

TESIS DE MAESTRÍA

**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE DOS DESARENADORES PARA
CÁMARAS DE INSPECCIÓN BAJO DISTINTAS CONDICIONES
HIDRÁULICAS Y DE CARGA DE SEDIMENTOS**

Laura Alejandra Ortega de la Pava

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2019**

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo General	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
1.2	Antecedentes	12
1.2.1	Los sedimentos en el drenaje urbano	13
1.2.2	Erosión hídrica	14
1.2.3	Estimación de pérdidas del suelo por erosión	14
1.2.4	Sedimentos en una red de alcantarillado pluvial	15
1.2.5	Uso de sedimentadores como estructuras previas a tanques de almacenamiento de aguas lluvia	15
1.2.6	Sedimentadores en la industria actual	16
2	Marco teórico	44
2.1	Definiciones	44
2.1.1	Desarenador	44
2.1.2	Sedimentador	45
2.1.3	Sedimentación	45
2.1.4	Sólidos sedimentables	45
2.1.5	Arenas	45
2.1.6	Cámaras o pozos de inspección	45
2.1.7	Tanques de almacenamiento de agua	45
2.2	Principios hidráulicos en el diseño de sedimentadores primarios	46
2.2.1	Objetivo	46
2.2.2	Principio de funcionamiento de un tanque de sedimentación	46
2.3	Normatividad respecto al uso de sedimentadores como parte de la red de alcantarillado pluvial	48
2.3.1	Cuerpos responsables de la normatividad en el mundo	48



2.3.2	Cuerpos responsables de la normatividad en Colombia.....	51
3	desarenadores.....	52
3.1	Antecedentes de los dos desarenadores	52
3.2	Descripción de los modelos.....	53
3.2.1	Aspectos hidráulicos de los sedimentadores en evaluación.....	53
3.2.2	Instrumentación y montaje.....	54
4	modelo físico	59
4.1	Descripción del modelo físico	59
4.1.1	Desarenador tipo filtro.....	59
4.1.2	Desarenador helicoidal descendente.....	60
4.1.3	Tanque de almacenamiento de agua a nivel.....	60
4.1.4	Motobomba	61
4.1.5	Tubería de PVC	61
4.1.6	Tanque elevado	62
4.1.7	Válvula de control	63
4.1.8	Tolva para arena.....	63
4.1.9	Tubería acrílica	63
4.1.10	Cámara de inspección	64
4.1.11	Cámara de inspección tipo filtros.....	65
4.1.12	Cámara de inspección helicoidal.....	66
4.1.13	Caudalímetro.....	67
4.1.14	Vertedero	68
5	METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS.....	69
5.1	Preparación de la mezcla de arenas.....	69
5.1.1	Calibración del caudal de arenas.....	71
5.2	Definición de caudales de agua.....	72
5.2.1	Calibración del caudal de agua.....	75
5.3	Tiempos de prueba.....	76
5.4	Bombeo de agua	76



5.5	Apertura y cierre de válvula de agua	76
5.6	Apertura y cierre de válvula de sólidos	77
5.7	Recolección de arenas retenidas.....	78
5.7.1	Desarenador tipo filtro.....	78
5.7.2	Desarenador helicoidal	82
5.8	Secado de arenas en el horno	82
5.9	Verificación del peso de las arenas retenidas.....	83
5.10	Documentación de las pruebas para los caudales principales.....	84
5.10.1	Desarenador tipo filtros	84
5.10.2	Desarenador helicoidal	90
5.11	Resultados	93
5.11.1	Porcentaje de retención de sólidos en el desarenador tipo filtros.....	93
5.11.2	Porcentaje de retención de sólidos en el desarenador helicoidal	97
5.12	Evaluación de los prototipos por criterios	100
5.12.1	Tamaño mínimo de la partícula removida	100
5.12.2	Eficiencia de desarenación.....	101
5.12.3	Versatilidad de caudales	102
5.12.4	Operación y limpieza.....	103
6	Conclusiones y recomendaciones	106
7	Referencias.....	109



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Flujo, ecuación de pérdida de suelo por erosión, USLE (Bhardwaj, 2017)	15
Figura 2. Caudales de diseño para el año 2017	73
Figura 3. Caudales de diseño para el año 2018	73
Figura 4. AquaCell.....	74
Figura 1. Eficiencia de desarenación en función del caudal de agua, prototipo tipo filtros	95
Figura 2. Eficiencia de desarenación en función de la concentración de arenas, prototipo tipo filtros	96
Figura 3. Eficiencia de desarenación en función del caudal de agua, prototipo tipo helicoides	99
Figura 4. Eficiencia de desarenación en función de la concentración de arenas, prototipo tipo helicoides .	100

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Trash Guard Plus	16
Ilustración 2. Trash Guard Plus antes de la limpieza	18
Ilustración 3. Trash Guard Plus después de la limpieza	18
Ilustración 4. Storm Tank Shield	19
Ilustración 5. Vario 800 Flex	20
Ilustración 6. Tipos de ubicación, Vario 800 Flex	21
Ilustración 7. Filtro universal de uso externo	22
Ilustración 8. Filtro universal externo industrial.....	23
Ilustración 9. Filtro para pozo de infiltración	24
Ilustración 10. Filtro de sedimentación	25
Ilustración 11. Túnel de inspección	27
Ilustración 12. HidroBox	27
Ilustración 13. Dimensionamiento del HidroBox.....	28
Ilustración 14. Estado de la cuenca antes del HidroBox.....	30
Ilustración 15. Estado de la cuenca después del HidroBox	30
Ilustración 16. Hydro Dry Screen	31
Ilustración 17. Tubería de entrada, Hydro Dry Screen	32
Ilustración 18. Sumidero de almacenamiento, Hydro Dry Screen	32
Ilustración 19. Pantalla de secado, Hydro Dry Screen	32
Ilustración 20. Vertedero vertical, Hydro Dry Screen.....	33
Ilustración 21. Pantalla, Hydro Dry Screen	33
Ilustración 22. Difusor, Hydro Dry Screen	33
Ilustración 23. Tubería de salida, Hydro Dry Screen.....	34
Ilustración 24. Limpieza sólidos, Hydro Dry Screen.....	35
Ilustración 25. Limpieza líquidos, Hydro Dry Screen	36
Ilustración 26. Optimax filter	36
Ilustración 27. Prueba #1, Optimax filter	37
Ilustración 28. Prueba #2, Optimax filter	37



Ilustración 29. Prueba #3, Optimax filter	38
Ilustración 30. Cabezal rociador de limpieza, Optimax filter.....	39
Ilustración 31. Vortex settling tank	39
Ilustración 32. First defense vortex separator.....	42
Ilustración 33. Puerto de mantenimiento y limpieza del First Defense Vortex Separator	43
Ilustración 34. Desarenador tipo filtro	54
Ilustración 35. Dispositivo de desarenación	56
Ilustración 36. Desarenador helicoidal descendente	56
Ilustración 37. Corte transversal del desarenador descendente.....	57
Ilustración 38. Tanque de almacenamiento de agua, laboratorio de alcantarillado Uniandes.....	61
Ilustración 39. Motobomba, laboratorio de alcantarillado Uniandes	61
Ilustración 40. Tuberías PVC, laboratorio alcantarillado Uniandes	62
Ilustración 41. Tanque elevado laboratorio de alcantarillados Uniandes	62
Ilustración 42. Válvula de control, laboratorio de alcantarillado Uniandes	63
Ilustración 43. Tolva para graduar el caudal de arenas.....	63
Ilustración 44. Tubería de acrílico	64
Ilustración 45. Cámara de inspección.....	65
Ilustración 46. Desarenador tipo filtros.....	65
Ilustración 47. 1/5 Filtros del sistema	65
Ilustración 48. Sección de mamparas helicoidales	66
Ilustración 49. Composición interna del desarenador helicoidal	66
Ilustración 50. Vista aérea del desarenador helicoidal.....	66
Ilustración 51. Caudalímetro Ultrasónico.....	67
Ilustración 52. Sensores Ultrasónicos.....	67
Ilustración 53. Vertederos laboratorio de alcantarillado Uniandes	68
Ilustración 54. Diámetro externo del embudo	72
Ilustración 55. Diámetro interno del embudo.....	72
Ilustración 56. Válvula de control.....	77
Ilustración 57. Embudo instalado a la salida de la tolva.....	78
Ilustración 58. Cañuela desarenador helicoidal pos ensayo	79



Ilustración 59. Escaleras internas	79
Ilustración 60. Filtros del desarenador pos ensayo	80
Ilustración 61. Vista del desarenador sin filtros	80
Ilustración 62. Muestra de arenas retenidas en el desarenador	81
Ilustración 63. Filtro pre lavado.....	81
Ilustración 64. Arenas retenidas en el vertedero	82
Ilustración 65. Secado de las arenas en horno	83
Ilustración 66. Pesaje de las arenas secas	83
Ilustración 67. Limpieza desarenador tipo filtros	104
Ilustración 68. Limpieza desarenador helicoidal	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones del Trash Guard	17
Tabla 2. Tipos de filtros, Vario 800 Flex.....	21
Tabla 3. Dimensiones del filtro universal de uso externo	23
Tabla 4. Dimensiones filtro universal externo industrial.....	24
Tabla 5. Dimensiones filtro para pozo de infiltración.....	25
Tabla 6. Dimensiones filtro de sedimentación	26
Tabla 7. Dimensiones del HidroBox.....	29
Tabla 8. Capacidad Hydro Dry Screen.....	34
Tabla 9. Dimensiones Vortex Settling Tank	40
Tabla 10. Dimensiones First Defense Vortex Separator	43
Tabla 1. Rango de tamices 12 al 20 gradado	70
Tabla 2. Rango de tamices 20 al 30 gradado	70
Tabla 3. Rango de tamices 30 al 40 gradado	70
Tabla 4. Rango de tamices 40 al 60 gradado	70
Tabla 5. Distribución porcentual del tamaño de las partículas en las muestras	71
Tabla 6. Diámetro de abertura de malla por número de tamiz.....	71
Tabla 7. Caudal sólido para la apertura mínima de la válvula de la Tolva	71
Tabla 11. capacidad hidráulica tubería 160mm PVC (PAVCO, 2015).....	74
Tabla 8. Tiempo por ensayo	76
Tabla 9. Resultado de desarenación prototipo tipo filtros bajo 10g/s	93
Tabla 10. Resultados de desarenación prototipo tipo filtros bajo 5g/s	94
Tabla 11. Resultado de desarenación prototipo tipo helicoides bajo 10g/s	97
Tabla 12. Resultados de desarenación prototipo tipo helicoides bajo 5g/s.....	98

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1. Plano de instalación en planta, desarenador tipo filtro.....	59
Esquema 2. Plano de instalación en perfil, desarenador tipo filtro	59
Esquema 4. Plano de instalación en planta, desarenador helicoidal	60
Esquema 5. Plano de instalación en perfil, desarenador helicoidal	60

1 INTRODUCCIÓN

Bogotá, al estar localizada dentro de la zona de confluencia intertropical, cuenta con un régimen hidrológico bimodal el cual en sus épocas de lluvia alcanza precipitaciones del orden de 142mm; por lo que se conoce que una de sus mayores problemáticas es la amortiguación de aguas lluvias. Adicionalmente, el desarrollo urbano sobre grandes extensiones de suelo en la ciudad ha generado la impermeabilización masiva del territorio bogotano incrementando significativamente el riesgo de inundación.

De acuerdo a lo anterior, en los últimos años se han establecido los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles como parte de las estrategias de mitigación de impactos de la rápida urbanización; con ellos se pretende que la respuesta hidrológica de una zona urbanizada se mantenga lo más parecida posible a la que tenía en su estado original. (Abellán, 2013)

Es importante mencionar que la problemática descrita no hace referencia únicamente al volumen de agua incrementado por escorrentía sino también a la calidad de la misma, pues durante las épocas secas, se acumula una gran cantidad de contaminantes sobre las superficies los cuales son posteriormente lavados por la lluvia, así como también se precipitan aquellos que siguen suspendidos en el aire y generan un alto impacto en cuanto a contaminación de los cuerpos receptores.

El tipo y fuente de contaminación asociada a la escorrentía del agua lluvia es poco puntual por lo que se le da el nombre de contaminación difusa, ya que abarca una amplia gama de contaminantes como: materia orgánica, pesticidas, metales, patógenos, nutrientes, hidrocarburos y sedimentos. (Escalante, 2011)

Es por ello que la emergencia de los SUDS surge como estrategia de mitigación de la problemática tanto de la cantidad como de la calidad de la escorrentía urbana los cuales permiten recoger, transportar, descontaminar, retener, infiltrar y evacuar el agua de lluvia de una manera sostenible integrando los pilares económicos, sociales y ambientales. (Escalante, 2011)

Dentro de las estrategias de la implementación de SUDS existen varios enfoques: mantener equilibrados los niveles de escorrentía evitando así el colapso de los sistemas de alcantarillado existentes, la reutilización de las aguas lluvias almacenadas en distintos usos urbanos, captar aguas lluvias por infiltración evitando inundaciones no solo en zonas duras sino también en zonas verdes e implementar herramientas hacia la construcción de sistemas de redes de drenaje de redes separados.

La ingeniería ambiental, viene jugando un rol muy importante en cuanto al manejo sostenible de los recursos hídricos y los SUDS integran armónicamente el uso de las estructuras hidráulicas convencionales y no convencionales en pro de un desarrollo urbano sostenible a partir del cual se incentiva el crecimiento de las ciudades de hoy sin dejar de lado la concientización de la población en cuánto al aprovechamiento y disminución del consumo de agua potable.

Dentro de la legislación de la Secretaría Distrital de Ambiente, se encuentran varios ejemplos avalados de SUDS: Tanques de almacenamiento de agua lluvia, drenajes filtrantes, cuentas verdes, zonas de bioretención, pondajes húmedos vegetados y sumideros tipo alcorque inundable.

Los tanques de almacenamiento de agua lluvia son usados como estructuras de control de caudales pico, son convencionalmente construidos en concreto, pero se han desarrollado nuevas tecnologías que los hacen no solo más económicos, prácticos y de fácil instalación, sino que les dan también una mayor versatilidad en la implementación de proyectos con limitaciones de tiempo y espacio y les han dado mayores beneficios y usos que permiten que sean adaptados como SUDS. El uso de celdas plásticas perforadas modulares es una propuesta para reemplazar los tanques de almacenamiento de agua lluvia convencionales que cumplen con los criterios anteriormente descritos por la Secretaría Distrital de Ambiente para ser considerado como un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible.

Sin embargo, a pesar de que desde el año 2015, se viene implementando con éxito el uso de éste tipo de estructuras en proyectos de diferente índole, se ha encontrado que la tasa de acumulación de sedimentos en las celdas es aún desconocida y puede estar comprometiendo el comportamiento hidráulico de las mismas por la pérdida de volumen y capacidad de almacenamiento.

El diseño de los tanques de almacenamiento mediante el uso de estas celdas exige la instalación de una estructura de desarenación por cada punto de entrada al sistema, pero la capacidad que éste debe tener en función del caudal es desconocida.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Medir la eficiencia de dos desarenadores, instalados dentro de cámaras de inspección plásticas, de un metro de diámetro, que acompañen tanques de almacenamiento de agua tipo celdas plásticas modulares.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar cuál de los dos desarenadores es más eficiente y tiene un mejor ajuste al uso para el que fue diseñado, bajo condiciones hidráulicas y de carga de sedimentos iguales.



- Identificar las condiciones óptimas de funcionamiento de cada uno de los desarenadores evaluados.
- Identificar oportunidades de mejora en los diseños actuales.

1.2 Antecedentes

La Gestión integral del Recurso Hídrico, definida por el ministerio de ambiente como “un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales” ha sido uno de los pilares de la ingeniería civil y ambiental cuya importancia no cesa de crecer, en principio, por la dependencia vitalicia e irremplazable que tenemos los seres vivos de un abastecimiento continuo del recurso y consecuentemente por las alarmantes noticias del cambio climático y la reducción en cantidad y calidad del agua. (Minambiente, 2019)

Por otro lado, en las últimas décadas el porcentaje de la población que vive en zonas urbanas, en especial en ciudades densas, ha incrementado hasta superar el 50 por ciento a nivel mundial. Tan solo 200 años atrás el 90 por ciento de la población global vivía en áreas rurales, sin embargo, en los Estados Unidos de América el porcentaje de personas que ocupaba la urbe subió a un 40 por ciento en 1900 y para el año 2000 ya había superado el 80 por ciento. Japón supera esa cifra con un 90 por ciento de su población habitando las ciudades, China cuenta con un 58 por ciento e India con un 33 por ciento. En el caso de Colombia, al año 2017 según cifras del World Bank Group 39.471.325 personas conforman la población urbana. (Banco Mundial, 2018)

Una de las consecuencias de esa urbanización abrupta y repentina, ha sido la impermeabilización de una gran área de terreno natural. Lo anterior ha impactado los recursos hídricos en cuanto a cantidad y calidad del agua, geomorfología de los cauces, y naturaleza ecológica de los hábitats naturales. El ciclo del agua como lo conocemos, está compuesto de varios procesos físicos tales como evapotranspiración, condensación, precipitación e infiltración en su forma simplificada. La urbanización, reduce significativamente el porcentaje de agua infiltrada en los suelos, como consecuencia del reemplazo de terreno natural por materiales con un índice de permeabilidad mucho menor, casi nulo, irrumpiendo así el ciclo natural del agua.

Lo anterior genera la aparición de caudales pico, mayores volúmenes de escorrentía e incremento en el riesgo de inundaciones. Asimismo, la escorrentía no solo crece en caudal sino en carga de contaminantes que en algunos de sus casos pueden llegar a ser tóxicos, pues las actividades antrópicas dentro de las urbanizaciones generan residuos químicos y orgánicos, tales como sedimentos, nutrientes, materia orgánica, metales pesados, patógenos, pesticidas, herbicidas e hidrocarburos, que se acumulan sobre el suelo siendo transportados, luego de un evento de lluvia, hacia cuerpos de agua receptores. En cuanto a la geomorfología de los cauces se han registrados

impactos negativos en la erosión, especialmente en cercanías a la zona de vertimiento debido a que las cargas de agua son mayores y desembocan en tiempos más cortos; de la misma manera, el incremento en la sedimentación de partículas de gran tamaño en el fondo de los cuerpos receptores, disminuye la profundidad y altera la sección transversal en los mismos. (Ritchie & Roser, 2018)

Es por ello que, como respuesta a éstos fenómenos, la ingeniería ha desarrollado el concepto de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los cuales buscan solucionar o por lo menos atenuar los impactos negativos de las urbanizaciones sobre el ciclo del agua. Su principal objetivo es la reducción de caudales pico, por medio de elementos estructurales y no estructurales. Los tipos de SUDs son denominados por el gremio como tipologías y varían dentro un amplio rango de aproximaciones entre las cuales se identifican medidas de infiltración, retención, filtración, detención y retardo.

Entre las tipologías más conocidas de SUDs están los techos y muros verdes, alcorques inundables, cunetas verdes, zonas de bioretención, cuencas secas de drenaje o piscinas de detención, pondajes húmedos, humedales artificiales, cuencas de infiltración, pavimentos permeables, sumideros de infiltración, filtros de arena, sumideros de infiltración, zanjas de infiltración, drenes filtrantes y tanques de almacenamiento de agua. (Haydee, Reguero, & Rodriguez, 2015)

Éstos últimos, son los más utilizados a lo largo de la historia del manejo sostenible de aguas lluvias y en épocas más recientes, en forma de tanques plásticos modulares, se han incrementado sus usos y ventajas. Tres son sus usos principales: retención temporal de agua lluvia para control de caudales pico y hacer una descarga controlada al alcantarillado pluvial, retención de agua lluvia para reúso inmediato o posterior en actividades tales como riego, lavado de zonas duras, descarga de aparatos sanitarios u otros usos no potables y finalmente infiltración del agua lluvia recolectada después de un evento para lograr la recarga de acuíferos subterráneos y normalizar el ciclo hidrológico.

Garantizar la eficiencia de ésta tipología de SUDs, requiere de un control de sedimentos aguas arriba del tanque, en forma de sedimentadores convencionales, hidrodinámicos o como se estudia a lo largo del desarrollo del proyecto en mención sedimentadores adaptados a cámaras de inspección. (CIRIA, 2017)

1.2.1 Los sedimentos en el drenaje urbano

Los grandes asentamientos urbanos, son también los responsables del incremento de material sólido de distintos tamaños arrastrados por la escorrentía urbana. Aquellos sedimentos de mayor tamaño, son los responsables del fenómeno denominado erosión hídrica, el cual, al presentarse en zonas urbanas puede además de alterar la geomorfología de los cauces, obstruir o inclusive colapsar las redes de drenaje de las ciudades. Es por esto, que cómo parte de las disciplinas que acompañan el diseño de una red de drenaje urbana sostenible se ha incorporado el estudio de los procesos de producción, transporte y depósito de sedimentos. (Heal et al., 2009)

1.2.2 Erosión hídrica

La erosión hídrica puede ser categorizada como erosión pluvial o fluvial, la primera es aquella generada por la lluvia, más específicamente las gotas de agua que caen sobre el suelo y cuya fuerza es suficiente para segregarse las partículas del suelo en varias de menor tamaño. La erosión pluvial tiene mayores impactos en zonas áridas, de poca cobertura vegetal. La segunda es el tipo de erosión generada por el flujo del agua en cauces fluviales y está directamente relacionada con el caudal. Dentro de su desarrollo se identifican tres etapas (1) El Desprendimiento: es la separación de las partículas de la capa superficial del terreno. (2) El Transporte: El material que ha sido desprendido se conduce desde el lugar de origen en el sentido del flujo del agua. (3) La sedimentación: El material transportado se deposita una vez el peso de la partícula supera la energía del flujo. (Camargo, Pacheco, & López, 2017; Casado, 2018)

1.2.3 Estimación de pérdidas del suelo por erosión

La Ecuación Universal de Pérdidas del Suelo (USLE), es uno de los muchos métodos desarrollados en la estimación de pérdidas del suelo ocasionadas por erosión hídrica y demás mecanismos responsables de la degradación de los suelos naturales. Dentro de sus utilidades no sólo atribuye la cuantificación de los caudales sólidos producidos por flujos hidráulicos según las condiciones y características de un terreno natural sino a la vez proponer medidas de protección y conservación de los terrenos e inclusive hacer las veces de guía de buenas prácticas para agricultores, ganaderos y demás trabajadores de la tierra. (Ibáñez, Ramón, Blanquer, & Manuel, 2015)

El desarrollo del método propone la modelación de las pérdidas de suelo mediante la parametrización de seis factores ambientales independientes. (1) Factor de erosividad de la lluvia “R”: es la caracterización de la capacidad del evento de lluvia de erosionar el suelo. (2) Factor de erosionabilidad del suelo “K”: es la representación de la susceptibilidad del suelo a sufrir pérdidas de suelo por erosión. (3) y (4) Factor topográfico “LS”: es la determinación del efecto del terreno, tanto de la pendiente como de la longitud de la ladera. (5) Factor vegetación “C”: depende de la cobertura vegetal y de la protección que le da al suelo. (6) Factor de conservación por medidas antrópicas “P”: se atribuye dependiendo del uso del suelo y las prácticas de trabajo. (Bhardwaj, 2017)

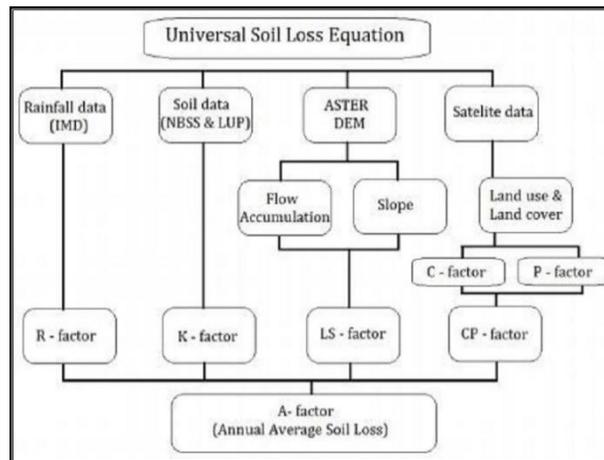


Figura 1. Diagrama de Flujo, ecuación de pérdida de suelo por erosión, USLE (Bhardwaj, 2017)

1.2.4 Sedimentos en una red de alcantarillado pluvial

Por otro lado, los sistemas de drenaje de las ciudades son sistemas abiertos, lo que implica que sus entradas vienen de distintas fuentes y los sedimentos por él transportados no obedecen exclusivamente al material erosionado del suelo natural sino también de material acumulado sobre cubiertas de edificaciones, andenes y vías, parqueaderos, escombros de construcción etc.

En 1967 se realizó la evaluación microscópica de muestras de sedimentos de un sistema de alcantarillado pluvial piloto en donde se buscaba entender el comportamiento del transporte de sólidos en alcantarillados. Como resultado se encontraron partículas tipo arena, con un rango de tamaños de entre 40 a 900µm con gravedades específicas de 2.4 a 2.6. Las partículas fueron categorizadas en carga de cama, suspendida y de lavado. La carga de cama fue definida como el material sólido que se encuentra cercano a las bateas de los colectores, la carga suspendida son los sólidos que han sido barridos y re-suspendidos desde la carga de cama y la carga de lavado son aquellas partículas que entraron en el sistema y continúan en suspensión dadas las condiciones de flujo del sistema. (Pérez, 2016)

1.2.5 Uso de sedimentadores como estructuras previas a tanques de almacenamiento de aguas lluvia

Con el fin de contrarrestar los efectos negativos de los sedimentos en las redes de alcantarillado los diseñadores se han enfocado en buscar técnicas hidráulicas que garanticen la auto limpieza de la red, por lo general, garantizando que el esfuerzo cortante a lo largo del sistema permanezca dentro del rango 2.50 a 3.0 Pa y la velocidad mínima del sistema sea de 0.75m/s, según la metodología propuesta por el RAS para alcantarillados pluviales. (Pérez, 2016)

Por otro lado, la incorporación de sistemas de drenaje urbano sostenible en su tipología de almacenamiento y detención en forma de tanques de almacenamiento de agua, requiere que su funcionamiento a lo largo de toda la vida útil del sistema sea garantizado mediante un plan de inspección y mantenimiento, con la periodicidad suficiente para cumpla con su función sin ninguna eventualidad. En el caso de tanques de almacenamiento tipo celdas plásticas modulares, la inspección post instalación no es posible y por ende se deben plantear soluciones alternativas; que, en la mayoría de los casos, como se va a ilustrar a continuación, se resuelve mediante la instalación de un tanque desarenador aguas arriba al tanque, el cual tiene como función, evitar el ingreso de cualquier tipo de sólido transportado por el colector al tanque de almacenamiento de agua.

1.2.6 Sedimentadores en la industria actual

1.2.6.1 Trash Guard Plus



Ilustración 1. Trash Guard Plus

Empresa: ACF Environmental

Lugar de Origen: Reino Unido

Página web (fuente de información): www.acfenvironmental.com

1.2.6.1.1 Descripción

Su productor lo denomina como un dispositivo de pretratamiento para aguas lluvias. Es un escudo metálico tipo rejilla, diseñado para ser atornillado dentro de un sumidero o cámara de inspección de mampostería o concreto, podría adaptarse a cámaras plásticas siempre y cuando se garantice hermeticidad en los puntos de acople.

Su función es la de capturar escombros, sedimentos de gran tamaño y sólidos flotantes. En la parte inferior del escudo cuenta con orificios de diámetro igual a $3/8''$ y en la parte superior el diámetro de los orificios pasa a ser de $3/4''$

Se distribuyen en tres tamaños diferentes, clasificados según su ancho de la siguiente manera:

Tabla 1. Dimensiones del Trash Guard

A	Diámetro del colector	≤ 15"	≤ 18"	≤ 24"
B	Altura	24"	30"	36"
C	Ancho	23"	28"	34"

1.2.6.1.2 Ventajas

- Su instalación es rápida, y sencilla, no requiere del uso de maquinaria pesada ni instrumentación específica.
- Puede adaptarse a bases irregulares de captación, cómo cuencas naturales o inclusive a paredes.

1.2.6.1.3 Desventajas

- Deja filtrar dentro del tanque, sedimentos de diámetro menor a 3/4 de pulgada, lo que puede generar problemas a futuro en cuanto a reducción de capacidad de almacenamiento.
- La frecuencia del mantenimiento dependerá directamente del tamaño del sumidero dentro del cual se instale, sumideros muy pequeños pueden saturarse de basuras prontamente, colapsar el sistema y generar inundaciones aguas arriba.

1.2.6.1.4 Caso de éxito

Burlington, NC

- 198 libras de sólidos fueron capturados dentro de la cámara en un total de siete meses, incluyendo nitrógeno, fósforo y metales regulados.



Ilustración 2. Trash Guard Plus antes de la limpieza



Ilustración 3. Trash Guard Plus después de la limpieza

1.2.6.1.5 Recomendaciones de operación y mantenimiento

Debe inspeccionarse trimestralmente para determinar cuándo es necesario el mantenimiento. Si la acumulación de sedimentos y escombros cubre más de la mitad de la unidad, se recomienda la remoción de escombros. Algunas instalaciones pueden requerir más inspecciones y mantenimiento según las cargas.

1.2.6.2 Storm Tank Shield

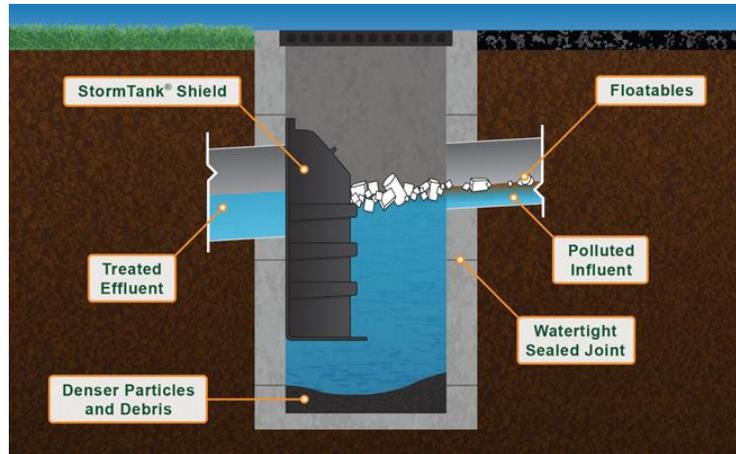


Ilustración 4. Storm Tank Shield

Empresa: Brentwood

Lugar de origen: Estados Unidos

Página web (fuente de información): www.brentwoodindustries.com

1.2.6.2.1 Descripción

Similar al anteriormente descrito, el StormTank Shield es también un dispositivo de tratamiento de aguas lluvias, su diseño reduce la cantidad de contaminantes a través de la eliminación de sedimentos y la separación de aceites en el agua. No permite el ingreso de elementos flotantes y aceites, transportados por tuberías, al tanque de almacenamiento de agua. Puede instalarse también, a la salida de tuberías, justo antes de su vertimiento a cuerpos de agua naturales, con el fin de que los contaminantes transportados no sean entregados al medio ambiente. Es una solución de tratamiento que reduce el impacto negativo causado por la contaminación del agua de escorrentía.

Con la instalación del dispositivo, los elementos más pesados se depositarán en el fondo del sumidero, ya que su diseño corrugado incrementa la longitud del flujo y reduce la velocidad de la escorrentía al mantener un nivel constante de agua en la estructura.

Para un adecuado funcionamiento el sumidero donde será instalado deberá tener una profundidad mínima de 36", sin embargo, para un mejor tratamiento se recomienda una profundidad mínima de 2.5 veces el diámetro de la tubería de salida.

Consideraciones adicionales para un diseño adecuado son: que la capota del escudo cubra la totalidad del área de apertura del tubo de salida, que el tamaño seleccionado garantice que la

capacidad hidráulica de la red no se disminuya con respecto a lo transportado aguas arriba y que al instalar e escudo se garantice un sellado hermético en todas las juntas y perforaciones.

1.2.6.2.2 Ventajas

- Cuenta con ventilación para la prevención de vórtices y sifones.
- Está disponible en tamaños de 18, 24 y 36 pulgadas.
- Tiene un puerto de acceso para limpieza interna y prevención de taponamientos.
- Si perfil es delgado, no ocupa mucho espacio y garantiza que el sumidero o cámara siga siendo inspeccionable.
- Cuenta con un punto de agarre para que sea fácil de manejar durante el proceso de instalación.

1.2.6.2.3 Desventajas

- En sumideros pequeños, un solo evento de lluvia puede taponar el sistema.
- La frecuencia de mantenimiento puede ser muy alta en zonas de acumulación de basuras y sedimentos grandes.

1.2.6.2.4 Recomendaciones de operación y mantenimiento

De la misma forma que el ejemplo anterior, los fabricantes de esta solución de tratamiento recomiendan que, para las dimensiones de sumidero especificadas, se haga una revisión periódica, inicialmente una vez al mes o cada vez que haya un evento de lluvia importante y así establecer la periodicidad de limpieza prudente ya que ésta puede variar con respecto al lugar de instalación.

1.2.6.3 Vario 800 Flex



Ilustración 5. Vario 800 Flex

Empresa: Graf

Lugar de origen: Francia

Página web (fuente de información): www.graf-water.com

1.2.6.3.1 Descripción

El vario 800 Flex funciona como una cámara de inspección, pero en lugar de conectar intersecciones de tuberías, se inserta como una extensión a las celdas del tanque de almacenamiento. Además de servir como un punto de inspección, permite que las conexiones de entrada de tuberías se hagan directamente sobre el cuerpo del pozo; lo anterior facilita las conexiones ya que cuenta con muescas prefabricadas de diámetros nominales de 200, 300 y 400 milímetros que pueden ser perforados in situ según diseños. Adicionalmente, los módulos de entrada son de giro libre.

Es su parte superior, el vario 800, es terminado con un domo telescópico de 600mm de diámetro el cual le da un acceso fácil a la base cuadrada que mide 800x800mm.

Las cámaras Vario 800 pueden ser instaladas bajo tres tipos de configuraciones: esquina, lateral y central.

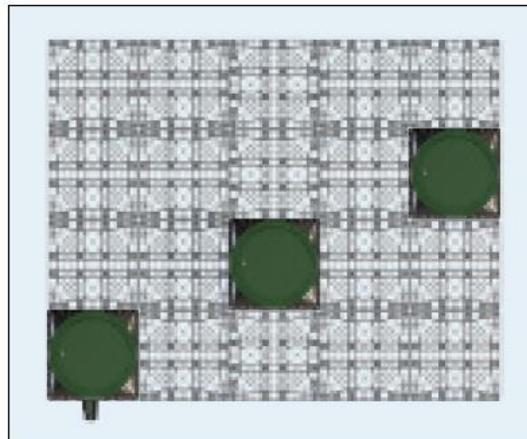


Ilustración 6. Tipos de ubicación, Vario 800 Flex

Cuándo son utilizados como pretratamiento, al interior de la cámara se instala un filtro, cuyo espesor de la malla varía según el diámetro nominal de la tubería de entrada y el uso (infiltración o asentamiento, doméstico o industrial)

Tabla 2. Tipos de filtros, Vario 800 Flex

Tipo de filtro	Ilustración	Material	Espesor de la malla	Volumen de sólidos
A: DN 400 (16")		PP	0.35 mm (0.01")	15 L (4 US gal.)

Tipo de filtro	Ilustración	Material	Espesor de la malla	Volumen de sólidos
B: DN 600 (24")		Acero inoxidable	0.75mm (0.03")	25 L (6.6 US gal.)
C: Filtro de infiltración		Galvanizado	<0.5mm (0.01")	20 L (5.3 US gal.)
		PP	0.35mm (0.01")	
D: Filtro de asentamiento		PP	0.35mm (0.01")	17 L (4.5 US gal.)

1.2.6.3.1.1 Tipo de tecnología de filtración

1.2.6.3.1.1.1 Filtro universal externo



Ilustración 7. Filtro universal de uso externo

Cuenta con una conexión de entrada, el agua que ingresa al tanque pasa por el filtro antes de salir por el colector de mayor profundidad. Adicionalmente tiene un colector de salida de emergencia o rebose.

Tabla 3. Dimensiones del filtro universal de uso externo

Dimensiones de las conexiones	
Entrada	273 -723 mm (10.7 – 28.5")
Salida	544 – 944 mm (21.4 – 37.2")
Rebose	273 -723 mm (10.7 – 28.5")

- EL rendimiento hidráulico es del 100 por ciento, no cuenta con control de caudales pico, pero es ideal para instalación en drenajes de techos pequeños.
- El espesor de la malla es de 0.35mm (0.01")
- La profundidad de la instalación puede variar entre 600 y 1050mm.
- La diferencia en cotas bateas de las tuberías de entrada y salida debe ser mínimo de 270mm
- El caudal máximo que puede soportar es de 5.5L/seg. Para conexiones de DN100

1.2.6.3.1.1.2 Filtro universal externo industrial



Ilustración 8. Filtro universal externo industrial

El lado izquierdo de la imagen permite apreciar en la parte superior el colector de entrada al tanque y en la parte inferior el colector de salida, después de que el agua ha pasado por el filtro. Al lado derecho está el colector de rebose o emergencia.

Tabla 4. Dimensiones filtro universal externo industrial

Dimensiones de las conexiones		
Entrada	DN 150 (6")/ 200 (8")	395 – 962 mm (15.6 – 37.9")
Salida	DN 150 (6")	624 – 1191 mm (24.6 – 46.9")
Rebose	DN 150 (6")/ 200 (8")	395 – 962 mm (15.6 – 37.9")

- El caudal máximo de trabajo es de 29.5L/s para conexiones de DN 200 y de 16 L/seg. para conexiones de DN 150
- La profundidad de instalación es variable, puede estar entre 703 – 1270 mm (26.7 – 50.0 “)
- Sólo se requiere una diferencia de nivel de 229 mm entre la salida y la entrada
- Puede soportar cargas peatonales y vehiculares
- El diámetro nominal del pozo es de 600mm
- El espesor de la malla es de 0.75mm (0.03”)

1.2.6.3.1.1.3 Filtro para pozo de infiltración



Ilustración 9. Filtro para pozo de infiltración

En este caso los filtros están ubicados en la parte superior del elevador del pozo, cuenta con una sola salida de emergencia o rebose, la entrada del agua es por infiltración, en la parte superior del pozo, las paredes son herméticas. Tanto el agua que sale por rebose como el agua infiltrada pasan por el proceso de filtración.

Tabla 5. Dimensiones filtro para pozo de infiltración

Dimensiones de las conexiones	
Salida	245 – 725 mm (9.6 – 28.5")

- Es un tratamiento de 3 etapas: filtro de gruesos, filtro de finos (0.35m) y zona de sedimentación.
- Retiene los contaminantes que puedan afectar el proceso de infiltración.
- Ideal como elemento de desbordamiento de zanja
- Resistente a cargas vehiculares de hasta 3.5 toneladas
- Profundidad de instalación variable, de 570 a 1050 mm (22.4 – 41.3")
- Caudal máximo de 5.5L/seg. para DN 100 (4") y 16L/s para DN 150 (6")
- Conexiones de DN 100 (4") y DN 150 (6")

1.2.6.3.1.1.4 *Filtro de sedimentación*



Ilustración 10. Filtro de sedimentación

La entrada de la tubería, en el extremo tiene terminación en codo de 90°, el cual dirige el flujo de agua hacia la malla de filtración, el fondo del tanque hace las veces de zona de sedimentación, la salida, tiene en su extremo inicial un accesorio TEE es cual funciona como separador inmerso y garantiza que los sólidos sedimentados no salgan del tanque por el colector.

Tabla 6. Dimensiones filtro de sedimentación

Dimensiones de las conexiones	
Entrada	380 - 1080 mm (15 – 42.5")
Salida	630 – 1330 mm (24.8 – 52.4")

- Profundidad de instalación variable: 900 – 1600 mm (2' 11.4" – 5' 3")
- Resistente a cargas peatonales y viales de hasta 3.5 toneladas
- Máximo caudal soportado de 16L/s
- Conexiones de DN 150 (6")

1.2.6.3.2 Ventajas

- Fácil inspección, permite acceder sin problemas a todas las celdas.
- Puede tener varios usos: pozo de inspección, pozo de conexión de entrada de agua, pozo de filtración.
- Resiste camiones de hasta 60 toneladas de peso para una cobertura de tierra de 800mm.
- Tiene superficies de conexión de hasta DN400.
- El acceso es amplio.
- No requiere excavación adicional con respecto a la realizada para la instalación del tanque.
- Los canales de inspección del sistema vario 800 flex, son perfectamente compatibles con las celdas del mismo fabricante Ecobloc.
- Las dimensiones del cámara vario 800 flex permiten su libre posicionamiento dentro del sistema Ecobloc.
- Sus partes son apilables lo que permite ahorro de espacio durante las etapas de transporte y almacenamiento temporal.

1.2.6.3.3 Desventajas

- No cuentan con filtros de grandes profundidades, mayores de 3.0 metros.
- El mantenimiento es frecuente y requiere de una persona dedicada a su continua inspección.

1.2.6.3.4 Recomendaciones de operación y mantenimiento

Para una fácil y muy acertada inspección, se recomienda que exista una alineación entre los pozos de inspección del tanque como se muestra en la imagen, formando un túnel continuo. El acceso se da, por lo general, a través de la cara interna de DN200 (8"). Las celdas Ecobloc tiene una estructura interna que permite la inspección y limpieza de los elementos a lo largo de la zanja permanente además de que garantiza una buena iluminación.

Los filtros son removibles para que su vaciado y lavado sea sencillo, a través de los túneles de inspección se pueden ingresar elementos de inspección por CCTV y jets de limpieza con agua a presión para remover cualquier sedimento que se haya escapado de los sistemas de filtración.

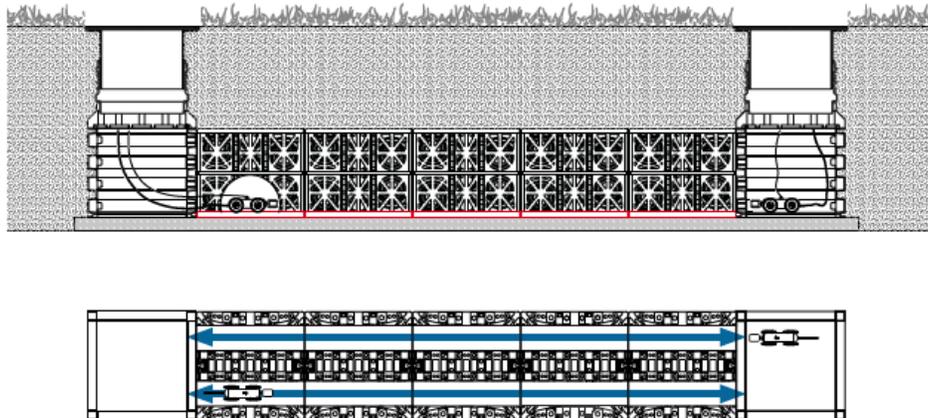


Ilustración 11. Túnel de inspección

1.2.6.4 Separador hidrodinámico HidroBox



Ilustración 12. HidroBox

Empresa: HidroStank

Lugar de origen: España

Página web (fuente de información): www.hidroStank.com

1.2.6.4.1 Descripción

Un separador hidrodinámico garantiza la eliminación de sólidos aceites y grasas, retiene todos los contaminantes capturados inclusive en caudales altos; la eliminación de los contaminantes capturados es muy sencilla pues los aísla en el fondo del tanque, por lo general, en seco.

1.2.6.4.1.1 Principios de funcionamiento

- Se introduce el flujo dentro de la cámara tangencialmente para crear un vórtice de baja energía.
- Los sedimentos se depositan en el fondo del tanque.
- Los sólidos flotantes y aceites ascienden a la superficie.

1.2.6.4.1.2 Aplicaciones

- Pretratamiento para la recogida / reutilización de aguas pluviales.
- Pretratamiento para infiltración y bioretención.
- Reconstrucción urbana.
- Protección de estanques y lagos contra los sedimentos y basuras.
- Protección de bombas.

1.2.6.4.1.3 Dimensiones disponibles

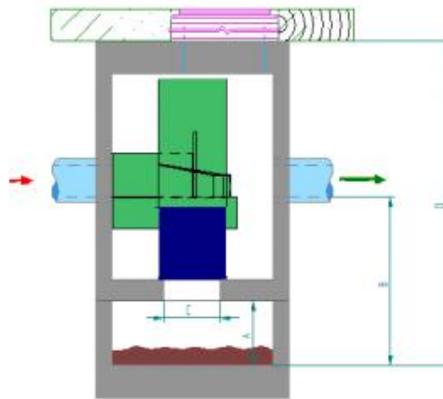


Ilustración 13. Dimensionamiento del HidroBox

Tabla 7. Dimensiones del HidroBox

Q alivio [L/s]	Volumen depósito [m ³]	Volumen de aceite [L]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
28	0.7	232	610	1,372	533	2,460
43	1.1	376	610	1,600	533	2,460
63	1.1	439	610	1,702	533	2,735
151	1.5	994	610	2,058	533	3,090
297	4.5	2149	610	2,642	711	3,730

1.2.6.4.2 Ventajas

- La separación hidrodinámica es un método rentable de eliminación de contaminantes
- Se reduce el tamaño de las estructuras de pretratamiento
- El mantenimiento es sencillo

1.2.6.4.3 Desventajas

- Requiere de personal capacitado para su instalación, operación y mantenimiento.
- Sólo existen dos profundidades de instalación lo que limita su flexibilidad de conexiones a redes de alcantarillado existentes y/o de altas pendientes.

1.2.6.4.4 Caso de éxito

Se instaló en el 2017 un separador hidrodinámico HidroBox a la orilla de un estanque de retención en el condado de Pinellas, Florida, la cual sufría de una excesiva contaminación de cigarrillos y otros desechos arrastrados por la escorrentía. Tan solo dos meses después, la orilla del estanque quedó completamente limpia.



Ilustración 14. Estado de la cuenca antes del HidroBox



Ilustración 15. Estado de la cuenca después del HidroBox

1.2.6.4.5 Recomendaciones de operación y mantenimiento

Se usa un dispositivo comercial tipo vector para remover los sedimentos que se encuentran en el fondo del equipo y la basura flotante capturada en la parte superior. La limpieza por lo general se realiza una o dos veces al año, dependiendo de la carga contaminante del lugar.

1.2.6.5 Hydro Dry Sreen

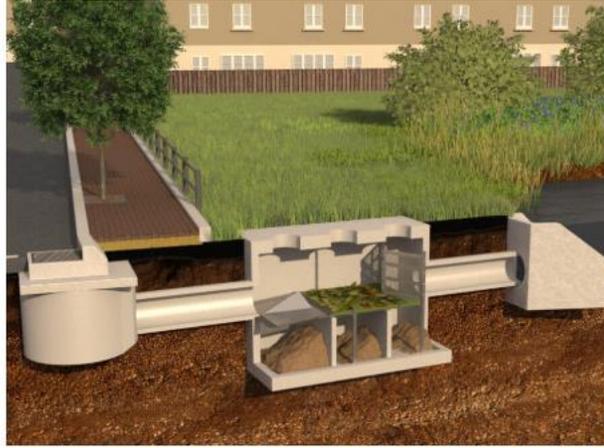


Ilustración 16. Hydro Dry Screen

1.2.6.5.1 Descripción

El principio de funcionamiento es la reducción de la velocidad del flujo de agua conducido a través de una tubería para que los sólidos allí presentes se asienten fuera de él.

- En la medida en que el flujo entra a la cámara pasa por un proceso de difusión y reduce su velocidad.
- Los sólidos gruesos se transportan alrededor del difusor y se capturan en la pantalla horizontal, donde se mantienen secos.
- A medida que el flujo encuentra la primera pared deflectora, la velocidad vuelve a disminuir, lo que permite que las partículas suspendidas se asienten.
- Otros sólidos en la corriente de flujo golpean la pared del deflector y se asientan en el sumidero, donde la presencia del deflector impide el movimiento adicional.
- El flujo continúa a través de las siguientes dos cámaras deflectoras, donde las partículas más pequeñas se depositan.

1.2.6.5.1.1 Componentes del sistema

- Conexión a tubería de entrada

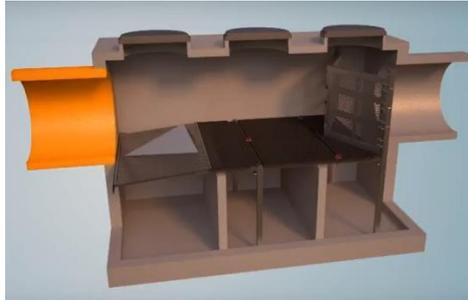


Ilustración 17. Tubería de entrada, Hydro Dry Screen

- Sumidero de almacenamiento de sedimentos

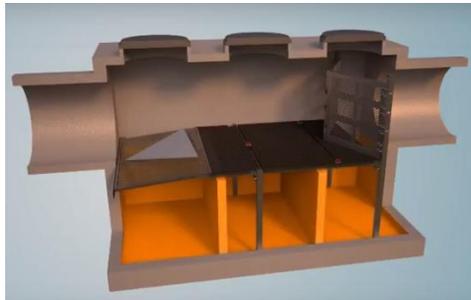


Ilustración 18. Sumidero de almacenamiento, Hydro Dry Screen

- Pantalla de secado (altura ajustable)



Ilustración 19. Pantalla de secado, Hydro Dry Screen

- Vertedero de pantalla vertical

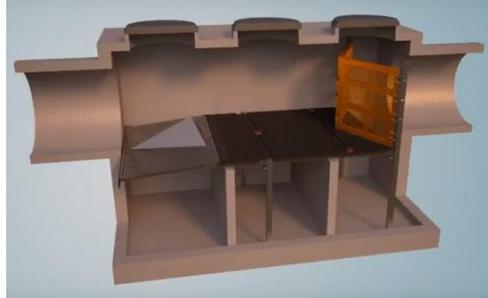


Ilustración 20. Vertedero vertical, Hydro Dry Screen

- Pantalla en rampa

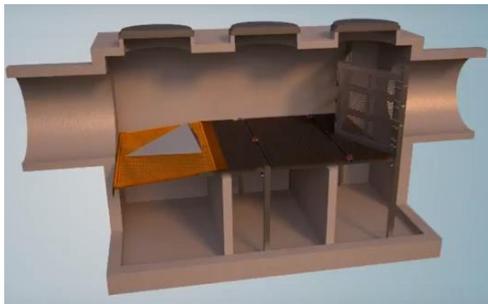


Ilustración 21. Pantalla, Hydro Dry Screen

- Difusor de flujo patentado

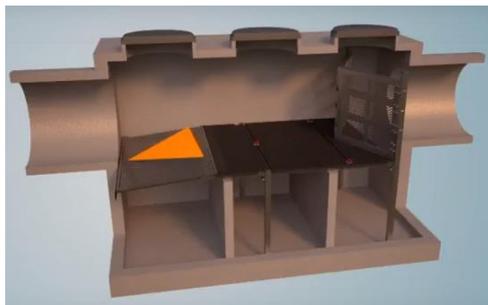


Ilustración 22. Difusor, Hydro Dry Screen

- Conexión para tubería de salida

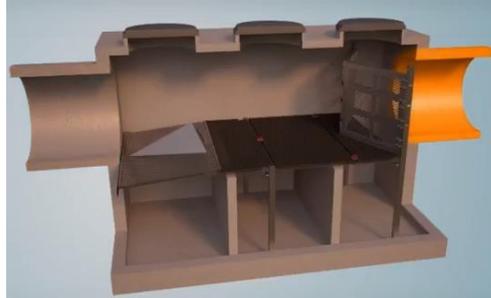


Ilustración 23. Tubería de salida, Hydro Dry Screen

1.2.6.5.1.2 Dimensiones

Las dimensiones que se exponen a continuación corresponden al ancho y alto del tanque, el largo es estándar de 7.0m.

- 4 x 8 ft / 1.2 x 2.4 m
- 6 x 12 ft / 1.8 x 3.7 m
- 8 x 14 ft / 2.4 x 4.3 m
- 10 x 16 ft / 3.0 x 4.9 m
- 12 x 20 ft / 3.7 x 6.1 m

1.2.6.5.1.2.1 Capacidades

Tabla 8. Capacidad Hydro Dry Screen

Capacidad de tratamiento	4.500 L/s
Caudal de trabajo típico	300 L/s – 2200 L/s
Capacidad de almacenamiento en pantalla	26.8 m ³
Capacidad de almacenamiento de sedimentos	27.1 m ³

1.2.6.5.1.2.2 Aplicaciones

- Zonas con tuberías grandes y picos de caudales altos.
- Instalaciones que requieran una pérdida de cabeza hidráulica pequeña, es decir, perfiles de drenaje de baja pendiente.
- Instalaciones superficiales con un nivel freático alto.
- Áreas con problemáticas de basuras.

1.2.6.5.2 Ventajas

- La altura de la pantalla seca es ajustable
- El mantenimiento es sencillo
- Cuenta con llaves de ajuste de los tornillos, no se requiere de herramientas adicionales.
- La pantalla puede tener hasta un 80 por ciento de saturación sin afectar el drenaje aguas arriba.

1.2.6.5.3 Desventajas

- Utiliza más espacio que otros tipos de desarenadores

1.2.6.5.4 Recomendaciones de operación y mantenimiento

La remoción de sólidos y líquidos para limpieza se recomienda sea efectuada con el uso de un vector, cada Hydro Dry Screen tiene tres perforaciones de acceso desde la superficie, y las pantallas tanto de secado como la rampa que sostiene el difusor pueden ser desatornilladas para que la manguera del vector pueda ingresar con comodidad y llegar a todos los rincones del tanque.



Ilustración 24. Limpieza sólidos, Hydro Dry Screen



Ilustración 25. Limpieza líquidos, Hydro Dry Screen

1.2.6.6 *Optimax Filter*



Ilustración 26. Optimax filter

Empresa: Rain Harvest Systems

Lugar de origen: Estados Unidos

Página web (fuente de información): www.rainharvest.com

1.2.6.6.1 Descripción

Es un filtro de agua lluvia para instalaciones residenciales o comerciales pequeñas, proporciona una solución de mantenimiento fácil y económica ya que permite la remoción y el reemplazo del filtro con la frecuencia que se considere necesaria. Puede ser instalado a profundidades variables desde 22 a 44". Solo hay una diferencia de altura entre la entrada y la salida de 7".

1.2.6.6.1.1 Rendimiento

1.2.6.6.1.1.1 Prueba # 1

Se probó el sistema con un flujo entrante de 0.354gal/seg que corresponde a un evento de lluvia fuerte de 10.7 gal/seg por acre en una cubierta de 1500 ft² y se obtuvo una tasa de rendimiento de 99.8%.



Ilustración 27. Prueba #1, Optimax filter

1.2.6.6.1.1.2 Prueba # 2

Se probó el sistema con un flujo entrante de 0.827gal/seg que corresponde a un evento de lluvia fuerte de 10.7 gal/seg por acre en una cubierta de 3400 ft² y se obtuvo una tasa de rendimiento de 96.5%



Ilustración 28. Prueba #2, Optimax filter

1.2.6.6.1.2 Prueba # 3

Se probó el sistema con un flujo entrante de 1.701gal/seg que corresponde a un evento de lluvia fuerte de 10.7 gal/seg por acre en una cubierta de 7000 ft² y se obtuvo una tasa de rendimiento del 89%



Ilustración 29. Prueba #3, Optimax filter

1.2.6.6.2 Ventajas

- De los sistemas revisados, es el único que propone limpieza automatizada y sin necesidad de personal.
- Garantiza un caudal de entrada al sistema, completamente limpio. Los excesos no entran al tanque bajo ninguna circunstancia.

1.2.6.6.3 Desventajas

- Los sedimentos separados de la corriente de agua, de no ser retirados inmediatamente después del evento van a salir por la conexión de rebose.

1.2.6.6.4 Recomendación de operación y mantenimiento



Ilustración 30. Cabezal rociador de limpieza, Optimax filter

En la parte superior de la conexión de la tubería de entrada, se puede instalar un cabezal rociador para proporcionar una limpieza manos libres del filtro. El cabezal cuenta con 16 chorros de agua de alta potencia; el proceso puede ser automatizado completamente extendiendo la red de la zona de riego hasta la entrada del rociador y programar intervalos regulares, también puede ser programado manualmente.

1.2.6.7 Vortex settling Tank



Ilustración 31. Vortex settling tank

Empresa: Ecol-unicon

Lugar de origen: Polonia

Página web (fuente de información): en.ecol-unicon.com

1.2.6.7.1 Descripción

Son tanques de sedimentación utilizados en el pretratamiento de agua lluvia y la sedimentación de sólidos suspendidos de densidad mayor a 1kg/dm^3 , adicionalmente garantiza la separación de derivados del petróleo.

1.2.6.7.1.1 Operación

Para su funcionamiento, los tanques utilizan tanto la fuerza de la gravedad como la fuerza centrífuga. La unión de estas dos fueras garantiza que haya una alta eficiencia de separación de sólidos suspendidos inclusive bajos cargas hidráulicas altas. Lo anterior permite la reducción de los tamaños requeridos.

En el interior del tanque, hay un deflector direccional que ocasiona permanentemente el movimiento rotatorio de las aguas residuales. La salida de la cámara de vórtice está en el tubo central.

Tabla 9. Dimensiones Vortex Settling Tank

Capacidad Q_{\max} [L/s]	Diámetro interno del tanque [mm]	H_w [mm]	A_{\min} [mm]	Diámetro máximo de la tuberías de entrada y salida [mm]	Capacidad volumétrica de sedimentación [L]	Capacidad volumétrica de almacenamiento de aceites [L]
60	1000	900	890	400	580	350
100	1200	1710	1090	500	1750	790
150	1200	1710	1090	500	1750	790
200	1200	1710	1090	500	1750	790
250	1200	2100	970	500	2190	1350

1.2.6.7.2 Ventajas

- Es de los sedimentadores de mayor capacidad referenciados hasta el momento.
- Puede utilizarse para el pretratamiento del agua lluvia proveniente de calles, parqueadero, zonas industriales, estaciones de petróleo, áreas de almacenamiento y bodegas, garajes, lavaderos de carros, etc.



1.2.6.7.3 Desventajas

- No es muy eficiente en tanques de almacenamiento pequeños.

1.2.6.7.4 Recomendaciones de operación y mantenimiento

- Inspección del dispositivo
 - Control visual de la tapa y del pozo de inspección.
 - Inspección de la cantidad de sólidos suspendidos acumulados y / o de la película de aceite o espesor de la capa de grasa
 - Control visual de los componentes: deflectores, vertederos, tuberías, sección de láminas.
- Detalles de Inspección y limpieza
 - Cuando la capacidad de almacenamiento de sólidos suspendidos se llena a 1/2 y hasta 2/3, el dispositivo debe someterse al proceso de limpieza.
 - La limpieza debe incluir las siguientes actividades:
 - Eliminación de desechos sólidos flotantes de gran tamaño.
 - Bombeo de aguas residuales, aceites, grasas, lodos y arena acumulados en el dispositivo.
 - En el caso de los separadores de aceite, lavado por corriente de agua intensiva bajo presión. Se debe hacer la descarga de agua aceitosa en el sistema de tratamiento de aguas residuales contaminadas con aceites.
- Frecuencia
 - Dos veces por año

1.2.6.8 First defense vortex separator

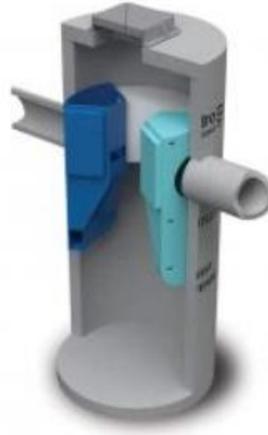


Ilustración 32. First defense vortex separator

Empresa: Hydro International

Lugar de origen: Estados Unidos

Página web (fuente de información): www.hydro-int.com

1.2.6.8.1 Descripción

Separador de vórtice hidrodinámico para la eliminación efectiva de sedimentos, basura y aceite de las aguas superficiales. Los contaminantes capturados se guardan dentro del dispositivo, manteniendo las áreas públicas libres de contaminantes dañino, es adecuado para el control de la contaminación en la fuente en las cuencas de tamaño pequeño a mediano, puede utilizarse como tratamiento de aguas superficiales en un pozo de tamaño estándar. Contiene un bypass integral que transmite flujos de eventos de lluvia grandes e infrecuentes directamente al canal de salida, así se evitan las turbulencias en la cámara e impide que los contaminantes capturados se eliminen.

Está compuesto de nueve partes: (1) canal de entrada, (2) colector de entrada, (3) puesto de extracción de flotantes, (4) cámara prefabricada, (5) bypass interno, (6) canal de salida, (7) colector de salida, (8) zona de almacenamiento de aceites y flotantes y (9) sumidero de almacenamiento de sedimentos.

1.2.6.8.1.1 Dimensionamiento

Tabla 10. Dimensiones First Defense Vortex Separator

Diámetro del pozo	Tasa de tratamiento [L/s]	Capacidad hidráulica [L/s]	Capacidad de almacenamiento de aceites	Capacidad de almacenamiento de sedimentos
1.2	29	120	681	0.76
1.8	90	510	1590	2.7

La tasa de tratamiento es basada en la eliminación del 80% de arenas medias a finas mientras que la capacidad hidráulica es el caudal máximo que puede pasar a través de la cámara sin que haya represamiento aguas arriba.

1.2.6.8.2 Ventajas

- El dispositivo puede ser ajustado a cámaras de inspección existentes, o nuevas siempre y cuando tengan los diámetros referenciados.
- Puede ser utilizado como separados de aceites además de sedimentos. Excelente para escorrentía proveniente de vías.

1.2.6.8.3 Desventajas

- Cuando el caudal de entrada al sistema supera la tasa de tratamiento, los sedimentos ingresan al tanque de almacenamiento de agua en lugar de ser rebosados.

1.2.6.8.4 Recomendaciones de operación y mantenimiento

Cuenta con un eje circular ubicado centralmente a través del cual se puede acceder al sumidero de almacenamiento de sedimentos con una manguera de aspiración. El diámetro de abertura de este eje de acceso es de 15 pulgadas de diámetro. Por lo tanto, la boquilla permite la instalación de cualquier manguera utilizada para el mantenimiento debe tener menos de 15 pulgadas de diámetro.

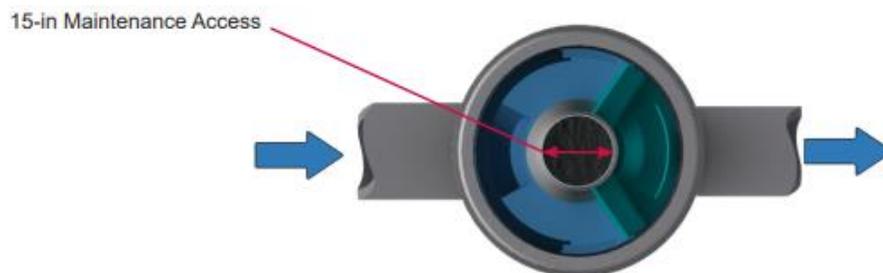


Ilustración 33. Puerto de mantenimiento y limpieza del First Defense Vortex Separator

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Definiciones

2.1.1 Desarenador

Estructura hidráulica cuyo objetivo es la remoción de partículas, de un rango de tamaños definido, que vienen suspendidas en un flujo de agua superficial, para evitar que ingresen a estructuras posteriores tales como procesos de tratamiento, pequeñas centrales hidroeléctricas, aducciones u otras estructuras. (López, 2009)

2.1.1.1 Tipos de desarenadores

2.1.1.1.1 Convencional

Los desarenadores convencionales son de flujo horizontal, en ellos el asentamiento de las partículas se logra reduciendo la velocidad del flujo. Sus partes principales son: transición de entrada, cámara de sedimentación, vertedero, compuerta de purga y canal de salida o bypass. Típicamente se tienen forma rectangular, y la longitud depende tanto de la capacidad para la que se está diseñando, la disponibilidad de espacio y las características geográficas de la zona. Los diseños se concentran en el volumen útil, que es la sección dónde se da lugar a la sedimentación. (López, 2009)

2.1.1.1.2 De flujo vertical

Los desarenadores de flujo vertical, son aquellos en dónde el flujo del agua se da desde la parte baja o inferior del dispositivo hacia la parte superior. Las partículas quedan en el fondo. Son útiles cuando existen limitaciones de espacio. (López, 2009)

2.1.1.1.3 De alta rata

Dentro de los diferentes tipos de desarenadores, son lo de mayor eficiencia, ocupan menor espacio y en algunos casos pueden ser más económicos con respecto a los convencionales. Para lograr éstas cualidad se utilizan varias cámaras, divididas por mamparas, láminas planas inclinadas, que obligan al fluido que los atraviesan a incrementar la línea de recorrido y disminuir su velocidad. (López, 2009)

2.1.1.1.4 Tipo vórtice

Éste tipo de desarenación, se logra induciendo el fluido a formar un vórtice con energía mecánica. Los sólidos son dirigidos por el vórtice al fondo de la estructura. Usualmente cuentan con un fondo plano, el cual puede ser limpiado a través de una pequeña abertura que permite la remoción de arena y otros sólidos. (López, 2009)

2.1.2 Sedimentador

Contenedor cuya función es el almacenamiento de agua con sólidos hasta lograr la separación, por gravedad, de las partículas suspendidas en la totalidad del volumen de agua.

2.1.3 Sedimentación

Proceso físico mediante el cual pequeñas partículas de sólidos son depositadas y asentadas por gravedad en el fondo de un líquido y forman una capa removible. (Organización panamericana de la salud, 2005)

2.1.4 Sólidos sedimentables

Es la fracción del total de los sólidos contenidos en cierto volumen de agua que tienen la facultad de ser asentados por la acción de la gravedad en un tiempo determinado. (Organización panamericana de la salud, 2005)

2.1.5 Arenas

Conjunto de las partículas disgregadas, de rocas silíceas y de otro tipo, que miden de 0,063 a 2 milímetros. (Organización panamericana de la salud, 2005)

2.1.6 Cámaras o pozos de inspección

Estructura hidráulica ubicada en las intersecciones de tuberías de alcantarillados con el objetivo de evitar taponamientos, excesos de velocidad y garantizar el flujo adecuado en la red. Permite, además, el acceso a los sistemas de alcantarillado desde la superficie para supervisión y mantenimiento. (Cambridge University, 2019)

2.1.7 Tanques de almacenamiento de agua

2.1.7.1 Tanques de agua potable

Grandes contenedores para la recolección y almacenamiento de agua potable. Fundamentales en las redes de abastecimiento de agua de las ciudades para regular las condiciones de demanda por variaciones horarias. (Cambridge University, 2018)

2.1.7.2 Tanques de agua lluvia

Grandes contenedores para la recolección y almacenamiento de agua lluvia. Su uso más común es la detención de cierto volumen de agua por un periodo de tiempo definido con el fin de hacer una entrega de caudales controlada a la red de alcantarillado existente. (Cambridge University, 2018)

2.1.7.3 Geosintético

Grupo de materiales fabricados a partir de derivados del petróleo, utilizados para mejorar, cambiar o mantener las características del suelo con el que interactúan. (CIRIA, 2017)

2.1.7.4 Geomembrana

Revestimientos o barreras de líquidos y vapores, fabricadas a partir de polímeros termoestables o termoplásticos. Se considera el material más impermeable que se consigue en la actualidad, sirven como aislante entre distintos medios para impedir filtraciones indeseadas. (CIRIA, 2017)

2.1.7.5 Geotextil

Es un geosintético utilizado en obras civiles, especialmente en las disciplinas de geotecnia e hidráulica. Útil en el manejo de suelos inestables, blandos o en presencia de nivel freático. Dentro de sus principales funciones se encuentran la separación de estratos de suelo evitando la contaminación o mezcla indeseada de materiales, el refuerzo de suelos por su alta resistencia a la tensión, la filtración y drenaje por sus excelentes características hidráulicas.

Dentro de sus procesos de fabricación se pueden identificar dos tipos de geotextiles, los tejidos y los no tejidos. Los tejidos son fabricados mediante la orientación de fibras o cintas planas en dos direcciones. Los no tejidos son fibras entrelazadas aleatoriamente, ligadas mediante procesos mecánicos, térmicos o químicos. (CIRIA, 2017)

2.1.7.6 Celdas plásticas modulares

Son cajas plásticas, con una porosidad del 85% o superior, apilables en cualquier dirección y de alta resistencia estructural diseñadas para la formación de tanques de almacenamiento de agua lluvia. La recolección del agua puede hacerse de manera puntual, sobre el sitio donde se precipita la lluvia, por infiltración o por conexión directa al sistema de alcantarillado pluvial. (PAVCO, 2015)

2.2 Principios hidráulicos en el diseño de sedimentadores primarios

2.2.1 Objetivo

Un tanque de sedimentación primario se diseña e instala con el objetivo de remover partículas de sólidos, típicamente arenas, suspendidas en agua de fuentes tanto puntuales como difusas.

2.2.2 Principio de funcionamiento de un tanque de sedimentación

El principio hidráulico del funcionamiento, en la totalidad de los tipos de sedimentadores, es la reducción de la velocidad del flujo de entrada al tanque, entre mayor sea la ésta reducción, más partículas y de menor tamaño serán sedimentadas. La velocidad a la cual las partículas de menor



tamaño, que se pretenden sedimentar, descienden hacia el fondo de la estructura, es denominada “velocidad de sedimentación”.

La cantidad de partículas recolectadas en el fondo del tanque, depende no solamente de la velocidad de sedimentación y su diferencia con la velocidad real del agua dentro del tanque, sino también de otros factores como el tamaño y forma, tanto del tanque como de las partículas, tiempo de detención e inclusive la temperatura del agua. (Li, Kang, Sim-Linm, & Kayhanian, n.d.)

2.2.2.1 Velocidad de sedimentación

La velocidad de sedimentación de una partícula es definida por la Ley de Stoke. Esta ecuación, puede aplicarse en partículas pequeñas, simétricas, contenidas en un fluido. Considera las fuerzas que actúan sobre la partícula mientras esta se hunde a lo largo de una columna de líquido bajo la acción de la gravedad.

La fuerza que se opone a la caída es igual a $6\pi r\eta v$ donde r es el radio de la partícula, η es la viscosidad del fluido y v es la velocidad de caída. En contraposición, la fuerza actuando a favor de la caída es igual a $\frac{4}{3}\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g$, en donde ρ_1 corresponde la densidad de la partícula, ρ_2 es la densidad del líquido y g es la constante gravitacional. (Britannica, 2014)

Cuando la velocidad de caída es constante, las fuerzas actuando sobre la partícula son iguales, de esta manera, igualando las expresiones y despejando la velocidad, Stokes encontró la siguiente expresión:

$$v = \frac{2}{9\eta}(\rho_1 - \rho_2)gr^2$$

Ecuación 1. Velocidad de sedimentación (Anupaju, 2016)

2.2.2.2 Velocidad de salida

La velocidad de rebose se estima como el volumen de agua que ingresa al sistema por unidad de tiempo, o caudal de entrada, por unidad de área de salida. Para garantizar que las partículas sean sedimentadas, la velocidad de salida debe ser menor que la velocidad de sedimentación.

2.2.2.3 Velocidad de transición

La velocidad con la que el agua viaja desde la entrada al tanque de sedimentación hasta la salida del mismo. Debe ser una velocidad baja.

2.2.2.4 Periodo de detención

Corresponde al tiempo que transcurre desde que el agua entra al sistema hasta que sale. Entre mayor sea éste valor más eficiente será el sistema.

2.2.2.5 Eficiencia

La eficiencia de un sedimentador, es la relación entre la máxima concentración de sólidos a la entrada versus la máxima concentración de sólidos en el agua a la salida. Este valor depende netamente de la velocidad de sedimentación y la de salida.

2.3 Normatividad respecto al uso de sedimentadores como parte de la red de alcantarillado pluvial

2.3.1 Cuerpos responsables de la normatividad en el mundo

2.3.1.1 Reino Unido

Los principales cuerpos regulatorios en el Reino Unido, en términos de manejo de agua lluvia y sus impactos, son:

- The Environmental Agency (Inglaterra)
- The Scottish Environment Protection Agency – SEPA (Escocia)
- Natural Resources Wales (Gales) (Lemont, 2018)

2.3.1.1.1 Flood Water Management Act (2010) – Legislación Gubernamental

Es el estatuto utilizado por las autoridades locales para ejercer el rol de “Lead Local Flood Authorities” (LLFAs), quienes juegan un rol importante en la toma de decisiones en cuanto a implementación, operación y mantenimiento de estrategias locales para manejo de inundaciones, es su área de administración.

Los LLFAs también actúan como consultores estatutarios en proyectos que involucren la intervención de grandes áreas de drenaje. (Lemont, 2018)

2.3.1.1.2 Department of Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA)

Es el encargado de establecer una guía para las descargas de agua superficiales y subterráneas. Lista los permisos medioambientales que pueden aplicar en cada caso particular. (Lemont, 2018)

2.3.1.1.3 Code of Practice for Surface Water Management for Development Sites (2013) – BS 8582

Da recomendaciones sobre la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de sistemas de gestión de aguas superficiales para nuevos desarrollos y sitios de redesarrollo en cuanto a:

- Minimizar y/o mitigar las inundaciones y otros riesgos ambientales derivados de la escorrentía.

- Maximizar los beneficios sociales y ambientales potenciales derivados del uso de la escorrentía de agua superficial para proteger y mejorar los recursos y suministros de agua locales

A pesar de las diferencias regionales en los enfoques para la gestión del riesgo de inundación, esta norma se aplica a todos los territorios del Reino Unido y todas las autoridades regionales. Inglaterra, Gales, Escocia e Irlanda del Norte participaron activamente en la redacción de este estándar. (Lemont, 2018)

2.3.1.1.4 The Construction Industry Research and Information Association (CIRIA)

Se considera como el líder nacional de drenaje sostenible. Su manual de SuDS es ampliamente aceptado como una guía completa para el diseño y requisitos de este tipo de sistemas. (Lemont, 2018)

2.3.1.1.5 The Chartered Institution of Water and Environmental Management (CIWEM)

Cuenta con un “Grupo de Drenaje Urbano” el cual se encarga de la promoción de las mejores prácticas en éste campo de la ingeniería a través de talleres y conferencias técnicas. (Lemont, 2018)

2.3.1.1.6 The Association of Drainage Authorities (ADA)

Representa las autoridades a nivel de drenaje de agua y gestión de riesgos de inundaciones, ofrece consultores, contratistas e interviene en la selección de proveedores como miembros asociados. (Lemont, 2018)

2.3.1.2 Estados Unidos

2.3.1.2.1 United States Environmental Protection Agency (EPA)

Clean Water Act, fue la primera legislación gubernamental en los Estados Unidos en exigir el control de las descargas de agua lluvia según el “National Pollutant Discharge Elimination System” (NPDES) en 1972.

Para cumplir con el CWA, las autoridades de la industria y la construcción debían crear e implementar un plan de medidas de control del manejo de agua lluvia (conocidos como Best Management Practices BMP). Dentro de las BMP están soluciones estructurales como pondaje de detención y otras NO estructurales como el reemplazo de superficies impermeables por pavimentos permeables. (Lemont, 2018)

2.3.1.2.2 US EPA’s Environmental Technology Verification Program (ETV) (1994-2014)

Programa nacional para prueba de productos, en colaboración con entidades sin ánimo de lucro. Trataba de lidiar con la falta de información acerca de la efectividad y longevidad de las BMPs. (Lemont, 2018)

2.3.1.2.3 Water Environment Federations

Cuentan con un grupo de trabajo e investigación denominado “Stormwater Testing and Evaluation of Products and Practices”.

Llena el vacío que genera la falta de evaluación de terceros de las soluciones y casos de estudio en los distintos estados.

Emitió en el 2014 un programa de evaluación de los programas nacionales y ha sido fuertemente apoyado por los entes interesados o stakeholders. (Lemont, 2018)

2.3.1.2.4 Storm Water Solutions

Es una revista online, cuenta con las noticias más recientes dentro del gremio y expone casos de estudio. (Lemont, 2018)

2.3.1.2.5 American Society of Civil Engineers (ASCE)

Es una de las fuentes técnicas de temas referentes al manejo de recursos hídricos más consultadas en el mundo. (Lemont, 2018)

2.3.1.3 Australia

2.3.1.3.1 Cooperative Research Center for Water Sensitive Cities

Trabajan con un amplio rango de socios involucrados en el manejo de agua urbana y el planteamiento de soluciones sostenibles. Hacen también trabajo cooperativo con el grupo de investigación nacional CISRO. Se le atribuyen la mayoría de avances en investigación referente al manejo de agua lluvia alcanzado hasta el momento en Australia, especialmente en calidad, almacenamiento y reúso. (Lemont, 2018)

2.3.1.3.2 CISRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)

En la actualidad cuenta con una gran cantidad de “laboratorios urbanos” en toda Australia que permite a los investigadores determinar las interacciones entre factores como la calidad de las aguas pluviales urbanas, la reutilización en el entorno urbano, las medidas de sostenibilidad, consumo de energía y aceptación social, así como la medición y valoración de las aguas pluviales. (Lemont, 2018)

2.3.1.3.3 Water Environment Research Foundation (Nueva Zelanda)

Expidió una guía de manejo de aguas lluvias in situ (2004). Permite que el gobierno local, los diseñadores y los propietarios de viviendas diseñen sistemas de aguas pluviales para reducir la contaminación y las inundaciones. (Lemont, 2018)

2.3.1.3.4 Building Code Clause E1

Norma de eliminación del agua de lluvia de superficies externas. Establece requisitos de rendimiento para sistemas de drenaje y soluciones aceptables. (Lemont, 2018)

2.3.2 Cuerpos responsables de la normatividad en Colombia

En Colombia la normatividad vigente en el ámbito de SuDS, se resume en la Norma Técnica NS-166, la cual involucra varias entidades del sector público bajo diferentes estatutos:

2.3.2.1 Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

Se encarga de los lineamientos en cuanto a construcción general, geotecnia, gestión ambiental y diseño.

En junio del 2017, la EAAB, en conjunto con la Universidad de los Andes, produjo la primera Cartilla Técnica de SuDS en Colombia; en ella se establece una guía de selección de las tipologías y/o tecnologías de SuDS que más se adapten a las condiciones de Bogotá D.C.

2.3.2.2 Ministerio de ambiente

Hace referencia al uso de SuDS en decreto 1076 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo sostenible.

“El mantenimiento dependerá directamente de quien decida implementar este tipo de medidas (tanques de almacenamiento de agua lluvia), debe proveerse un sistema adecuado que permita la remoción de grasas y filtración de sedimentos con el fin de mejorar la calidad del agua afluyente para su uso posterior.” (Minambiente, 2019)

2.3.2.3 Ministerio de vivienda

Establece la resolución 0330 de 2017: por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.

2.3.2.4 INVÍAS

Produjo el Manual de Drenaje para carreteras.

3 DESARENADORES

3.1 Antecedentes de los dos desarenadores

Una vez al año, PAVCO, en conjunto con su fundación y otras entidades líderes en el gremio de la hidráulica, la protección del medio ambiente y los recursos hídricos como: CECODES, el Ministerio de Ambiente, UNICEF, la Universidad de los Andes, la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia y la Red de Jóvenes de Ambiente; les dan la oportunidad a jóvenes colombianos, con ideas innovadoras, de proponer soluciones que ayuden al cuidado y la protección de los recursos hídricos.

En su más reciente edición, el premio del agua, se enfocó en el mejoramiento de la propuesta de PAVCO® de manejo sostenible de aguas lluvias, AQUACELL®, específicamente en el proceso de pretratamiento del afluente previo a su entrada a las celdas, el cual, como se mencionó en el literal 3.6 del presente documento se logra mediante la sedimentación de los sólidos suspendidos en el agua dentro de una cámara de inspección de 1000mm de diámetro cuya base no cuenta con entradas ni salidas (base tipo tanque) sino que su elevador es perforado a la altura a la que los colectores de la red de alcantarillado se ajustan por diseño.

Como principios de diseño e instalación, se recomienda que la diferencia entre las cotas bateas de las tuberías de entrada y salida del tanque sea como mínimo de 20cm, asimismo en el extremo de la tubería de entrada, dentro del tanque, se plantea la instalación de un codo de 90° mientras que en el extremo de la tubería de salida del tanque desarenador con conexión a las celdas, se recomienda la instalación de una TEE. Lo anterior con el fin de garantizar que la línea de flujo del agua vaya desde la entrada al desarenador en dirección al fondo, exista una reducción significativa en la velocidad del flujo y finalmente que la mayor cantidad de sólidos suspendidos queden depositados en el fondo.

Sin embargo, al día de hoy, se desconoce con precisión la eficiencia de las cámaras desarenadoras en función del caudal que reciben.

Por lo anterior, y teniendo en cuenta que el manejo sostenible de aguas lluvias se ha convertido en uno de los temas de mayor importancia en el desarrollo urbanístico e hidráulico de las ciudades, la temática del premio del agua para el 2018 impulsó a sus participantes a diseñar una nueva propuesta de desarenación para cámaras de inspección plásticas de 1000mm de diámetro. Dentro de las propuestas recibidas se evaluaron varios criterios como: innovación, sustentabilidad, principios hidráulicos y presentación. Los modelos de las dos propuestas finalistas fueron construidos durante el segundo semestre del 2018 y serán probados en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes para definir mediante pruebas reales cuál es el desarenador con mayor eficiencia.

3.2 Descripción de los modelos

Dentro de los dos modelos finalistas, se tienen dos tipos de desarenadores. El primero es un desarenador tipo filtro, diseñado por el estudiante de arquitectura de la Pontificia Universidad Javeriana de Bucaramanga, Carlos Andrés Mariño Quintero, el cual garantiza la remoción de sólidos desde 0,1mm hasta 2mm de diámetro por medio de 4 mayas de distintos calibres. El segundo es un desarenador de mamparas helicoidales, diseñado por el ingeniero Álvaro Josué López Duarte, el cual promete la retención de la totalidad de los sedimentos transportados por un caudal máximo de 5L/s.

3.2.1 Aspectos hidráulicos de los sedimentadores en evaluación

3.2.1.1 Desarenador tipo filtro

Como su nombre lo indica, el principio del funcionamiento de este desarenador es la filtración del agua; para lograrlo propone la instalación dentro de la cámara de inspección de un filtro multicapa, intercambiable y reutilizable. (Mariño, 2018)

3.2.1.1.1 Especificaciones

- Compuesto por un cuerpo plástico de polipropileno (PP) o polietileno (PE)
- Filtración invertida con 4 mallas de acero inoxidable
- Inserción y remoción en forma vertical
- Disposición radial en intervalos de 50 grados

3.2.1.1.2 Detalles de diseño

- Área superficial abierta (superior o inferior) = 263cm^2
- 5 unidades por desarenador = 1315cm^2
- Permite un taponamiento del 40,73% de su área superficial sin afectar el flujo normal del agua

3.2.1.2 Desarenador helicoidal descendente

El propósito del diseño del desarenador helicoidal, es ampliar modularmente el proceso del desarenador básico desarrollando este proceso sobre una rampa helicoidal descendente, aprovechando la gravedad para impulsar el agua a través de los mamparos desarenadores, bajo los principios hidráulicos listados a continuación.

3.2.1.2.1 Flotabilidad

Los sólidos suspendidos en el agua son divididos en dos categorías: los sólidos flotantes y los precipitables. Para lograr una remoción completa, el agua a tratar se obliga a pasar sucesivamente sobre los mamparos bajos que retienen los elementos pesados y bajo los mamparos altos que retienen los elementos suspendidos. (López, 2018)

3.2.1.2.2 Efecto vórtice

Aprovechando la forma circular de las cámaras de inspección, el proceso se desarrolla circularmente, en sentido contra reloj, buscando el efecto succionador del vórtice con el fin de que se induzca la precipitación de los sedimentos al fondo y de allí rodar a la cámara de desechos. Este propósito se logra haciendo rebosar el agua sobre mamparos alabeados de construcción inclinada y helicoidal sobre los que al pasar el agua se arremolinan hacia las aberturas inferiores del fondo cónico desde donde finalmente caerán al depósito de arena. (López, 2018)

3.2.1.2.3 Turbulencia

El paso del agua contaminada por cada una de las cámaras ocurre a través de una estrecha abertura y enseguida llega a la parte ancha de la siguiente cámara reduciendo su velocidad, la aceleración del agua a su paso por la sección estrecha genera turbulencia que momentáneamente suspende los sedimentos y los que puedan ser lanzados hacia arriba encuentran el techo de los mamparos alabeados y finalmente, al reducirse la velocidad del agua, se precipitan al fondo para ser desechados por la abertura de desarenado. (López, 2018)

3.2.2 Instrumentación y montaje

3.2.2.1 Desarenador tipo filtro

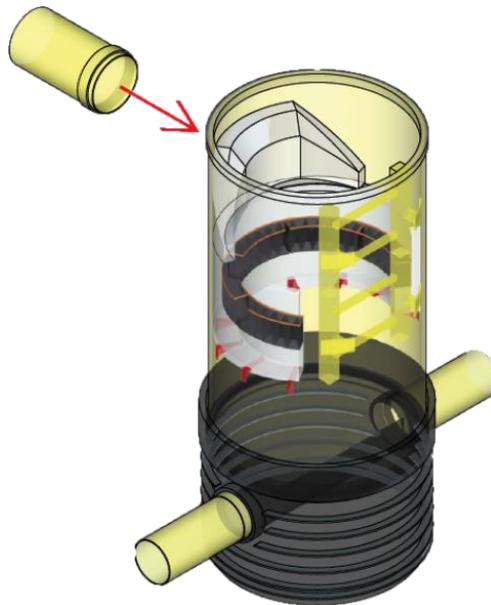


Ilustración 34. Desarenador tipo filtro

3.2.2.1.1 Tubería de entrada de aguas

Como referencia para las pruebas de eficiencia en el laboratorio se asume una tubería de PVC de 160mm de diámetro.

3.2.2.1.2 Adaptador para entrada de aguas (1)

Teniendo en cuenta la forma del desarenador, se requiere la instalación de un adaptador para que la tubería de entrada de aguas pueda ser instalada cómoda y estable. El adaptador es universal, para cámaras plásticas de 1000mm de diámetro y se perfora en el lugar de instalación en conjunto con el elevador de la cámara.

3.2.2.1.3 Tanque principal (2)

Tomando el nivel del agua como la delimitación del tanque, la capacidad del almacenamiento total es de 75,82L. El sedimento que se filtra se ubicará al fondo del tanque y puede acumular hasta 32,59L de sólidos sin afectar el funcionamiento normal del desarenador. Lo anterior equivale al 39,68% del volumen total del desarenador o al 42,97% si no se tiene en cuenta la cámara de aire, es decir, el volumen total efectivo.

3.2.2.1.4 Sistema de filtros (3)

El sistema de filtros garantiza que el desarenador cumpla con su función. Los sólidos de mayor tamaño y densidad quedan al fondo del tanque sin necesidad de pasar por los filtros, sin embargo, los sólidos de menor tamaño tienen una alta probabilidad de seguir con la corriente. La implementación de un sistema de filtros por diámetros evita la posibilidad de taponamiento que existiría en el caso en el que se instalara un solo filtro de finos.

Por lo general, los filtros se instalan hacia abajo, pero en este diseño, la parte inferior del filtro es utilizada como zona de almacenamiento de sedimentos, por lo tanto, el sistema de filtros debe funcionar de forma invertida. Éste tipo de funcionamiento, mejora a su vez, su funcionalidad pues las partículas estarían en flujo contrario a la gravedad, mejorando drásticamente su eficiencia.

Entre mayor es el área de filtrado, mayor eficiencia tendrá el desarenador, es por eso que se proponen mallas de acero inoxidable plegadas tipo acordeón de manera que se aumente el área superficial, se genere una mejor filtración, se garantice un mejor caudal y se incremente la tolerancia del dispositivo al taponamiento.

3.2.2.1.5 Cámara de aire (4)

El desarenador funciona por medio de gravedad y presión atmosférica, de la misma forma que trabajan los aparatos sanitarios, por ende, no puede ser hermético y requiere de una cámara de aire. Además, este espacio permite flexibilidad para la ubicación del adaptador y se utiliza para las actividades de mantenimiento y limpieza.

3.2.2.1.6 Válvula para salida de sólidos (5)

En el proceso de limpieza y extracción de sólidos, el personal encargado deberá conectar a la válvula de salida del desarenador una manguera de extracción de sólidos. A la vez, otra manguera es insertada en la cámara de aire para generar un flujo de agua después de encender la bomba de lodos.

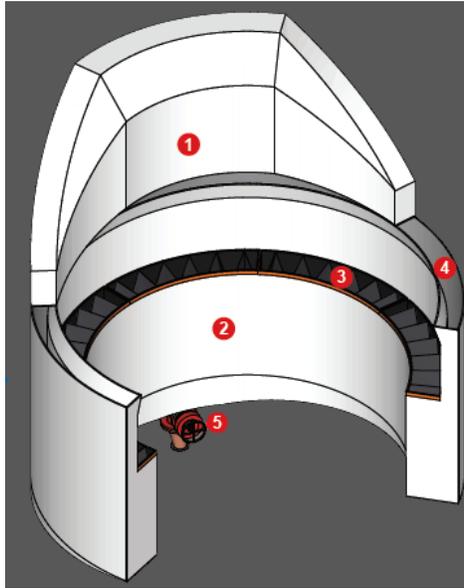


Ilustración 35. Dispositivo de desarenación

3.2.2.2 Desarenador helicoidal descendente

Esta alternativa se desarrolla en una espiral descendente pasando por diez y seis pares de cámaras hasta descargar por la parte inferior de la cámara de inspección. Esta cámara utiliza un elevador de 3,0m. Y consta de las siguientes partes:

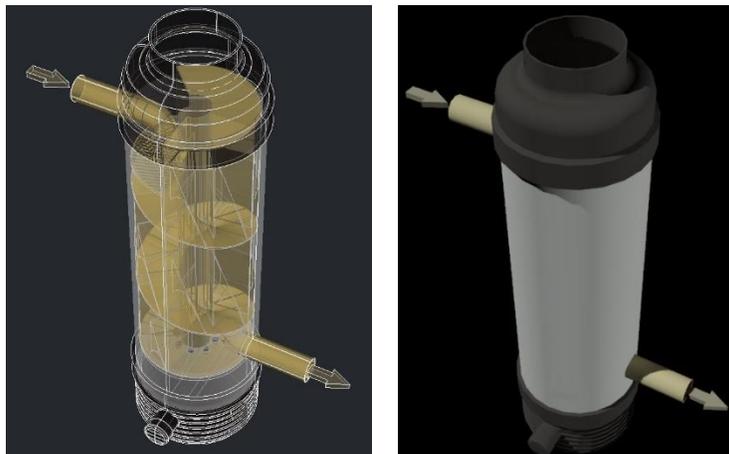


Ilustración 36. Desarenador helicoidal descendente

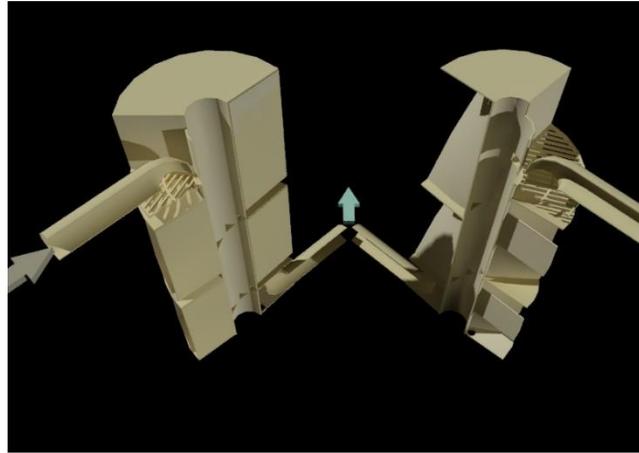


Ilustración 37. Corte transversal del desarenador descendente

3.2.2.2.1 Cámara de llenado

Recibe el tubo de ingreso que remata en un codo para descargar verticalmente sobre una criba que filtra los elementos mayores a una pulgada, en esta sección llegan los elementos flotantes y desde allí cae toda esta basura por el ducto central hasta el depósito de sedimentos. Esta cámara de llenado tiene fácil acceso para limpieza manual de los escombros que allí queden retenidos.

3.2.2.2.2 Ducto central

por él descargan los diez y seis mamparos desarenadores para conducir los residuos al depósito de sedimentos. Igualmente, este ducto permite el acceso de un vector para aspirar los residuos desechables.

3.2.2.2.3 Rampa espiral peraltada

Conduce los sedimentos retenidos hacia el centro y descargarlos por las ventanas del ducto central.

3.2.2.2.4 Mamparas desarenadoras

Son en total dieciséis pares que fuerzan al agua a pasar sucesivamente sobre y bajo ellos para retener las impurezas que finalmente van al depósito de arena e impurezas. Este conjunto de mamparos tiene una altura de 2,50 m.

3.2.2.2.5 Base del sistema

Plataforma cónica que separa el sistema desarenador del depósito de desechos.

3.2.2.2.6 Tubo de salida

Recoge el agua filtrada por un codo vertical que es el último obstáculo para que salga cualquier partícula de impurezas.



3.2.2.2.7 Depósito de desechos

Está en la base de la cámara de inspección y su altura es de 60 cm.

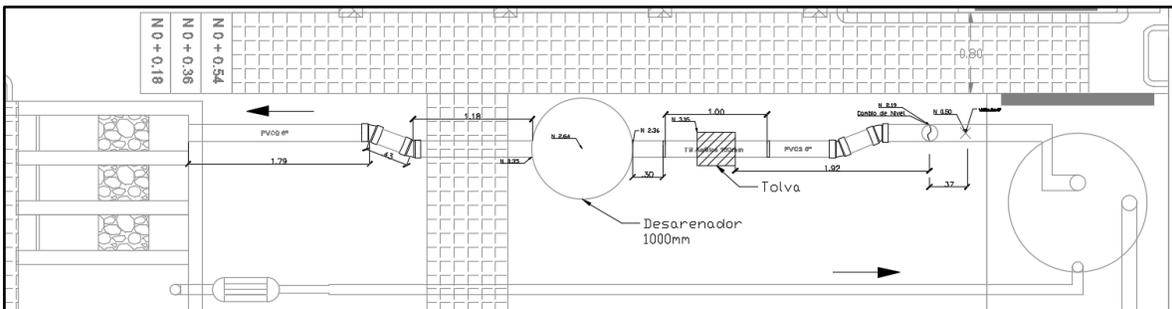
El agua tratada es contenida en el sistema y llega a dos compartimientos básicos, el primero constituido por el recorrido espiral con agua en permanente movimiento hasta salir depurada. El segundo con agua en reposo es el destinado al tránsito y depósito de los desechos. Estos dos compartimientos son independientes pero comunicados por vasos comunicantes generados por las pequeñas ventanas para la salida de arena retenida. Dado que el agua circulante no afecta el reposo del ducto y la cámara de sedimentos se garantiza que de esta manera la arena se precipite rápidamente al fondo de su reservorio y por no existir turbulencia estos sedimentos permanecerán reposados en la base de la cámara de inspección.

4 MODELO FÍSICO

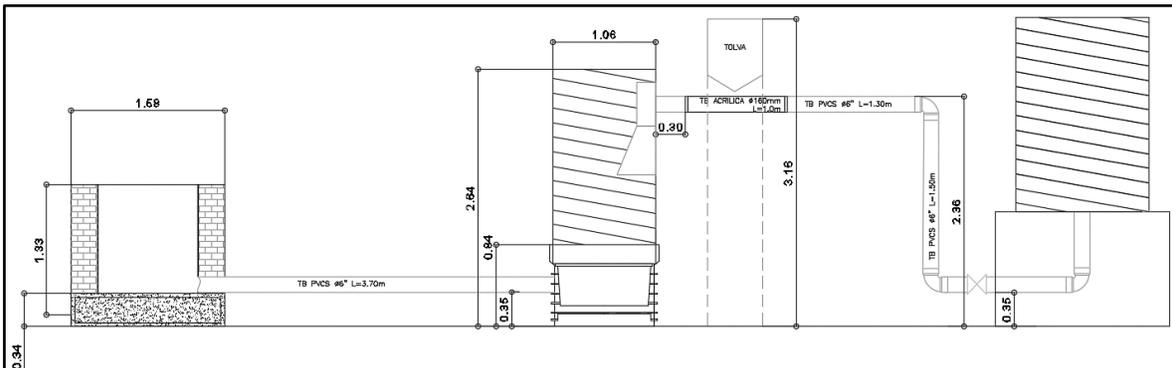
4.1 Descripción del modelo físico

En las instalaciones del laboratorio de Alcantarillados de la Universidad de los Andes se cuenta con las herramientas necesarias para el montaje de un modelo físico de alcantarillado pluvial, compuesto de: una fuente de agua lluvia simulada por un tanque de almacenamiento de agua construido en concreto y mampostería, una tubería de transporte representada por tubería de PVC, una cámara de inspección y un punto de descarga.

4.1.1 Desarenador tipo filtro



Esquema 1. Plano de instalación en planta, desarenador tipo filtro



Esquema 2. Plano de instalación en perfil, desarenador tipo filtro



Ilustración 38. Tanque de almacenamiento de agua, laboratorio de alcantarillado Uniandes

4.1.4 Motobomba

La impulsión del agua desde el tanque de almacenamiento es generada por una motobomba de la marca HICROMAC de 230mm de diámetro que trabaja a 1750 RPM, encargada de transformar la energía mecánica en energía cinética y alimentar el tanque de almacenamiento elevado.



Ilustración 39. Motobomba, laboratorio de alcantarillado Uniandes

4.1.5 Tubería de PVC

La conducción del agua desde el tanque de almacenamiento a nivel hasta el tanque elevado es a través de un tubo de 4 pulgadas de PVC.



Ilustración 40. Tuberías PVC, laboratorio alcantarillado Uniandes

4.1.6 Tanque elevado

El tanque elevado, elaborado con tubería NOVALOC de 54" de diámetro y 2.4m de altura, cumple la función de garantizar la altura piezométrica necesaria para lograr el rango de caudales (0.1 a 20 L/s) requeridos para los ensayos.



Ilustración 41. Tanque elevado laboratorio de alcantarillados Uniandes

4.1.7 Válvula de control

A la salida del tanque elevado, se instaló una válvula de bola para el control del caudal de agua. El diámetro de la válvula es de 6 pulgadas. La abertura total de la válvula requiere un total de 30 vueltas de giro de la perilla.



Ilustración 42. Válvula de control, laboratorio de alcantarillado Uniandes

4.1.8 Tolva para arena

Para el almacenamiento de las arenas se instaló una tolva metálica de 57cm de ancho, 57cm de largo y 74cm de alto. Para garantizar su estabilidad está apoyada sobre dos columnas metálicas ancladas con pernos expansivos a la placa de concreto.



Ilustración 43. Tolva para graduar el caudal de arenas

4.1.9 Tubería acrílica

Con el fin de poder monitorear las características del flujo y el transporte de las arenas, se instaló un tramo de 2 metros de tubería acrílica transparente de 6 pulgadas. La unión entre la tubería acrílica y la tubería de PVC se hizo mediante dos bridas.



Ilustración 44. Tubería de acrílico

4.1.10 Cámara de inspección

El elemento principal dentro de la configuración del alcantarillado pluvial fue la cámara de inspección, ya que en este modelo no cumplió únicamente la función de inspección, como su nombre lo describe, sino que contenía la estructura de desarenación que se quería evaluar en función de su eficiencia para diferentes caudales. Para los dos casos evaluados, se usaron cámaras plásticas prefabricadas cuya base es elaborada 100 por ciento con polietileno de alta densidad, mediante un proceso conocido como roto-moldeo; el cuerpo de la cámara es de PVC, con doble pared estructural fabricado por doble extrusión. Dentro del modelo físico construido en el laboratorio, por cuestiones de espacio y practicidad no se instalaron los demás elementos que conforman la cámara de inspección, sin embargo, no sobra mencionar que, en la práctica, cada cámara lleva un cono reductor y una aro-tapa de polipropileno. El diámetro de las cámaras evaluadas es de 1.0m.

La descripción detallada del diseño de cada uno de los modelos de encuentra en la sección XXX del documento sin embargo a continuación se ilustra fotográficamente el resultado post fabricación de los prototipos.

4.1.11 Cámara de inspección tipo filtros



Ilustración 45. Cámara de inspección



Ilustración 46. Desarenador tipo filtros



Ilustración 47. 1/5 Filtros del sistema

4.1.12 Cámara de inspección helicoidal



Ilustración 48. Sección de mamparas helicoidales



Ilustración 49. Composición interna del desarenador helicoidal



Ilustración 50. Vista aérea del desarenador helicoidal

4.1.13 Caudalímetro

Para el control de caudal de prueba, se instaló un caudalímetro electrónico no intrusivo de la marca Ultra flux, el cual mediante la instalación de dos sensores ultrasónicos sobre el mismo eje longitudinal de la tubería de conexión entre la cámara de inspección y el punto de descarga median el caudal de agua que estaba siendo transportado y permitía la calibración del mismo mediante el control de la apertura de la válvula de bola.



Ilustración 51. Caudalímetro Ultrasónico

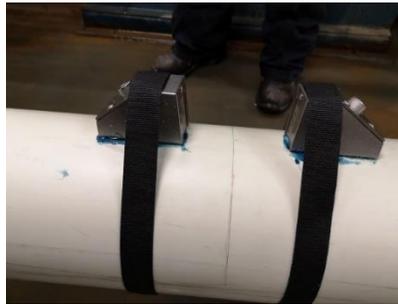


Ilustración 52. Sensores Ultrasónicos

4.1.14 Vertedero

El vertedero fue un elemento de suprema importancia en el modelo, cumplió dos funciones: fue el punto de descarga del agua que pasaba por el desarenador simulando el tanque de almacenamiento de agua tipo celdas plásticas modulares, permitía la recuperación de las arenas que no habían sido retenidas en la cámara y cumplía la función de verificación del caudal gracias a la ecuación de calibración del vertedero desarrollada por (XIMENA).



Ilustración 53. Vertederos laboratorio de alcantarillado Uniandes

5 METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS

5.1 Preparación de la mezcla de arenas

Para cada uno de los ensayos se decidió, teniendo en cuenta que el tiempo disponible en el laboratorio para la realización de todas las pruebas era limitado, medir la retención de 10 kg de arena en concentraciones distintas, combinando 2 caudales de arenas versus 10 caudales de agua.

El aporte de sedimentos transportado por la escorrentía depende del uso del suelo de los alrededores del proyecto, los usos que mayor aporte de sedimentos tienen son comercial, residencial de alta densidad y parqueaderos; el uso de aporte intermedio es vial y los de aporte bajo son residencial de baja densidad y cubiertas.

Para cumplir con el objetivo de evaluar las eficiencias de desarenación de los dos prototipos, bajo las mismas condiciones de cargas de sedimentos, y debido a que la caracterización de la carga de sedimentos arrastrada por las aguas lluvias es tan difícil y diversa, se tomó la decisión de usar la granulometría establecida por el estándar europeo EN-295-3 para la prueba de resistencia a la abrasión de las tuberías, aplicada especialmente en materiales plásticos para uso en sistemas de alcantarillado pluvial.

El estándar establece que el material utilizado debe ser natural, arena de grano redondo con las siguientes características:

$$M_p = d_{50} = 0.47\text{mm}$$

$$d_{80} = 1.5\text{mm}$$

$$d_{20} = 0.75\text{mm}$$

$$U = d_{80}/d_{20} = 2$$

Donde,

M_p es el tamaño promedio de las partículas

U es el grado de no uniformidad

d_{50} , d_{80} , d_{20} es el tamaño de la partícula, no excedido por el 50, 80 y 20 por ciento de la masa del material

La granulometría de las muestras de 10kg arena para todos los ensayos fue la misma. Para alcanzarlo se adquirió arena de cuatro rangos de tamaño: 1.68mm a 0.84mm (tamiz 12 a 20), 0.84mm a 0.60mm (tamiz 20 a 30), 0.60mm a 0.42mm (tamiz 30 a 40) y 0.42mm a 0.25mm (tamiz 40 a 60).

Para alcanzar la granulometría establecida por el estándar de prueba adoptado, se procedió a tamizar cada uno de los rangos de arenas adquiridos para conocer la distribución real de los tamaños de arenas y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 11. Rango de tamices 12 al 20 gradado

# Tamiz	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	PROMEDIO %
12	210.5	13.5	127.5	14.5	182.5	13.8	13.9
14	780	50.0	426.5	48.5	651.5	49.2	49.3
16	374	24.0	212	24.1	324.5	24.5	24.2
20	73.5	4.7	44	5.0	63.0	4.8	4.8
>20	122	7.8	68.5	7.8	101.5	7.7	7.8
Total	1560	100.0	878.5	100.0	1323.0	100.0	100.0

Tabla 12. Rango de tamices 20 al 30 gradado

# Tamiz	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	PROMEDIO %
20	379	28.1	365	25.5	351.5	26.9	26.8
25	418	31.0	496.5	34.6	422.0	32.3	32.7
30	236	17.5	230.5	16.1	231.5	17.7	17.1
>30	313.5	23.3	342	23.8	300.0	23.0	23.4
Total	1346.5	100.0	1434	100.0	1305.0	100.0	100.0

Tabla 13. Rango de tamices 30 al 40 gradado

# Tamiz	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	PROMEDIO %
30	88.5	6.5	77.5	5.8	83.5	6.3	6.2
35	775.5	57.1	901.5	67.7	826.0	62.5	62.4
40	272	20.0	195	14.6	227.5	17.2	17.3
>40	222.5	16.4	157.5	11.8	185.0	14.0	14.1
Total	1358.5	100.0	1331.5	100.0	1322.0	100.0	100.0

Tabla 14. Rango de tamices 40 al 60 gradado

# Tamiz	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	PROMEDIO %
40	44	3.3	9.5	0.8	31.5	2.4	2.2
50	767.5	57.1	675.5	59.7	764.0	57.8	58.2
60	143.5	10.7	170.5	15.1	166.5	12.6	12.8
>60	390	29.0	276.5	24.4	360.0	27.2	26.9
Total	1345	100.0	1132	100.0	1322.0	100.0	100.0

Luego de conocer los porcentajes de cada tamaño dentro de cada uno de los rangos y separar las arenas por tamaños por medio del tamizado, se preparó cada mezcla de 10kg con la siguiente distribución:

Tabla 15. Distribución porcentual del tamaño de las partículas en las muestras

Números de tamiz	Porcentaje por muestra
12 a 20	20%
20 a 40	30%
40 a 60	50%

En donde:

Tabla 16. Diámetro de abertura de malla por número de tamiz

Número del Tamiz	Abertura de malla [mm]
12	1.68
14	1.41
16	1.19
20	0.84
25	0.71
30	0.6
35	0.5
40	0.42
50	0.3
60	0.25

5.1.1 Calibración del caudal de arenas

Como se mencionó en la sección de instrumentación del montaje, se instaló sobre la tubería de acrílico, justo antes del ingreso del agua a los desarenadores, una tolva metálica para el almacenamiento de las arenas propias de cada ensayo y en un principio se pretendía que sirviera como dosificador de las arenas para cada ensayo. Sin embargo, durante las actividades de calibración de la apertura de la válvula de la tolva, permitiendo que liberara la masa de arenas para la apertura mínima, el caudal de arenas promedio fue de 73.03 g/s; demasiado alto para los objetivos del proyecto

Tabla 17. Caudal sólido para la apertura mínima de la válvula de la Tolva

	Tiempo de apertura de la válvula	
	10 segundos	30 segundos
Masa de arenas para la mínima apertura de la válvula (g)	794	2050
	833	2014.5
	695.5	2008.5
	770.5	2025
	782	2032
	776.5	2044
	802	2036
	796	2041
	785	2016
	804	2038
Promedio (g)	783.85	2030.5

	Tiempo de apertura de la válvula	
	10 segundos	30 segundos
Q sólido [g/s]	78.39	67.68

Con el fin de limitar el alcance del proyecto y alcanzar concentraciones de arena en el agua altas, que pusieran a trabajar bajo condiciones críticas los prototipos de desarenador y reconociendo la poca facilidad a la hora de variar el flujo de arenas sobre la tubería, se buscó garantizar dos únicos caudales sólidos para la totalidad de los ensayos: 5g/s y 10g/s con los cuales, al variar el caudal de agua, se pudo ensayar un rango de concentraciones de 0.5 a 10 g/L.

Es por ello que para limitar el paso de arena se tuvo que instalar dos embudos, de diferentes aperturas a través de los cuales el flujo de arenas era el requerido según lo descrito en el párrafo anterior. Luego de probar un gran número de embudos los que resultaron ajustándose a lo requerido fueron el de 6.92mm para 5g/s y el de 13.02 para 10g/s.



Ilustración 54. Diámetro externo del embudo



Ilustración 55. Diámetro interno del embudo

5.2 Definición de caudales de agua

Con el fin de definir el rango de caudales para los cuales serían probados los desarenadores, se revisaron la totalidad de los tanques de almacenamiento con celdas plásticas modulares instalados durante últimos dos años, por PAVCO en Colombia. En total se revisaron más de 50 casos de estudio, en zonas institucionales, comerciales, residenciales e industriales. Por la variabilidad de las aplicaciones de los tanques evaluados, y teniendo en cuenta que sus usos son diversos, los

volúmenes de almacenamiento varían en un rango significativamente amplio, comenzando con tanques de 1 hasta 1000 m³. Por lo anterior, los caudales que reciben cada uno de los tanques en estudio son también ampliamente distintos.

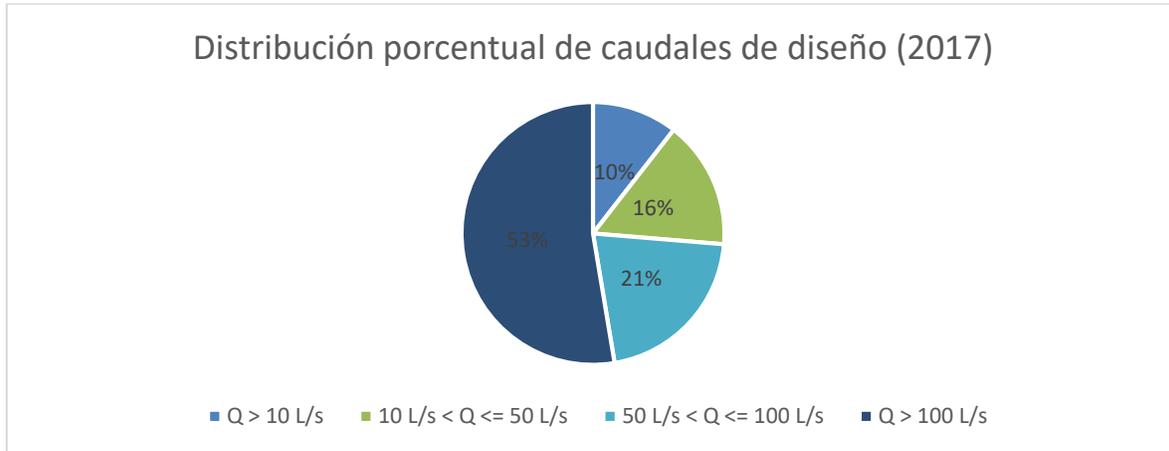


Figura 2. Caudales de diseño para el año 2017

Para el 2017 encontramos que el 10 por ciento de los tanques instalados tiene un caudal de entrada inferior a 10L/s, el 16 por ciento se encuentra en un rango de 10 a 50L/s, el 21 por ciento está en un rango entre 50 y 100L/s mientras que el 53% tienen caudales de entrada superiores a los 100L/s.

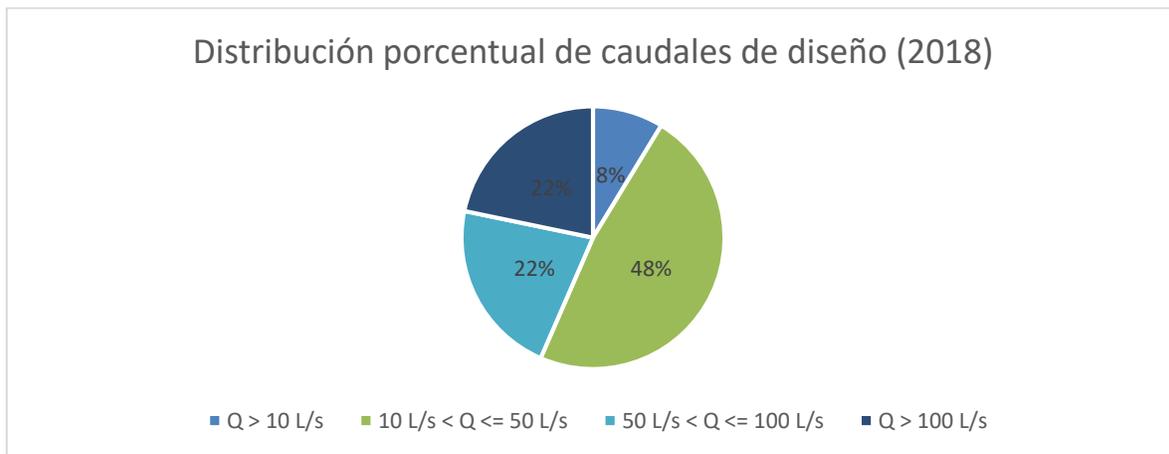


Figura 3. Caudales de diseño para el año 2018

Para el 2018 encontramos que el 8 por ciento de los tanques instalados tiene un caudal de entrada inferior a 10L/s, el 48 por ciento se encuentra en un rango de 10 a 50L/s, el 22 por ciento está en un rango entre 50 y 100L/s mientras que el 22% restante tienen caudales de entrada superiores a los 100L/s.

De acuerdo a lo anterior, encontrar un patrón, o un rango de caudales que puedan ser probados en el laboratorio, que se aproxime a lo que vemos aplicado en la realidad, no es sencillo. Asimismo, pretender que un desarenador instalado en una cámara de 1000mm de diámetro, con una altura estimada que va desde 1 metro hasta 3, pueda desarenar con eficiencia caudales del orden de 50L/s, o inclusive superiores, no parece ser posible.

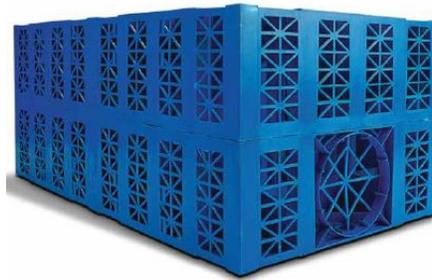


Figura 4. AquaCell

Por otro lado, cada una de las celdas viene desde fabricación con una muesca que encaja una tubería de 160mm de diámetro, con el fin de que el empalme sea más sencillo. Es por esto que se definió que el modelo de prueba se hará con tubería de ese diámetro, tanto a la entrada como a la salida del desarenador.

La ecuación de Manning, permite conocer la capacidad hidráulica de una tubería:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

Dónde, la rugosidad “n” para PVC es igual a 0.009 y el radio hidráulico “R” en condición de tubo lleno es igual a $\phi/4$.

Para diferentes pendientes, el caudal y velocidad a tubo lleno en una tubería de PVC de 160mm de diámetro son:

Tabla 18. capacidad hidráulica tubería 160mm PVC (PAVCO, 2015)

Pendiente %	V (m/s)	Q (L/s)
0.1	0.38	6.4
0.5	0.86	14.2
1	1.22	20.1

Pendiente %	V (m/s)	Q (L/s)
2	1.72	28.4
5	2.72	44.9
10	3.85	63.6

Como se puede evidenciar en la Tabla 18, inclusive una sola tubería de 160mm de diámetro nominal, puede alcanzar a transportar caudales importantes, los cuales sin lugar a duda superarían la capacidad de desarenación de un tanque de las dimensiones en prueba.

Por lo tanto, se tomó la decisión de probar los desarenadores con caudales entre 0.5L/s y 20 L/s, con fines investigativos y de generación de una curva de eficiencias con diferentes cargas.

5.2.1 Calibración del caudal de agua

Teniendo en cuenta que típicamente las celdas modulares a partir de las cuales se construyen los tanques de almacenamiento de agua lluvia vienen configuradas para la instalación de tuberías de alcantarillado de doble pared estructural con diámetro de 160mm o 6 pulgadas, la instalación de todo el modelo de alcantarillado se realizó con tuberías del mismo diámetro, garantizando que no se generaran cuellos de botella por reducciones de diámetro en ningún punto sobre la red y que el flujo para el cual se pusiera a prueba los prototipos de desarenador tampoco excedieran los valores esperados bajo condiciones que simularan la realidad.

Teniendo en cuenta que la motobomba cumplía la función exclusiva de llenar el tanque de agua elevado, la energía con la que viajaba el agua desde el tanque hasta pasar por el desarenador y llegar al punto de descarga, era dada por la cabeza piezométrica generada por el nivel de agua sobre el tanque.

De acuerdo a estas condiciones el máximo caudal que el sistema logró transportar fueron 20L/s mientras que el mínimo registrado y medido bajo experimentación fue de 0.5L/s.

Para la calibración del caudal de agua se encendía la bomba con la válvula de control completamente cerrada hasta que el tanque elevado alcanzara su máximo nivel y el agua empezara a salir por el rebose interno que tiene el mismo. Posteriormente, se empezaba a dar apertura a la válvula en rangos de cuarto de giro pues se evidenció que por cada uno de estos intervalos el caudal se veía incrementado en 0.4L/s. Con la ayuda del caudalímetro ultrasónico no invasivo se verificaba que el flujo que corría por el sistema correspondía con el valor que se pretendía estudiar y se dejaba

estabilizar por un tiempo de 5 minutos, si no se evidenciaban disminuciones ni incrementos sustanciales (mayores a 0.1//S) se procedía a continuar con el ensayo.

5.3 Tiempos de prueba

El tiempo de las pruebas lo establecía principalmente el caudal de arenas que se estuviese probando en el momento, como se mencionó anteriormente se midieron para totalidad de los ensayos dos caudales de arenas 5g/s y 10g/s y en la totalidad de los ensayos, la masa de arenas que se condujo a través del desarenador fueron 10kg. De acuerdo a estos valores, el tiempo de duración de los ensayos fue de 33 minutos para el caudal de arena más bajo y de 17 minutos para el caudal de arena más alto.

Tabla 19. Tiempo por ensayo

Caudal sólido	Tiempo del ensayo
g/s	Min
5	33
10	17

Adicional a estos valores, se debe tener en cuenta el tiempo de calibración del caudal de agua, los 5 minutos de estabilización del caudal en el sistema antes de empezar con la adición de las arenas y finalmente, una vez el ultimo grano de arena ingresara al desarenador, se dejó correr agua limpia a través del sistema para garantizar que posibles sedimentos retenidos en la tubería de conexión entre el desarenador y el vertedero, alcanzaran su destino final.

5.4 Bombeo de agua

El manejo del bombero de agua desde el tanque de almacenamiento en concreto y mampostería a nivel hacia el tanque elevado de PVC, se realizó con la bomba eléctrica cuyo tablero de control ubicado dentro del laboratorio nos permitía manipular los tiempos de bombeo con facilidad.

El bombeo iniciaba y se mantenía activo desde el momento en el que se buscaba calibrar el caudal a través el sistema y solo se detenía hasta pasados cinco minutos después de que la totalidad de la arena había entrado al desarenador.

5.5 Apertura y cierre de válvula de agua

La válvula de control de flujo, instalada a la salida de la tubería de 6 pulgadas de PVC, antes de la columna que conduce el agua al desarenador a través de la tubería acrílica, tiene un total de 13 giros completos para alcanzar el cien por ciento de la apertura.

La apertura de la válvula en cada ensayo se realizó una vez el tanque de almacenamiento de agua elevado alcanzaba su nivel máximo y el rebose interno entraba en funcionamiento, se estimó que por cada cuarto de giro el caudal incrementaba en 0.4L/s, así se calibraba fácilmente el caudal de prueba.



Ilustración 56. Válvula de control

Antes del cierre de las válvulas se detenía el bombeo del tanque a nivel hacia el tanque elevado e inmediatamente se procedía a cerrar por completo la válvula.

Tanto la apertura como el cierre de la válvula se realizó manualmente.

5.6 Apertura y cierre de válvula de sólidos

Una vez se contaba con el caudal determinado para el ensayo en curso, y se había verificado su estabilidad a lo largo de 5 minutos, se procedía a dar apertura de la válvula de sólidos. Dado que, como se mencionó con anterioridad, la apertura mínima de la válvula propia de la tolva era demasiado grande y que la dosificación se hizo a partir de embudos, se podía abrir la totalidad de la válvula de la tolva y mantenerla constante a lo largo de todo el ensayo.

Dado que no todos los tamaños de partículas en la mezcla eran iguales y que por más de que durante el proceso de gradación y mezcla de los 10kg de arena se trató de garantizar homogeneidad en la misma, se evidenció que la boca del embudo podría presentar taponamientos. Por lo anterior, fue necesario durante la corrida de cada ensayo estar vigilando el embudo y aireando la salida continuamente mediante suaves pero constantes golpes.



Ilustración 57. Embudo instalado a la salida de la tolva

5.7 Recolección de arenas retenidas

Dentro de la descripción de la metodología, la única actividad que es distinta entre los montajes de prueba es la recolección de las arenas retenidas en el desarenador.

5.7.1 Desarenador tipo filtro

El prototipo de desarenador tipo filtro tiene la ventaja de que no impide la inspeccionabilidad de la cámara y, por ende, la limpieza del mismo puede realizarse de manera manual y sin la necesidad de equipos.

Una vez el ensayo llegaba a su fin se procedía a desocupar de agua la cámara, para poder retirar las arenas con más facilidad. El procedimiento de limpieza era el siguiente:

1. Drenar por completo la cámara



Ilustración 58. Cañuela desarenador helicoidal pos ensayo

2. Ingresar a la cámara haciendo uso de las escaleras internas



Ilustración 59. Escaleras internas

3. Retirar los cinco filtros del cuerpo del desarenador



Ilustración 60. Filtros del desarenador pos ensayo

4. Con ayuda de un palustre sacar las arenas retenidas en el cuerpo del desarenador



Ilustración 61. Vista del desarenador sin filtros



Ilustración 62. Muestra de arenas retenidas en el desarenador

5. Lavar los filtros por fuera de la cámara



Ilustración 63. Filtro pre lavado

6. Instalar nuevamente los filtros lavados

5.7.2 Desarenador helicoidal

El prototipo del desarenador helicoidal está compuesto por una estructura de láminas internas que impiden el ingreso de un hombre, por lo que las arenas que se midieron para la verificación del porcentaje retenido no fueron las que quedaron dentro de la cámara sino por el contrario las que salieron y quedaron en el fondo del vertedero, igualmente, pasados los 5 minutos después de que la totalidad de la arena hubiese ingresado a la cámara.

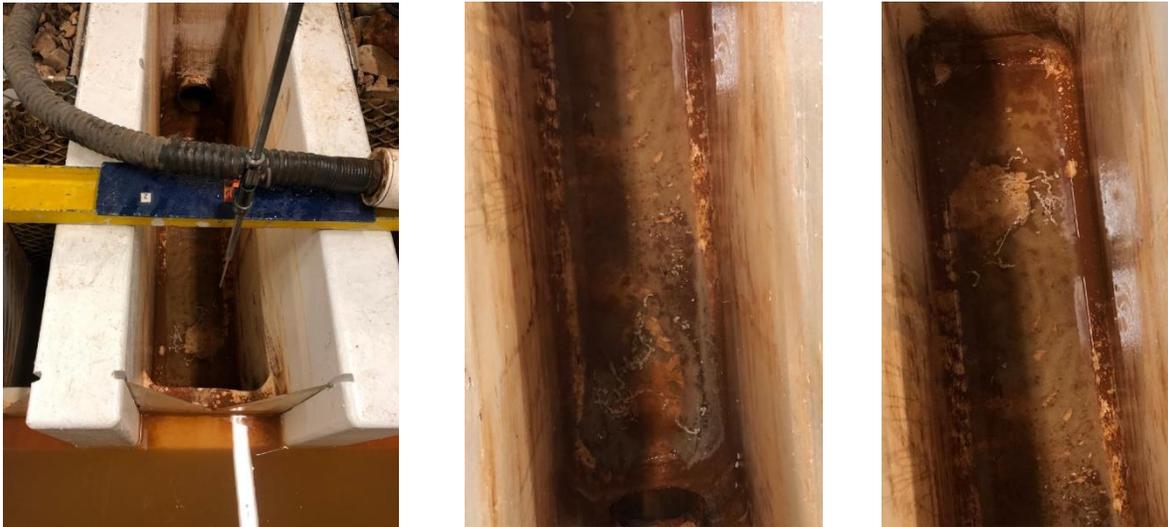


Ilustración 64. Arenas retenidas en el vertedero

5.8 Secado de arenas en el horno

La cantidad total en peso de arenas que se probaron por ensayo fueron 10kg pesados en seco completamente, como se describió en literales anteriores, la recuperación de las arenas se realizó de forma distinta según cada uno de los prototipos ensayados. Para el desarenador tipo filtros, la recuperación de las arenas post ensayo se realizó dentro de la estructura de filtración; en el caso del desarenador tipo helicoides la recuperación de las arenas se realizó en el vertedero.

Sin embargo, en los dos casos las arenas que se recogían venían con un gran contenido de humedad que debía ser retirado para que el pesaje post ensayo pudiese ser comparable con el pesaje pre ensayo.

En este orden de ideas, las arenas recogidas en recipientes metálicos eran metidas en un horno eléctrico durante 24 horas con el fin de que salieran completamente secas.



Ilustración 65. Secado de las arenas en horno

5.9 Verificación del peso de las arenas retenidas

El paso final dentro de la metodología de cada ensayo consistía en la verificación del peso de las arenas retenidas. Para ello se pesaba la totalidad de arenas retenidas por el desarenador (en el caso de la estructura de filtros) y la totalidad de arenas que pasaban al vertedero (en el caso de la estructura helicoidal) para proceder a comparar la cifra obtenida con las arenas ingresadas a cada estructura y hallar a retención porcentual.

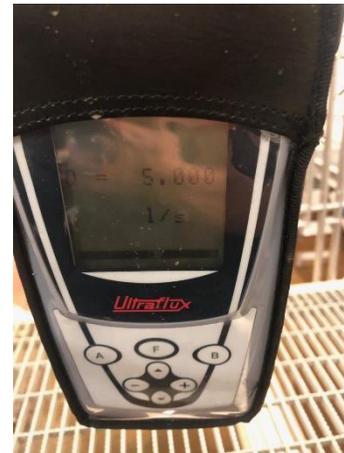


Ilustración 66. Pesaje de las arenas secas

5.10 Documentación de las pruebas para los caudales principales

5.10.1 Desarenador tipo filtros

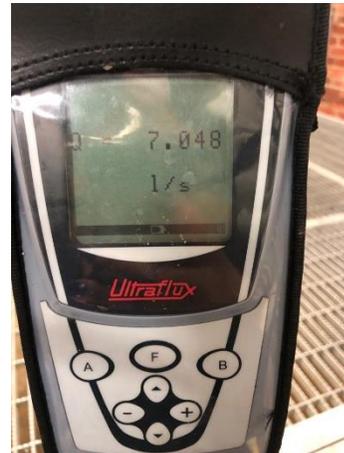
5.10.1.1 5L/s



5.10.1.2 6L/s



5.10.1.3 7L/s



5.10.1.4 8L/s



5.10.1.5 9L/s



5.10.1.6 10L/s



5.10.2 Desarenador helicoidal

5.10.2.1 0.5L/s



5.10.2.2 5L/s



5.10.2.3 10L/s



5.11 Resultados

5.11.1 Porcentaje de retención de sólidos en el desarenador tipo filtros

Tabla 20. Resultado de desarenación prototipo tipo filtros bajo 10g/s

Caudal líquido (L/s)	Caudal sólido (g/s)	Concentración de arenas (g/L)	Arenas retenidas en el desarenador (g)	Porcentaje de desarenación
1	10	10.0	9032	0.90
2	10	5.0	9008	0.90
3	10	3.3	8654	0.87
4	10	2.5	8424	0.84
5	10	2.0	8325	0.83
6	10	1.7	8071	0.81
7	10	1.4	7515	0.75
8	10	1.3	7200	0.72
9	10	1.1	6929	0.69
10	10	1.0	6625	0.66
12	10	0.8	6021	0.60
14	10	0.7	5038	0.50
16	10	0.6	4602	0.46
18	10	0.6	3032	0.30

Tabla 21. Resultados de desarenación prototipo tipo filtros bajo 5g/s

Caudal líquido (L/s)	Caudal sólido (g/s)	Concentración de arenas (g/L)	Arenas retenidas en el desarenador (g)	Porcentaje de desarenación
0.5	5	10.0	9508	0.951
1	5	5.0	9464	0.946
1.5	5	3.3	9404	0.940
2	5	2.5	9256	0.926
2.5	5	2.0	9226	0.923
3	5	1.7	9204	0.920
3.5	5	1.4	9190	0.919
4	5	1.3	9184	0.918
4.5	5	1.1	9166	0.917
5	5	1.0	9140	0.914
6	5	0.8	8932	0.893
7	5	0.7	8692	0.869
8	5	0.6	8506	0.851
9	5	0.6	8172	0.817
10	5	0.5	7762	0.776

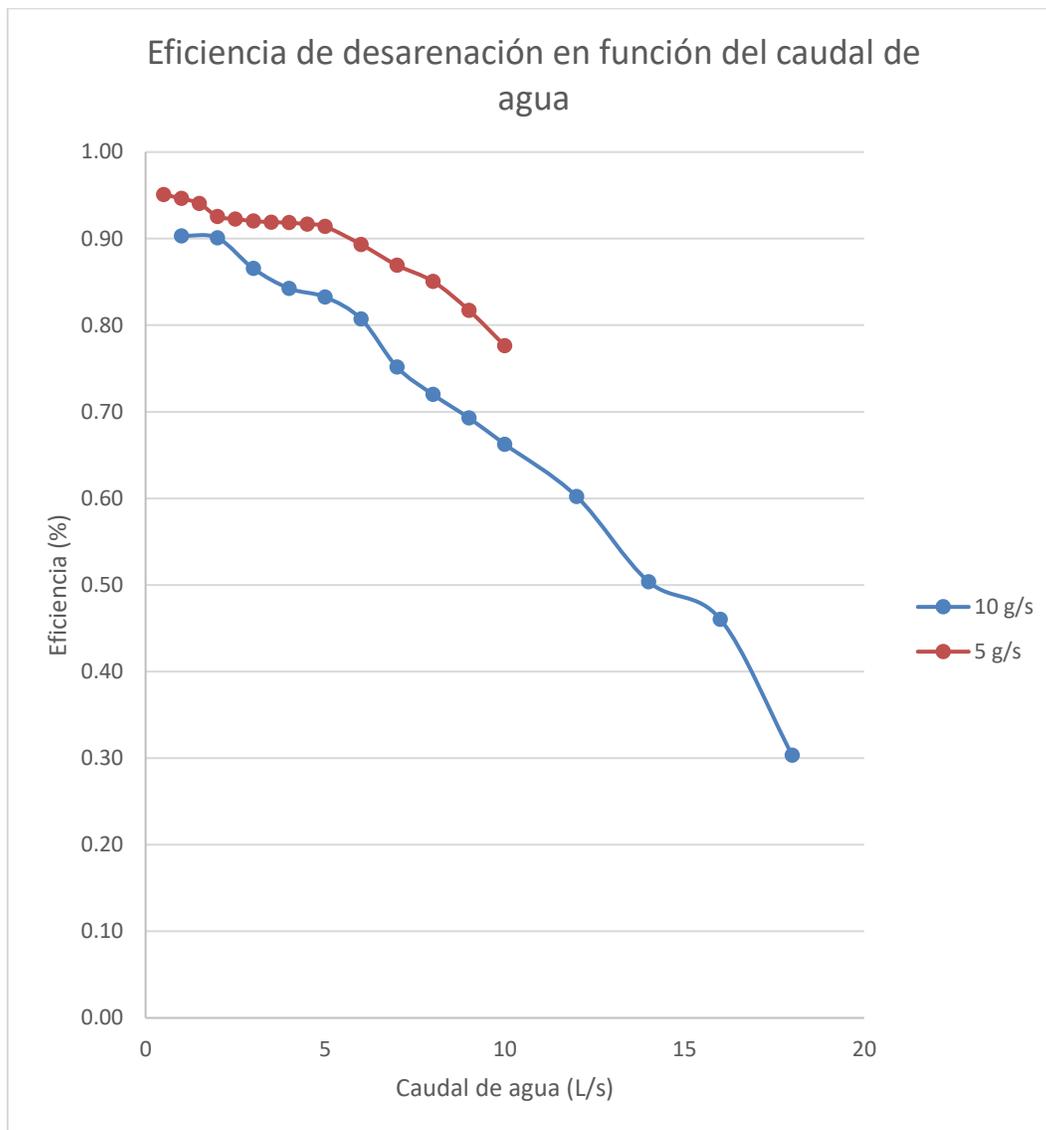


Figura 5. Eficiencia de desarenación en función del caudal de agua, prototipo tipo filtros

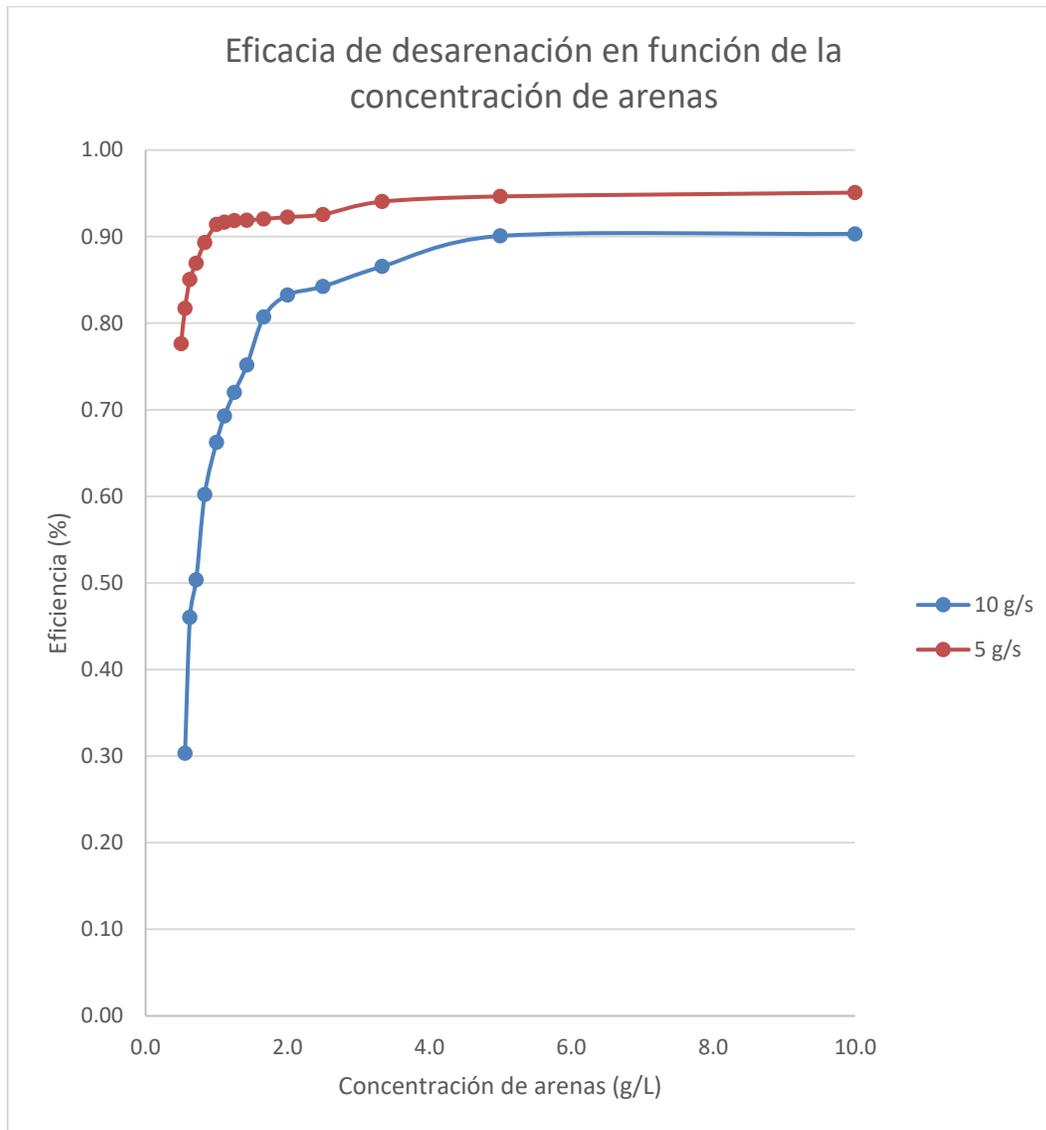


Figura 6. Eficiencia de desarenación en función de la concentración de arenas, prototipo tipo filtros

5.11.2 Porcentaje de retención de sólidos en el desarenador helicoidal

Tabla 22. Resultado de desarenación prototipo tipo helicoides bajo 10g/s

Caudal líquido (L/s)	Caudal sólido (g/s)	Concentración de arenas (g/L)	Arenas retenidas en el desarenador (g)	Porcentaje de desarenación
1	10	10.0	8326.0	0.83
2	10	5.0	8210.5	0.82
3	10	3.3	8192.5	0.82
4	10	2.5	8056.0	0.81
5	10	2.0	8042.5	0.80
6	10	1.7	7978	0.80
7	10	1.4	7894	0.79
8	10	1.3	7864	0.79
9	10	1.1	7831	0.78
10	10	1.0	7663	0.77
12	10	0.8	7711	0.77
14	10	0.7	7666	0.77
16	10	0.6	7594	0.76
18	10	0.6	7597	0.76
20	10	0.5	7435	0.74

Tabla 23. Resultados de desarenación prototipo tipo helicoides bajo 5g/s

Caudal líquido (L/s)	Caudal sólido (g/s)	Concentración de arenas (g/L)	Arenas retenidas en el desarenador (g)	Porcentaje de desarenación
0.5	5	10.0	8710	0.871
1	5	5.0	8668	0.867
1.5	5	3.3	8650	0.865
2	5	2.5	8680	0.868
2.5	5	2.0	8572	0.857
3	5	1.7	8584	0.858
3.5	5	1.4	8560	0.856
4	5	1.3	8488	0.849
4.5	5	1.1	8500	0.850
5	5	1.0	8458	0.846
6	5	0.8	8398	0.840
7	5	0.7	8398	0.840
8	5	0.6	8368	0.837
9	5	0.6	8284	0.828
10	5	0.5	8170	0.817

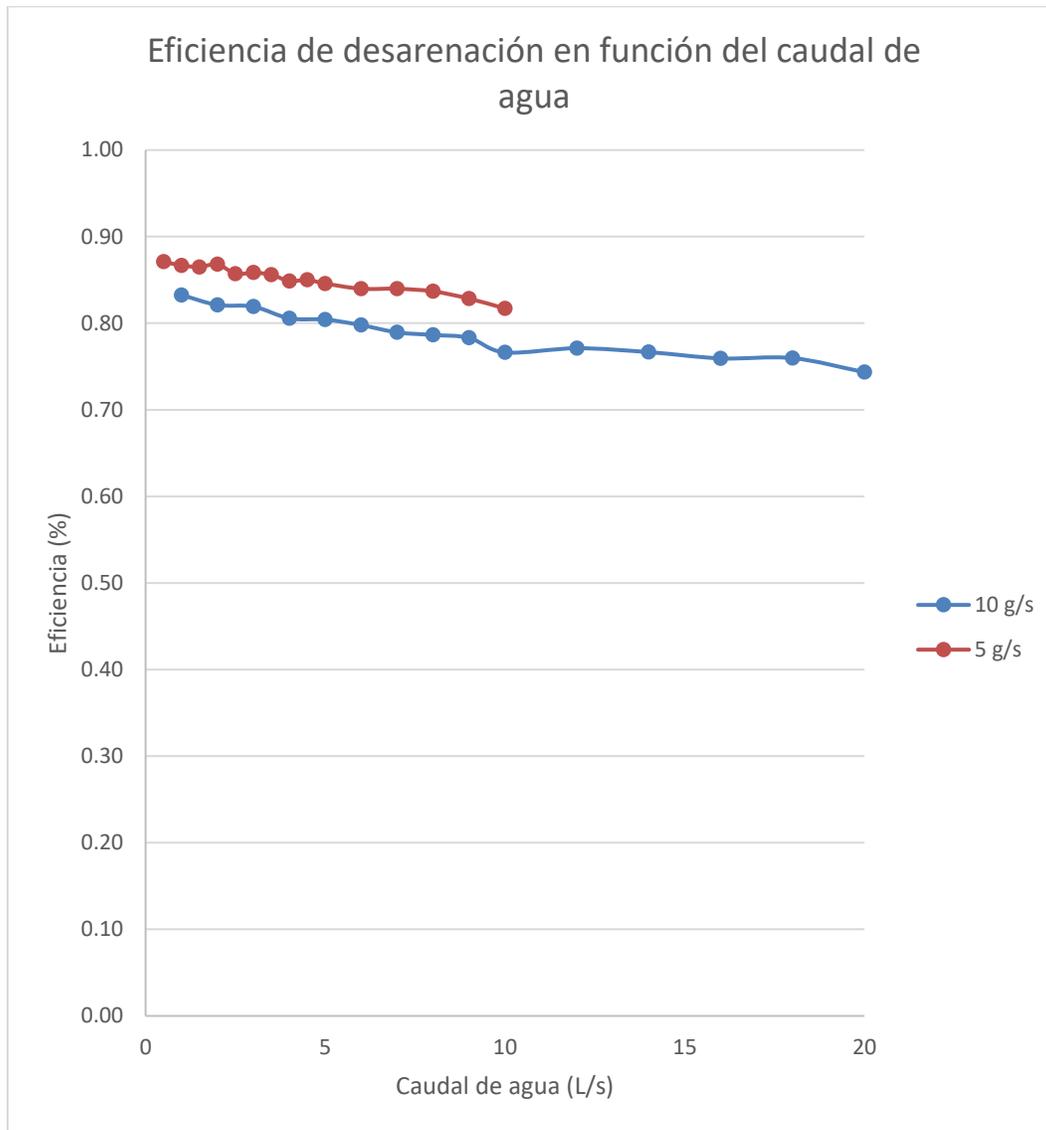


Figura 7. Eficiencia de desarenación en función del caudal de agua, prototipo tipo helicoides

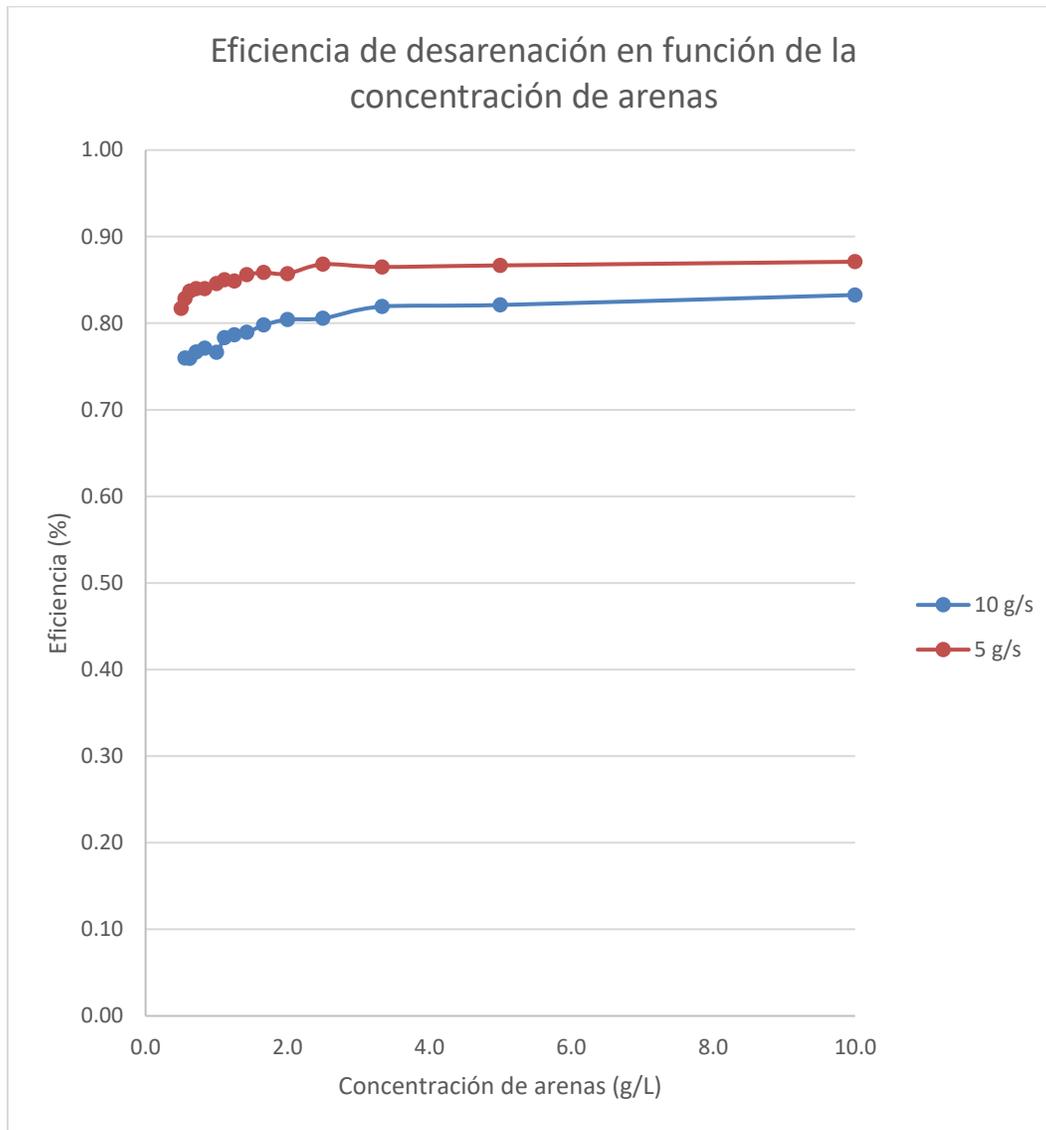


Figura 8. Eficiencia de desarenación en función de la concentración de arenas, prototipo tipo helicoides

5.12 Evaluación de los prototipos por criterios

5.12.1 Tamaño mínimo de la partícula removida

Dentro del sistema unificado de la clasificación de los suelos las arenas son aquellas partículas cuyo diámetro se encuentra dentro del rango de 0.05mm a 2.0mm. Sin embargo, se estima que la pérdida en volumen por partículas suspendidas en la escorrentía que serán almacenadas dentro del que, es del orden del 10 por ciento en casos en donde no se realizan procesos de pre tratamiento ni sedimentación, lo anterior, después de 50 años de funcionamiento del sistema. Por lo anterior y

teniendo en cuenta que la complejidad y tamaño de la estructura de sedimentación está directamente relacionada con el tamaño de la partícula a remover y el tiempo de residencia de esta dentro la estructura y por su puesto su velocidad de asentamiento; se esperaba que los prototipos de los sedimentadores logran la remoción de partículas de 0.25mm de diámetro o superior.

5.12.1.1 Desarenador tipo filtros

El diseño del desarenador tipo filtros, por su sistema de mallas multinivel, prometía la retención con su malla más cerrada de partículas de hasta 0.1mm, superando así las expectativas. A pesar de esto, dentro del periodo de ensayos evidenciamos que cada una de las mallas cumplía con la función de retención de partículas de distintos tamaños, según el posicionamiento de las mismas, pero en cierto porcentaje (determinado en mayor o menor porción por el caudal de agua que viajaba por el desarenador) inclusive las partículas de 0.25mm lograron pasar a través del filtro más cerrado.

Como conclusión se puede decir que el prototipo cumple con la función de retener partículas de 0.25mm, pero no con la misma eficiencia con la que logra retener partículas de mayor tamaño.

5.12.1.2 Desarenador helicoidal

El diseño del desarenador helicoidal, en base a la línea de flujo del agua desde se entrada en la estructura hasta la salida de la misma, indicaba que para un caudal de 5L/s las partículas de tamaño igual o superior a 0.25mm quedarían retenidas dentro de la base de la cámara y no llegarían al tanque de almacenamiento. Efectivamente, se pudo comprobar que para caudales menores o iguales a 5L/s la granulometría de la mezcla de arenas recuperadas dentro del tanque era homogénea y se recuperaron tanto partículas finas como partículas gruesas. Por otro lado, para caudales mayores a 5L/s la granulometría de la mezcla de arenas retenida dentro del tanque se acomodaba dentro del espectro de los diámetros más finos en mayor proporción de en el espectro de los diámetros más gruesos.

5.12.2 Eficiencia de desarenación

Con cada uno de los prototipos de desarenación se consideró que una eficiencia de desarenación mínima del 75% era requerida para ser considerado exitoso.

5.12.2.1 Desarenador tipo filtros

Como pudimos evidenciar en la Tabla 20. Resultado de desarenación prototipo tipo filtros bajo 10g/s, para un caudal sólido de 5g/s la eficiencia de desarenación máxima alcanzada fue del 95.1% para un caudal de 0.5L/s, la mínima alcanzada fue de 77.6L/s para un caudal de 10L/s, permitiendo concluir que para el rango de caudales ensayado el desarenamos cumple a satisfacción con la eficiencia mínima de desarenación del 75% que se exigía.

Por otro lado, según los datos de la Tabla 21, para un caudal sólido de 10g/s la eficiencia de desarenación máxima alcanzada fue del 90.0% para un caudal de 1.0L/s, la mínima alcanzada fue de 30.0L/s para un caudal de 18.0L/s; el cumplimiento del porcentaje mínimo de desarenación se evidenció hasta los 7.0L/s, caudales superiores a éste tendrán como respuesta una baja o muy baja eficiencia en la desarenación.

5.12.2.2 Desarenador helicoidal

Para el segundo prototipo la Tabla 23 registra que para un caudal sólido de 5g/s, la eficiencia de desarenación máxima alcanzada fue de 87.1% para un caudal de 0.5L/s, la mínima alcanzada fue de 81.7% para un caudal de 10L/s, nuevamente se puede concluir que para el rango de caudales ensayado el desarenador cumple contundentemente con la eficiencia mínima de desarenación exigida.

Asimismo, según la Tabla 22 para un caudal sólido de 10g/s, la eficiencia de desarenación máxima alcanzada fue de 83.0% para un caudal de 1L/s mientras que la mínima fue de 74.0% para un caudal de 20L/s. El cumplimiento del porcentaje mínimo de desarenación se evidenció hasta los 18.0L/s ya que sólo para el valor de caudal máximo ensayado, el cual fue de 20L/s se pudo registrar una eficiencia de desarenación menor a 75%.

5.12.3 Versatilidad de caudales

Establecer un rango de caudales típico utilizado en el dimensionamiento de los tanques de almacenamiento de agua lluvias construidos a partir de celdas plásticas modulares, no es realmente posible; en principio porque, cómo se explicó en la sección de antecedentes, las celdas plásticas típicamente están diseñadas para almacenar volúmenes de agua desde 150 litros hasta 200 litros pero con la singularidad de que pueden ser apilables entre sí para formar tanque tan largos y/o anchos como se requiera. Asimismo, el rango de caudales para los cuales son diseñados puede variar ampliamente.

Las celdas plásticas modulares que ofrece la industria colombiana ofrece un único modelo que cuenta con una sola muesca de conexión para tubería de alcantarillado de doble pared estructural, cuyo diámetro nominal es de 160mm, a partir de este criterio y asumiendo una relación de llenado del 85% y pendientes menores al 2 por ciento, se estableció que el rango de caudales para el cual el funcionamiento de los prototipos debía ser probado era desde 0.5L/s hasta 20L/s.

5.12.3.1 Desarenador tipo filtros

Al analizar los resultados de desarenación, es evidente que, aunque entre los dos prototipos es el que alcanza el mayor porcentaje de eficiencia para los caudales bajos, solo alcanza los resultados exigidos dentro de la mitad más baja del rango de caudales establecidos para los ensayos. Su versatilidad de funcionamiento se ve truncada al 50 por ciento y su eficiencia decrece rápidamente

en la medida en que los caudales aumentan después de llegar al valor medio. En conclusión, es el prototipo funciona correctamente en conjunto con caudales bajos a medios y puede desempeñarse bien en proyectos del tipo residencial de baja densidad.

5.12.3.2 Desarenador helicoidal

A pesar de que en ninguno de los escenarios evaluados la eficiencia de desarenación superó el 90%, como si lo hizo el desarenador tipo filtros, la curva de eficiencia en función del caudal de prueba del desarenador helicoidal se mostró mucho más estable y se mantuvo dentro del porcentaje de desarenación esperado tanto para los caudales bajos y medios como para los caudales altos. Por lo resultados obtenidos se puede inferir que el rango de funcionamiento del prototipo en mención podría ser mucho más amplio que lo que se alcanzó a demostrar dentro las prácticas desarrolladas. Podría ser necesario someterlo a pruebas con caudales mayores para confirmar esta hipótesis, pero de ser cierta podría instalarse en proyectos residenciales de baja y alta densidad, institucionales y comerciales.

5.12.4 Operación y limpieza

El criterio de operación y limpieza, aunque no afecta el resultado durante el proceso de evaluación de la eficiencia de los prototipos dentro del laboratorio, es un punto muy importante ya que aquello depende que los valores medidos durante las pruebas puedan ser aplicables en proyectos de ingeniería. Como se mencionó durante la descripción de las actividades realizadas en las pruebas, con el fin de no alterar los resultados entre pruebas las cámaras fueron desocupadas completamente después de cada ensayo.

5.12.4.1 Desarenador tipo filtros

Una de las mayores ventajas que se le puede atribuir al prototipo tipo filtros en cuanto a la operación y limpieza de su sistema, es que respeta la característica de la cámara de ser inspeccionable, lo cual es útil no solo por ser un desarenador que requiere mantenimiento, sino que dentro de cualquier sistema de alcantarillado pluvial contar con estructuras inspeccionables es un requerimiento fundamental.

Otra de las ventajas evidenciadas es que da la alternativa de ser limpiada por tres formas distintas:

- Las arenas pueden ser extraídas conectando una manguera a una bomba de lodos.
- Se puede insertar una manguera de agua por uno de los orificios de los filtros y lavar manualmente la estructura posterior a la remoción de las arenas.
- Los filtros pueden removerse para ser revisados, limpiados manualmente o con chorros de alta presión.

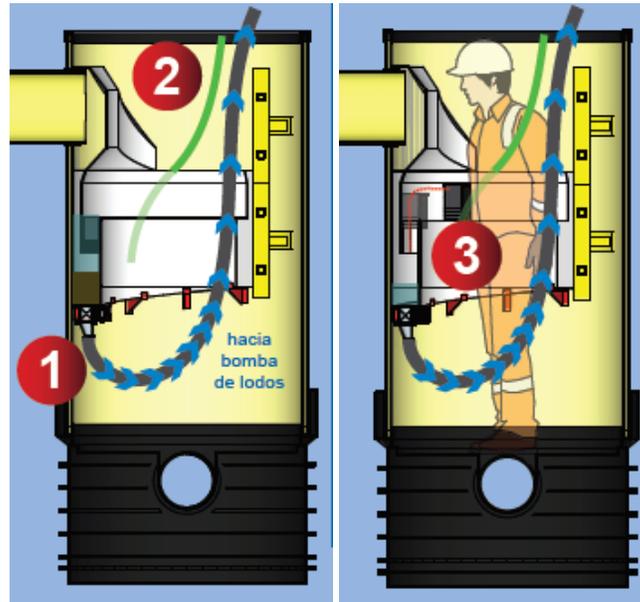


Ilustración 67. Limpieza desarenador tipo filtros

En conclusión, puede hacerse uso de la tecnología y maquinaria disponible, pero en caso de no contar con ningún tipo de instrumentación la limpieza la puede hacer una persona del común con herramientas simples y manuales como un balde y un palustre, no se requiere fuerza ni habilidades especiales.

El volumen total de almacenamiento de sólidos de este prototipo es de 32.6 litros.

5.12.4.2 Desarenador helicoidal

Para alcanzar la alta eficiencia de desarenación que demostró tener este prototipo, fue necesaria la construcción de una estructura compleja dentro de todo el cuerpo de la cámara y no dejó espacio disponible para el ingreso de una persona a la cámara para inspeccionarla. Por la estructura de su diseño exige que la limpieza y remoción de todos los sólidos retenidos se realice utilizando un vector que ingrese su manguera de succión por el ducto central de la estructura y succione tanto los sólidos como los lodos que alberga la base de la cámara.

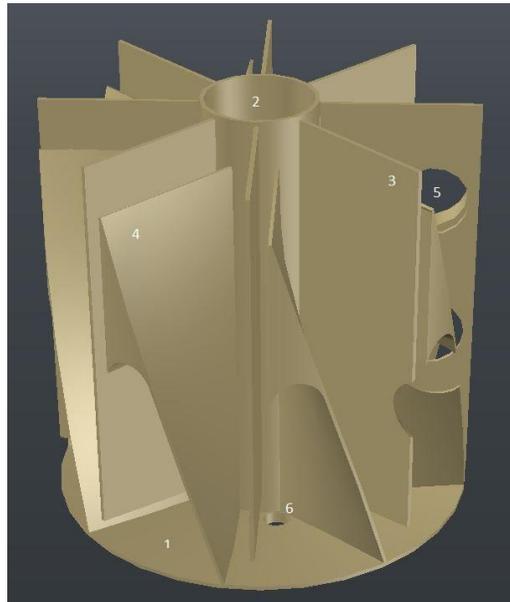


Ilustración 68. Limpieza desarenador helicoidal

El volumen total de almacenamiento de sólidos de este prototipo es de 137 litros.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de las nuevas ciudades, el incremento incesante de poblaciones migrando de forma masiva cada vez más y en menor tiempo hacia las ciudades, y la inmensa permeabilización de zonas verdes como resultado de las nuevas urbanizaciones han alterado el ciclo del agua en sus etapas de evapotranspiración e infiltración natural y han influido significativamente en el incremento de escorrentía en los suelos de las ciudades. Asimismo, las redes de alcantarillado pluvial existentes, no fueron diseñadas para amortiguar tales impactos y están siendo rápidamente colapsadas, generando inundaciones, incremento en los caudales de entrada por conexiones erradas en los alcantarillados sanitarios, riesgo a los ciudadanos en términos de salubridad, seguridad vial, etc.

Los sistemas urbanos de drenaje sostenibles con estructuras hidráulicas de apoyo a los alcantarillados pluviales urbanos, en su variedad de tipologías pueden ser adaptados según la necesidad del sitio: infiltración, retención o retardo; se pueden seleccionar según las limitaciones de espacio, nivel freático, condiciones hidrológicas, intensión de recreación o paisajismo, etc. Entre los más antiguos y utilizados se encuentra el tanque de almacenamiento de agua lluvia, que, en su propuesta más reciente, se construyen a partir de celdas plásticas modulares ya que, por su flexibilidad geométrica, vida útil, facilidad de instalación y discreción entran dentro de la categoría SuDS.

Por otro lado, el incremento en los volúmenes de escorrentía, aumenta a su vez, la erosión en los suelos tanto naturales como artificiales de ciertos tipos (granulares, adoquines, etc.) y sumando los sedimentos arrastrados a lo largo de las vías como: arenas, hojas, residuos de construcción, basuras, etc. Los tanques de almacenamiento tipo celdas plásticas modulares, por sus características constructivas, no permiten la inspección, limpieza ni mantenimiento interno y es imperativo prevenir el ingreso de residuos sólidos de todo tipo y tamaño. Para lograr lo anterior se deben acompañar de estructuras de desarenación.

En varios países, especialmente en países europeos, quienes son los líderes en la tecnología SuDS, han emergido empresas con propuestas innovadoras en tanques de desarenación; el común denominador es la búsqueda de elementos altamente eficientes, costo-efectivos, que requieran poco mantenimiento, ligeros, de materiales plásticos y con una larga vida útil.

Conocer la eficiencia de desarenación de un tanque sedimentador es fundamental en el diseño integral de un sistema de amortiguación de caudales de aguas lluvias con tanque de almacenamiento tipo celdas plásticas modulares, tal información permite dar garantía del funcionamiento del proyecto a largo plazo, estimar el número de desarenadores requeridos según los caudales de diseño y sustentar el proyecto delante de las autoridades ambientales para darle viabilidad.



La información disponible en la literatura acerca de los sólidos suspendidos en el agua de escorrentía es muy poca, parecer ser un área investigación poco explorada y de difícil caracterización pues los estudios encontrados difieren significativamente en sus resultados; lo que permite concluir que la localización geográfica así como la hidrología típica de la zona, el uso del suelo e inclusive las culturas, son factores influyentes en el tipo, tamaño y concentración del material transportado por el agua lluvia.

Cada uno de los dos prototipos construidos es distinto no solo en concepto, principios físicos e hidráulicos de funcionamiento, operación sino también en eficiencia y utilidad como estructura complementaria a tanques de almacenamiento tipos celdas plásticas modulares.

El desarenador tipo filtros, construido a partir de láminas de acrílico, adhesivo epóxico y mallas metálicas, mostró que su proceso productivo no es complejo; sus piezas pueden ser prefabricadas y cortadas en serie para luego ser cementadas manualmente. Otra opción, teniendo en cuenta que es una sola pieza, es optar por la fabricación de un molde para inyección o inclusive roto molde que acorte los tiempos de producción y reduzca los desperdicios de material. Se recomienda que el material de las mallas sea reemplazado por algún tipo de acero inoxidable o mallas plásticas que eviten la oxidación de los filtros, ya que esta fue evidente aun cuando el periodo de realización de las pruebas no supero las 5 semanas de funcionamiento.

El prototipo de desarenador tipo filtros permite la retención de arenas finas y de diámetro medio, lo cual da cumplimiento al criterio bajo el cual fue diseñado, sin embargo, si pensamos en la gran variedad de sólidos que pueden ser transportados por el alcantarillado pluvial, tales como basuras, residuos de construcción, aceites, etc., se pone en tela de juicio la funcionalidad de la estructura ya que el volumen de almacenamiento de sólidos del desarenador es de tan solo 37 litros y la única salida que tiene el agua es por rebose, entonces, el flujo de agua lluvia podría verse represado dentro de la cámara y eso alteraría el diseño de la red y se podrían generar problemas aguas arriba.

El desarenador helicoidal fue construido a partir de láminas y tubos de PVC, el ensamble se hizo con tornillos metálicos y silicona fría. El proceso de construcción es complejo y toma mucho tiempo. La construcción del prototipo, por ser el primero y haberse realizado de forma artesanal tomó alrededor de 7 meses. Esos tiempos pueden ser reducidos significativamente una vez de estandaricen los moldes y el corte de cada una de las piezas, pero el ensamble, por tratarse de una estructura de varias piezas empastadas en un orden específico se tendría que seguir realizando de manera manual.

El desarenador helicoidal, demostró alta eficiencia en la remoción de arenas finas, medias y gruesas. Adicionalmente, a pesar de no ser probado para lo mismo, con tan solo observar el diseño, se ve que cuenta en la parte superior de la cámara con una rejilla que impide el paso de sólidos de gran tamaño, como basuras y hojas, al interior de la estructura, y como es en la sección más alta de la



cámara, estos pueden ser removidos fácilmente de forma manual con tan solo levantar la tapa que descansa sobre el cono de la cámara.

El desarenador tipo filtros alcanza valores de eficiencia mayores para caudales bajos en comparación con el desarenador helicoidal, pero su eficiencia cae rápidamente cuando es puesto a prueba con caudales altos. Por otro lado, la eficiencia de desarenación del desarenador helicoidal es estable en todo el rango de caudales probados, es decir que su rango de variación es estrecho.

Ambos diseños son innovadores, no son nada similares a los encontrados actualmente en la industria y descritos en el presente documento, cumplen con una eficiencia de desarenación superior al 75% para caudales medios y bajos y podrían ser desarrollados por manufactureras del gremio de tubosistemas y soluciones para sistemas de drenaje urbano sostenible dándoles aplicación en proyectos pequeños como escuelas, instituciones de pequeñas áreas, residenciales de baja densidad y comerciales siempre y cuando se verifiquen los aportes de aguas lluvias de las áreas aferentes al proyecto.

Establecer la frecuencia de limpieza y/o mantenimiento del sistema no es posible debido a que no existe una caracterización de la concentración de arenas en la escorrentía y como se mencionó anteriormente esto depende mucho de las características del proyecto. La recomendación es que, durante los primeros tres meses posteriores a la instalación de cualquiera de los desarenadores, se haga una inspección semanal y también después de cada evento de lluvia del desarenador y se lleve una bitácora de los niveles de arenas encontrados, tanto en altura acumulada como en caracterización cualitativa. El personal encargado de la operación del sistema que se espera sea el mismo de la administración del inmueble, debe establecer la periodicidad del mantenimiento que requiere la estructura según la información recolectada.

Finalmente, a pesar que se encontraron muy buenos resultados en cuanto al porcentaje de eficiencia, se cree que estos podrían ser más altos una vez se logren producir los prototipos industrialmente pues se minimizarán los riesgos de fugas por el empate incorrecto de piezas, manipulación excesiva de los elementos, etc.

7 REFERENCIAS

- DESARENADOR. (2009). Retrieved from <http://sistemadetratamientodelagua.blogspot.com/2009/04/desarenador.html>
- Survey, G., Service, R. C., & Matter, D. (2013). Standard Test Methods for Determining Sediment Concentration in Water Samples 1, 97(Reapproved), 1–7. <https://doi.org/10.1520/D3977-97R13E01.2>
- Bhardwaj, T. (2017). Mapping Soil Erosion using USLE. Retrieved from <https://www.satpalda.com/blogs/mapping-soil-erosion-using-usle>
- García-Naranjo, M. (2015). Diseño de desarenadores. Retrieved from <https://es.slideshare.net/mgarcianaranjo/diseo-de-desarenadores>
- Anupaju, S. (2016). Sedimentation Tank Design Parameters. *The Constructor*. Retrieved from <https://theconstructor.org/environmental-engg/sedimentation-tank-design-parameters/21277/>
- Matos, C., Santos, C., Pereira, S., Bentes, I., & Imteaz, M. (2013). Rainwater storage tank sizing: Case study of a commercial building. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.04.004>
- Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Saldarriaga, J. G., & Navarro-Planas, V. R. (2017). Pseudo-genetic Model Optimization for Rehabilitation of Urban Storm-water Drainage Networks. *Procedia Engineering*, 186, 617–625. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.278>
- Banco Mundial. (2018). Población Urbana. Retrieved from <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL?locations=CO>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2018). Urbanization. Retrieved from <https://ourworldindata.org/urbanization>
- Abellán, A. (2016). Los impactos de la urbanización en el ciclo del agua. Retrieved from <https://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/impactos-urbanizacion-ciclo-agua>
- Perlman, H. (2018). Ciclo del agua. Retrieved from <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>
- Casado, A. (2018). Erosión Hídrica: Etapas, Causas, Efectos, Tipos. Retrieved from <https://www.lifeder.com/erosion-hidrica/>

- Pérez, M. (2016). *Efecto de los Diferentes Criterios de Auto-Limpieza Sobre el Resultado Final de un Diseño Optimizado de Redes de Alcantarillado en Sistemas de Drenaje Urbano*. Universidad de los Andes.
- Imteaz, M. A., Rahman, A., & Ahsan, A. (2012). Reliability analysis of rainwater tanks: A comparison between South-East and Central Melbourne. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.05.009>
- Leong, J. Y. C., Oh, K. S., Poh, P. E., & Chong, M. N. (2017). Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3014–3027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.167>
- Jenkins, G. A., Greenway, M., & Polson, C. (2012). The impact of water reuse on the hydrology and ecology of a constructed stormwater wetland and its catchment. *Ecological Engineering*, 47, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.006>
- Slaughter, A. R., Hughes, D. A., Retief, D. C. H., & Mantel, S. K. (2017). A management-oriented water quality model for data scarce catchments. *Environmental Modelling and Software*, 97, 93–111. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.015>
- Haydee, A., Reguero, M., & Rodriguez, Y. D. (2015). SUDS : Metodología de cálculo y experiencias en áreas urbanas.
- Environment Agency. (2007). *Cost-benefit of SUDS Retrofit in Urban Areas. Science Report – SC060024*. Retrieved from <http://publications.environment-agency.gov.uk/PDF/SCHO0408BNXZ-E-E.pdf>
- Lucke, T., Nichols, P., Shaver, E., Lenhart, J., Welker, A., & Huber, M. (2017). Pathways for the Evaluation of Stormwater Quality Improvement Devices – the Experience of Six Countries. *Clean - Soil, Air, Water*, 45(8). <https://doi.org/10.1002/clen.201600596>
- Heal, K. V., Bray, R., Willingale, S. A. J., Briers, M., Napier, F., Jefferies, C., & Fogg, P. (2009). Medium-term performance and maintenance of SUDS: A case-study of Hopwood Park Motorway Service Area, UK. *Water Science and Technology*, 59(12), 2485–2494. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.288>
- Department for Environment Food and Rural Affairs. (2010). Flood and Water Management Act 2010. *Water Management*, 1–84. Retrieved from <http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2010/29/contents>
- Ota, J. J., & Nalluri, C. (2003). Urban Storm Sewer Design: Approach in Consideration of Sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(4), 291–297. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:4\(291\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:4(291))



- Gómez-Valentín, M., Pouget, L., Cabello, A., Sunyer, D., & Russo, B. (2015). Estudio de la erosión de un sedimento orgánico en la red de alcantarillado. *V Jornadas de Ingeniería Del Agua. La Precipitación y Los Procesos Erosivos*, 897–906. <https://doi.org/ISBN:978-84-608-3043-6>
- Minambiente. (2019). Gestión Integral del Recurso Hídrico. Retrieved from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico>
- Maglić, L., Frančić, V., Zec, D., & David, M. (2017). Ballast water sediment management in ports. *Marine Pollution Bulletin*, (September), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.065>
- Huston, R., Chan, Y. C., Gardner, T., Shaw, G., & Chapman, H. (2009). Characterisation of atmospheric deposition as a source of contaminants in urban rainwater tanks. *Water Research*, 43(6), 1630–1640. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.045>
- Ochowiak, M., Matuszak, M., Włodarczak, S., Ancukiewicz, M., & Krupińska, A. (2017). The modified swirl sedimentation tanks for water purification. *Journal of Environmental Management*, 189, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.023>
- CIRIA. (2017). *The SUDS manual*.
- Lía Ramos, F., & Flores, L. (2009). Caracterización de sedimento acumulado en alcantarillas . Caso : Ciudad de Santander en España, 70(2), 146–158.
- Abellán, A. (2013). Sistemas de Drenaje Sostenible. Retrieved from <http://sudsostenible.com/bienvenidos-a-drenaje-urbano-sostenible/>
- RODRIGUEZ, J., RODRIGUEZ, J., GOMEZ-ULLATE, E., & CASTRO, D. (2005). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Interciencia*, 30(5), 1–25.
- Brzozowski, C. (2007). Stormwater management. *Erosion Control*, 14(5), 68–75. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(02\)80723-1](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(02)80723-1)
- Device, S. P. (n.d.). Trash guard plus ®.
- Burgess, A. H. (1995). Stormwater management system. *American Ceramic Society Bulletin*, 74(4), 54–57. [https://doi.org/10.1016/0377-0265\(93\)90012-V](https://doi.org/10.1016/0377-0265(93)90012-V)
- Camargo, C., Pacheco, C., & López, R. (2017). Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Gestión y Ambiente*, 20(2), 265–280.
- Takamatsu, M., Barrett, M. E., & Charbeneau, R. J. (2012). Alternative approach to evaluate sedimentation performance of stormwater detention basins using a nondimensionalized

- time scale. *Journal of Environmental Engineering (United States)*, 138(7), 809–814.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000526](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000526)
- Heal, K. V., Hepburn, D. A., & Lunn, R. J. (2006). Sediment management in sustainable urban drainage system ponds. *Water Science and Technology*, 53(10), 219–227.
<https://doi.org/10.2166/wst.2006.315>
- Napier, F., Jefferies, C., Heal, K. V., Fogg, P., Arcy, B. J. D., & Clarke, R. (2009). Evidence of traffic-related pollutant control in soil-based Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS). *Water Science and Technology*, 60(1), 221–230. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.326>
- Boogaard, F., van de Ven, F., Langeveld, J., & van de Giesen, N. (2014). Stormwater Quality Characteristics in (Dutch) Urban Areas and Performance of Settlement Basins. *Challenges*, 5(1), 112–122. <https://doi.org/10.3390/challe5010112>
- Ellis, J. B., & Mitchell, G. (2006). Urban diffuse pollution: Key data information approaches for the Water Framework Directive. *Water and Environment Journal*, 20(1), 19–26.
<https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2006.00025.x>
- Ibáñez, A., Ramón, M., Blanquer, G., & Manuel, J. (2015). La Ecuación Universal De Pérdidas De Suelo (Usle), 10.
- Periago, L., González, S., González, R., & Viqueira, D.-F. (n.d.). Un Modelo Conceptual Para La Estimación De La Carga De Sólidos En Suspensión a Partir De La Escorrentía.
- Zafra MCA, Temprano GJ, T. M. (2007). Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía Contamination by urban superficial runoff: accumulated heavy metals on a road surface. *Revista de Ingeniería e Investigación*, 27(1), 4–10.
- Pacheco, E., Farguell, J., Úbeda, X., Outeiro, L., & Miguel, A. (2011). Escorrentía y producción de sedimento en una cuenca mediterránea con dos usos diferentes del suelo. *Cuaternario y Geomorfología: Revista de La Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española Para El Estudio Del Cuaternario*, 25(3), 103–114. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3844610&info=resumen&idioma=ENG>
- Li, Y., Kang, J.-H., Sim-Linm, L., & Kayhanian, M. (n.d.). Optimization of Settling Tank Design to Remove Particles and Metals. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-93722008134:11885>
- Escalante, A. N. (2011). Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible. Retrieved from <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/73754/Sistema+Urbanos+de+Drenaje+Sostenible>



Graf. (n.d.). EcoBloc System Stormwater management Internationally proven: GRAF infiltration technology.

PUB. (n.d.). ON-SITE STORMWATER DETENTION TANK SYSTEMS.

Gdańsk. (2015). OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL SETTLING TANKS SEPARATORS
SETTLING TANKS AND SEPARATORS, (March). Retrieved from www.ecol-unicon.com

HydroInternational. (n.d.). Vortex Separator for Stormwater Treatment.

Organización panamericana de la salud. (2005). GUÍA DE PROCEDIMIENTOS PARA LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE DESARENADORES Y SEDIMENTADORES.

Graf. (n.d.). Graf Optimax[®] Rainwater Filters of residential , commercial and industrial, 1–2.

US EPA. (2010). Stormwater Best Management Practice (BMP) Performance Analysis, 2010(December 2008), 232. <https://doi.org/10.1186/s13018-017-0643-7>

Graf. (2016). Stormwater management drawing.pdf.

Graf. (n.d.). EcoBloc System Stormwater management.

HidroStank. (n.d.). Separación Hidrodinámica (HDS) Urbangreen[®] Beneficios de la HDS
Aplicaciones de la HDS Características del sistema CDS (Separación Deflectiva Continua).

Lemont, L. (2018). How to improve stormwater pollution capture, prevent environmental damage and ensure regulatory compliance. *Hydro International*.