

TESIS DE PREGRADO

**ANALISIS DEL DISEÑO DE TRAMPAS DE SEDIMENTO ANTES DE
TANQUES DE TORMENTA**

Tania Victoria Niño Escalante

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



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

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a la Universidad de los Andes, por haberme acompañado durante mi proceso de formación profesional; gracias a mi asesor Juan Guillermo Saldarriaga, por siempre alentarme a buscar la excelencia en las actividades; gracias a John Calvo, por ayudarme siempre en el laboratorio; a mis padres y hermano por el apoyo incondicional que me han dado a lo largo de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo General.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos.....	2
2	Marco teórico	3
3	Metodología.....	5
3.1	Estimación de caudales.....	6
3.2	Selección de la granulometría.....	7
3.3	Material adicional necesario.....	7
3.4	Procedimiento de las pruebas.....	8
3.5	Granulometría de las muestras.....	13
3.6	Limpieza de la cámara desarenadora	13
4	Resultados	21
4.1	Capacidad de la cámara desarenadora.....	21
4.2	Granulometría de la arena saliente.....	23
4.3	Tiempo de llenado de la cámara desarenadora helicoidal	27
5	Análisis de resultados.....	29
6	Conclusiones y recomendaciones	30
7	Referencias	31

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Montaje del laboratorio.....	5
Ilustración 2. Tanque de alimentación, válvula, tubería de alimentación y tolva.	6
Ilustración 3. Caudalímetro usado para las pruebas	7
Ilustración 4. Embudo utilizado.....	8
Ilustración 5. Tolva que contiene la arena	8
Ilustración 6. Curva de calibración del vertedero de salida	9
Ilustración 7. Caudal que sale de la cámara.	9
Ilustración 8. Tolva con la arena.....	10
Ilustración 9. Vertedero de salida	11
Ilustración 10. Vertedero de salida luego de retirar el agua	11
Ilustración 11. Arena que se recoge del vertedero de salida	12
Ilustración 12. Arena lista para llevar al horno para secarla	12
Ilustración 13. Arena en la balanza luego de secarla en el horno	12
Ilustración 14. Tamices con los que se realizó la granulometría de las muestras de arena saliente de la cámara.....	13
Ilustración 15. Tanque de almacenamiento y alimentación principal.	14
Ilustración 16. Arena ubicada en el tanque principal de abastecimiento	15
Ilustración 17. Tanque principal de abastecimiento desocupado	15
Ilustración 18. Tanque principal siendo llenado nuevamente con agua limpia	16
Ilustración 19. Drenaje del agua almacenada en la parte baja de la cámara	17
Ilustración 20. Drenaje del agua dentro de la cámara	17
Ilustración 21. Creación del primer agujero de la cámara	17
Ilustración 22. Arena almacenada al interior de la cámara.....	18
Ilustración 23. Vista al interior de la cámara desde el agujero	18
Ilustración 24. Eliminación manual de la arena.....	19
Ilustración 25. sello de los agujeros hechos en la cámara desarenadora	20
Ilustración 26. Interior de la cámara desarenadora luego de remover la arena de las pruebas anteriores	20

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Eficiencia de la retención de arena de la cámara	22
Gráfica 2. Resultados de la arena saliente de los lavados de la cámara	23
Gráfica 3. Curvas de granulometría de las muestras	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de las pruebas.....	21
Tabla 2. Resultados de los lavados de la cámara desarenadora.....	22
Tabla 3. Granulometría de muestra 1.....	23
Tabla 4. Granulometría de muestra 2.....	23
Tabla 5. Granulometría de muestra 3.....	24
Tabla 6. Granulometría de muestra 4.....	24
Tabla 7. Granulometría de muestra 5.....	24
Tabla 8. Granulometría de muestra 6.....	25
Tabla 9. Granulometría de muestra 7.....	25
Tabla 10. Granulometría de muestra 8.....	25
Tabla 11. Granulometría de muestra 9.....	26

1 INTRODUCCIÓN

Las estructuras nuevas de trampas de sedimentos para antes de tanques de tormentas pueden implicar una mejora en la implementación de estructuras de retención que existen actualmente. Las trampas de sedimentos, como su nombre lo indica, buscan retener los sedimentos antes de que lleguen a los tanques de tormenta, los cuales captan las aguas lluvias para después dirigirlas a las redes de alcantarillado con el fin de mitigar el caudal que pasa por estas redes en temporadas de lluvia (Ayesa). Un desarenador antes de un tanque de tormenta busca que el material particulado que contiene el agua lluvia quede retenido en la trampa y no pase al tanque de tormenta, esto con el fin de evitar que las redes de alcantarillado de un sector se llenen de material sedimentante y generen un problema mayor.

La estructura que quiere probarse actualmente, consiste en un desarenador con forma de helicoidal en su interior que busca reducir la velocidad del agua que entra y de esta manera permitir que las arenas que transporta se decanten en su interior. Sin embargo, esta nueva estructura requiere de una distribución del espacio distinta a las actualmente utilizadas, es por esto, que se quiere probar su eficiencia, pero en especial se quiere analizar el diseño de esta, es decir, poder concluir si el diseño propuesto por Álvaro López, ganador del concurso de la fundación PAVCO en el 2017 es lo suficientemente eficiente y cuánto tiempo tardará en llenarse esta trampa, todo esto con el fin de dar un juicio acerca de la conveniencia de la implementación de estos nuevos modelos.

Se espera que este modelo que se va a probar en el laboratorio a lo largo del semestre muestre un rendimiento superior a las estructuras actualmente utilizadas. Una prueba de lo que puede llegar a ser la eficiencia de este tipo de modelos, es que se han venido comercializando distintos tipos de desarenadores en forma de espiral, como es el caso del desarenador que se muestra en el portal de drenatura (Mikelfa, s.f.), el cual contiene una espiral en su interior, sin embargo, el diseño de este es diferente al que se desea probar en el laboratorio de alcantarillados. El diseño helicoidal que se quiere poner a prueba durante el periodo de investigación, asegura llegar a una eficiencia de hasta el 75% con un caudal de 5 l/s.

En el campo profesional de la ingeniería hidráulica se ha generado un interés importante en este tipo de modelos, ya que estos modelos tienen un nivel de complejidad en el mantenimiento menor al actualmente implementado. Esto se debe a que, una vez instalado el tanque de tormentas, su mantenimiento tiene un alto nivel de dificultad y lo que se busca con la implementación de una trampa de sedimentos es de evitar, a toda costa, que las arenas lleguen al tanque y a su vez a la red de alcantarillado. Las implicaciones que tendrían que los sedimentos lleguen a la red de alcantarillado son bastante graves, ya que estas se entienden como el sistema circulatorio de una ciudad en términos de aguas potables, residuales y de lluvias, si se llegara a generar algún

taponamiento de una de estas tuberías de aguas lluvias, las pérdidas económicas serían enormes. Además, esto implicaría la detención de la prestación del servicio del alcantarillado a la ciudad, esto desencadenaría una serie de brotes de enfermedades en la ciudad. Es aquí donde yace el interés del mundo ingenieril en este tipo de soluciones, para evitar que una ciudad deje de funcionar y entre en crisis económica y de salud debido a un problema que puede ser evitado adoptando medidas innovadoras.

Como se ha mostrado previamente, la búsqueda de soluciones fáciles y efectivas llevará a una ciudad a tener un mejor desarrollo y evitar paros en su funcionamiento. A lo largo de estas pruebas de laboratorio se decidirá si la estructura propuesta es viable en términos de limpieza, almacenamiento y eficiencia de retención de sedimentos. El análisis de esta cámara helicoidal se hará con un enfoque en su diseño y se buscará principalmente dar respuesta al interrogante de su capacidad de almacenamiento y un estimado de tiempo para su limpieza.

Para resumir, es necesario probar las trampas de sedimentos que se encuentran en el laboratorio de alcantarillado de la universidad con el fin de concluir si son una buena opción o es mejor actuar conforme al protocolo de tanques de tormenta como se ha venido haciendo hasta ahora. También, es necesario decidir si vale la pena cambiar el tipo de distribución y el espacio que ocupan las trampas actuales por las nuevas que han sido propuestas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Evaluar el diseño de la cámara desarenadora helicoidal desarrollada por el equipo de PAVCO y diseñada por Álvaro López ganador del concurso de la fundación PAVCO, este análisis incluye la estimación del tiempo de llenado de la cámara y el punto de saturación de la cámara.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la capacidad de llenado de la cámara desarenadora helicoidal
- Establecer un tiempo real de llenado
- Identificar oportunidades de mejora en el diseño
- Idear un método de limpieza para la cámara

2 MARCO TEÓRICO

Desarenador: es una estructura hidráulica que tiene como función remover las partículas de cierto tamaño que la captación de una fuente superficial permite pasar. Es una estructura diseñada para retener la arena que traen las aguas servidas o las aguas superficiales a fin de evitar que ingresen, al canal de aducción, a la central hidroeléctrica o al proceso de tratamiento y lo obstaculicen creando serios problemas. (Martínez, 1970)

Sedimentador: Un sedimentador es un tanque en donde se realiza la remoción de partículas inferiores a 0.2 mm y superiores a 0.05 mm. Comprende cuatro partes: una zona de entrada o estructura hidráulica de transición que permite una distribución uniforme del flujo dentro del sedimentador; una zona de sedimentación; una zona de salida constituida por un vertedero, canaletas o tubos con perforaciones que recolectan el efluente; y una zona de recolección de lodos, constituida por una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados y una tubería y válvula para su evacuación periódica (OPS 2005b). Los sedimentadores pueden ser tanques circulares o rectangulares (CONAGUA 2015b). En tanques rectangulares, la relación longitud-ancho varía entre 3:1 y 5:1, con profundidades de agua mayores a dos metros, longitud menor de 90 m., ancho de 3 a 24 m. y pendiente suave, 1 ó 2 %; en tanques circulares la pendiente en el fondo es del 8% regularmente (CONAGUA 2015b). (Tilley, 2018).

Sedimentación: La sedimentación simple (también conocida como sedimentación simple por gravedad) es un pretratamiento físico de agua sencillo, de bajo costo, que se realiza antes de la aplicación de otros métodos de purificación como filtración (por ejemplo, filtración lenta de arena) y desinfección (cloración). Este proceso sirve para eliminar partículas pequeñas suspendidas no deseadas (arena, limo y arcilla) y algunos contaminantes biológicos del agua bajo la influencia de la gravedad. Cuanto más tiempo se almacena el agua o se mantiene inalterada, más se depositarán los sólidos en suspensión y los patógenos en el fondo del recipiente. El proceso de sedimentación se puede acelerar agregando coagulantes. (Bruni, 2018)

Sedimento: es la materia que, después de haber estado en suspensión en un líquido, termina en el fondo por su mayor gravedad. Este proceso se conoce como sedimentación. (Pérez Porto & Gardey, 2010)

Tanque de tormentas: Los tanques de tormenta son parte de las infraestructuras de alcantarillado de algunas ciudades. Son depósitos cuyo objetivo es retener el agua de lluvia que llega a través de los colectores, especialmente cuando se trata de lluvias intensas, para minimizar el riesgo de inundaciones. Limitan el aumento súbito del caudal y evitan que las primeras lluvias, que son las más contaminadas, lleguen directamente a ríos y arroyos. El agua que queda almacena en estos tanques se conduce posteriormente a las depuradoras, donde será tratada y enviada a los sistemas fluviales en condiciones óptimas de calidad. No solo funcionan antes fuertes precipitaciones,

también cuando en la época de lluvias las depuradoras no son capaces de tratar más agua por falta de capacidad y de tiempo. Actúan entonces como retenedores hasta que las plantas depuradoras están preparadas para albergar nuevas entradas de agua. (Rodríguez, 2019)

3 METODOLOGÍA

Para explicar el proceso llevado a cabo en el laboratorio para analizar el diseño de la trampa de sedimentos, es necesario aclarar el funcionamiento del modelo de laboratorio con el que se trabajó: se cuenta con un tanque de almacenamiento que tiene una bomba sumergible, la cual transporta el agua hacia un tanque de alimentación que descargará el agua a través de una tubería con válvula de seis pulgadas hacia una tubería que se conectará a la cámara desde la parte superior y liberará agua con sedimento. El sedimento que se mezclará con el agua que viene del tanque de almacenamiento es añadido desde una tolva que se conecta a la mitad de la tubería de alimentación. A continuación, se mostrarán imágenes del montaje del laboratorio.



Ilustración 1. Montaje del laboratorio

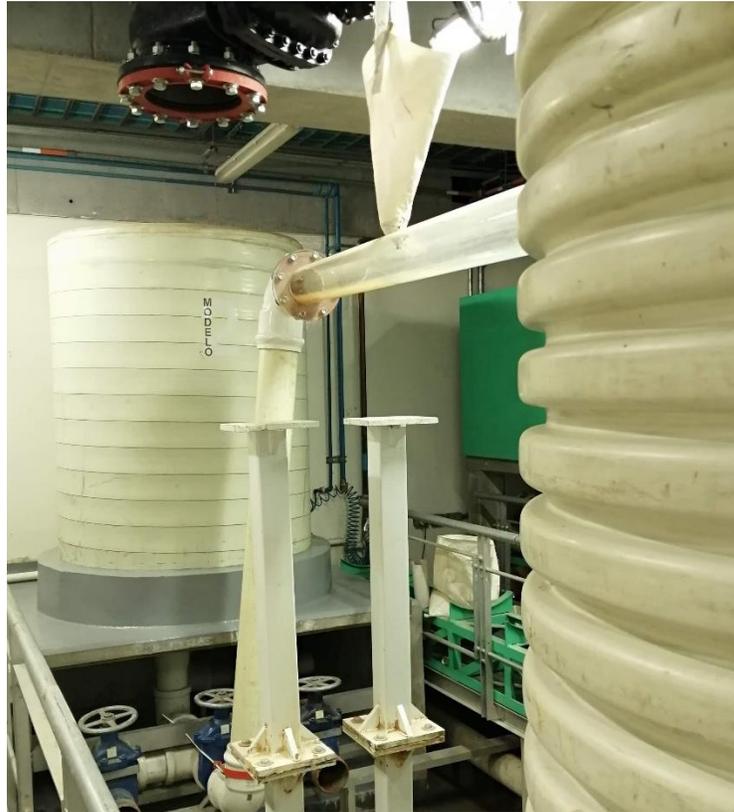


Ilustración 2. Tanque de alimentación, válvula, tubería de alimentación y tolva.

3.1 Estimación de caudales

Para comenzar, es necesario definir los caudales y la carga de sedimento que se le pondrá al modelo. Para la selección de caudales de las pruebas, se hizo uso del manual del diseñador de la cámara helicoidal, donde se sugiere que el caudal máximo que puede tolerar el diseño es de 5 l/s para garantizar una eficiencia de hasta el 75%. Con esta información de caudal, se configura entonces el paso del agua hacia el modelo de para no exceder el límite previamente establecido.

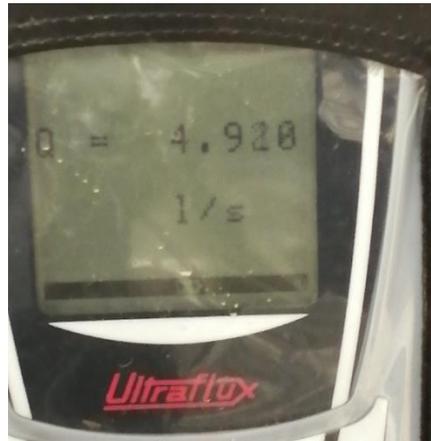


Ilustración 3. Caudalímetro usado para las pruebas

3.2 Selección de la granulometría

Para la selección de la granulometría de la arena que se utilizó en las pruebas, se siguió utilizando la seleccionada por Laura Ortega de la Pava, ya que ella estuvo trabajando con el desarenador en una ocasión previa y estableció ciertos parámetros para las pruebas, tales como la granulometría, que en este caso se considera pertinente continuar utilizando. La arena que se utilizó fue de 12-20 (1.51 mm), 20-30 (1.21 mm), 30-40 (0.47 mm) y 60-70, en proporciones de 25% de la carga completa que se le irá aplicando a la cámara. Adicionalmente, se sigue con la carga de 10 kg de arena para las pruebas, esto quiere decir que se utilizarán 2.5 kg de arena de cada tamaño previamente mencionado.

3.3 Material adicional necesario

Para añadir la arena dentro del modelo, se utilizaron embudos con una apertura suficiente para permitir el paso de arena en una concentración entre 40 y 200 g/L/s, es decir, se estimó que la arena debe pasar por el embudo en una cantidad estimada de 10 g/s. A continuación, se muestran la tolva y el embudo utilizados para añadir la arena al modelo.



Ilustración 4. Embudo utilizado



Ilustración 5. Tolla que contiene la arena

3.4 Procedimiento de las pruebas

Con el fin de llevar a cabo las pruebas, se siguió el procedimiento previamente establecido por Laura Ortega para probar la eficiencia de la cámara, sin embargo, en este caso, se estará analizando la capacidad del modelo y el tiempo de llenado, con el fin de establecer un período de tiempo para limpieza.

El proceso de cada prueba consiste en:

1. Encender el modelo y asegurar un caudal de 5 l/s.

En esta etapa, se abre y cierra la válvula en repetidas ocasiones y se espera a que se regule el caudal para probar los caudales máximos y mínimos a los que puede ser sometido el modelo. En este caso, se estimó que se puede manejar un rango de caudales de aproximadamente entre 3 y 8 l/s. Sin embargo, se decidió apegarse a las sugerencias hechas por el diseñador y trabajar con un caudal para todas las pruebas de 5 l/s. Los caudales fueron medidos siempre con un caudalímetro, el cual se encontraba sincronizado correctamente con las curvas de calibración del vertedero del tanque de salida.



Ilustración 6. Curva de calibración del vertedero de salida

En la Ilustración 6, se puede ver claramente el vertedero de salida y la ecuación para hallar el caudal según la altura de la lámina de agua.



Ilustración 7. Caudal que sale de la cámara.

- Añadir la carga de 10 kg de arena a la tolva con el embudo.

Se añade la carga de 10 kg, esta carga está distribuida con los porcentajes tipo de arena según el tamaño de grano que se mencionaron previamente.



Ilustración 8. Tolva con la arena

3. Asegurar que la arena esté pasando por el embudo y se esté mezclando con el agua.

Se debe asegurar que la arena si pase por el embudo de forma ininterrumpida, es por esto, que en esta fase se requiere de una estricta vigilancia al embudo.



4. Esperar a que toda la carga de arena sea desalojada de la tolva.
5. Apagar el modelo.
6. Sacar el agua del vertedero de salida.

En esta etapa, se hizo uso de una bomba sumergible que permite la extracción del agua del tanque antes del vertedero de salida.



Ilustración 9. Vertedero de salida

Luego de retirar el agua, se puede observar la arena que no quedó atrapada en la cámara desarenadora y que llegó al tanque.

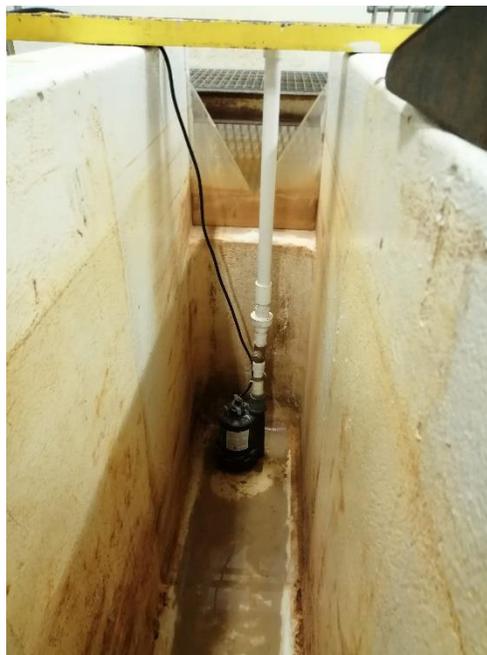


Ilustración 10. Vertedero de salida luego de retirar el agua

7. Recoger la arena que queda en el fondo del vertedero de salida en recipientes de aluminio aptos para horno.

Esta arena se retira en su totalidad con una pala pequeña y una brocha.



Ilustración 11. Arena que se recoge del vertedero de salida



Ilustración 12. Arena lista para llevar al horno para secarla

8. Llevar las muestras al horno, este proceso puede tardar alrededor de un día.
9. Pesar la arena resultante.



Ilustración 13. Arena en la balanza luego de secarla en el horno

10. Realizar la granulometría de estas muestras de arena.

Se decidió hacer la granulometría de las muestras de la arena que sale de la cámara debido a que se notó que el tamaño de grano saliente depende de si se está alimentando la cámara con arena o no.



Ilustración 14. Tamices con los que se realizó la granulometría de las muestras de arena saliente de la cámara

Este procedimiento se debe repetir hasta que la arena que sale de la cámara llega a ser por lo menos el 25% de la arena que se le introduce. Finalmente, se estima que el proceso de vaciado de la arena en el agua toma un tiempo de alrededor una hora.

3.5 Granulometría de las muestras

Después de haber pesado la arena que salió de la trampa de sedimentos, fue considerado pertinente hacer la granulometría de estas muestras, para esto, se llevó a cabo el procedimiento especificado en la NTC 77.

3.6 Limpieza de la cámara desarenadora

Debido a que a la cámara desarenadora se le había puesto arena en pruebas anteriores llevadas a cabo por Laura Ortega, y esta arena se quedó atrapada dentro de la cámara, fue necesario buscar alternativas para lograr su limpieza.

Para comenzar, se decidió encender el modelo por un periodo prolongado de tiempo con el caudal máximo permitido el montaje del laboratorio, es decir, 8 l/s. Luego de mantener encendido el montaje por periodos de 1 hora, se lograba sacar una parte de la arena atrapada, sin embargo, se presumía que no era toda la que se encontraba atrapada en la cámara. Por esta razón, se decidió llevar a cabo un proceso exploratorio de la ubicación de la arena dentro de todo el montaje.

Primeramente, se vació el tanque de almacenamiento grande y se encontró una porción de arena que se albergaba allí. Sin embargo, tampoco era la totalidad de la arena, entonces, se lavó el tanque y se retiró toda la arena y limos que se encontraban allí para llenarlo nuevamente con agua limpia.



Ilustración 15. Tanque de almacenamiento y alimentación principal.



Ilustración 16. Arena ubicada en el tanque principal de abastecimiento



Ilustración 17. Tanque principal de abastecimiento desocupado



Ilustración 18. Tanque principal siendo llenado nuevamente con agua limpia

De acuerdo con el protocolo propuesto por el diseñador Álvaro López, la limpieza de esta cámara se haría por medio de un Vactor, el cual succionaría el agua y la arena atrapados desde la tubería central y de esta forma, permitir que la cámara desarenadora siga funcionando sin contratiempos. Pero este procedimiento de limpieza no es posible de realizar en el laboratorio debido a las limitaciones de espacio, de ahí que, se debió buscar una alternativa factible para su limpieza en el laboratorio, la cual resultó ser abrir agujeros lo suficientemente grandes como para hacer la limpieza manual como se mostrará a continuación.

Luego, después de haber descartado el tanque de almacenamiento, se decidió que era necesario abrir un agujero en la cámara desarenadora para hacer la verificación pertinente. Se encontró que la arena si quedaba almacenada dentro de la cámara en la zona inferior, por lo tanto, luego de analizar los planos hechos por el diseñador, se escogieron dos lugares para abrir el hueco. Estos agujeros permitieron la limpieza de la cámara en gran medida y se pudo continuar con las pruebas y lograr la saturación que se estaba buscando.

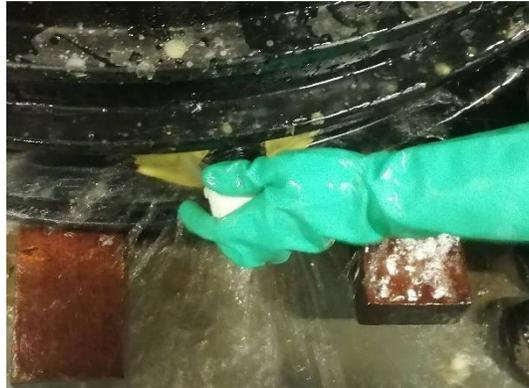


Ilustración 19. Drenaje del agua almacenada en la parte baja de la cámara

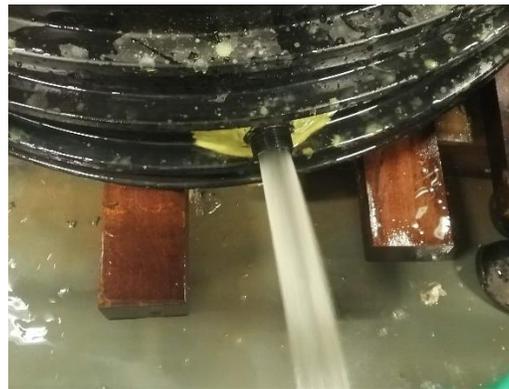


Ilustración 20. Drenaje del agua dentro de la cámara



Ilustración 21. Creación del primer agujero de la cámara

En la Ilustración 21, se puede observar la ubicación del primer agujero que se le hizo a la cámara. El agujero debía ser lo suficientemente grande para poder hacer la extracción de la arena almacenada de forma manual.

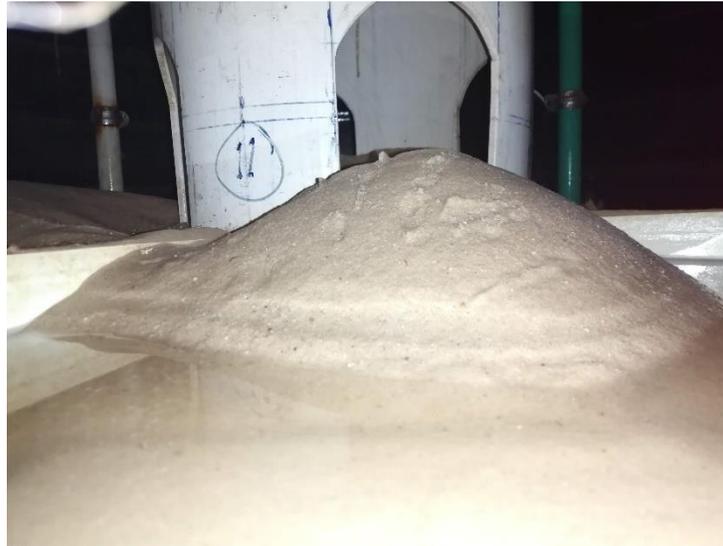


Ilustración 22. Arena almacenada al interior de la cámara



Ilustración 23. Vista al interior de la cámara desde el agujero

También, en la Ilustración 23, se puede observar la acumulación de arena dentro de la cámara. Luego de esto, se procedió a hacer la limpieza manual con una pala y un balde, en la Ilustración 24

se observa el proceso de eliminación de la arena que se encuentra al interior de la parte inferior del desarenador.



Ilustración 24. Eliminación manual de la arena

A pesar de la gran cantidad de arena que se retiró por este agujero, fue necesario abrir un segundo hueco, ya que el tamaño de la cámara desarenadora no permitía el acceso a toda la arena por retirar. El segundo hueco se hizo justo al otro lado del primero, pero se hizo más bajo, es decir, a ras del fondo del tanque, con este segundo agujero se pudo desalojar toda la arena que se albergaba ahí. Los agujeros se sellaron con cinta para ducto debido a que se debían abrir en ocasiones posteriores.

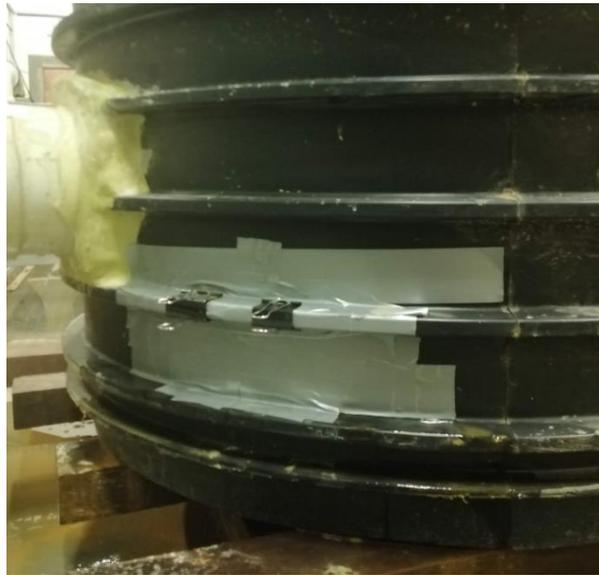


Ilustración 25. sello de los agujeros hechos en la cámara desarenadora

La limpieza de la cámara resultó ser positiva para la obtención de los nuevos resultados de las pruebas, luego de haber sellado los agujeros se continuó con las pruebas descritas previamente.



Ilustración 26. Interior de la cámara desarenadora luego de remover la arena de las pruebas anteriores

4 RESULTADOS

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

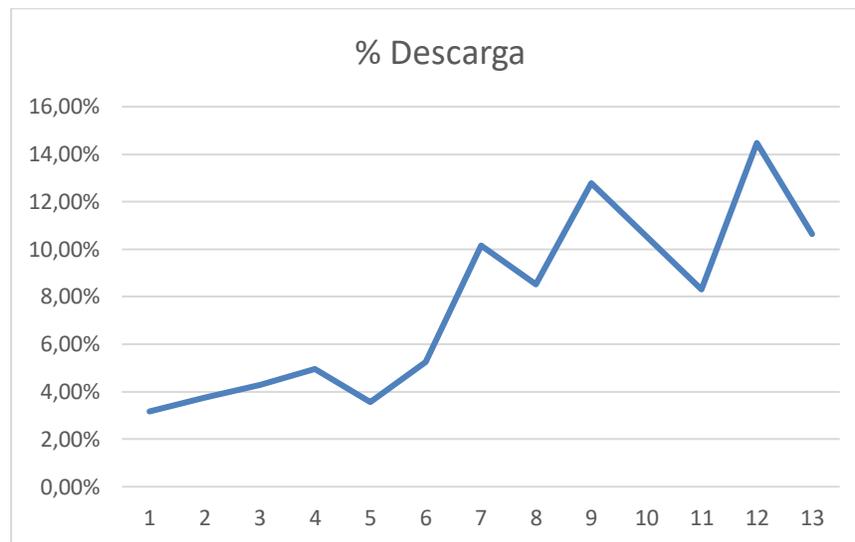
4.1 Capacidad de la cámara desarenadora.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en forma de número de prueba y cantidad de arena saliente.

Tabla 1. Resultados de las pruebas

Prueba	Carga (kg)	Descarga (g)
1	10	317
2	10	376
3	10	428
4	10	495,5
5	10	356,5
6	10	525,5
7	10	1016
8	10	851,1
9	10	1279,1
10	10	1053,5
11	10	830,5
12	10	1447,5
13	10	1063

También se puede observar la curva de comportamiento de la capacidad de almacenamiento de la trampa para sedimentos.

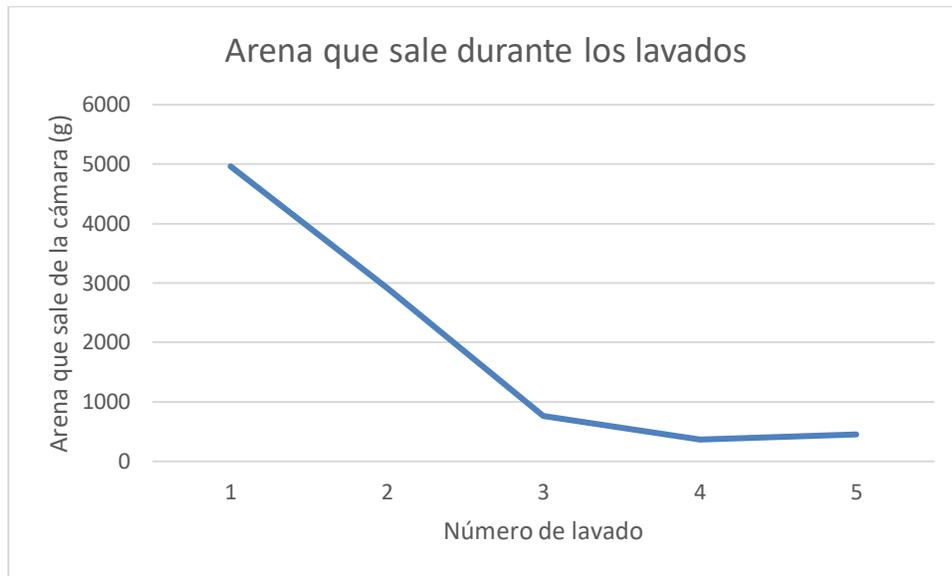


Gráfica 1. Eficiencia de la retención de arena de la cámara

Luego de obtener estos datos se decidió también hacer ciclos de auto lavado de la cámara desarenadora, para esto, la cámara se encendió por periodos de 30 minutos con el caudal máximo de 8 l/s y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2. Resultados de los lavados de la cámara desarenadora

Lavado	Duración (minutos)	Caudal (l/s)	Salida (g)
1	30	8	4963
2	30	8	2919
3	30	8	768
4	30	8	367,5
5	30	8	457,5



Gráfica 2. Resultados de la arena saliente de los lavados de la cámara

4.2 Granulometría de la arena saliente

Como indicador de la eficiencia y la saturación de la cámara, se consideró el tamaño de grano saliente. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 3. Granulometría de muestra 1

Muestra	317	g			
Tamiz	Abertura	Retuvo	% r. parcial	% r. acum	%pasa
8	2,38	0	0%	0%	100%
16	1,19	0	0%	0%	100%
20		0	0%	0%	100%
30	0,595	0	0%	0%	100%
50	0,297	31,1	10%	10%	90%
100	0,149	157,4	50%	59%	41%
200	0,074	90,8	29%	88%	12%
fondo		28	9%	97%	3%

Tabla 4. Granulometría de muestra 2

Muestra	377,2	g			
Tamiz	Abertura	Retuvo	% r. parcial	% r. acum	%pasa
8	2,38	0	0%	0%	100%

16	1,19	0	0%	0%	100%
20		1,1	0%	0%	100%
30	0,595	4,5	1%	1%	99%
50	0,297	58,4	15%	17%	83%
100	0,149	221,3	59%	76%	24%
200	0,074	64,9	17%	93%	7%
fondo		27	7%	100%	0%

Tabla 5. Granulometría de muestra 3

Muestra	495	g			
Tamiz	Abertura	Retuvo	% r. parcial	% r. acum	%pasa
8	2,38	0	0%	0%	100%
16	1,19	0,5	0%	0%	100%
20		2,5	1%	1%	99%
30	0,595	10	2%	3%	97%
50	0,297	100,4	20%	23%	77%
100	0,149	225	45%	68%	32%
200	0,074	66,8	13%	82%	18%
fondo		90,3	18%	100%	0%

Tabla 6. Granulometría de muestra 4

Muestra	495,5	g			
Tamiz	Abertura	Retuvo	% r. parcial	% r. acum	%pasa
8	2,38	0	0%	0%	100%
16	1,19	0,8	0%	0%	100%
20		5,7	1%	1%	99%
30	0,595	26,3	5%	7%	93%
50	0,297	199,1	40%	47%	53%
100	0,149	189	38%	85%	15%
200	0,074	55,2	11%	96%	4%
fondo		19,4	4%	100%	0%

Tabla 7. Granulometría de muestra 5

Muestra	356,2	g			
Tamiz	Abertura	Retuvo	% r. parcial	% r. acum	%pasa

8	2,38	0	0%	0%	100%
16	1,19	0,6	0%	0%	100%
20		5	1%	2%	98%
30	0,595	13,3	4%	5%	95%
50	0,297	99,9	28%	33%	67%
100	0,149	154,3	43%	77%	23%
fondo		83,1	23%	100%	0%

Tabla 8. Granulometría de muestra 6

Muestra	525,6	g			
Tamiz	Abertura	Retuvo	% r. parcial	% r. acum	%pasa
8	2,38	0	0%	0%	100%
16	1,19	1	0%	0%	100%
20		6,2	1%	1%	99%
30	0,595	20	4%	5%	95%
50	0,297	132,1	25%	30%	70%
100	0,149	233,9	45%	75%	25%
fondo		131,8	25%	100%	0%

Tabla 9. Granulometría de muestra 7

Muestra	1016,1	g			
Tamiz	Abertura	Retuvo	% r. parcial	% r. acum	%pasa
8	2,38	0	0%	0%	100%
16	1,19	3,2	0%	0%	100%
20		15,1	1%	2%	98%
30	0,595	61,8	6%	8%	92%
50	0,297	458,2	45%	53%	47%
100	0,149	337,2	33%	86%	14%
fondo		140	14%	100%	0%

Tabla 10. Granulometría de muestra 8

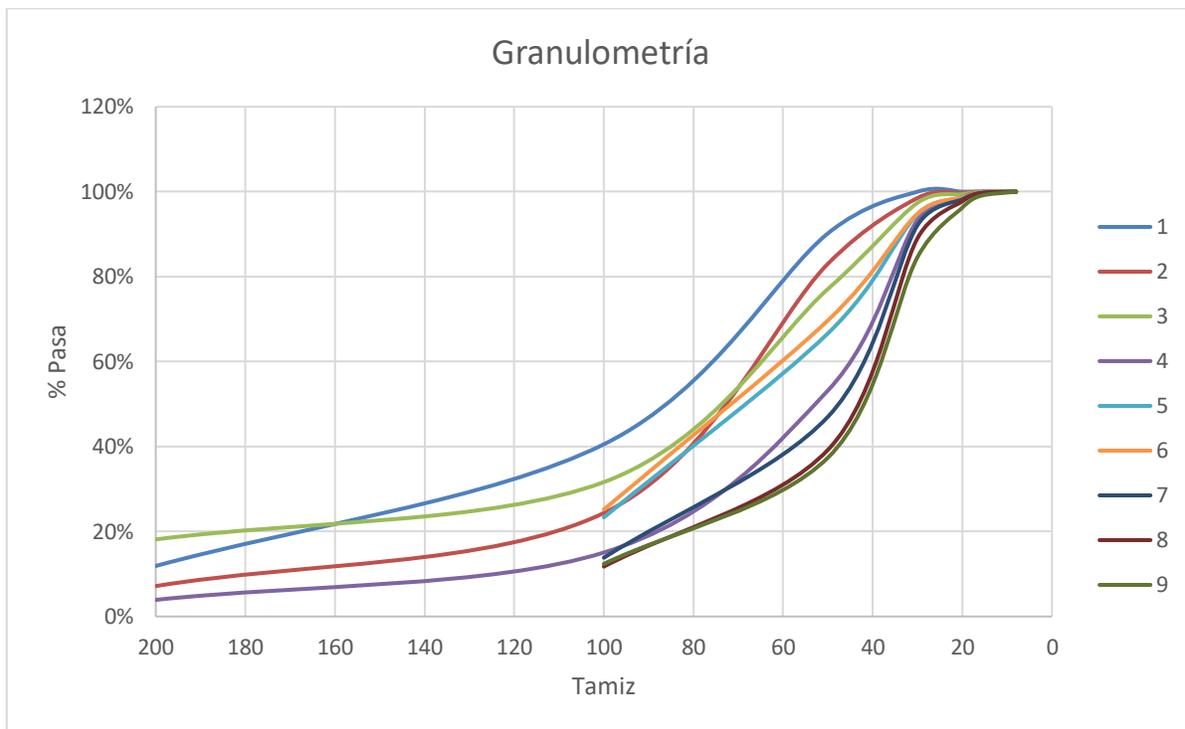
Muestra	851,1	g			
Tamiz	Abertura	Retuvo	% r. parcial	% r. acum	%pasa
8	2,38	0	0%	0%	100%
16	1,19	3,2	0%	0%	100%

20		16,2	2%	2%	98%
30	0,595	73,8	9%	11%	89%
50	0,297	424,1	50%	61%	39%
100	0,149	233,8	27%	88%	12%
fondo		99,6	12%	100%	0%

Tabla 11. Granulometría de muestra 9

Muestra	1279,1	g			
Tamiz	Abertura	Retuvo	% r. parcial	% r. acum	%pasa
8	2,38	0	0%	0%	100%
16	1,19	12,9	1%	1%	99%
20		35	3%	4%	96%
30	0,595	149	12%	15%	85%
50	0,297	604	47%	63%	37%
100	0,149	319,8	25%	88%	12%
fondo		158,3	12%	100%	0%

Adicionalmente, se obtuvieron las siguientes curvas de granulometría:



Gráfica 3. Curvas de granulometría de las muestras

4.3 Tiempo de llenado de la cámara desarenadora helicoidal

Para estimar el tiempo de llenado de la cámara desarenadora se hizo un cálculo teniendo en cuenta el tiempo que tardaba la arena ser desalojada de la tolva.

Velocidad de caída de la arena = 10 g/s

Caudal promedio = 5 l/s

Carga de arena = 10 kg

Entonces, con los datos anteriores se obtiene que:

$$\text{tiempo neto de vaciado de la tolva} = \frac{\text{carga de arena}}{\text{velocidad de caída de la arena}} = \frac{10000\text{g}}{10\text{ g/s}} = 17 \text{ minutos}$$

Sin embargo, se debe tener en cuenta el tiempo añadido debido a los taponamientos que se generan en el embudo. Por esta razón, se considera un tiempo de alrededor 45 a 50 minutos para vaciar la tolva y que la carga completa pase a la trampa de sedimento.

Con el conocimiento de que se le añadieron 130 kg de arena y que este fue el peso máximo que alcanzó antes de perder eficiencia, se considera entonces que la cantidad de tiempo que tarda una cámara desarenadora como la probada en el laboratorio es de:

$$\text{tiempo de llenado de la cámara} = 50 \text{ minutos} * 13 \text{ pruebas} = 650 \text{ minutos} \cong 11 \text{ horas}$$

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De la capacidad de retención de la cámara desarenadora, se puede decir que su eficiencia se ve directamente condicionada a la cantidad de material que esté atrapando previamente, es por esto que se ve una curva en aumento en la Gráfica 1. Sin embargo, se ve claramente una divergencia luego del dato 8, esto se debe a que ya la cámara está llegando a su límite y, en lugar de mantener un comportamiento ordenado, oscila en su capacidad de retención. Es necesario aclarar que la cámara funcionaría correctamente hasta alcanzar una eficiencia del 85%, sin embargo, el diseño está pensado para que el desarenador helicoidal llegue a una eficiencia del 75%.

Dentro de los resultados, también se obtuvieron datos de ciclos de auto lavado de la cámara. Los resultados que se obtienen son desfavorables para la cámara debido a que se evidencia una gran pérdida del material que se encuentra almacenado. Durante las pruebas del laboratorio se pudo observar que el tamaño del grano de arena resultante de estos lavados correspondía principalmente a la gradación más grande que tenía la arena, es decir el tamaño 12-20 (1.51mm). en estos ciclos de lavado es donde se logra ver claramente cómo se supera la eficiencia de contención de sedimentos de la que se habló previamente.

Como criterio de saturación de la cámara desarenadora se utilizó el tamaño de grano saliente. Para evaluar este criterio se obtuvieron las curvas de granulometría de la arena saliente de la cámara. Estas curvas se pueden observar en la Gráfica 3, se puede observar en esta gráfica que, a medida que se va avanzando con las pruebas, la curva se va moviendo más a la derecha, esto significa que el tamaño del grano va aumentando con el paso de las pruebas. Esto se debe a que, en las primeras pruebas, se espera que la cámara, al estar vacía retenga todo el sedimento y que las partículas que salen sean las más pequeñas que se encuentran en suspensión en el agua. A medida que se va avanzando, la capacidad del desarenador disminuye y esto ocasiona que cada vez, partículas más grandes salgan del mismo. Cuando se llega a una curva que está muy a la derecha, se puede concluir también que el desarenador ha llegado al límite y deber vaciado.

El tiempo de llenado de la cámara desarenadora arrojó un estimado de 11 horas recibiendo sedimento y agua en su capacidad máxima, este desarenador también estaría siendo capaz de albergar un estimado de 150 kg de sedimento antes de llegar al límite recomendado. Como no se tienen datos de esorrentía de sedimentos en ciudades, y este dato depende también del régimen de lluvias que pueda llegar a presentar una ciudad, no es posible dar un periodo de mantenimiento preciso. Sin embargo, se considera que la capacidad del desarenador es insuficiente en condiciones extremas.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos se puede decir que el desarenador helicoidal probado no es funcional debido a la cantidad de material particulado que sale hacia los vertederos. Se puede observar que también hay cierta cantidad de arena que no queda retenida en el vertedero que se espera, sino que pasó directo al tanque de alimentación del modelo, por lo tanto, hay un porcentaje de sedimento que no fue atrapado por la cámara desarenadora, pero tampoco pudo ser contabilizado luego de su paso por la misma ya que está quedó almacenada en el tanque de alimentación del modelo.

Desde el principio de las pruebas, se puede observar una gran salida de material y esta salida va en aumento al avanzar con las pruebas. Sin embargo, la arena que sale procedente de cada prueba no es una preocupación, ya que se puede ver que se mantiene dentro del rango de la eficiencia para el que se diseñó la cámara. La salida de material que es preocupante se refiere a la que sale de los lavados de la cámara, es decir, cuando se enciende el modelo y se pone a correr el agua sin añadirle sedimento a la entrada de la cámara, de este si se logra ver una enorme cantidad de material que sale y puede llegar a convertirse en un problema debido a su magnitud.

Una forma útil de saber si la cámara está llegando a su punto de saturación, es con las curvas de granulometría de la arena saliente, de esta forma se puede saber si la salida se encuentra dentro de los rangos normales esperados, es decir, las partículas más pequeñas que permanecen suspendidas por un periodo mayor de tiempo, o si se están lavando las partículas más grandes que pueda llegar a soportar el desarenador.

El mantenimiento en el laboratorio no es fácil de hacer y requiere de mucho tiempo para poder poner en funcionamiento el desarenador. Es necesario indagar más sobre el proceso de limpieza con el vector, sin embargo, se considera insuficiente para retirar todo el material almacenado dentro de la cámara.

7 REFERENCIAS

- Ayesa, A. (s.f.). *Hidrostantk*. Obtenido de <https://www.hidrostantk.com/downloads/016.1-Tanques-de-tormenta.pdf>
- Bruni, M. (2 de Diciembre de 2018). *SSWM*. Obtenido de <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/sedimentaci%C3%B3n->
- López Duarte, Á. (2017). *PROYECTO DE UN DESARENADOR FABRICADO DENTRO DE UNA CÁMARA NOVACAM DE PAVCO*. Bogotá.
- Martínez, J. (1 de Enero de 1970). *DESARENADOR*. Obtenido de <http://sistemadetratamientodelagua.blogspot.com/2009/04/desarenador.html>
- (2018). *NTC 77. CONCRETOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS*. Icontec.
- Ortega de la Pava, L. A. (2018). *ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE DOS DESARENADORES PARA CÁMARAS DE INSPECCIÓN BAJO DISTINTAS CONDICIONES HIDRÁULICAS Y DE CARGAS DE SEDIMENTOS*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2010). *Definición de sedimento*. Obtenido de <https://definicion.de/sedimento/>
- Rodríguez, M. (29 de Agosto de 2019). *Tiempo.com | Meteored*. Obtenido de <https://www.tiempo.com/noticias/actualidad/tanques-de-tormenta-para-que-sirven.html>
- Saldarriaga Valderrama, J. G. (2016). *Hidráulica de tuberías*. Bogotá: Alfaomega.
- Tilley, E. (11 de Diciembre de 2018). *Sedimentador: SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management!* Obtenido de Sustainable Sanitation and Water Management: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/sedimentador>
- Wu, I. (1975). Design on Drip Irrigation Main Lines. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*.