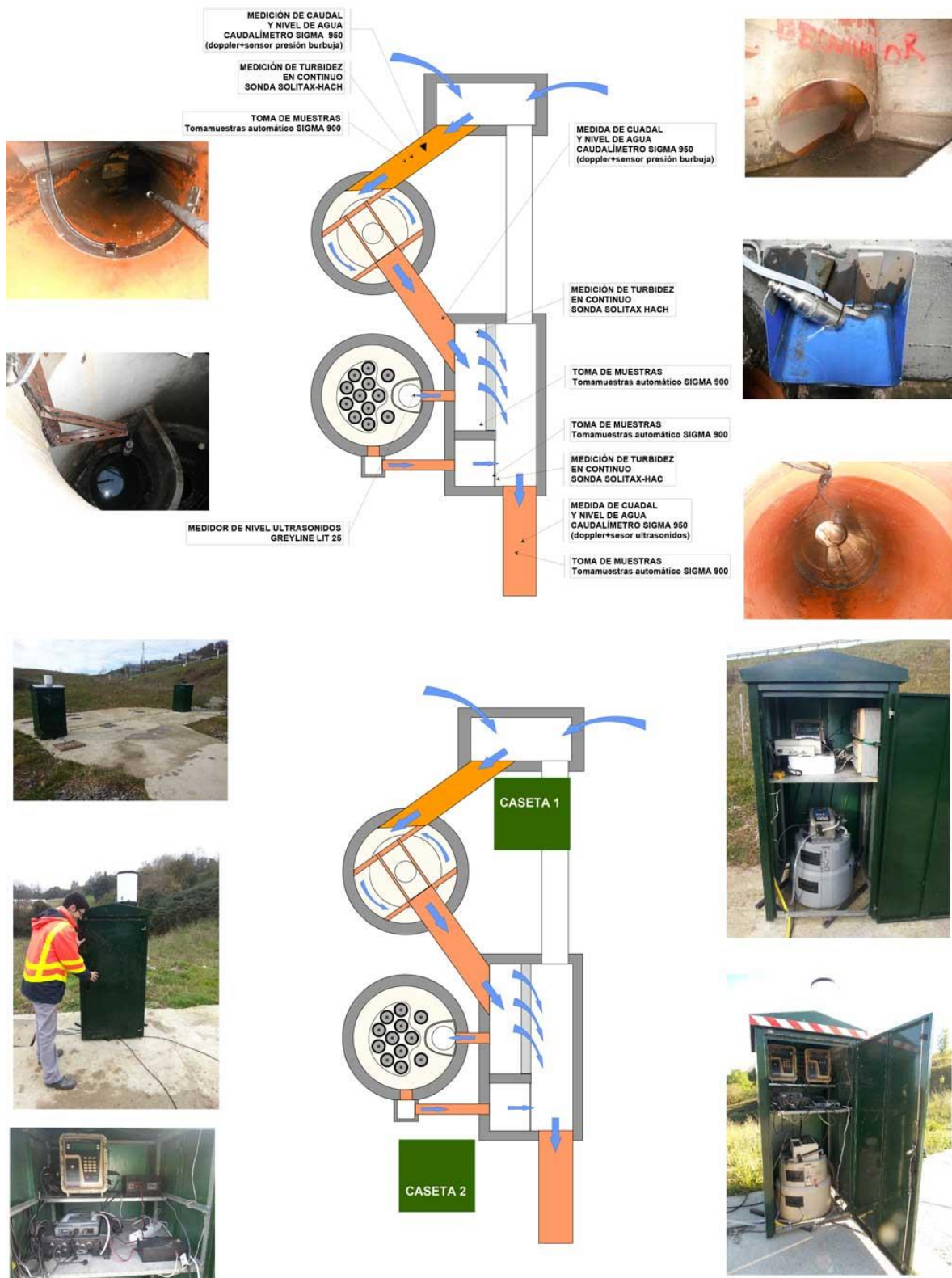


Figura 6.- Diagrama de la infraestructura de tratamiento y descripción de la instrumentación instalada.



6.4.- Toma de muestras y medida de parámetros en continuo

La toma de muestras representativas de los fenómenos de movilización de contaminación fue, sin duda, la actividad más compleja de las desarrolladas en este estudio. El lavado y arrastre de la contaminación por la escorrentía es claramente un fenómeno transitorio y muy variable. Cada suceso que muestreado fue generado por una lluvia de características diferentes a las otras (tuvo una duración, una variación de la intensidad en el tiempo, un volumen total de precipitación, etc., y se encontró una masa de contaminantes diferentes dispuestos para ser lavados).

La toma de muestras correcta durante un evento de lluvia en la instalación de tratamiento estuvo condicionada porque todos los equipos funcionasen de forma adecuada, cuestión que no siempre ocurrió. El comienzo de la toma de muestras en ambos tomamuestras se hizo a partir de la emisión de una señal que enviaba el caudalímetro de salida cuando detectaba un caudal mínimo.

Los sucesos de lluvia son representativos de los caudales reales que se producen en la cuenca estudiada. Unos abarcan perfectamente a todo el hidrograma generado por una determinada lluvia mientras que otros sólo dan información sobre la parte inicial del flujo generado.

Debido a que se muestreó la primera hora del flujo casi siempre se recogieron muestras de las aguas más contaminadas. La información que en sucesos de lluvia “largos” no ha sido posible recoger se intenta conocer mediante la metodología desarrollada a partir de las lecturas de la turbidez mediante sondas en continuo.

Suceso representativo a efectos de este estudio se definió como un evento de precipitación que cumplía con las siguientes características:

- Un volumen de al menos 1.5 veces el volumen de almacenamiento de las unidades monitoreadas, aproximadamente 25 m³.
- Intensidad mínima de precipitación de 3 mm/h o precipitación total superior a 2.5 mm.
- Las muestras cubren un mínimo del 70% del caudal de la tormenta, incluyendo la cantidad máxima posible de muestras recogidas en el 20% inicial del suceso de precipitación.

La medida de la turbidez, tanto en la entrada como en la salida, fue realizada mediante sondas SOLITAX (Hach). Se trata de sondas robustas, con sistema de autolimpieza y mecanismos de autocalibración. Con el fin de dar fiabilidad a las medidas que se realizaban, en numerosas ocasiones de valores muy bajos (sobre todo a la salida de filtros), en las muestras discretas tomadas en cada suceso también se midió en laboratorio la turbidez. El valor de turbidez de laboratorio se ha considerado como “bueno” o más fiable. A partir de estos valores se procedió a realizar una curva de corrección-ajuste de los valores medidos en campo por las sondas SOLITAX. Las correcciones, o calibración, de las medidas de las sondas de turbidez son relativamente robustas en los flujos de entrada, mientras que en los flujos de salida, con valores muy bajos de turbidez las correcciones tienen mucha más incertidumbre.



Tabla 4. Muestras tomadas en los sucesos estudiados y parámetros analizados.

Nº muestras	1TLL- 27122014	2TLL- 11012015	3TLL- 14022015	4TLL- 13032015	5TLL- 17042015	6TLL- 17042015	7TLL- 21052015	8TLL- 10062015
	7E-7S	8E-8S	3E+5E- 3S+5S	8E-8S	6E-6S	1E-0S	8E-8S	12E-11S
Periodo de muestreo	90 min.	115 min	15+80 min	105 min.	100 min	40 min	50 min.	130 min.
Parámetros								
DQO (mg/L)	X	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
N-TOTAL (mg/L)	X	SI	SI	SI	SI	SI	X	X
P-TOTAL (mg/L)	X	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
ST (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
STV (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
SST (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
SSV (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
SSF (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
SDT (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
SDV (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
SDF (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Ssed (ml/L)	X	X	SI	SI	SI	SI	SI	SI
pH	SI	X	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Conduct. (µs/cm)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
TURBIDEZ (UNF)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
ACEITES Y GRASAS	X	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
HTP	X	SI	SI	SI	SI	X	SI	SI
Cd (µg/L)	X	SI	SI	SI	SI	SI	X	X
Cr (µg/L)	X	SI	SI	SI	SI	SI	X	X
Cu (µg/L)	X	SI	SI	SI	SI	SI	X	X
Fe (µg/L)	X	SI	SI	SI	SI	SI	X	X
Ni (µg/L)	X	SI	SI	SI	SI	SI	X	X
Pb (µg/L)	X	SI	SI	SI	SI	SI	X	X
Zn (µg/L)	X	SI	SI	SI	SI	SI	X	X

E: Entrada o afluente S: Salida o efluente

Durante la campaña y tras la toma de datos se ha realizado un ajuste entre los datos de medición de SST, Turbidez y DQO de muestras simples y las señales en continuo de turbidez para cada uno de los eventos caracterizados en las secciones de control. El seguimiento en base a muestreos de los eventos de lluvia es un proceso costoso y laborioso sujeto también a la aleatoriedad de la tipología de cada lluvia, de tal forma que resulta difícil obtener un muestreo completo de un suceso lluvioso. La monitorización en continuo de la turbidez en la sección de control ha permitido la generación de una serie de ajustes que permiten estimar, en buena medida, polutogramas “polutogramas sintéticos”) de eventos de lluvia en los que no han sido tomadas muestras de agua para su caracterización.

Un ejemplo de las correlaciones que se utilizarán de corrección de los valores aportados



por las sondas en continuo, una vez eliminados los valores anómalos, se muestra en la figura 7.

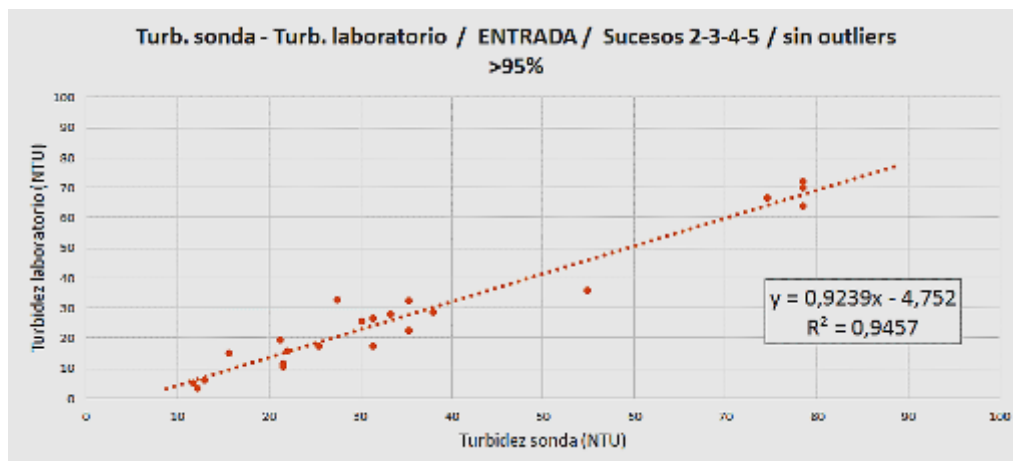


Figura 7.- Ajustes de regresión lineal entre valores de turbidez medida mediante sonda y los valores obtenidos en las muestras en laboratorio. Flujo de entrada.

Este tipo de ajustes y polutogramas sintéticos fueron utilizados para la estimación de SST, DQO y Turbidez a la entrada y a la salida de la sección de control en 4 eventos de lluvia (S1TLL: 8 de diciembre de 2014, S2TLL: 29 de enero de 2015, S3TLL: 26 de abril de 2015, S4TLL: 19 de mayo de 2015). Adicionalmente, se ha empleado esta metodología en el evento 6TLL del 18 de abril de 2015, donde los muestreos de agua habían sido agregados en forma de muestra compuesta.

7.- TRATAMIENTO Y PARAMETRIZACIÓN DE LOS DATOS DE CAMPO

La gran cantidad de datos que obtenidos en las campañas de campo requirió de un sistema de organización de la información que facilitara la labor posterior de tratamiento y análisis de la misma. En el caso del estudio objeto de esta comunicación el grado de instrumentación ha sido muy alto y se obtuvieron tanto de series de registros de sistemas de medida en continuo como de valores que se han obtenido a partir de muestras o medidas discretas.

Con el fin de describir mejor la organización y tratamiento de la información que seguida se ha elaborado el diagrama de la figura 8.

En cada uno de los sucesos de lluvia muestreados estructuró toda la información disponible en una ficha tipo, o "ficha de suceso", que incluyó datos en bruto de las variables medidas e información gráfica sobre la evolución de los mismos. En la ficha también se integraron otros indicadores elaborados o calculados.

Los parámetros que se presentan en la "FICHA DE SUCESO" para describir la contaminación medida en los diferentes flujos fueron las concentraciones máximas, las concentraciones mínimas, las concentraciones medias de suceso (CMS), las masas y la carga específica movilizadas.

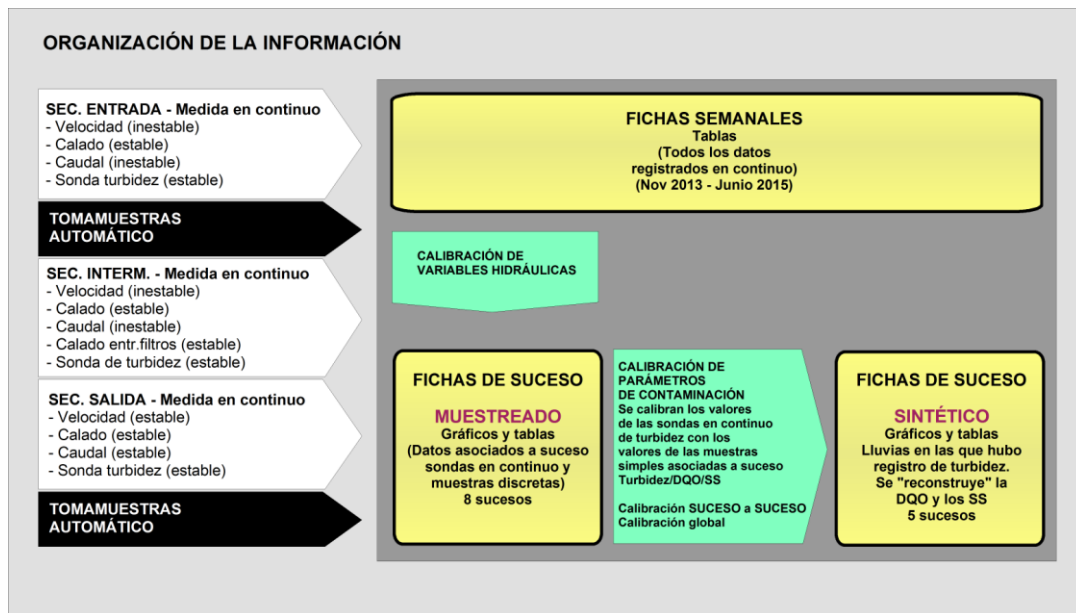


Figura 8.- Organización de la información obtenida durante las campañas.

Como ya se citó en los flujos de entrada y de salida de la unidad de tratamiento se dispone sondas de medida en continuo de la turbidez. Esta señal fue ajustada (corregida, calibrada) a partir de datos obtenidos de la medida de la turbidez en laboratorio en muestras discretas. A partir de estos datos de turbidez en continuo fue posible reconstruir las concentraciones de sólidos en suspensión a partir de curvas de ajuste que relacionaban turbidez con SS. Este mismo procedimiento se siguió para obtener la variación de la DQO (mg/L) a partir de las medidas en continuo de la turbidez. Mediante esta técnica se obtuvieron los denominados “polutogramas sintéticos”.

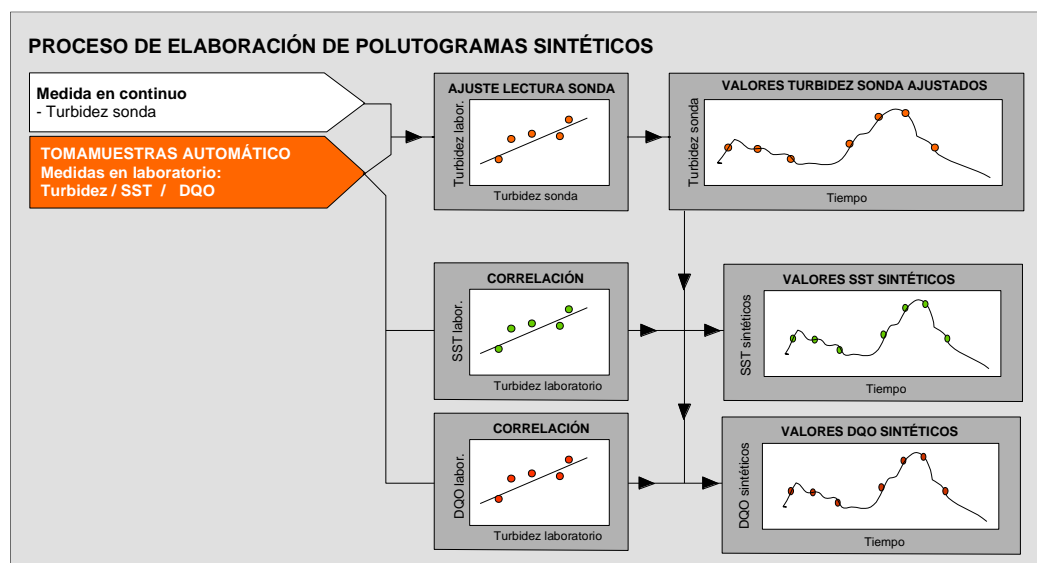


Figura 9.- Croquis que describe la metodología seguida para obtener polutogramas sintéticos de sólidos en suspensión (SS) y demanda química de oxígeno (DQO).



Para la presentación de los resultados de los sucesos caracterizados, bien mediante muestras bien mediante el análisis de los registros en continuo de turbidez, se siguieron cuatro casuísticas:

- CASO 1 - CMAX Y CMS muestreadas: Valores de concentraciones máximas y concentraciones medias de suceso obtenidos a partir de todos los resultados obtenidos en las muestras tomadas en los flujos de ENTRADA a la unidad de tratamiento.
- CASO 2 - CMAX y CMS muestreadas > 35 mg/L SST: Valores de CMAX y CMS obtenidos a partir de las muestras que son consideradas tanto en el polutograma de entrada como en el de salida, teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulica en las unidades de tratamiento (que depende del caudal medio; es importante a la hora de calcular los rendimientos del sistema de tratamiento, ya que se trata de comparar las “mismas gotas de agua”) y operando solo con aquellas muestras cuyos valores han sido mayores de 35 mg/L en los sólidos en suspensión.
- CASO 3 - CMAX y CMS de todo el suceso > 35 mg/L: Valores de CMAX y CMS obtenidos a partir de las “curvas de contaminación sintética”. A partir de los valores registrados en las sondas de Turbidez en continuo ha sido posible “reconstruir” los polutogramas de sólidos en suspensión y de DQO de varios de los sucesos en los que se tomaron también muestras. Este tipo de análisis permite conocer mejor los eventos en los que el “tramo muestreado” era corto respecto al total de hidrograma. Se realizan los cálculos con aquellos valores que se sitúan en instantes en los que los sólidos en suspensión (SST) tienen valores superiores a 35 mg/L.
- CASO 4 - CMAX Y CMS Sintéticas: Valores de CMAX y CMS obtenidos en “sucesos sintéticos” a partir de las “curvas de contaminación sintética”. A partir de los valores registrados en las sondas de Turbidez en continuo ha sido posible “reconstruir” los polutogramas de sólidos en suspensión y de DQO de varios de los sucesos en los que NO se tomaron muestras.

En la tabla siguiente se intenta mostrar de forma ordenada la casuística comentada, haciendo mención a aquellos sucesos en los que alguna de las sondas en continuo no funcionó de forma correcta y, por lo tanto, no fue posible la elaboración de polutogramas sintéticos.

Tabla 5.- Casuística de los diferentes sucesos de lluvia caracterizados en este estudio.

DENOMINACIÓN	TRATAMIENTO	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
2CD-1TLL-27122014	SH + Filtro	SI	SI	SI	
2CD-2TLL-11012015	SH + Filtro	SI	SI	SI	
2CD-3TLL-14022015	SH + Filtro	SI	SI	SI	
2CD-4TLL-13032015	SH	SI	SI	SI	
2CD-5TLL-17042015	SH	SI	SI	Solo turbidímetro de salida	
2CD-6TLL-18042015*	SH	SI	SI		
2CD-7TLL-15052015	SH + Filtro	SI	SI	Solo turbidímetro de salida	
2CD-8TLL-10062015	SH + Filtro	SI	SI	Solo turbidímetro de salida	
2CD-S1TLL-08122014	SH + Filtro				SI
2CD-S2TLL-29012015	SH + Filtro				SI
2CD-S3TLL-26042015	SH + Filtro				SI
2CD-S4TLL-19052015	SH + Filtro				SI

SH: Separador hidrodinámicos / * Muestra de salida descartada por datos incoherentes

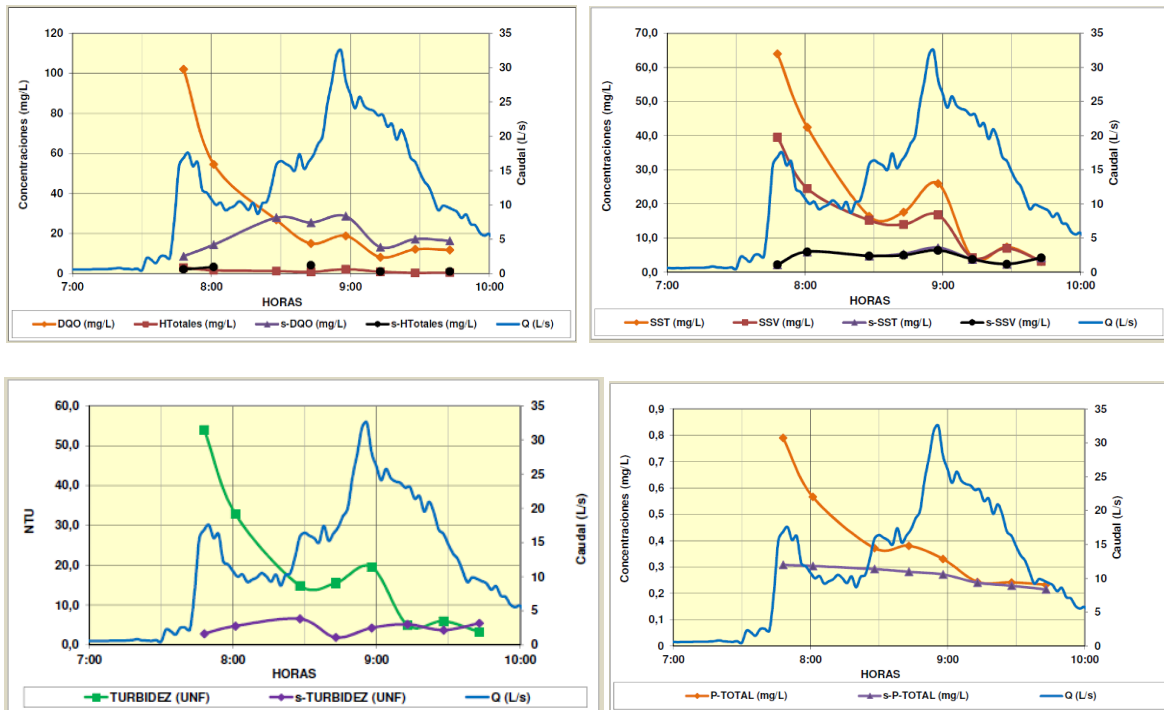


Figura 10.- Ejemplo de hidrogramas y polutogramas caracterizados durante el Suceso 2 (s- indica flujo de salida).

8.- RESULTADOS

8.2.- Resultados principales de las medidas hidráulicas vinculadas a los sucesos muestreados.

A continuación, se muestran los valores característicos de precipitaciones y de los hidrogramas de los sucesos caracterizados.

Tabla 6.- Valores característicos de la campaña de caracterización del sistema de tratamiento de la Dolina de Berakorte para los sucesos muestreados (Hernani).

	PREP. TOTAL (mm)	I _{MED} (mm/h)	I _{MAX} (mm/h)	DURACIÓN (h)	TIEMPO SECO PRECEDENTE (h)
Evento medido	6.1	2.1	5.7	5.4	33.2
2CD-1TLL-27122014	20.6	2.3	7.8	9.0	9.0
2CD-2TLL-11012015	7.3	1.3	5.4	5.7	3.0
2CD-3TLL-14022015	12.6	0.7	2.4	17.8	165.0
2CD-4TLL-13032015	7.8	3.1	7.2	2.5	201.6
2CD-5TLL-17042015	5.0	2.7	6.0	1.8	156.0
2CD-6TLL-18042015	21.4	3.9	75.6	5.5	23.8
2CD-7TLL-15052015	8.4	1.9	13.2	4.3	9.7
2CD-8TLL-10062015	12.0	3.3	20.4	3.7	6.3



Tabla 7.- Datos generales de los hidrogramas de los sucesos generados en la salida de la instalación de tratamiento.

Nº Suceso	Día y hora de inicio	Día y hora de finalización	Duración (horas)	Caudales máximos en todo el evento (L/s)	Caudales máximos en el tramo muestreado (L/s)	Caudales medios en tramo muestreado (L/s)
1	27/12/2014 13:45	28/12/2014 1:50	12 horas 05 minutos	158,67	76,8	35,3
2	11/01/2015 7:28	11/01/2015 14:24	6 horas 56 minutos	32,52	32,52	17,3
3	14/02/2015 10:45	15/02/2015 4:30	17 horas 45 minutos	17,80	17,80	14,7
4	13/03/2015 6:30	13/03/2015 11:10	4 horas 40 minutos	53,19	53,19	27,4
5	17/04/2015 12:45	17/04/2015 15:50	3 horas 05 minutos	23,72	23,72	16,3
6	18/04/2015 14:00	18/04/2015 20:45	6 horas 45 minutos	113,87	113,87	53,7
7	15/05/2015 7:15	15/05/2015 9:25	2 horas 10 minutos	120,24	120,24	21,9
8	10/06/2015 12:20	10/06/2015 17:00	4 horas 40 minutos	83,17	83,17	22,8

8.3.- Valores de concentraciones medidos y calculados en los sucesos caracterizados

A continuación, se presentan los valores de concentraciones medidos en cada suceso.

Tabla 8.- Valores máximos y Concentraciones Máximas de Suceso considerando todos los valores de las muestras tomadas (CASO 1).

ENTRADA										
CMAX ENTRADA	N-TOTAL (mg/L)	ACEITES Y GRASAS	DQO (mg/L)	HTotales (mg/L)	P-TOTAL (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	Cond. (µs/cm)	TURB. (UNF)
1TLL-27122014	-	-	94,7	-	-	231	104	162	267	78,0
2TLL-11012015	7,9	5,1	102,0	3,0	0,79	792	64	728	1192	54,0
3TLL-14022015	12,7	5,1	90,1	1,0	0,74	2359	76	2288	3900	70,0
4TLL-13032015	21,1	11,4	191,0	5,3	2,42	470	124	346	580	93,0
5TLL-17042015	28,8	22,9	403,0	13,4	1,95	460	164	296	553	119,5
6TLL-18042015	4,7	1	69,4	-	0,30	244	106	138	178	121,0
7TLL-15052015	4,1	8,6	228,0	5,4	0,60	364	184	236	325	79,0
8TLL-10062015	5,1	10,6	329,0	8,6	0,50	374	180	194	239	80,0
SALIDA										
CMAX SALIDA	N-TOTAL (mg/L)	ACEITES Y GRASAS	DQO (mg/L)	HTotales (mg/L)	P-TOTAL (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	Cond. (µs/cm)	TURB. (UNF)
1TLL-27122014	-	-	23,7	-	-	186	17	178	298	22,1
2TLL-11012015	6,1	5,7	28,7	4,2	0,31	596	7	591	962	6,6
3TLL-14022015	9,1	4,5	59,4	1,8	0,36	2136	39	2102	3510	36,3
4TLL-13032015	15,7	11,3	146,0	8,1	2,08	500	82	458	677	80,0
5TLL-17042015	20,9	7,0	257,0	6,0	1,31	396	106	340	602	75,5
6TLL-18042015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7TLL-15052015	12,1	6,3	59,0	4,3	0,52	380	29	358	552	18,0
8TLL-10062015	9,3	7,3	99,0	6,2	0,38	294	50	244	385	35,1



Tabla 9.- Valores medios ponderados y CMS registradas en ENTRADA considerando todos los valores de las muestras tomadas (CASO 1) y considerando los polutogramas sintéticos de eventos NO caracterizados con muestras (CASO 4)

ENTRADA										
CMS ENTRADA	N-TOTAL (mg/L)	ACEITES Y GRASAS	DQO (mg/L)	HTotales (mg/L)	P-TOTAL (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	Cond. (µs/cm)	TURB. (UNF)
1TLL-27122014	-	-	83,3	-	-	182	73	110	174	65,3
2TLL-11012015	4,4	3,1	25,1	1,3	0,36	453	20	433	699	16,8
3TLL-14022015	6,5	2,7	51,5	0,6	0,42	1689	45	1644	2770	40,8
4TLL-13032015	7,8	4,0	56,9	1,5	0,73	229	42	187	307	30,1
5TLL-17042015	10,3	8,6	110,1	5,1	0,69	221	44	177	268	37,3
6TLL-18042015	4,7	-	69,4	-	0,30	244	106	138	178	121,0
7TLL-15052015	4,1	8,6	129,3	5,4	0,60	229	107	122	149	44,5
8TLL-10062015	5,1	10,6	77,3	8,6	0,50	192	55	137	140	21,5
Valores promedio	6,1	6,3	75,4	3,75	0,51	430	62	369	585,6	47,2
S1TLL-08122014	-	-	204	-	-	-	135	-	-	107
S2TLL-29012015	-	-	170	-	-	-	112	-	-	89
S3TLL-26042015	-	-	116	-	-	-	76	-	-	60
S4TLL-19052015	-	-	147	-	-	-	97	-	-	77
Valores promedio	-	-	159,3	-	-	-	105	-	-	83,25

Tabla 9.- Valores medios ponderados y CMS registradas en SALIDA considerando todos los valores de las muestras tomadas (CASO 1) y considerando los polutogramas sintéticos de eventos NO caracterizados con muestras (CASO 4)

SALIDA										
CMS SALIDA	N-TOTAL (mg/L)	ACEITES Y GRASAS	DQO (mg/L)	HTotales (mg/L)	P-TOTAL (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	Cond. (µs/cm)	TURB. (UNF)
1TLL-27122014	-	-	10,5	-	-	152	12	140	241	8,9
2TLL-11012015	5,0	2,1	20,4	1,3	0,27	515	5	510	857	4,5
3TLL-14022015	7,8	2,9	47,6	1,4	0,33	1881	31	1850	3139	30,7
4TLL-13032015	7,8	4,2	61,5	2,8	0,83	269	47	222	343	43,7
5TLL-17042015	10,8	3,3	113,9	2,3	0,77	253	49	204	334	40,9
6TLL-18042015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7TLL-15052015	12,1	6,3	38,9	4,3	0,52	313	19	293	419	13,1
8TLL-10062015	9,3	7,3	72,7	6,2	0,38	193	26	167	212	18,5
Valores promedio	8,8	4,35	52,2	3,05	0,52	510,8	27	483,7	792,1	22,9
S1TLL-08122014	-	-	104	-	-	-	40	-	-	32
S2TLL-29012015	-	-	58	-	-	-	22	-	-	18
S3TLL-26042015	-	-	68	-	-	-	26	-	-	21
S4TLL-19052015	-	-	16	-	-	-	6	-	-	5
Valores promedio	-	-	61,5	-	-	-	23,5	-	-	19

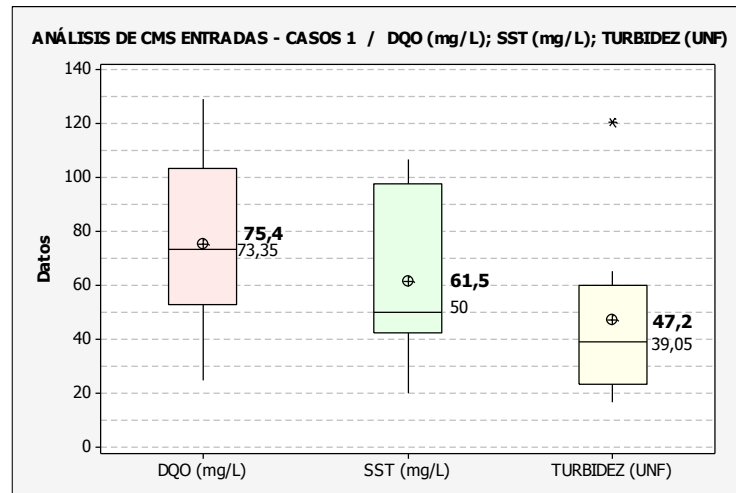


Figura 11.- Valores de la media y de la mediana de las CMS obtenidas a partir de todas las muestras tomadas durante los sucesos 1 a 8 (CASO 1).

8.4.- DETERMINACIÓN DE RENDIMIENTOS

Para el cálculo de rendimientos del tratamiento se aplicó el método de cálculo de reducción de cargas para un suceso individual descrito en el manual “*Urban Stormwaer BMP Performance Monitoring*” de la EPA (“*Environmental Protection Agency*”) de Estados Unidos. Este método es apto para calcular la eficiencia de las unidades de tratamiento de las escorrentías pluviales para un evento de precipitación determinado basado en las cargas de entrada y de salida.

$$ER = \frac{CMS_e - CMS_s}{CMS_e} \times 100$$

Dónde:

ER = Ratio de Eficiencia (%)

CMS_e = Concentración media del suceso en la ENTRADA (Unidades variables según parámetro analizado).

CMS_s = Concentración media del suceso en SALIDA (Unidades variables según parámetro analizado).

Las CMS seleccionadas para el cálculo de rendimientos se corresponden a la casuística 2, teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulica en las unidades de tratamiento y operando solo con aquellas muestras cuyos valores han sido mayores de 35 mg/L en los sólidos en suspensión.

Para el cálculo del ER en SST, turbidez y DQO se consideraron tanto los sucesos muestreados y los sucesos sintéticos.

Los bajos caudales registrados durante el Suceso 3 (3TLL), hacen que el tiempo de retención hidráulica (TRH) dentro de los equipos de tratamiento, se incremente notablemente. Si a las horas de la recogida de las muestras a la entrada se les suma el TRH de los equipos se observa que no existe ninguna muestra tomada a la salida que se



corresponda con una muestra tomada a la entrada de los equipos. El evento 3 ha sido incluido en las tablas siguientes, para observar los valores registrados y analizados en laboratorio que caracterizan el evento. Los resultados obtenidos, no tienen efecto sobre los valores estadísticos y rendimientos finales de las unidades.

Tabla 10.- Ratios de eficiencia del tratamiento y eficiencias máximas y mínimas para cada contaminante y para todos los sucesos muestreados y caracterizados para agua filtrada.

Parámetros	Cd (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Ni (µg/L)	Pb (µg/L)	Zn (µg/L)
RATIO DE EFICIENCIA (ER)	71	56	47	56	50	52	53
EFICIENCIA MAXIMA	100	100	89	97	100	100	82
EFICIENCIA MINIMA	42	12	4	14	0	4,5	25

Parámetros	N-TOTAL (mg/L)	P-TOTAL (mg/L)	Aceites y Grasas (mg/L)	HT del Petróleo (mg/L)	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Turbidez (UNF)	DQO (mg/L)
RATIO EFICIENCIA (ER)	-90	30	37	23	80	74	66
EFICIENCIA MAXIMA	12	55	55	27	93	93	89
EFICIENCIA MINIMA	-198	13	26	20	61	24	27

Comentarios sobre los valores obtenidos:

Sólidos suspendidos totales, DQO y turbidez: Para los 8 sucesos muestreados y los 4 eventos sintéticos analizados los rendimientos de las medidas implementadas en la separación de SST oscilaron en un rango de 61%-93%, con una media del 80%. Las eficiencias en la remoción de turbidez variaron entre 24%-93%, con una media de 73%. El rendimiento máximo y mínimo de eliminación de la DQO varió entre el 26% y 89%, con una media del 66%.

Metales Totales: El rango de eficiencia de remoción medio para todos los metales pesados fue del 54% para el efluente filtrado. Una proporción elevada de la concentración de metales pesados se encuentra asociada al material particulado en las aguas de escorrentía. La proporción de material particulado y disuelto para cada uno de los metales se presenta en el análisis de resultados.

Aceites y Grasas, e Hidrocarburos totales del petróleo: El rendimiento máximo de eliminación de grasas y aceites e hidrocarburos fue de 55% y 27% correspondientemente. Los rendimientos medios de aceites y grasas fueron del 37% y del 24% para los hidrocarburos totales del petróleo.

Nutrientes: Los rendimientos de separación de nutrientes, Fósforo y Nitrógeno total, en las aguas de escorrentía variaron entre el 12% y -198% para el Nitrógeno total, y entre el 13% y 55% para el Fosforo total. Para el estudio la eficiencia media en la separación medio de Fósforo total se estableció en el 37%. La eficiencia en la remoción de Nitrógeno total fue del -89%. Para sistemas de tratamiento que no han sido diseñados para eliminar fracciones disueltas, como nutrientes o metales, no es raro observar ratios de eficiencia negativos para esos contaminantes durante una campaña de muestreo. La solución de tratamiento está diseñada para remover materia en suspensión y la fracción adherida a esa materia. En la discusión de resultados se detalla más este fenómeno y sus posibles causas.



Otros Parámetros Químicos – pH, Conductividad y SDT: El pH del afluente en las aguas de escorrentía vario entre 6.80 y 7.62, con una media de 7.15, y el rango de valores de pH en el efluente oscilo entre 6.88 y 7.45 con una media de 7.16. La conductividad en las aguas de entrada osciló entre 137 y 3026 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con una media de 748 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductividad en el efluente vario entre 179 y 3279 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una media de 824 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Debido a que los sólidos disueltos totales están muy correlacionados con la conductividad estos siguen un patrón similar. La conductividad incrementa durante el tratamiento debido al contacto con las aguas retenidas con alta conductividad en la unidad de filtración. Estos sucesos pueden observarse en unidades de tratamiento que no han sido dimensionadas para remover las fracciones disueltas debido a los procesos y equilibrios que ocurren entre material disuelto y particulado dentro de las mismas.

Parámetros hidráulicos y volúmenes tratados: El caudal máximo para todos los eventos estudiados varió entre 18 y 302 L/s, con una media de caudales máximos de 115 L/s y el promedio de todos los caudales medios fue de 48 L/s. El primer nivel de tratamiento no entró en bypass para ninguno de los sucesos muestreados, tratando el 100% del caudal de entrada. El filtro gestionó un rango de volúmenes que osciló entre el 25% y 82% de los volúmenes de escorrentía generados para todos los sucesos muestreados. La media del volumen de agua tratada por el filtro fue del 55%.

9.- DISCUSION DE RESULTADOS

El cálculo de los rendimientos del tratamiento se determinó mediante el método de cálculo estandarizado de reducción de cargas basado en la variación entre las CMS de entrada y de salida, para cada contaminante y suceso. El estudio probabilístico de todos los datos de contaminación en la entrada y salida de la unidad de tratamiento mostró una clara tendencia en los rendimientos del tratamiento, con un incremento en los porcentajes de eliminación de contaminantes a medida que aumentaba la carga contaminante en las aguas de entrada. Las concentraciones de salida permanecieron relativamente constantes durante todo el estudio. Debido a la predominancia de valores bajos en la concentración de contaminantes en el caudal de entrada, para el cálculo de rendimientos se seleccionaron únicamente las muestras de entrada con valores de SST superiores a 35 mg/L (valor límite de emisión considerado en los planes hidrológicos) y contabilizando el tiempo de retención hidráulica dentro de las unidades para comparar baches de agua complementarios a la entrada y la salida (casuística 2).

Los rendimientos en la eliminación de la materia particulada presente en forma de SST y DQO para el agua de escorrentía, que recibe dos niveles de tratamiento, se establecieron en una media del 80% y 67% respectivamente, similar a los valores inicialmente fijados en la fase de diseño del proyecto.

El sistema de depuración instalado puede considerarse que tiene la capacidad de gestionar las aguas de escorrentía, si referenciamos o comparamos con los requisitos de referencia de la legislación nacional y española. El Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas establece los siguientes requisitos de los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas.



A pesar de que los requisitos son para vertidos de aguas residuales urbanas y que el tipo de tratamiento recibido en una depuradora urbana es mucho más completo, el requerimiento de porcentaje mínimo de reducción exigido para la DQO y los SST se cumple o está muy cercano.

Tabla 11. Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas

PARÁMETROS	MEDIANTE TRATAMIENTO PRIMARIO		MEDIANTE TRATAMIENTO SECUNDARIO	
	CONCENTRACIÓN	PORCENTAJE MÍNIMO DE REDUCCIÓN ^(a)	CONCENTRACIÓN	PORCENTAJE MÍNIMO DE REDUCCIÓN ^(d)
DQO	-	-%	125 mg/L	75%
Total sólidos en suspensión	-	50%	35 mg/L (b)	90%

(a) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada / (d) Este requisito es optativo.

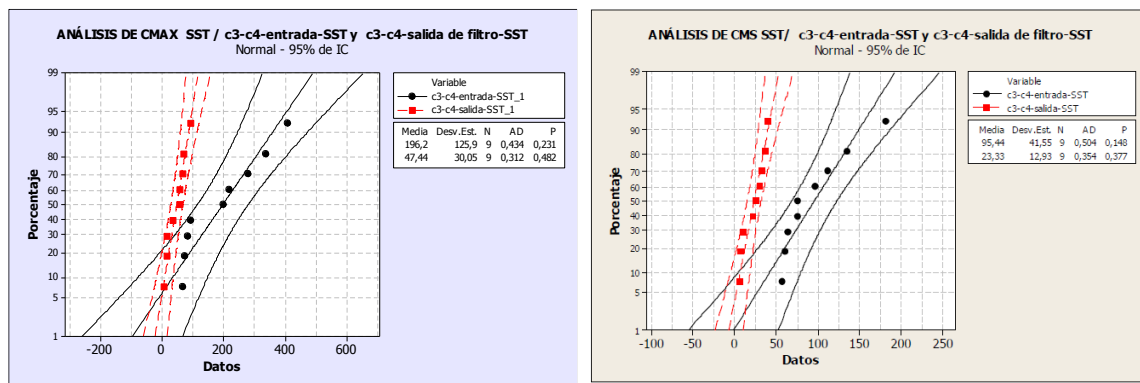


Figura 12.- Análisis de probabilidad acumulada de los valores de CMAX y CMS de SST (valores de polutogramas sintéticos, CASOS 3 y CASOS 4).

El gráfico de probabilidad anterior presenta las CMAX de sólidos en suspensión de los diferentes sucesos tanto en entrada como en salida (casos 3 y 4). En esta figura puede apreciarse como para concentraciones inferiores en la entrada el porcentaje de eliminación de los contaminantes es bajo y las líneas de entrada y salida tienden a ser paralelas. Sin embargo, a medida que la concentración del afluente se incrementa el porcentaje de remoción también lo hace y las rectas tienden a alejarse entre sí.

El 54% de remoción obtenido para los metales pesados totales en el sistema de tratamiento es ligeramente superior a los niveles de eliminación que cabrían esperar para el sistema. La forma dominante de los metales muestreados es mayoritariamente particulada, lo cual muestra que la remoción de partículas finas, fracción asociada a los metales, de las aguas de escorrentía puede ser un método efectivo para controlar la emisión de metales pesados desde una carretera durante su explotación.

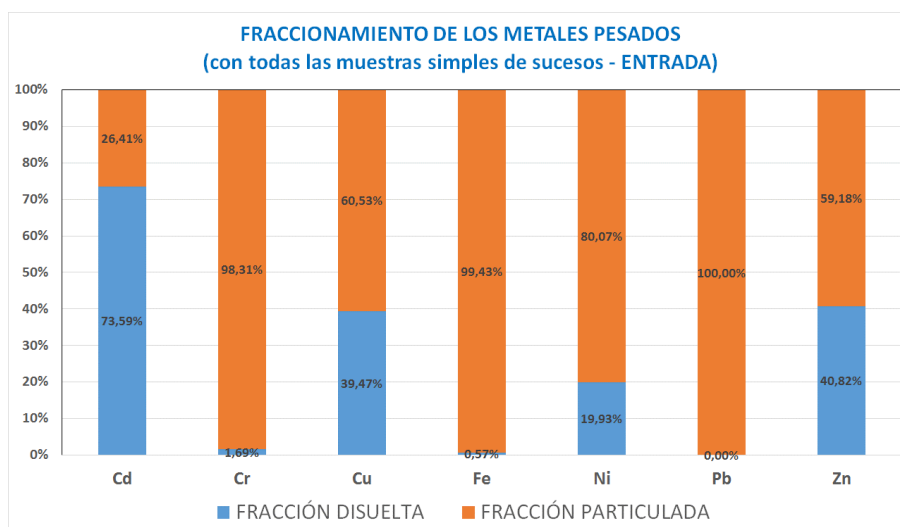


Figura 13.- Fraccionamiento de los metales pesados (analizados a partir de todos los valores medidos en muestras simples).

La eliminación de nutrientes en las aguas de escorrentía varió entre el 12% y -198% para el nitrógeno total y entre el 13% y 55% para el fósforo total. La eficiencia media en la reducción de fósforo total se estableció en el 37% y para el nitrógeno total fue del -89%. El sistema de tratamiento estudiado no fue diseñado para eliminar fracciones disueltas por lo que los ratios de eficiencia negativos para el nitrógeno en algunos sucesos indican la posible presencia de compuestos solubles de nitrógeno, amonio o nitratos, en el volumen de agua permanente de la unidad de tratamiento. Las colonias microbianas establecidas en el sistema de filtración, asimilan y fijan algunas formas de nitrógeno y transforman sus distintas especies en la cámara del sistema de tratamiento influyendo en las concentraciones solubles y particuladas de nitrógeno total. Las especies solubles del nitrógeno y los propios microorganismos pueden ser incorporados en el efluente, dando valores más altos de nitrógeno total en relación al afluente, y reduciendo por tanto el porcentaje de remoción de este elemento.

La determinación de rendimientos en la eliminación de nitrógeno total para los sucesos 7 y 8, sucesos con porcentajes de eliminación negativos, se realizaron comparando una única muestra de entrada y salida ponderada con el caudal. En el resto de los eventos, donde se cuenta con un mayor número de muestras, los resultados fueron positivos. En comparación, el fósforo tiene una cinética química más rápida que el nitrógeno, y vuelve antes a su fracción particulada, generalmente de un tamaño mayor y con una mayor componente inorgánica que aumenta su peso específico, entre 2 y 2.7, siendo más propenso a su eliminación por decantación. Por ello se obtuvo un porcentaje superior en la remoción del fósforo a lo largo de toda la campaña de muestreo que nunca llega a ser negativo. El fósforo es también asimilado por los microorganismos, pero una vez que vuelve a su forma particulada el fósforo total es mucho más estable, menos lixiviable, menos reactivo y menos móvil que el nitrógeno total en un ambiente tan cambiante a lo largo del tiempo como es la cámara de almacenamiento sumergida de una unidad de tratamiento.

El nitrógeno también pudo presentar picos en las concentraciones por aportes de algas y



por la presencia de material vegetal en descomposición que puede entrar en el sistema y escapar en un momento puntal. Durante la campaña se apreció la presencia casi continuada de algas en la cuneta vegetada y dentro de las unidades de tratamiento. Estas algas para poder proliferar y establecerse requieren de un aporte continuado de nutrientes que, como se discutirá en el siguiente punto, puede estar asociado al uso agrícola de gran parte de la cuenca.

Las grasas y aceites, e hidrocarburos totales del petróleo presentaron valores de remoción bajos, con una media del 37 y 24%. Estos rendimientos son inferiores a los esperados y determinados en las unidades en pruebas de campo y laboratorio. Esta discrepancia es posiblemente debida a los elevados caudales punta y a la forma en la que se presentan estos compuestos en el agua, en dispersión o emulsionados. Durante las numerosas inspecciones realizadas a las unidades de tratamiento siempre se constató la presencia de hidrocarburos libres flotando en las cámaras de detención de las unidades.

Las concentraciones reales de entrada a las unidades de estos contaminantes han podido ser superiores a las determinadas debido a la posición en la que se instaló el tubo de succión de agua del tomamuestras. Este punto de succión se instaló en la parte central de la tubería sumergida al separador hidrodinámico dificultando la captura de líquidos o material flotante.

Referente a los caudales y volúmenes tratados, comentar que el primer nivel de tratamiento conformado por el separador hidrodinámico no entró en bypass en ninguno de los eventos muestreados y trató el 100% de todo el volumen de escorrentía generado por la cuenca aportante, frente al 90% de volumen proyectado en su dimensionamiento. Esta diferencia se debe principalmente a que el área de cuenca aportante usada en el dimensionamiento de este dispositivo fue superior al área cuenca que realmente aporta caudal y que se confirmó en el estudio.

Cabe destacar que tampoco se registró un bypass del primer nivel en el plazo de 18 meses que transcurrió desde la instalación de los equipos de medida hasta el final de la campaña. Esto confirmó que el dimensionamiento de las unidades de tratamiento, basado en el cálculo del “caudal de calidad de aguas” para la cuenca (caudal asociado al percentil 90 de volumen de precipitación anual acumulada para la cuenca), es correcto y puede ser un método válido de dimensionamiento de este tipo de sistemas.

El sistema de filtración trató el 55% del volumen de escorrentía total generado por los sucesos muestreados; un valor muy similar al estimado en el proyecto. No obstante, los caudales punta tratados por el sistema de filtración no llegaron a los caudales de diseño de 55 L/s, entrando la unidad en bypass antes de alcanzar ese valor en varios de los sucesos muestreados. Esto se debe a la obturación prematura de las membranas por varios motivos que se han observado durante el estudio:

- Concentraciones continuadas y elevadas de hidrocarburos en el afluente por la presencia de las estaciones de servicio cercanas. Los hidrocarburos y aceites y grasas promueven una obturación rápida de cualquier sistema de filtración.
- La existencia de un caudal base continuado en tiempo seco de 2-3 L/s en la entrada



del filtro, que minimiza considerablemente el efecto de retrolavado de los cartuchos filtrantes.

Estos factores requieren una limpieza frecuente de las membranas para conservar su capacidad hidráulica y optimizar los caudales punta que son capaces de gestionar.

La proporción entre fracciones disueltas y suspendidas en las aguas de escorrentía muestreadas se puede apreciar en la figura 14.

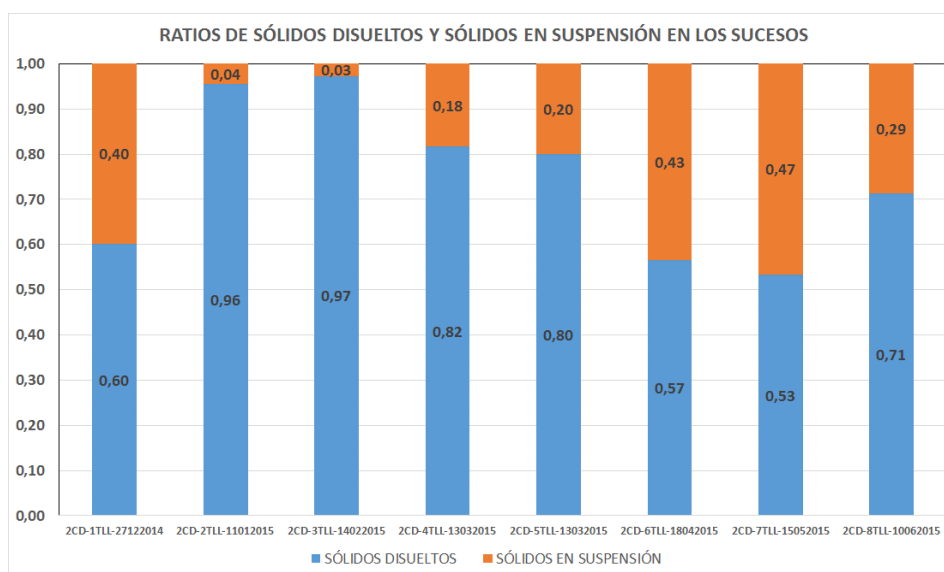


Figura 14.- Proporciones de materia particulada y disuelta en las aguas de escorrentía del Segundo Cinturón (analizados a partir de todos los valores medidos en muestras simples).

La figura anterior muestra un comportamiento anómalo de la cuenca piloto como cuenca “vial-parking”. En todos los sucesos analizados se han registrado proporciones de sólidos disueltos superiores al 60% (incluso se llega al 96-97% en sucesos 2 y 3). Los sucesos 6 y 7 muestran proporciones más habituales en las cuencas de tipo vial. Este comportamiento anómalo se asocia a dos fenómenos:

- Cuencas rurales, con un comportamiento ya explicado respecto a la disolución de materiales.
- Uso de sal en épocas de hielo en la carretera y zonas de aparcamiento. Este fenómeno se ve claramente en las conductividades medidas en el Suceso 3 y en la masa de sales movilizadas.

Las concentraciones de contaminantes en las escorrentías viarias en el Segundo Cinturón son comparables a las de otros estudios con condiciones climáticas y de tráfico similares. Prácticamente todos los eventos muestreados mostraron valores puntuales de concentraciones máximas de sedimentos por encima del valor típico de 80 mg SST/L que se usa en varios valores límite de emisión de la normativa nacional. Las concentraciones medias de suceso solo superaron este límite en 5 de los 12 eventos estudiados.



Esta gran variabilidad en las concentraciones de contaminantes en las aguas de escorrentía fue caracterizada gracias al empleo de métodos de medición de turbidez en continuo y sus correlaciones con distintos contaminantes. Se encontraron correlaciones significativas entre las mediciones de turbidez y SST. Las predicciones de SST sintéticos como subrogados de la turbidez y las concentraciones reales medidas en laboratorio para este parámetro fueron buenas. Este tipo de mediciones pueden representar un método técnica y económicamente viable para caracterizar y monitorizar los vertidos de escorrentía y la efectividad de las técnicas implementadas para su tratamiento.

La evaluación de rendimientos del sistema de tratamiento implementado mostró la capacidad del sistema para remover sedimentos finos y los metales pesados asociados. Las especies metálicas se encontraron mayoritariamente en forma particulada, estas especies en la escorrentía tienden a adherirse a los sedimentos formando complejos que como se ha mostrado en el estudio pueden ser removidos mediante dispositivos de tratamiento de las aguas de escorrentía diseñados para retener partículas finas.

El estudio hidrológico mostró que el dimensionamiento de sistemas de tratamiento usando el método del caudal de calidad de aguas, caudal asociado al percentil 90 de precipitación anual acumulada, presenta un equilibrio técnico y económico en la gestión de las escorrentías pluviales. El uso criterios de dimensionamiento de primer lavado para estas aguas no es siempre aplicable teniendo que tratar en varias ocasiones un volumen mayor de escorrentía para atrapar los picos de los polutogramas.

El estudio ha mostrado cómo pueden aplicarse procesos y tecnologías de tratamiento a las escorrentías procedentes de una calzada viaria para mejorar la calidad del vertido.

BIBLIOGRAFIA

Clar, Michael L. y Barfield, Billy J. 2004. Stormwater Best Management Practice Design Guide. Cincinnati : U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 2004.

Harrison, Roy M. y Hamilton, Ronald S. 1991. Highway Pollution. Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V., 1991.

Puertas Agudo, Jerónimo, Suárez López, Joaquín y Anta Álvarez, José. 2008. Gestión de las aguas pluviales: implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano. A Coruña : CEDEX, 2008.

Rodríguez Sánchez, Juan José y Díaz Martínez, Alberto. 2009. Guía técnica de diseño y gestión de balsas y otros dispositivos de retención de contaminantes en carreteras. s.l. : CEDEX, 2009.

Service d'Études techniques des routes et autoroutes (Sétra). 2006. Calcul des charges de pollution chronique des eaux de ruissellement issues des plates-formes routières. s.l. : Sétra, 2006.

State of California Department of Transportation (Caltrans). 2003. Construction Site Best Management Practices (BMPs) Manual. s.l. : Caltrans, 2003.

Stockholm Vatten. 2001. Klassificering av dagvatten och recipienter samt riktlinjer för reningskrav. Del 2, Dagvattenklassificering. s.l. : Stockholm Vatten, 2001.

Storhaug, Ragnar. 1996. Miljøgifter i overvann. Oslo : Statens forurensningstillsyn, 1996.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2002. Urban Stormwater BMP Performance



Monitoring. Washington : s.n., 2002.

Xunta de Galicia. 2009. Instrucciones Técnicas de Obras Hidráulicas de Galicia. Santiago de Compostela : s.n., 2009.

Stockholm Vatten, 2001. Klassificering av dagvatten och recipienter samt riktlinjer för reningskrav. Del 2, Dagvattenklassificering. s.l.: Stockholm Vatten.

Estadísticas Europeas (EUROSTAT). Datos del 2012. Tables, Graphs and Maps Interface (TGM) table.

OTEUS (Observatorio de transporte de Euskadi). 2013, Panorámica del Transporte en Euskadi

FHWA (Federal Highway Administration), USGS (U.S. Geological Survey) y EPA (Environmental Protection Agency). National Highway Runoff Water-Quality Data and Methodology System

DIRECTIVA 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, 2000. Directiva Marco del Agua por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

European Comision, 2000. "Common Implementation Strategy for the WFD (2000/60/EC). Guidance Document nº 3. Analysis of Pressures and Impacts"

BOG (Boletín Oficial de Gipuzkoa), dic 2002. Estudio de Impacto Ambiental del "Segundo Cinturón de Donostia-San Sebastián".

BOG (Boletín Oficial de Gipuzkoa), sep 2004. Declaración de Impacto Ambiental del "Segundo Cinturón de Donostia-San Sebastián".

Real Decreto 1290/2012. "Por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH)"

Real Decreto 509/1996. De desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, "Por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas"

Orden AAA/2056/2014. de 27 de octubre, "Por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido"

Real Decreto 400/2013. de 7 de junio, "Por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental"

ASCE-WEF (American Society of Civil Engineers-Water Environment Federation (1993). "Design and Construction of urban stormwater management Systems"

Adams, B.J., Papa, F. 200). Urban Stormwater Management Planning with Analytical Probabilistic Models. John Wiley & Sons, New York, USA.

Wu, J.S. and Ahlert, R.C. 1978. "Assessment of Methods for Computing Storm Runoff Loads." Water Resources Bulletin, 14(2).

Wu, J.S. and Ahlert, R.C. 1978. "Prediction and analysis of stormwater pollution." Proc. Of the International Sym on Urban Stormwater Management, University of Kentucky, Lexington, KY"

Moore, J., 2007. Investigation of Contaminants in Industrial Stormwater Catchpits

Dorman M. E., Hartgan J.P., Steg, R.F. y Quasebarth, T.F. 1996. "Retention, detention, and overland flow for pollutant removal from highway stormwater runoff"

Timperley, M., B. Williamson, et al. 2005. Sources and loads of metals in urban stormwater. Auckland Regional Council. New Zealand.