

“Dispositivo para desazolve en presas: Segunda etapa. Aplicación en campo”

HC-1614.1

Informe final

Coordinación de Hidráulica  
Subcoordinación de obras y equipos hidráulicos

Jefe de proyecto:  
M.I. José Alfredo González Verdugo

Participantes:  
Dra. María Joselina Espinoza Ayala  
M. en I. José Isidro Robles López  
M en A. José Raúl Saavedra Horita

Diciembre del 2016, Jiutepec Morelos

## Contenido

<b>1. Antecedentes</b> .....	1
<b>2. Objetivo</b> .....	3
<b>3. Variantes del dispositivo alterno ensayado en laboratorio</b> .....	4
3.2 Estimación del arrastre de sedimento.....	4
<b>3.2.1 Generación y transporte de sedimentos en cuencas de ríos de montaña</b> .....	4
<b>3.2.2 Modelo morfológico para ríos de montaña</b> .....	5
<b>3.2.3 Fórmula de Meyer-Peter y Muller (1948)</b> .....	6
3.2.4 Fórmula de Engelund y Hansen (1967) .....	6
<b>3.2.5 Fórmula de Van Rijn (1984)</b> .....	6
<b>3.2.6 Fórmula de Di Silvio (1983)</b> .....	7
3.3 Sedimentación en embalses.....	8
<b>3.3.1 Reducción de sedimentos</b> .....	8
<b>3.3.2 Depósito de sedimentos en embalses.</b> .....	9
<b>3.3.3 Patrones de deposición de sedimento</b> .....	9
<b>3.3.4 Impactos de la sedimentación</b> .....	10
<b>3.3.5 Geometría longitudinal de depósito</b> .....	11
<b>3.3.6 Clasificación del tamaño del grano de la partícula</b> .....	13
<b>3.3.7 Balance de masa de sedimentos</b> .....	14
<b>4. Técnicas de dragado</b> .....	18
4.1 Clasificación de las obras de dragado .....	20
4.2 Equipos de dragado .....	21
<b>4.2.1 Dragas Mecánicas</b> .....	22
<b>4.2.2 Dragas Hidráulicas</b> .....	25
4.3 Costos de dragado .....	29
<b>4.3.1 Movilización / Desmovilización</b> .....	30
<b>4.3.2 Costos de capital</b> .....	31
<b>4.3.3 Costos Operativos</b> .....	32

<b>4.3.4 Gastos generales</b> .....	36
<b>4.3.5 Método de costos standard</b> .....	37
Bases del método .....	37
<b>5. Desazolve por medio de aeración</b> .....	41
5.1 Eutroficación de lagos y embalses .....	41
5.2 Descripción del dispositivo aireador .....	44
5.3 Características y Funcionamiento del Dispositivo .....	45
5.4 Análisis adimensional. ....	47
5.4.1 Definición de variables que intervienen en el proceso.....	47
<b>6. Pruebas experimentales</b> .....	53
6.1 Ensayos preliminares del funcionamiento del dispositivo .....	53
<b>6.1.1 Primer serie de experimentos</b> .....	54
<b>6.2 Modificación del Dispositivo experimental</b> .....	77
<b>6.3 Incremento de la longitud del tubo principal</b> .....	84
<b>7. Simulación numérica</b> .....	89
<b>8. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	95
Bibliografía.....	97

## Índice de figuras

Figura 3.1 Relación entre intensidad de tormentas y erosión producida en Zanesville, Ohio (Adoptado de Fournier, 1972)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3.2 Las copas de los árboles no reducen la energía cinética de las gotas de agua. En la imagen, tomada en Pennsylvania por Sidney Schwartz, se aprecian raíces expuestas debido a la erosión de impacto producida bajo árboles de copas altas ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3.3 Las raíces de los árboles mantienen las partículas de suelo en su lugar. Imagen tomada por Pablo García-Chevesich en las cercanías de Lebanon, New Hampshire..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3.4 Las raíces de las plantas ayudan a sostener el suelo en su lugar, siendo las raíces superficiales (A) las más adecuadas para controlar la erosión hídrica y eólica. Por otro lado, las raíces más profundas (B y C) ayudan a prevenir movimientos de masas en pendientes (Adoptado de García-Chevesich, 2008). . **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3.5 La presencia de hojarasca es fundamental para controlar la erosión, pues protege el suelo contra el impacto de las gotas de lluvia. Además, la hojarasca reduce la velocidad del escurrimiento superficial y disminuye la evaporación del agua infiltrada. Fotografía tomada por Pablo García-Chevesich en Pennsylvania. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3.6 Variaciones en las tasas de erosión (E) y depositación (D), según cambios topográficos a lo largo de una pendiente (Adoptado de Terrence et al., 2002).. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3.7 Diagrama de Hjulstrom, el cual indica la velocidad mínima requerida para desprender, transportar o depositar partículas de suelo, según su diámetro, para flujos de agua (Adoptado de Hjulstrom, 1935)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3.8 Por lo general, las altas pendientes hacen que los ríos y arroyos de montaña estén constituidos por aguas cristalinas y la ausencia de sedimentos finos en el fondo de los cursos de agua. A la izquierda se ilustra un estero de la región de Tatras, Polonia, cortesía de Andrzej Wrotniak ([www.wrotniak.net](http://www.wrotniak.net)). Por esta razón, las diferencias naturales entre la concentración de sedimentos en aguas de ríos de montaña y valle se deben principalmente a variaciones en la pendiente de los terrenos en que se encuentran. La imagen de la derecha muestra una vista aérea de la desembocadura del río Pájaro, en California, gentileza de Gregory Morris ([www.gmaeng.com](http://www.gmaeng.com))..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3.9 Los sitios de construcción son los más dañinos en términos de pérdida de suelo. Se puede apreciar una excesiva sedimentación, producto de una urbanización ocurrida cerca de Birmingham, Colorado. Gentileza de Nelson Brooke, Black Warrior Riverkeeper..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3.10 El sobrepastoreo es una práctica muy común en países no desarrollados. En la imagen de la izquierda se aprecian evidencias notables de erosión laminar provocada por un indiscriminado pastoreo, donde han quedado sólo las partículas de mayor tamaño en las cercanías de La Ligua, Chile. En la imagen de la derecha, tomada al norte de Santiago, Chile, se pueden apreciar las diferencias en cobertura vegetal para áreas con y sin animales. Fotografías tomadas por Pablo García-Chevesich. .... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3.11 Procesos de transporte de sedimentos .....	6
Figura 3.12 Suelos en la República Dominicana recientemente arado, antes de la estación húmeda (G. Morris). .....	8
Figura 3.13 Generalización de las zonas de depósito en una presa. ....	10
Figura 3.14 Apreciación de las tres fases de depósito de los sedimentos. ....	10
Figura 3.15 Impactos de la sedimentación.....	11
Figura 3.16 Patrones longitudinales de la deposición de sedimentos en presas. Pueden existir simultáneamente múltiples patrones en diferentes áreas del mismo embalse.	12
Figura 3.17 (A) Perfil longitudinal en la presa Sakuma, Japon, después de 24 años de operación. El perfil muestra tanto delta y turbidez depósitos actuales. (B) Tamaños de grano para distintos puntos del embalse. ....	13
Figura 3.20. Esfericidad, redondez, y clasificación de los granos de sedimentos.....	16
Figura 4.3. Draga de Dragalina. ....	24
Figura 4.4. Draga de cangilones o rosario. ....	24
Figura 4.5. Draga de pala. ....	25
Figura 4.6. Draga de cántara con tubo de succión.....	27
Figura 4.7. Draga de succión con cabezal cortador. ....	27
Figura 4.8. Cabezal de draga “Dustpan”.....	28
Figura 4.9. Draga de succión en marcha.....	28
Figura 5.1. Principio de funcionamiento del aireador hipolimnético LIMNO.....	43
Figura 5.2. Dispositivo aireador .....	46
Figura 5.3. Variables adimensionales del experimento.....	47
Figura 6.1. Primer dispositivo ensayado.....	54
Figura 6.2. Dimensiones del primer dispositivo ensayado. ....	55
Figura 6.3. Geometría en el experimento 1.....	55
Figura 6.4. Secciones en el cálculo del gradiente de velocidad. ....	59

Figura 6.5. Características del dispositivo del experimento 2.....	62
Figura 6.6. Dimensiones del dispositivo del experimento 3.....	66
Figura 6.7. Segundo dispositivo utilizado. ....	77
Figura 6.8. Dimensiones del segundo dispositivo.....	78
Figura 6.9. Incremento de la longitud del dispositivo.....	84
Figura 6.10. Geometría del último dispositivo ensayado.....	85
Figura 6.11. Prueba 1. Sifón 13.5 cm y disco 30 cm.....	87
Figura 6.12. Prueba 2. Sifón 15 cm y disco 37 cm.....	87
Figura 6.13. Prueba 3. Sifón 11.5 cm y disco 43 cm.....	88
Figura 7.1. Modelo en 3D del dispositivo para la geometría de la tabla 7.1 .....	89
Figura 7.2. Modelo en 3D del dispositivo para la geometría de la tabla 7.2. ....	90
Figura 7.3. Acercamiento a la cámara del dispositivo, geometría de la tabla 7.2.....	91
Figura 7.4. Modelo en 3D del dispositivo para la geometría de la tabla 7.3. ....	92
Figura 7.5. Acercamiento a la cámara del dispositivo, geometría de la tabla 7.3.....	92
Figura 7.6. Modelo en 3D del dispositivo para la geometría de la tabla 7.4. ....	93
Figura 7.9. Acercamiento a la cámara del dispositivo, geometría de la tabla 7.4.....	94

## Índice de Gráficas

Gráfica 4.1 Distribución de las dragas mecánicas (Piza, 2002).....	23
Gráfica 4.1 Distribución de las dragas hidráulicas (Vanoni V. , 1975).....	26
Gráfica 6.1 Variación del gasto de agua desplazada respecto al gasto de aire suministrado.....	70
Gráfica 6.2 Gradiente de velocidad respecto al gasto de aire suministrado. ....	71
Gráfica 6.3 Velocidad burbuja / descendente – Reynolds $V_{des}$ .....	74
Gráfica 6.4 Velocidad burbuja / descendente - distancia de llenado de aire/diámetro del tubo principal.....	75
Gráfica 6.5 Velocidad burbuja / descendente – Velocidad ascendente/descendente. ....	76
Gráfica 6.6 Velocidad de la bala de aire para cada longitud del sifón con disco de 30 cm. ....	80
Gráfica 6.7 Velocidad de la bala de aire para cada longitud del sifón con disco de 37 cm. ....	81
Gráfica 6.8 Velocidad de la bala de aire para cada longitud del sifón con disco de 43 cm. ....	81
Gráfica 6.9 Gráfica de efectos principales para velocidad.....	83
Gráfica 6.10 Diagrama de Pareto estandarizada para la velocidad. ....	83

## Índice de tablas

Tabla 4.4 Reparaciones mayores – Costos por día.....	35
Tabla 4.4. Costos Standard.....	39
Tabla 6.1. Cálculo del tiempo entre burbujas.....	57
Tabla 6.2. Cálculo del gasto de agua desplazada.....	58
Tabla 6.3. Cálculo de los gradientes de velocidad.....	61
Tabla 6.4. Cálculo del tiempo entre burbujas.....	63
Tabla 6.5. Cálculo del gasto de agua desplazada.....	64
Tabla 6.6. Cálculo de los gradientes de velocidad.....	65
Tabla 6.7. Cálculo del tiempo entre generación de burbujas.....	67
Tabla 6.8. Cálculo del gasto de agua desplazada.....	68
Tabla 6.9. Cálculo de los gradientes de velocidad.....	69
Tabla 6.10. Valores de los parámetros adimensionales para los experimentos anteriores.....	72
Tabla 6.11. Valores constantes utilizados en el cálculo de los parámetros adimensionales.....	73
Tabla 6.12. Velocidad de la burbuja para diferentes condiciones de presión suministrada.....	79
Errores estándar basados en el error total con 8 g.l.....	82
Tabla 6.15. Volumen de sedimento desalojado en 5 minutos.....	88
Tabla 7.1. Geometría para el primer dispositivo ensayado experimentalmente.....	89
Tabla 7.2. Geometría para el dispositivo más largo, primer caso.....	90
Tabla 7.3. Geometría para el dispositivo más largo, segundo caso.....	91
Tabla 7.4. Geometría para el dispositivo más largo, tercer caso.....	93



**SEMARNAT**  
SECRETARÍA DE  
MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



**IMTA**  
INSTITUTO MEXICANO  
DE TECNOLOGÍA  
DEL AGUA

## 1. Antecedentes

El problema de sedimentación en vasos de presas pequeñas y grandes, lagos y lagunas, es una situación que habrá de atenderse en el corto y mediano plazo. En nuestro país muchos cuerpos de agua han perdido la capacidad de almacenar o regular por lo que su vida operativa está muy disminuida e incluso algunas obras representan un riesgo al no operar adecuadamente ante la pérdida de capacidad de almacenamiento.

La remoción de sedimentos en presas de almacenamiento es una alternativa para incrementar la vida operativa de las obras. En México, existen más de 2000 presas pequeñas y bordos con riesgo potencial de quedar fuera de servicio. Para contribuir a disminuir esta problemática, durante el año 2015 se analizó experimentalmente un dispositivo alternativo para ayudar al desazolve de cuerpos de agua pequeños. Dicho dispositivo funciona a través de la generación de una burbuja de aire cuya velocidad de ascenso es función de la geometría de la cámara de aire y de la presión suministrada.

Las primeras pruebas realizadas con el objeto de ver la posibilidad de ensayar un dispositivo para resuspensión de sedimentos fue en 2008, mismas que fueron retomadas en 2015, al utilizar el mismo dispositivo.

Las pruebas del dispositivo alternativo durante el año 2015 fueron realizadas en tres depósitos o tanques de agua de dimensiones: 0.40 X 0.40 X 0.89 m, 0.77 X 1.65 X 1.67 m y 0.77 X 1.65 X 2.5 m. En cada caso se ensayaron diferentes geometrías del tamaño del disco y longitud del sifón.

Para el caso del segundo tanque o depósito se realizaron 15 pruebas de manera sistemática. Estas pruebas fueron analizadas mediante un diseño estadístico factorial  $2^3$  para tener una mejor comprensión del funcionamiento del dispositivo, para ello se utilizó el software Statgraphics Centurion v15 1.0.2. Las variables analizadas fueron: el tamaño del disco, longitud del sifón y presión de aire suministrada respecto a la velocidad de ascenso de la burbuja.

Cada variable de manera individual presentó un comportamiento diferente que cuando interactúan entre ellas. La presión de aire resultó ser de mayor importancia que el diámetro del disco y la longitud del sifón, para incrementar la velocidad de ascenso de la burbuja. La combinación presión-disco es más relevante que la combinación presión-sifón para una mayor velocidad de ascenso de la burbuja. Es conveniente comentar que para valores superiores a

la presión máxima ensayada ( $P = 50 \text{ lb/pulg}^2$ ) se tuvieron problemas para la formación de la burbuja, lo cual indica que los resultados obtenidos son válidos para la geometría ensayada en estos experimentos.

Al ensayar en un tanque o depósito más largo, considerando el efecto de la sumergencia o profundidad del agua, se encontraron diferencias entre las velocidades de ascenso de la burbuja entre un 10% hasta un 22%, siendo mayores las velocidades para el caso del dispositivo con el tubo largo. También se detectó en estos experimentos que la formación adecuada y ascenso de la burbuja solo fue posible hasta una presión de aire de  $30 \text{ lb/pulg}^2$ , ya que para presiones de aire mayores se distorsionaba la formación de la burbuja y no se tenía un funcionamiento adecuado del dispositivo.

En general, de los resultados de las pruebas realizadas pueden hacerse las siguientes precisiones:

1. Si se incrementa el tamaño del disco y el sifón, la velocidad de la burbuja no necesariamente aumentará.
2. Para las geometrías ensayadas del dispositivo, se requiere al menos una carga o columna de agua 115 cm, para que funcione adecuadamente el dispositivo.
3. Para presiones mayores a  $50 \text{ lb/pulg}^2$  en la inyección de aire en la cámara, el dispositivo no funciona, el aire se escapa o libera de la cámara sin llegar a formar la burbuja.
4. Para un mejor funcionamiento del dispositivo, la parte final del tubo principal, no debe estar más de 5 cm fuera de la superficie del agua.
5. Para un correcto funcionamiento el dispositivo debe estar completamente vertical para que la burbuja no se desvíe hacia un lado y el golpe de succión sea uniforme.

A partir de los resultados anteriores, se planteó realizar una segunda etapa de este proyecto para efectos de probar el funcionamiento del dispositivo alterno aplicado a un caso en particular.

## 2. Objetivo

Durante el presente año, se plantearon los siguientes objetivos

- ✓ A partir de los resultados del año 2015, implementar y ensayar en laboratorio una variante del dispositivo alternativo.
- ✓ Dimensionar un dispositivo alternativo para el caso de la presa Tlayecac.
- ✓ Implementar y evaluar el dispositivo alternativo en la presa Tlayecac.

El último de los objetivos dependerá o podrá cumplirse si se tienen los recursos necesarios para poder llevar a cabo las actividades relacionadas con ello.

### **3. Variantes del dispositivo alternativo ensayado en laboratorio**

Enseguida se comentarán la variante las pruebas brevemente la influencia de estas variables en las tasas de erosión esperadas.

#### **3.2 Estimación del arrastre de sedimento**

##### **3.2.1 Generación y transporte de sedimentos en cuencas de ríos de montaña**

Para el proyecto de las obras hidráulicas o manejo de cuencas en ríos de montaña, resulta imprescindible conocer el comportamiento del material sólido producido o generado en la cuenca, que es transportado luego por el sistema fluvial. Asimismo también es de importancia conocer cómo es el mecanismo del transporte de ese sedimento generado, a lo largo de los cauces de la red, con el fin de poder evaluar los procesos de erosión y/o sedimentación que pueden presentarse. Especialmente en zonas con suelos con escasa vegetación y altas pendientes, las precipitaciones intensas tienen un importante efecto erosivo en la cuenca, con el consiguiente elevado transporte sólido en los cursos que conforman la red de drenaje.

Existen diversos métodos para evaluar y cuantificar el sedimento producido en una cuenca de montaña. Todos ellos, en general, analizan la interacción de factores tales como el clima, la litología, el uso del suelo, la topografía, entre otros. A pesar de la gran cantidad de metodologías existentes, la valoración cuantitativa precisa de la producción de sedimentos es imposible de asegurar debido a la complejidad del proceso erosivo, a la cantidad de factores que influyen en el mismo y la escala de los fenómenos actuantes, debiendo tenerse en cuenta cuestiones tan locales como ser el grado de cohesión de las partículas del terreno, hasta parámetros regionales como la temperatura o las precipitaciones en la cuenca. Los ríos de montaña se caracterizan por presentar lechos con sedimentos heterogéneos, como consecuencia, por un lado, de la variabilidad en los fenómenos que actúan como aportes de material, y, por otro, de los procesos de erosión y depósito que ocurren en el cauce, y que están vinculados al transporte de los sedimentos que componen el lecho. Los sedimentos son transportados por la acción del flujo, en forma de arrastre en el

fondo en una capa de cierto espesor, en suspensión formando parte de la corriente, y como carga de lavado.

Para modelar la dinámica morfológica de este tipo de ríos deben tenerse en cuenta una serie de fenómenos relacionados con el transporte de la mezcla de sedimentos del lecho, tales como la mayor movilidad intrínseca de las partículas finas, que hace que los sedimentos del lecho sean más gruesos en relación a la composición del material transportado; el efecto de protección-exposición, que incrementa la movilidad de las partículas más gruesas y disminuye la de las más finas en comparación con las correspondientes a material uniforme y, reduciendo la diferencia entre la composición del lecho y del material transportado; y el efecto de acorazamiento dinámico del fondo que produce una protección vertical contra la erosión.

### 3.2.2 Modelo morfológico para ríos de montaña

Como ya se comentó, para modelar la dinámica morfológica de ríos de montaña deben tenerse en cuenta una serie de fenómenos relacionados con el transporte de la mezcla de sedimentos del lecho, tales como la mayor movilidad intrínseca de las partículas finas, el efecto de protección-exposición, y el efecto de acorazamiento dinámico del fondo que produce una protección vertical contra la erosión. Los ríos de montaña se caracterizan por presentar lechos con pendientes fuertes y sedimentos heterogéneos, con gran variabilidad en las dimensiones de las partículas que componen el fondo. Los procesos de erosión y depósito que ocurren en el cauce, están asociados al transporte de sedimentos por la acción del flujo, el que puede desarrollarse en forma de arrastre de fondo, en suspensión y como carga de lavado.

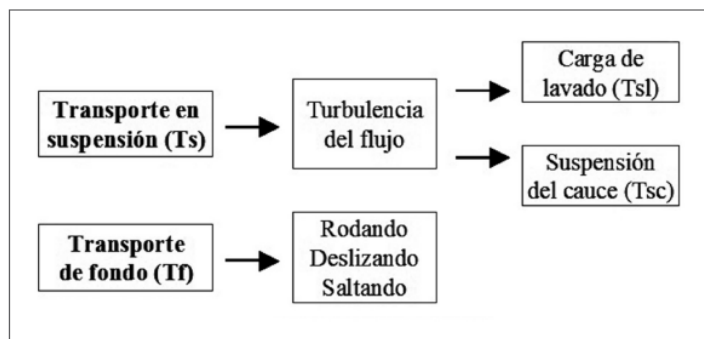


Figura 3.1 Procesos de transporte de sedimentos

$$T_{total} = T_f + T_s = T_f + T_{sc} + T_{s1} \quad (4.1)$$

De las formas de transporte antes indicadas, el transporte de fondo es el que está asociado a los cambios morfológicos del lecho. En general las ecuaciones para calcular el transporte de sedimentos no tienen en cuenta la no-uniformidad del material, y han sido verificadas en rangos limitados de condiciones hidráulicas y sedimentológicas.

Algunos ejemplos de la base teórica y experimental utilizada para la definición de estas expresiones son:

### 3.2.3 Fórmula de Meyer-Peter y Muller (1948)

Es una ecuación para el cálculo del transporte de fondo. Se obtuvo a partir de un importante número de datos experimentales en un canal de 2 x 2 x 50 metros con material uniforme y mezcla de partículas (los autores usan el diámetro medio aritmético) con diámetros entre 0,4 y 29 mm, pendientes entre 0,0004 y 0,02 y tirantes entre 0,1 y 1,2 metros.

### 3.2.4 Fórmula de Engelund y Hansen (1967)

Ecuación para el cálculo del transporte total (para tensiones de corte moderadas puede aplicarse para determinar el transporte de fondo). Basada en consideraciones teóricas a partir del concepto de balance energético, y verificada con ensayos con sedimentos uniformes, con diámetros entre 0,19 y 0,93 mm.

### 3.2.5 Fórmula de Van Rijn (1984)

Esta ecuación para la estimación del transporte de fondo fue obtenida a partir de consideraciones teóricas, asumiendo que el movimiento del material de fondo es dominado por los saltos de las partículas bajo la influencia de las fuerzas hidrodinámicas del flujo y de las fuerzas gravitatorias. Para su verificación se tomaron de la literatura, 130 experimentos en canales de laboratorio con sedimentos uniformes con  $d_{50}$  entre 0,2 y 2 mm, profundidades mayores a 0,1 m y números de Froude menores a 0,9. El transporte de fondo

por unidad de ancho se define como el producto de la velocidad de las partículas, la altura de los saltos y la concentración de fondo.

### 3.2.6 Fórmula de Di Silvio (1983)

Fue obtenida de la relación entre el transporte adimensional con la potencia cúbica de la tensión de corte adimensional, incorporando la ecuación de Strickler-Manning. Fue verificada con datos de campo y laboratorio. En ríos con pendientes altas, donde los sedimentos presentes en el lecho en general varían entre fracciones de milímetros (arenas finas) y algunos decímetros, las simplificaciones que llevan implícitas las formulaciones tradicionales, son una limitación importante para su aplicación. La dinámica morfológica de este tipo de ríos está condicionada por una serie de fenómenos asociados al transporte de la mezcla de sedimentos del lecho, entre los que pueden destacarse:

1. La mayor movilidad intrínseca de las partículas finas.
2. El efecto de protección-exposición, que incrementa la movilidad de las partículas más gruesas de la mezcla y disminuye la de las más finas.
3. El efecto de acorazamiento dinámico en la superficie del lecho.
4. La infiltración de las partículas finas entre las más gruesas hasta que la porosidad del lecho es saturada.
5. La gran variabilidad en las longitudes de “salto” en el transporte de los distintos tamaños de grano.

Debido a la imposibilidad de tener en cuenta todos estos fenómenos en forma conjunta en el análisis de la evolución morfológica de estos ríos, deben hacerse algunas simplificaciones para su estudio, por lo que se realiza una serie de hipótesis simplificativas:

1. Concepto de capa de mezcla o capa activa.
2. Movimiento del fondo como continuo.
3. La longitud del volumen elemental del fondo es mayor que la máxima longitud de salto de las partículas.
4. Mezcla de sedimentos representada por fracciones granulométricas.
5. Aplicación de las ecuaciones de transporte a cada clase granulométrica. Término que tiene en cuenta el efecto de protección-exposición.



### 3.3 Sedimentación en embalses

#### 3.3.1 Reducción de sedimentos

La disminución de sedimentos que ingresan a un embalse puede efectuarse mediante dos procesos: 1) Reducir la producción de sedimentos mediante un manejo adecuado de la cuenca y 2) Disponer de trampas de sedimentos antes de llegar al embalse. La rehabilitación de las cuencas hidrográficas degradadas puede reducir drásticamente la tasa de sedimentos, nutrientes y otros contaminantes que ingresan al embalse. Existe una extensa literatura sobre manejo de cuencas y control de la erosión. Por lo general, se recomienda que se lleven a cabo programas para prevenir y corregir problemas de erosión para limitar la sedimentación en los embalses y mejorar la calidad del agua, y en la mayoría de los embalses esta es la única medida recomendada. Sin embargo, muchos programas de control de la erosión han sido espectacularmente un fracaso, a pesar de grandes gastos, porque fueron mal planeados y ejecutados, y carecían de apoyo a largo plazo y compromiso de los usuarios de la tierra.



Figura 3.2 Suelos en la República Dominicana recientemente arado, antes de la estación húmeda (G. Morris).

Es costoso y difícil de implementar mejores prácticas de uso de tierra en cuencas hidrográficas de gran tamaño, y particularmente en las cuencas hidrográficas que cubren miles de kilómetros cuadrados con múltiples jurisdicciones. Incluso cuando tienen éxito, el control de la erosión no representa necesariamente una solución completa a los problemas de sedimentación.

### **3.3.2 Depósito de sedimentos en embalses.**

La depositación de sedimentos es el problema principal que afecta la vida operativa de los embalses. Cuando el agua de un afluente llega al embalse y disminuye su velocidad, la carga de sedimentos comienza a depositarse. La carga de fondo y la fracción gruesa de la carga suspendida se depositan inmediatamente para formar depósitos de sedimento, mientras que los sedimentos finos con velocidades de sedimentación inferiores, son transportados un poco más hacia lo profundo del embalse ya sea por flujo estratificado o no estratificado. Un vaso o embalse en una sola corriente, sin grandes afluentes y que funciona a un nivel alto casi constante del vaso puede representar una distribución uniforme del depósito, y representa el modelo más simple de depositación de sedimentos.

La mayoría de los sedimentos son transportados a los embalses en los puntos de depósito por tres procesos: (1) transporte de material grueso como carga de fondo a lo largo del delta aguas arriba del depósito, (2) transporte de finos en suspensión en las corrientes turbias, y (3) el transporte de los finos en flujos no estratificados.

### **3.3.3 Patrones de deposición de sedimento**

Las zonas de depósito longitudinal en los embalses se pueden dividir en tres zonas principales que conceptualmente se ilustra en la figura 3.12. Depósito en delta (material grueso) a la entrada que corresponden a los depósitos de rápida sedimentación. Depósitos de fondo (material fino), representan el frente de avance en el depósito y se diferencian del depósito en delta, por un aumento en la pendiente y la disminución de tamaño de grano. Depósito por corrientes de turbiedad (material fino) que consisten de sedimentos finos que se depositan más allá por las corrientes de turbidez o flujo no estratificado.

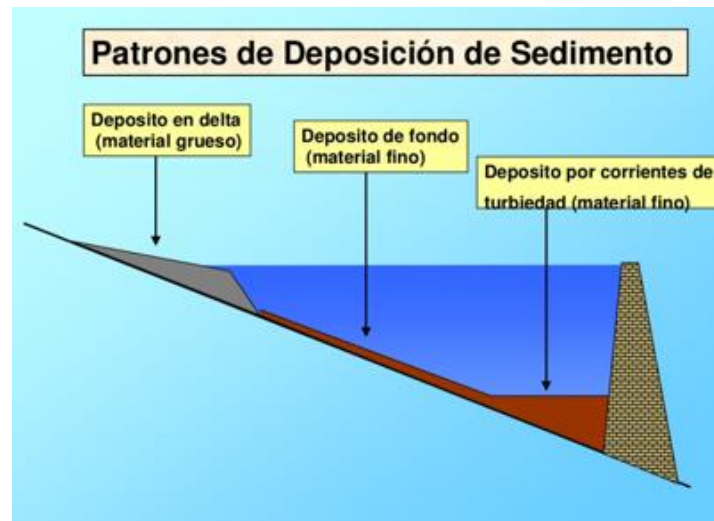


Figura 3.3 Generalización de las zonas de depósito en una presa.



Figura 3.4 Apreciación de las tres fases de depósito de los sedimentos.

### 3.3.4 Impactos de la sedimentación

Aguas arriba

- ◆ Puede depositar sedimentos aguas arriba del nivel de lago
- ◆ Aumentar nivel del río: inundaciones, saturación de suelos

Dentro del embalse

- ◆ Pérdida de volumen
- ◆ Obstrucción de compuertas y tomas

Aguas abajo de la presa

- ◆ Costos de mantenimiento del equipo por turbinar agua con sedimentos gruesos.
- ◆ Falta de sedimento grueso aguas abajo de la presa resulta en socavación del cauce del río, erosión acelerada de riberas.
- ◆ La descarga de sedimentos puede producir daños económicos y ambientales.

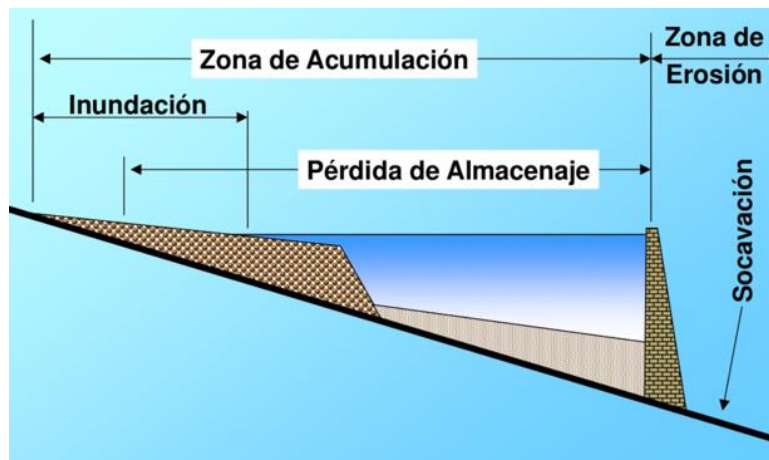


Figura 3.5 Impactos de la sedimentación.

### 3.3.5 Geometría longitudinal de depósito

Los patrones de depositación longitudinal pueden variar drásticamente de un depósito a otro debido a varios factores: la geometría del vaso, la descarga, las características y tamaño de grano de la carga de la corriente de llenado y la operación de los embalses. La sedimentación puede presentar cuatro patrones básicos en función de las características del sedimento y la corriente de llenado del embalse (fig. 3.15):

1. Depósitos delta que contienen la fracción más gruesa de la carga de sedimentos, y que se deposita rápidamente en la zona de entrada. Puede consistir de sedimentos gruesos ( $d > 0.062$  mm) en la mayoría de los casos o también puede contener una fracción importante de sedimentos finos, como limo.
2. Los depósitos en forma de cuña tienen mayor espesor junto a la cortina y se vuelven más delgados hacia aguas arriba. Este patrón es causado por el transporte de sedimentos finos hacia la cortina por las corrientes de turbidez. Se encuentran en pequeños embalses con una gran afluencia de sedimentos finos.
3. Los depósitos decrecientes ocurren cuando los depósitos se hacen progresivamente más delgados en movimiento hacia la presa. Este es un patrón común en los embalses largos que normalmente tienen un alto nivel de llenado, y refleja la depositación progresiva de los finos del agua que van hacia la cortina.
4. Los depósitos uniformes son inusuales pero se producen. En embalses estrechos con fluctuaciones frecuentes del nivel de agua y una carga pequeña de sedimentos finos pueden producir sedimentación casi uniforme.

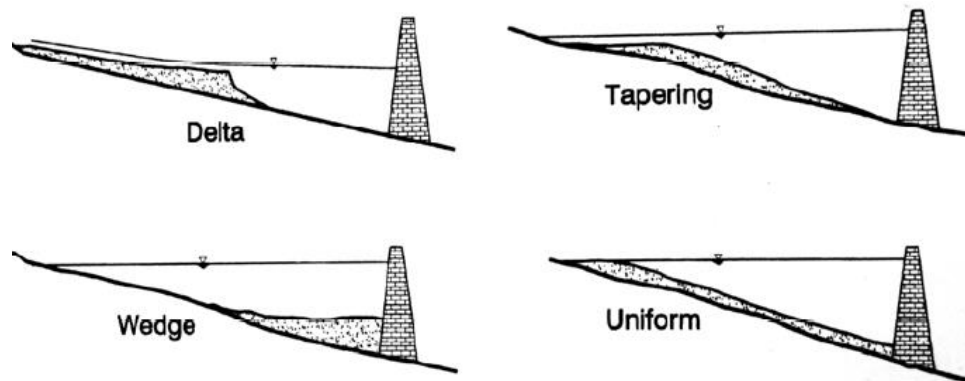


Figura 3.6 Patrones longitudinales de la deposición de sedimentos en presas. Pueden existir simultáneamente múltiples patrones en diferentes áreas del mismo embalse.

Los embalses pueden presentar diferentes procesos de depositación de una zona a otra, dando lugar a un patrón complejo de depósito, como se ilustra en el perfil para el embalse de Sakuma en Japón (fig. 3.16). Esta figura también ilustra la clasificación longitudinal de sedimentos por tamaño de grano.

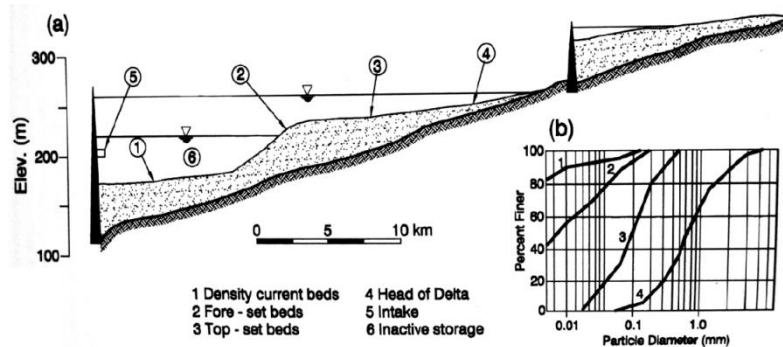


Figura 3.7 (A) Perfil longitudinal en la presa Sakuma, Japon, después de 24 años de operación. El perfil muestra tanto delta y turbidez depósitos actuales. (B) Tamaños de grano para distintos puntos del embalse.

La depositación de sedimentos se concentrará inicialmente en la parte más profunda de cada sección transversal, la creación de depósitos con una superficie casi horizontal, independientemente de la forma de la sección transversal original. Hay tres tipos de procesos que pueden contribuir a que los sedimentos se centralicen en la parte más profunda de la sección transversal. (1) Transporte de corrientes turbias y depósito de sedimentos a lo largo del cauce, (2) El perfil logarítmico de la concentración de sedimentos en suspensión dentro de la columna de agua se centrará en la parte más profunda de la sección transversal, (3) Si los sedimentos en suspensión se distribuyen uniformemente en toda la sección transversal y se instalan en posición vertical, la depositación de sedimentos será directamente proporcional a la profundidad del agua.

### 3.3.6 Clasificación del tamaño del grano de la partícula

El tamaño de las partículas de los sedimentos transportados por el agua varía más de 7 órdenes de magnitud, desde pequeñas partículas de arcilla hasta cantos rodados. El tamaño de grano es el parámetro más importante que describe el comportamiento de los sedimentos en el agua, y existen una variedad de términos para describir las características de tamaño de los granos individuales y muestras compuestas. El término *grueso* implica normalmente arena y granos más grandes, y *fino* se refiere a limos y arcillas.

El tamaño de las partículas de sedimento tiene un efecto significativo sobre la densidad. Los depósitos de sedimentos compuestos de limo y arena tienen densidades más altas que aquellas en las que predomina la arcilla. La clasificación de los sedimentos según el tamaño de la forma propuesta por la Unión Geofísica Americana (Vanoni V. A., 1975), es la siguiente:

<b>Tipo de sedimento</b>	<b>Rango de tamaño en milímetros</b>
<b>Arcilla</b>	Menor a 0.004
<b>Limo</b>	0.004 a 0.062
<b>Arena</b>	0.062 a 2.0

**Figura 3.8. Rango de tamaño de sedimentos**

### 3.3.7 Balance de masa de sedimentos

La cantidad de sedimentos depositados en un embalse puede estimarse a partir de la diferencia entre la entrada de sedimentos fluviales y descarga durante un intervalo de tiempo corto o largo cualquiera (un solo caso). Esta técnica es esencial para obtener información detallada sobre el proceso de descarga de sedimentos y la captura en el embalse, y para evaluar y supervisar la eficacia de diferentes técnicas de gestión de sedimentos. Sin embargo, resultados confiables a largo plazo son difíciles de obtener, y un balance de masa no debe ser utilizado como único medio para estimar la tasa de acumulación de sedimentos y la pérdida de almacenamiento.

Las partículas de sedimento nunca son exactamente esféricas y el término "diámetro" sólo es una aproximación a su tamaño. Se usan varios métodos para determinar y expresar el diámetro del grano. Los granos pueden ser medidos a lo largo de tres ejes perpendiculares entre sí, de la que será, una la más larga, una intermedia, y la menor. El diámetro triaxial es la media aritmética de los tres ejes. El diámetro del tamiz es la longitud de un lado de una abertura cuadrada de tamiz a través del cual una partícula acaba de pasar y se aproxima al eje intermedio. Las arenas y gravas finas son normalmente medidas con tamices, y el diámetro característico es el diámetro de tamiz. El diámetro nominal de partículas más grandes, tales como grava o piedras, se puede medir

directamente mediante una escala y la longitud del eje intermedio. El diámetro de sedimentación, es el diámetro de una esfera que en un mismo fluido tiene la misma velocidad de sedimentación de la partícula.

El diámetro nominal es el diámetro de una esfera cuyo volumen sea igual al de la partícula.

Size class	Grain diameter, mm		Sieve size retained on	
	Min.	Max.	Tyler	U.S. Standard
<b>Boulders:</b>				
Very large	2048	4096		
Large	1024	2048		
Medium	512	1024		
Small	256	512		
<b>Cobbles:</b>				
Large	128	256		
Small	64	128		
<b>Gravel:</b>				
Very coarse	32	64		
Coarse	16	32		
Medium	8	16		
Fine	4	8	5	5
Very fine	2	4	9	10
<b>Sand:</b>				
Very coarse	1	2	16	18
Coarse	0.5	1	32	35
Medium	0.25	0.5	60	60
Fine	0.125	0.25	115	120
Very fine	0.062	0.125	250	230
<b>Silt:</b>				
Coarse	0.031	0.062		
Medium	0.016	0.031		
Fine	0.008	0.016		
Very fine	0.004	0.008		
<b>Clay:</b>				
Coarse	0.002	0.004		
Medium	0.001	0.002		
Fine	0.0005	0.001		
Very fine	0.00024	0.0005		

**Figura 3.9 Clasificación del tamaño de los granos**

Las partículas muy irregulares erosionan sus estructuras rápidamente, volviéndose más redondeadas con el tiempo como resultado de la abrasión entre sí. Así, las arenas en cauces tienden a ser más angulares aguas arriba y más redondeadas aguas abajo. Las arenas eólicas (viento-transportadas) suelen ser más redondeadas que las arenas fluviales ya que el impacto y las fuerzas entre los granos abrasivos transportados por vía aérea son mayores que entre las arenas transportadas en el agua. Una representación visual de redondez y esfericidad se muestra en la figura 3.17.



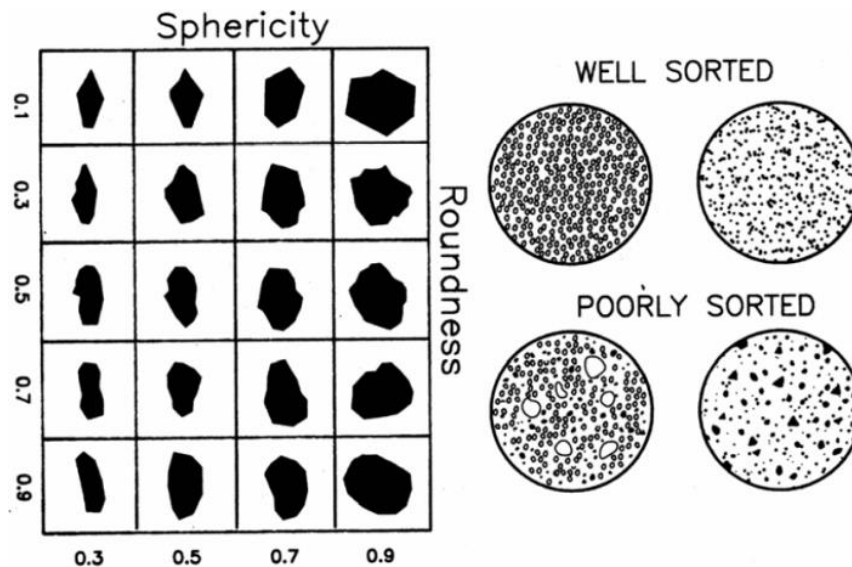


Figura 3.10. Esfericidad, redondez, y clasificación de los granos de sedimentos.

El lecho del cauce se compone de los sedimentos que son transportados por el agua, especialmente durante las crecidas. No todos los materiales que se encuentran en lechos de arroyos se considera transportables, tales como escombros de gran diámetro o depósitos de arcillas cohesionada. Los sedimentos del río pueden ser clasificados por tamaño de grano y la abundancia relativa en el (lecho móvil y por modo de transporte (Einstein, 1964).

La carga de lavado es la porción de la carga de sedimento de granos más pequeños que los que se encuentran en cantidades apreciables en el lecho del cauce, a menudo es 10 por ciento más pequeño que el material del lecho en peso. La carga se transporta normalmente en suspensión. Estos sedimentos pequeños se lavan a través del sistema fluvial, sin la interacción significativa con el fondo.

Los problemas ocasionados por los sedimentos pueden llegar a tener influencia significativa sobre la factibilidad económica de un proyecto de aprovechamiento hídrico, lo que significa que en tales casos críticos sería necesario estimar la magnitud del transporte con gran precisión. Sin embargo, tanto en estos casos críticos como en la generalidad de los proyectos, es frecuente que la información básica sobre el transporte de sólidos sea muy deficiente en cuanto a su calidad, representatividad y duración. El caso general

ha sido que cuando va a efectuarse el estudio de factibilidad para un proyecto, no se cuenta con datos de transporte de sedimentos en el sitio de interés y para efectos del estudio, la información disponible es la que se obtiene durante el curso del mismo, normalmente un intervalo de uno a dos años.

Esto indica la dificultad que se tiene para definir la factibilidad de un proyecto, cuando depende fundamentalmente de la apreciación correcta del acarreo de sedimentos al embalse.

#### 4. Técnicas de dragado

Una obra de dragado se define como el conjunto de operaciones necesarias para la extracción, el transporte y el vertido de materiales situados bajo el agua, ya sea en el medio marino, fluvial o lacustre. Estas tres etapas son fundamentales en toda obra de dragado y deben analizarse con detenimiento para optimizar la operación. El primer paso consiste en extraer el material de fondo, y para ello se requiere una maquinaria específica, las dragas (Macdonel, 2001). El dragado es una operación necesaria para el desarrollo y el mantenimiento de las infraestructuras en el medio marino y fluvial, y de su realización depende el desarrollo de los puertos y del tráfico marino. Sin embargo, a pesar de su importancia en las obras marítimas y su vinculación al desarrollo económico y social, las técnicas de dragado siguen siendo una de las ramas más desconocidas de la ingeniería civil.

El dragado de los embalses tiene como finalidad el mantenimiento de su capacidad de uso al máximo rendimiento posible. Los embalses, al igual que los lagos, son cubetas de decantación de los sólidos en suspensión que transporta el río desde la cuenca de drenaje. Este proceso se encuentra con frecuencia acelerado por varias razones, siendo la más importante su carácter artificial que lo hace no estar en equilibrio con su cuenca de drenaje. La actividad humana en la cuenca, y en general todos aquellos procesos que aumenten la erosión de la cuenca, tienden a reducir la vida del embalse por colmatación de la cubeta. Aunque los motivos del dragado pueden ser múltiples, Cooke *et al* (1993) señala cuatro causas por las que se suelen dragar los embalses:

1.- Aumentar la profundidad e incrementar la capacidad del embalse. Solo es aplicable a lagos pequeños en los que el volumen de sedimentos retirados no suponga un problema grave de almacenamiento en otras zonas. Se han realizado múltiples intentos de reutilización de estos sedimentos para regeneración de suelos, aunque con escaso éxito por predominar los materiales arcillosos que impermeabilizan y reducen la textura del suelo. Para sistemas de gran volumen se suelen dragar ciertas zonas por motivos operacionales (navegación, reparación de compuertas, etc.).

2.- Control de nutrientes. Los sedimentos son zonas de acumulación de nutrientes. Parte del material sedimentado es orgánico, que contiene nitrógeno

amoniaco y fósforo. Paralelamente, se puede producir precipitación de diferentes compuestos de fósforo que tienen solubilidades muy bajas y que por lo tanto son retirados de circulación (Armengol et al., 1986). Este proceso es tanto más importante cuanto más eutrófico es el embalse (Margalef, 1983) y constituye uno de los mecanismos de autodepuración de los ecosistemas acuáticos. Si los embalses son someros, puede producirse una resuspensión por efecto del viento, mientras que si los sedimentos son limos o arenas pueden liberarse parte de los nutrientes acumulados.

3.- Retirada de sustancias tóxicas. Como se mencionó en el párrafo anterior, el sedimento es la zona de acumulación de muchos de los materiales que se encuentran en el agua. Además de los nutrientes, muchos metales tienden a precipitar en condiciones oxidantes y de elevado pH o potencial óxido-reducción. Aunque las concentraciones en el agua puedan ser bajas, el carácter acumulativo del sedimento los hace potencialmente peligrosos en caso de movilización en condiciones químicas adecuadas, como ocurrió con la enfermedad de Minamata producida por acumulación de mercurio.

4.- Una de las causas que determinan el dragado total o parcial de una zona de los embalses es la erradicación de los macrófitos enraizados en las zonas litorales. Afortunadamente, este fenómeno no es muy frecuente ya que los embalses tienen grandes fluctuaciones de nivel que imposibilita el desarrollo de macrófitos en la zona litoral o en la cola de los embalses. Más al contrario, se tiende a estimular su crecimiento siempre que las posibilidades lo permiten, ya que en nuestro caso los cinturones de vegetación pueden actuar como zonas de sedimentación y como filtros biológicos.

Los sedimentos a extraer se encuentran bajo agua a profundidades variables desde pocos metros de profundidad hasta más de 100 m de profundidad. El incremento de la profundidad a la que se realizan operaciones de dragado es una de las características de los últimos años y ha tenido un gran efecto sobre el diseño de las dragas.

La disgregación del material se efectúa por diversos métodos de acuerdo al tipo de draga. La elevación del material desde el fondo hasta la superficie se puede realizar por medios mecánicos o hidráulicos de acuerdo al tipo de draga que se utilice. Además de la diferencia conceptual que da origen a estas dos familias de dragas, existe una gran diferencia de rendimiento a favor de las hidráulicas.

Las dragas mecánicas se caracterizan por extraer el material con un contenido de sólidos mucho mayor que las dragas hidráulicas, pero a su vez presentan rendimientos horarios mucho más limitados. Por este motivo, salvo en ocasiones donde el tipo de material o las restricciones propias del sitio lo impiden, las dragas hidráulicas son las preferidas, hecho que se manifiesta en la conformación de la flota mundial de dragas y en el volumen dragado ejecutado con estos equipos.

El transporte del material dragado puede realizarse por tuberías, mediante la cántara de la draga y con barcazas. El lugar de descarga es uno de los elementos que más influyen en el costo de dragado. Define la distancia de transporte y el método de transporte y puede ayudar a definir el tipo de draga. La deposición puede efectuarse: en tierra o en zonas de aguas de mayor profundidad.

La obra de dragado puede ser una obra específica donde el objeto principal es ejecutar un dragado o parte de una obra civil de mayor importancia donde la obra de dragado es una parte de la obra principal. ¿Por qué se realiza el movimiento de suelos de un lugar a otro? Existen una serie de situaciones donde es necesario realizar tareas de dragado, como por ejemplo, en los casos mostrados a continuación:

1. Canales de Navegación
2. Construcción de puertos
3. Mejoramiento de las redes de drenaje
4. Proyectos de Relleno de áreas
5. Parques temáticos
6. Áreas residenciales
7. Construcción de islas artificiales

En los últimos años han tomado también gran importancia los dragados asociados a la regeneración y conservación de las playas mediante aportaciones artificiales de arena. En la actualidad las técnicas de dragado están resultando vitales en obras en las que se pretende generar grandes áreas útiles en el mar, a menudo asociadas al transporte de mercancías y pasajeros.

#### **4.1 Clasificación de las obras de dragado**

Las obras de dragado están especialmente relacionadas con la construcción o mantenimiento portuarios y con la regeneración de playas, aunque sus

aplicaciones son mucho más diversas. De esta manera, se pueden clasificar las obras de dragado en función de su objetivo o destino. Por otro lado, las condiciones en que se desarrolla el dragado son también muy distintas en función del emplazamiento de la obra y de las características del terreno a dragar. Estos dos factores permiten también clasificar las obras de dragado.

Los terrenos a dragar pueden ser de naturaleza muy diversa, desde rocas duras hasta fangos, por lo que el comportamiento frente a la excavación, al transporte y al vertido es diferente en cada caso. La naturaleza del material a dragar, en resumen, condiciona en gran medida la draga y la técnica de dragado utilizada.

#### **4.2 Equipos de dragado**

Dada la gran diferencia de condiciones respecto a las obras terrestres, se necesita una maquinaria especializada para realizar las obras de dragado, que ha evolucionado mucho en los últimos años.

Las inversiones necesarias para financiar este tipo de obras son muy superiores a las terrestres, por lo que la selección de la maquinaria es decisivo en el costo final de las operaciones de dragado. La variedad de equipos y métodos de dragados es muy extensa, siendo lo más usual clasificarlos según el método utilizado para la excavación del material en dragas mecánicas o hidráulicas. Dentro de la gran variedad de equipos de dragados existentes, algunos de ellos se han especializado en una de las tres fases de operación (excavación, transporte o vertido), pero otros son capaces de realizar todo el conjunto de la operación sin necesitar equipos o instalaciones auxiliares. A continuación se muestran los principales equipos de dragado existentes (Jesus Martinez Barron, 2008).



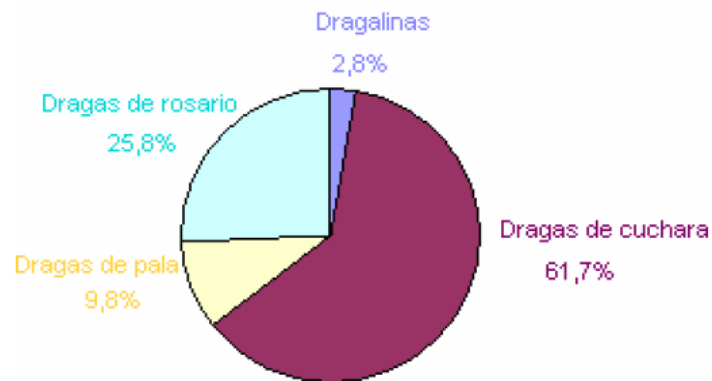
Figura 4.1. Clasificación de las dragas actuales.

#### 4.2.1 Dragas Mecánicas

Las dragas mecánicas utilizan equipos o medios exclusivamente mecánicos para la excavación y extracción del material. Es el tipo de dragas más antiguo y ha evolucionado mucho a lo largo de la historia gracias al avance de la tecnología industrial y de las obras marítimas. En función del medio mecánico con que se realiza la extracción del material, podemos clasificar las dragas mecánicas en los siguientes grupos:

- Dragalinas
- Dragas de cuchara
- Dragas de pala
- Dragas de rosario

Como puede verse en la gráfica 4.1, las dragas de cuchara son las más abundantes, con casi un 62% del total, seguidas de las dragas de rosario (25.8%), las de pala (9.8%) y finalmente las dragalinas con tan solo un 2.8%.



Gráfica 4.1 Distribución de las dragas mecánicas (Piza, 2002).

La elección del equipo más adecuado depende de una serie de factores, entre los que se encuentran: condiciones del emplazamiento (factores marítimos y meteorológicos, tipo de sedimento, tráfico marítimo, distancia al punto de vertido, entre otros), el tipo de obra, el volumen a dragar, el dragado de contaminación del material y el factor económico.

A continuación se describen los equipos mencionados:

Draga de cuchara. Son equipos que extraen el material mediante una pala mecánica, del mismo modo que lo realiza una excavadora en tierra. Estos equipos, debido a la fuerza de la pala mecánica, son utilizados para extraer materiales con gran contenido de sólidos.



Figura 4.2. Draga de cuchara.

Dragalinas. Consiste en una embarcación (generalmente pontona) sobre la que se monta un mecanismo de cuchara accionado por engranajes mecánicos o motores hidráulicos. Se fija mediante spuds al lecho marino. En general, se trata



de un equipo terrestre de excavación aplicado al dragado fluvial o marítimo. La inclinación óptima de la cuchara respecto del terreno depende del tipo de material a dragar y de la capacidad de carga de la cuchara.



Figura 4.3. Draga de Dragalina.

Draga de cangilones o rosario (*Bucket dredge*). Este tipo de draga realiza la extracción del suelo mediante una cadena de baldes que gira, como en una noria, sostenida por una escalera. El extremo exterior de la escalera, junto con los baldes y la cadena, es sumergido hasta el fondo a dragar. Cada uno de los baldes extrae una porción del material y es desplazado por la cadena hasta la superficie. El trabajo de la draga de cangilones es continuo y por esto más eficiente que otras dragas mecánicas.



Figura 4.4. Draga de cangilones o rosario.

La draga de pala de carga frontal está constituida por un fuerte brazo que puede realizar una excavación frontal, elevar la carga, girar el brazo y depositar el material sobre gánguil. Esta draga se fija al fondo con tres spuds, dos en proa y uno en popa. La capacidad del cazo oscila entre 3 y 5 metros cúbicos aunque en

Estados Unidos se fabrican hasta de 20 metros cúbicos. Las ventajas es que excava muy bien rocas blandas y arcillas duras y además según excava, se va abriendo a sí misma un canal.



Figura 4.5. Dragas de pala.

#### 4.2.2 Dragas Hidráulicas

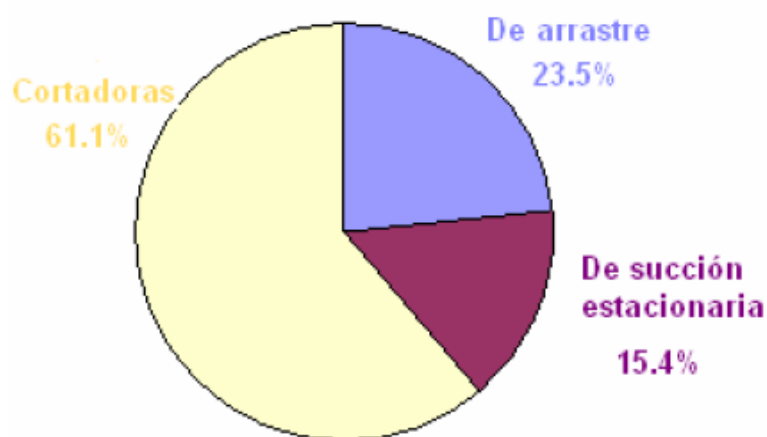
Las dragas hidráulicas son unidades que realizan un trabajo completo de dragado (entendiendo por tal la extracción, el transporte y la disposición final de los suelos a remover); es decir, son capaces de extraer los sedimentos, depositarlos dentro de la propia draga o en otro sitio, y transportarlos mecánica o hidráulicamente. Esta característica hace que este tipo de draga opere de manera más eficiente y económica.

A partir del siglo XIX comenzaron a utilizarse las bombas de succión en las operaciones de dragado. Con la operación de esta nueva tecnología, los equipos se clasificaron en mecánicos e hidráulicos. En 1994, el 60% de la flota mundial de dragas correspondía a dragas hidráulicas o de succión (Vanoni V. A., 1975). Las dragas hidráulicas se distinguen en dragas en marcha o estacionarias. Los diferentes equipos existentes en la actualidad son los siguientes:

- Dragas en marcha
  - Dragas de succión en marcha o de arrastre
- Dragas estacionarias
  - Dragas de succión estacionaria
  - Dragas cortadoras o “cutter”

- Draga dustpan
- Draga autoportadora

En la actualidad, aunque no existen datos globales, se acepta que las dragas de succión en marcha han ido ganando terreno por su versatilidad y capacidad de maniobra. Además, las nuevas tecnologías han permitido la aparición de otros tipos de dragas como la draga de dustpan diseñadas para obras de dragado más específicas.



Gráfica 4.2 Distribución de las dragas hidráulicas (Vanoni V. , 1975).

A continuación se detalla en qué consisten cada una de ellas:

Dragas de succión por arrastre. Estos equipos extraen el material diluido por bombeo, con una concentración entre el 10% y el 20%. Este tipo de draga se caracteriza por tener uno o dos (uno en cada banda) tubos de succión en cuyo extremo inferior se coloca un cabezal. Está diseñado para poder navegar con aguas profundas, incorpora una cántara en el interior de su estructura donde se va almacenando el material bombeado para su posterior transporte a la zona donde será depositado.



Figura 4.6. Draga de cántara con tubo de succión.

Dragas cortadoras. Son dragas de succión equipadas con un cabezal cortador o cutter que les permite trabajar sobre materiales más compactos y resistentes, obteniendo un volumen de producción muy elevado. Su forma de operar es estacionaria como la mayoría de los equipos mecánicos de dragado. Combina características mecánicas e hidráulicas, ya que utilizan un dispositivo mecánico para cortar el material y un sistema hidráulico para su transporte y vertido, normalmente por medio de tuberías.

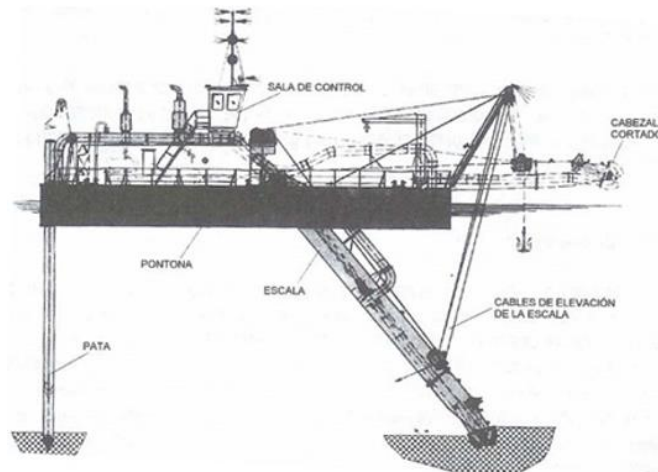


Figura 4.7. Draga de succión con cabezal cortador.

Draga Dustpan. Son equipos que extraen el material por medio de un cabezal que se coloca en contacto con el fondo y se caracteriza por tener forma plana, rectangular, alargada y con dos conductos para succionar el material. El cabezal

tiene una boca, por donde entra el material, a la que se encuentran adosados pequeños dientes verticales a lo largo de la misma. Los pequeños dientes evitan el paso de objetos de gran tamaño por la boca de succión.



Figura 4.8. Cabezal de draga “Dustpan”.

Una draga de succión en marcha (en inglés, Trailing Suction Hopper Dredger o T.S.H.D.) es una embarcación auto portante y auto propulsado, de dimensiones variables, diseñada para dragar de forma continua elevados volúmenes de material de una forma sencilla y económica, admitiendo condiciones marítimas adversas. El material es aspirado por una bomba centrífuga a través de un tubo cuyo extremo tiene un cabezal de succión.

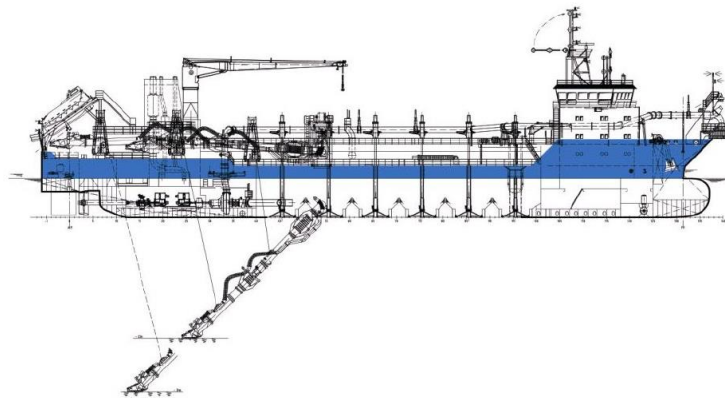


Figura 4.9. Dragas de succión en marcha.

### 4.3 Costos de dragado

En función del volumen a dragar, las características del suelo, los plazos prefijados para ejecutar la obra y otras características específicas del lugar y el trabajo a realizar, se establece el plan de dragado. Este debe tener la producción suficiente para cumplir los requisitos de volumen y plazo y ser el adecuado para realizar la obra. Elegido el equipo y el procedimiento de trabajo se puede estimar cada uno de los componentes y determinar cuál es el costo de la obra. Esta determinación se realiza tanto en la etapa de proyecto de la obra para poder prever las partidas presupuestarias correspondientes como en la etapa de presentación de propuestas por parte de los eventuales contratistas.

Es importante hacer una diferencia entre “costo” de la obra de dragado y “precio” de la misma. *El costo* es un valor objetivo que resulta de cotizar todos los conceptos que son necesarios para la ejecución de la misma. Esta tarea realizada por dos profesionales diferentes y para condiciones similares debería dar resultados parecidos. *El precio* es un valor que resulta de adicionar a los costos una serie de aspectos subjetivos y de oportunidad, por lo que para una misma obra, los costos son muy parecidos pero los precios pueden ser muy diferentes.

A efectos de determinar el costo de la obra se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Movilización / Desmovilización
- Costos de capital
- Costos operativos

Para determinar el precio de la obra se deben agregar los siguientes conceptos:

- Gastos Generales (Overhead)
- Riesgos
- Beneficios

Otros componentes que hacen a la determinación del precio final ofertado son:

- Costos financieros
- Impuestos

La determinación de costos se realiza de manera diferente cuando se trata de empresas públicas o empresas privadas. Se va a destacar este aspecto a medida

que se vayan analizando cada uno de los componentes del costo. El costo de las obras de dragado es muy dependiente del tiempo necesario para realizar las operaciones, muchos de los componentes más importantes del costo se cotizan por unidad de tiempo como son los costos de capital de los equipos, los costos asociados a personal y otros. Por ello la adecuada previsión en la ejecución de cada una de las tareas tiende principalmente a conocer con anticipación la real duración de las mismas y a evitar cualquier demora que pudiera producirse.

#### **4.3.1 Movilización / Desmovilización**

La movilización de los equipos, personal y materiales necesarios para realizar una obra de dragado es una tarea muy específica y que debe analizarse obra por obra. Debe tenerse en cuenta que en muchos casos, principalmente cuando se refiere a obras de gran magnitud, las tareas son realizadas por empresas extranjeras por lo que la movilización puede realizarse desde distancias muy significativas. Una vez iniciado el contrato se realiza una preparación de los equipos y materiales que va a ser necesario trasladar hasta el sitio de obra. Esto puede incluir la adecuación de algún aspecto de los equipos de dragado para poder realizar específicamente la obra a iniciar.

Además de los equipos de dragado debe tenerse en cuenta los repuestos necesarios para realizar el mantenimiento y reparaciones durante la duración del contrato. Este aspecto es importante para no tener demoras durante la ejecución de las obras por falta de repuestos. Todos los elementos necesarios se cargan a bordo de las dragas para su transporte. Se debe tener en cuenta el transporte en tierra, mediante camiones o ferrocarril, hasta el lugar de embarque y puede ser en algún caso el transporte en tierra en el lugar de destino. En ambos casos debe tenerse en cuenta los gastos necesarios en el puerto de embarque y desembarque, tanto gastos portuarios como gastos de grúas para el movimiento. Para el caso de dragas no autopropulsadas debe considerar el costo del transporte por agua o el costo del remolque. Para realizar todas estas tareas se debe contar con un equipo de personal de supervisión que se encargue de todas las tareas referentes a la movilización. El personal técnico asignado al proyecto debe trasladarse a la zona, instalarse, instalar las oficinas para el seguimiento del proyecto y contratar el personal local de apoyo. El personal embarcado asignado a los equipos de dragado llegará de acuerdo al tipo de draga y a la programación del trabajo. Hay épocas en que los equipos de dragado están muy ocupados y por lo tanto se dan ocasiones en que la

desmovilización de una obra puede ser considerada como movilización de la obra siguiente. En este caso los costos de desmovilización pueden ajustarse en este aspecto.

### 4.3.2 Costos de capital

El precio de los equipos de dragado es muy elevado aún para equipos pequeños que pueden valer más de un millón de dólares. Los equipos grandes, como las dragas de succión por arrastre grandes o las dragas de cortador grandes pueden llegar a valores superiores a los 100 millones de dólares. Por lo tanto el monto que se atribuye a un contrato en concepto de amortización del capital invertido es uno de los elementos más importantes en el costo total de la obra. Este valor comprende la amortización del capital inicial ( $V_0$ ) más los intereses ( $i$ ) compensatorios de una inversión equivalente. Para cada tipo de equipo se considera una vida útil por lo se amortiza en un número de años ( $n$ ). En la Tabla 4.1, se indican periodos de tiempo para diferentes tipos de equipos.

Tipo de equipo	Periodo (n)
	años
TSHD pequeña	20
TSHD mediana o grande	30
CSD pequeña	10
CSD mediana	20
CSD grande	25
Retroexcavadora	20
Draga de cucharas con cántara	25
Draga de cucharas	20
Barcaza autopropulsada	25
Barcaza no autopropulsada	25
Remolcador pequeño	10
Remolcador grande	20

Tabla 4.1. Periodo de amortización de equipos.

Se considera una tasa de interés ( $i$ ) por el capital inmovilizado. Las inversiones que realizan las grandes empresas son a través de préstamos otorgados a tal efecto. En algunos países se otorgan préstamos con tasas de interés muy favorables para la construcción de equipos de dragado como apoyo a los



astilleros. Se especifica un Valor Residual ( $V_r$ ) al final de la vida útil que va del 5% al 20 %. La cuota de capital o costo anual amortizable ( $CA$ ) se determina de la siguiente forma

$$CA = (V_o - V_r) \times f_r + V_r \times i$$

Donde

$f_r$  = Factor de recuperación del capital para la vida útil ( $n$ ) y tasa de interés ( $i$ ), se calcula con la siguiente fórmula de interés compuesto.

$$f_r = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

		<b>i=0,03</b>	<b>i=0,06</b>	<b>i=0,09</b>
<b>V<sub>o</sub></b>	US\$	10,000,000	10,000,000	10,000,000
<b>V<sub>r</sub></b>	%	10	10	10
<b>n</b>	años	15	15	15
<b>f<sub>r</sub></b>		0,083767	0,102963	0,124059
<b>CA</b>	US\$/año	783,839	986,665	1,206,529

Tabla 4.2. Incidencia de la tasa de interés.

Como se aprecia en la Tabla 4.2, el efecto de la tasa de interés sobre la cuota de capital es determinante para el costo de la obra. En estas condiciones los contratistas de países que favorecen tasas de interés bajas pueden realizar ofertas más económicas y por lo tanto con más oportunidad de ganar.

### 4.3.3 Costos Operativos

Los costos operativos incluyen todos los costos directos necesarios para ejecutar la obra.

➤ Personal

El personal necesario para realizar las operaciones se divide en personal embarcado y personal de supervisión.

➤ Personal embarcado

El personal a cargo de las operaciones de dragado es personal muy especializado y muy bien cotizado en el mercado de trabajo internacional. Hay dos

situaciones: las dragas autopropulsadas y las dragas no autopropulsadas. En las dragas que no tienen propulsión el personal realiza mayormente tareas de dragado mientras que en las dragas autopropulsadas se realizan tareas de dragado y también se debe mantener la draga en navegación. Se considera una draga de succión por arrastre en los comentarios que se realizan a continuación. El régimen del personal embarcado es un tiempo embarcado y un tiempo equivalente de descanso en tierra o 1 x 1. Por ejemplo, hay regímenes de 21 días x 21 días. Años atrás cuando en el mundo del dragado se trabajaba con un régimen de 2 x 1 se habituaba hacer 60 días embarcado por 30 días de descanso.

A bordo de la embarcación se trabaja en dos turnos de 12 horas los 7 días de la semana. Estas condiciones de trabajo además de la especialización necesaria para operar las dragas modernas hacen que los sueldos sean muy elevados. La dotación de las dragas tiende a disminuir en los equipos más modernos. Por ello, a pesar de que el tamaño de las dragas aumenta la dotación de personal se mantiene en igual número o incluso disminuye.

La cantidad de personal a bordo de cada draga depende de las empresas y de los países. Años atrás las dragas de China solían tener mayor cantidad de personal que las dragas europeas. En la actualidad tienden a tener la misma cantidad de tripulantes. En el costo del personal embarcado hay que tener en cuenta otros costos que hacen al valor total cotizado. Entre ellos debemos considerar:

Pasajes: el personal viaja a su lugar de origen cada 30 días aproximadamente, hay que prever todos los gastos de ida y regreso. Además de viáticos, entrenamiento: cada vez más el personal debe ser entrenado en forma continua, seguros y premios. Con respecto a los costos de combustibles hay que tener en cuenta: Tipo de combustible, precio unitario en el lugar de trabajo, potencia de los equipos de dragado: para estimar la potencia es necesario examinar cada elemento del ciclo de dragado y determinar aproximadamente qué porcentaje de la potencia disponible se va a utilizar y por cuanto tiempo. Algunos equipos continúan utilizando parte de la potencia aún en las etapas de parada,

- Horas de trabajo
- Horas ociosas
- Eficiencia de los equipos
- Pérdidas de combustible

➤ Lubricantes

El consumo de lubricantes depende de las características de los equipos, su edad y estado de mantenimiento. En general se adopta un porcentaje del costo de combustibles que varía del 10 al 15%.

➤ Otros consumibles

Cada tipo de draga consume una cantidad de productos de diferentes características. Entre ellos pueden encontrarse todos o algunos de los siguientes:

- Pinturas
- Cabos de acero y otros
- Provista
- Materiales de limpieza
- Agua

➤ Mantenimiento de rutina

Se refiere al mantenimiento de rutina y a las reparaciones diarias. En general son realizadas por el personal de a bordo: electricista, jefe de máquinas, etc. Este componente del costo depende de las horas de funcionamiento y se calcula en US\$/hr:

Entre las actividades incluidas en este concepto podemos mencionar:

- Cambios de aceite y engrase
- Limpieza y pintura
- Reemplazo de partes gastadas
- Reemplazo de filtros, empaquetaduras
- Reparaciones menores en motores, válvulas
- Reemplazo de cañerías y tuberías
- Reparaciones eléctricas
- Mantenimiento de instrumental de medición

Para una primera estimación pueden utilizarse los valores indicados en la tabla 4.3, donde el costo por día del equipo se determina multiplicando el factor K1 por el valor del equipo

Tipo de equipo	K1
Draga de succión por arrastre	0,000135
Draga de succión con cortador	0,000140
Draga tipo retroexcavadora	0,000140
Draga de cucharas	0,000130
Barcaza autopropulsada	0,000130
Barcaza no autopropulsada	0,000025
Remolcador	0,000145

Tabla 4.3. Mantenimiento de rutina – Costos por día.

Los contratos de dragado tienen, en general, una duración corta, de algunos meses. Por lo tanto la mayoría de las reparaciones mayores no se realiza durante el periodo en el que se desarrolla el contrato. Por lo tanto se carga un monto a todos los contratos para este rubro basado en el tiempo proporcional del contrato. Este monto se calcula en US\$/año, lo que nos indica que es un costo fijo que tienen los equipos de dragado. Estos costos incluyen alguno o todos los elementos que se enumeran a continuación:

- Reemplazo de elementos principales.
- Recorrido regular de motores y generadores.
- Repintado completo.
- Reparación de guinches.
- Salida a dique seco para reclasificación.
- Reparaciones estructurales, cambio de chapa.

A los efectos de calcular el costo por día se multiplica el factor K2 por el valor del equipo

Tipo de equipo	K <sub>2</sub>
Draga de succión por arrastre	0,000275
Draga de succión con cortador	0,000300
Draga de tipo retroexcavadora	0,000300
Draga de cucharas	0,000250
Barcaza autopropulsada	0,000260
Barcaza no autopropulsada	0,000250
Remolcador	0,000300

Tabla 4.4 Reparaciones mayores – Costos por día.

El mantenimiento de la certificación es un gasto importante tanto por el costo propio de la revisión como por el tiempo que el buque debe estar fuera de

operación. Al realizarse en intervalos superiores a la duración de los contratos individuales se carga una proporción de este costo a cada contrato. Las empresas de dragado son muy cuidadosas de mantener los seguros al día y con buenas coberturas.

#### **4.3.4 Gastos generales**

En general se aplica un porcentaje fijo a todos los contratos que resulta del valor medio anual que gasta la empresa en esos conceptos. En algunos casos puede ajustarse ese porcentaje en función de la estrategia de la empresa para ser más competitiva y ganar un determinado contrato. Como gastos generales se pueden considerar todos o algunos de los siguientes conceptos:

Oficina central: comprende todos los gastos que requiere la oficina central para su funcionamiento. La empresa se presenta a muchas licitaciones de las cuales gana solo algunas. El costo de mantener la oficina funcionando sale de los contratos que se ganan. Valor tentativo: 7%. Impuestos: es muy variable contrato a contrato. Valor tentativo 3 %.

Agente: la empresa necesita un agente que la represente en un país, compre los pliegos, presente las licitaciones y haga todos los trámites hasta que el contrato esté en funcionamiento: Valor tentativo: 1%.

Seguro de cambio: En general la moneda del contrato es diferente de la moneda del país de la empresa de dragado por lo que acostumbra tomar un seguro de cambio. Valor tentativo: 1,5 %.

Seguro a la exportación: Hay países que consideran el dragado realizado por sus empresas en otros países como una exportación de servicios. Por ello, estos contratos se pueden asegurar en los países de origen frente a eventuales incumplimientos de los Clientes: Valor tentativo: 2 %.

Asistencia legal: la asistencia legal e impositiva es permanente durante las etapas de preparación de propuestas, licitación, ejecución del contrato y finalización del mismo. Valor tentativo: 0,5 %.

Garantías: las licitaciones y los contratos requieren de los contratistas garantías de oferta y garantía de fiel cumplimiento de contrato. Para contratos importantes suelen ser fianzas bancarias de alto costo. Es muy variable según los requerimientos del pliego y del contrato. Valor tentativo: 0,5 %.

El porcentaje resultante se aplica sobre el total del contrato. Si suma 20% se aplica 25% sobre los costos. Las empresas públicas en general no calculan ningún valor en concepto de gastos generales ya que son costos pagados por la Administración Pública. Si se considera que los riesgos que presenta el trabajo son altos, el precio aumenta. Una forma de mejorar este aspecto es tomando provisiones en el contrato para disminuir los riesgos. Si hay mucho trabajo en el mundo, el precio aumenta. Si la obra es muy extensa, con volúmenes muy grandes o plazos de obra muy largos, el precio disminuye. Si el cliente o el país es poco confiable, el precio aumenta.

#### **4.3.5 Método de costos standard**

##### Bases del método

Bray (2006) publicó un método que denominó “Cost Standards for dredging equipment” basado en la experiencia de muchos años del NIVAG aplicado en Holanda. Este método permite determinar el valor de los diversos equipos de dragado mediante fórmulas que tienen en consideración las características principales de los mismos. Este aspecto es importante pues no es fácil obtener valores de adquisición de equipos con una cierta aproximación.

Además propone una forma de calcular los costos de mantenimiento mediante un porcentaje variable sobre el valor del equipo considerado. Para cada tipo de equipo de dragado se presentan tablas que resume los valores a aplicar y consideraciones que deben evaluarse caso a caso para su correcta aplicación.

Un aspecto a tener en cuenta es el periodo de utilización anual que se asigna a cada tipo de equipo. Para la draga de succión por arrastre, por ejemplo tabla 4.5, se le asigna un periodo de utilización anual de 33 semanas por año. Este aspecto que resulta de una evaluación estadística debe ser evaluado con cuidado. Los cálculos para la cuota de capital más intereses, Bray la calcula con un interés del 7%. Todos los valores están obtenidos así como la actualización anual de los mismos de la IADC - International Association of Dredging Companies.

##### Ejemplo de aplicación

Cálculo de la “depreciación + interés” y “mantenimiento y reparación” usando el método de “costos standard” para una draga de succión por arrastre de las siguientes características:

<b>Peso (W):</b>	<b>10.500 ton</b>
Potencia de las bombas de dragado (Pt):	6.000 kW
Potencia de las bombas de jet (Jt):	1.900 kW
Potencia de propulsión navegando (S):	15.000 kW

Se asume un coeficiente de indexación de 1.05 para este tipo de dragas y para el año 2008. Se asume para este ejemplo que la draga trabajará 140 horas por semana. La fórmula de cálculo sin indexación es

$$V = 4400 \times W + 89400 \times W^{0.35} \times 4766000 + 1400 \times P_t + 580 \times J_t + 670 \times S$$

$$V = € 83.829.033$$

Teniendo en cuenta la indexación (1.05) este valor pasa a ser

$$V = € 88.020.484$$

El costo semanal (D+i: Depreciación e interés) se obtiene multiplicando por 0.292 % de acuerdo a lo indicado en tabla 4.5

$$V(D + i) = € 257.019$$

Hay que recordar que este valor tiene implícita una tasa de interés del 7%. Para calcular los costos de mantenimiento y reparación (M+R) debe tomarse el valor de base y compararse con los costos standard (tabla 4.5).

Hopper Volume	Displacement at Dredging mark	Lightweight	Power dredge pumps during suction	Power jet pumps on draghead	Free sailing propulsion power	Value	Cost per week		M+R/week
							D+I	M+R	
m <sup>3</sup>	t	t	Pt kW	Jt kW	S kW	V €	€	€	% of V
900	2.000	635	350	220	950	7.840.000	22.893	18.032	0,230
1.100	2.500	780	450	260	1.250	9.480.000	27.682	21.330	0,225
1.300	3.000	945	600	300	1.550	11.300.000	32.996	24.747	0,219
1.600	3.500	1.100	750	340	1.900	13.000.000	37.960	27.690	0,213
1.800	4.000	1.260	880	360	2.200	14.600.000	42.632	30.076	0,206
2.400	5.200	1.640	1.000	660	2.500	17.800.000	51.976	32.930	0,185
2.700	5.800	1.800	1.250	660	3.550	20.000.000	58.400	34.000	0,170
3.500	7.600	2.400	1.550	760	4.000	24.700.000	72.124	37.297	0,151
4.700	9.900	3.050	1.950	800	5.100	30.100.000	87.892	40.033	0,133
6.200	13.000	3.925	2.400	850	6.450	36.900.000	107.748	45.387	0,123
7.700	16.000	4.780	2.600	1.000	7.350	42.800.000	124.460	48.792	0,114
9.100	19.000	5.635	3.500	1.600	9.400	50.500.000	147.460	54.035	0,017
11.000	23.000	6.830	4.320	1.600	10.800	59.100.000	172.572	60.873	0,103
12.500	26.000	7.610	5.200	1.600	13.000	66.000.000	192.720	66.660	0,101
13.500	29.000	8.685	5.200	1.600	13.000	71.900.000	209.948	71.900	0,100
18.000	40.000	12.100	6.680	1.800	16.700	94.200.000	275.064	93.258	0,099
19.000	42.000	13.750	7.000	2.000	17.500	104.000.000	303.680	102.960	0,099
22.500	48.000	15.950	7.200	3.000	18.000	116.000.000	338.720	114.840	0,099
24.000	60.000	18.250	9.600	4.000	24.000	135.000.000	394.200	132.300	0,098
35.000	83.000	22.440	9.600	4.000	24.000	156.000.000	455.520	152.880	0,098

Tabla 4.4. Costos Standard

Este valor de base se encuentra (tabla 4.5) entre los valores:

$$€ 71.900.000 \text{ y } € 94.200.000$$

Los porcentajes de mantenimiento y reparación ( $M + R$ ) para estos dos valores son:

$$0,100 \% ; 0,099 \%$$

El porcentaje real para el valor  $V = 83.829.033,00$  está dado por:

$$\frac{83,829.033 - 71,900.000}{94,200.000 - 71,900.000} \times (0,100 - 0,099) + 0,099 = 0,099535 \%$$

Esto representa un mantenimiento y reparación (M+R) semanal:

$$V = € 83.439 \times 1,05 = € 87.611$$

Este valor debe ser incrementado en un 15 % debido a la descarga del material por bombeo,

$$V = € 87.611 \times 1,15 = € 100.752$$

Este valor tiene en cuenta un trabajo de 84 horas semanales. El 30 % de este costo es fijo y el 70 % es variable,

$$V_{fijo} = € 100.752 \times 0,30 = € 30.225$$



El elemento variable debe ser incrementado para tener en cuenta las 140 horas semanales de trabajo,

$$V_{variable} = € 70.527,01 \times \left( \frac{140 - 84}{84} + 1 \right) = € 110.022,14$$
$$V_{variable} = € 100.752 \times 0,70 = € 70.527$$

El total de  $M + R$  es finalmente la suma de ambos elementos,

$$V = € 30.225,86 + € 110.022,14 = € 140.248,00$$

## 5. Desazolve por medio de aeración

En este capítulo se describirá el método alternativo que se está proponiendo para mitigar la pérdida de volumen de los cuerpos de agua, en particular en pequeñas presas o bordos, que en México, son la mayoría de los cuerpos de agua existentes.

El dispositivo alternativo que se analiza y es objeto de este informe, es un equipo que fue propuesto en su momento como técnica para mezclar la columna de agua en embalses estratificados y disminuir los efectos de contaminación y mejorar la calidad del agua. Sus antecedentes se mencionan a continuación.

### 5.1 Eutrofización de lagos y embalses

La eutrofización puede definirse como el enriquecimiento de las aguas por compuestos inorgánicos, mismos que provocan un incremento en la productividad primaria de los cuerpos de agua (Mason, 1991). La eutrofización es un problema ampliamente reconocido desde los años cuarenta y cincuenta. Cobró gran importancia en los sesenta y setenta, tiempo en el que se enfocaron parte de los esfuerzos de investigación al entendimiento del problema, relacionando con los efectos de contaminación, específicamente de contaminación por materia orgánica y se desarrollaron algunas de las técnicas de manejo. Sin embargo, es aún uno de los grandes problemas sin resolver en cuerpos de agua dulce, particularmente en lagos y embalses (Harper, 1992).

Una alternativa para el control de la contaminación tiene que ver con el manejo de los sedimentos, a través de su remoción. Esta técnica tiene varios efectos, ayuda al control de algas y macrófitas, disminuye las cargas de nutrientes y sustancias tóxicas acumulados en los sedimentos. Su ventaja sobre la inactivación de nutrientes consiste en que las fuentes son removidas en lugar de ser solo controladas. Este es un método muy efectivo en la administración de lagos y embalses. Este procedimiento resulta atractivo, siempre y cuando se realice una cuidadosa planeación de la disposición del sedimento.

Uno de los signos de la eutrofización, es la escasez de oxígeno en el hipolimnion de lagos (zona profunda) y embalses. La anoxia puede producir ciertos cambios indeseables en la calidad del embalse que incluyen el acelerado reciclaje de nutrientes, solubilización de metales y limitación de peces.

Para revertir esta condición, otra alternativa para mejorar la calidad del agua en lagos o embalses es mediante la aplicación de la técnica de aireación. La

aireación es un proceso a base de inyección de aire que sirve para lograr la oxigenación y la circulación artificial del agua de lagos y embalses eutrofizados, resolviendo los problemas de calidad del agua y de proliferación de algas.

La aireación puede realizarse en función de las condiciones del cuerpo de agua, es decir, si es somero o poco profundo, ligeramente o fuertemente estratificado, con sedimentos contaminados o no, si tiene vegetación enraizada, etc., es decir su forma de aplicación difiere según el tipo de cuerpo de agua.

Para el caso de lagos o embalses estratificados, la circulación artificial por mezclado puede llegar a producir una destratificación. Se realiza por medio de bombas, chorros y burbujas de aire. El objetivo es un mezclado completo que homogeniza la temperatura de todo el lago. Sus principales ventajas son la aireación y oxidación de sustancias químicas en toda la columna de agua. Esta técnica ha demostrado su efectividad cuando se emplea en embalses que no presentan estratificación térmica o muy leve. Uno de los métodos más usados es el sistema de burbujas de aire, el cual el aire comprimido es inyectado al cuerpo de aguas mediante difusores o tubos perforados. Al entrar al líquido, el chorro de aire se reduce rápidamente a una corriente de burbujas que arrastran al fluido circundante hasta la superficie, divergiendo en este lugar en una corriente horizontal.

Cuando no se quiere mezclar o destratificar la columna de agua, se puede utilizar la aireación mecánica, la cual consiste en llevar agua desde el hipolimnion, aireándola en la superficie y retornándola a la profundidad con un mínimo incremento en la temperatura.

Otra técnica es la oxigenación hipolimnética, la cual admite una oxigenación en los niveles inferiores del embalse sin perturbar la estratificación térmica natural, de hecho su objetivo es mejorar la calidad del agua mediante la oxigenación sin permitir el transporte vertical del fluido.

Ejemplo de esta técnica es el sistema denominado LIMNO, el cual se puede instalar permanentemente y operar cuando se requiera ya que se localiza fijo con respecto al fondo del embalse, como se muestra en la figura 5.1 (Geney, 1998).

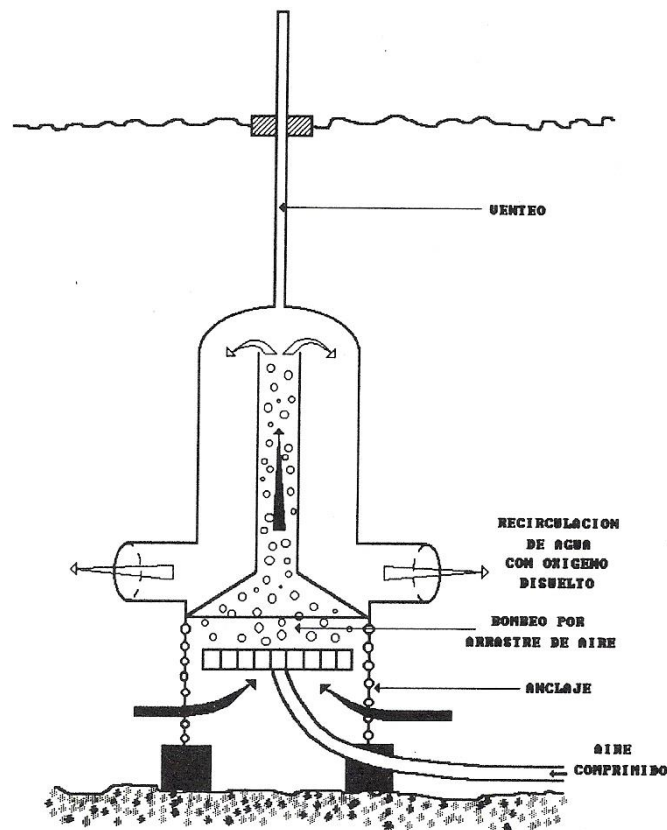


Figura 5.1. Principio de funcionamiento del aireador hipolimnético LIMNO.

El cuerpo principal del aireador mide 4.6 m de alto y 1.25 m de diámetro incluyendo los tubos de salida (figura 5.1). Está construido en plástico poliéster reforzado con fibra de vidrio y se ancla dentro del hipolimnion del embalse.

El funcionamiento de este sistema es el siguiente: El aire comprimido es liberado de un difusor de aire poroso suspendido abajo del cuerpo principal del aireador. El aire que sube arrastra el agua que tiene un nivel bajo, hacia dentro del cilindro interior del aireador donde ocurre la aireación.

El oxígeno se difunde dentro del agua, mientras que el ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y otros gases pueden desprenderse del agua hacia las burbujas de aire. Cerca del techo del cilindro interior, la mayor parte del aire se separa del agua y se colecta dentro de una cavidad dentro del aireador. Estos gases no deseables son venteados a la superficie a través de un tubo de diámetro pequeño (7.5 cm).

La cavidad de aire es característica importante de diseño, puesto que ayuda a mantener una presión hidrostática en el agua. Después de que el agua y el aire se separaron en el techo del cilindro interior, el agua fluye hacia abajo entre el cilindro interior y las paredes exteriores del aireador. Dicha agua sale del aireador a través de varios tubos.

El modelo estándar tiene 6 tubos de fibra de vidrio de salida con un diámetro de 50 cm. En caso de que un poco de aire permaneciera en el techo de los tubos de salida, también sería venteado mediante un sistema adicional. Si la línea de venteo principal llega a bloquearse, el aireador tenderá a llenarse con aire y subirá. Entonces una válvula de seguridad se abrirá y permitirá la salida del aire dentro del aireador. Esto previene que el aireador se llene con aire más allá de un cierto nivel y tienda a subir a la superficie.

## 5.2 Descripción del dispositivo aireador

Otro sistema que ayuda a mejorar las condiciones de calidad del agua en embalses es el denominado dispositivo aireación/circulación, que ha sido utilizado en varios lagos en Japón en la década de los 90's. Con este dispositivo, se mueve el agua de las capas profundas hacia la superficie, buscando generar un mezclado vertical. Básicamente, el sistema consta de un tubo principal, abierto en sus dos extremos, que puede construirse en PVC u otros materiales. La parte esencial del dispositivo es la cámara de aire, la cual está equipada con sifones que permite el ingreso del aire hacia el interior del tubo, ver figura 5.2. El dispositivo se puede equipar con boyas u otras formas en la parte superior y con un lastre en la parte inferior con un peso suficiente para contrarrestar la flotación, buscando además mantener el dispositivo en posición vertical dentro del cuerpo de agua.

En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), este sistema ha sido aplicado en dos tipos de problemas: En el año 2001 con el objeto de mejorar la calidad del agua en el vaso de la presa de Valle de Bravo, se instalaron y evaluaron dos sistemas (Ramírez León, *et al*, 2001), mientras que en 2002 el sistema fue evaluado para la formación de flóculos en el proceso de sedimentación de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Recientemente, a raíz de las inspecciones realizadas por la Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos, a más de 40 presas pequeñas y bordos a cargo de la CONAGUA en los últimos 4 años, surgió la inquietud de evaluar un método

alterno para ayudar a mitigar el problema de sedimentación y pérdida de capacidad de la mayoría de las presas del país.

En ese sentido, se pensó en evaluar experimentalmente el dispositivo aireador como un sistema para el desazolve de presas y embalses. Enseguida se describe las actividades realizadas para tal fin.

### **5.3 Características y Funcionamiento del Dispositivo**

Este dispositivo se sumerge hasta una profundidad  $H$ , un compresor instalado en tierra o bien sobre algún tipo de embarcación, envía aire a través de una manguera conectada a la válvula que se encuentra en la cámara de aire. El aire empieza a llenar la cámara gradualmente hasta que llega a la curva inferior del sifón y es expulsado hacia el tubo. Dentro del tubo, la masa de aire forma una burbuja de aire en el tubo, que asciende hacia la superficie debido a la diferencia de densidad que existe entre el aire y el agua. Al ser expulsada la burbuja, detrás de ella se genera un flujo de agua que vuelve a llenar el tubo. Este flujo a su vez generará un arrastre de sedimentos en el fondo debido a los esfuerzos cortantes producidos.

Cada vez que la burbuja asciende, desplaza fuera del dispositivo el agua contenida dentro del tubo, logrando de esta forma, la succión de arrastre de sedimentos en el fondo, debido a los esfuerzos cortantes producidos para ser expulsada.

Es muy importante para el buen funcionamiento del dispositivo de aireación, que éste se encuentre en posición vertical, ya que de no ser así, el llenado de la cámara no es uniforme y el sifón no expulsa el aire al mismo tiempo, formando así una burbuja defectuosa, la cual no permite una succión correcta en el dispositivo, y además tener una carga  $h$  mínima en columna de agua, para que cada descarga de aire sea uniforme.

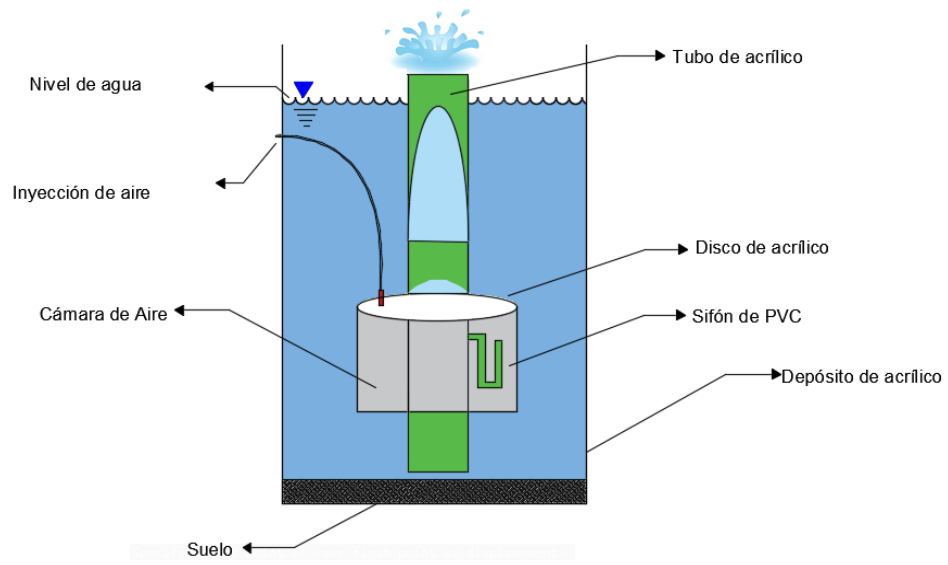


Figura 5.2. Dispositivo aireador

## 5.4 Análisis adimensional.

En la figura 5.3 se muestra el esquema del dispositivo aireador por evaluar, el cual tiene los siguientes componentes: un tubo principal de diámetro  $D$  y longitud  $L$ , cámara de ingreso de aire formado por disco  $d$  y longitud  $l$ , que va desde la superficie libre del agua hasta una profundidad  $h$ , en el extremo inferior del tubo se encuentra una conexión para el ingreso de aire por medio de un compresor.

### 5.4.1 Definición de variables que intervienen en el proceso.

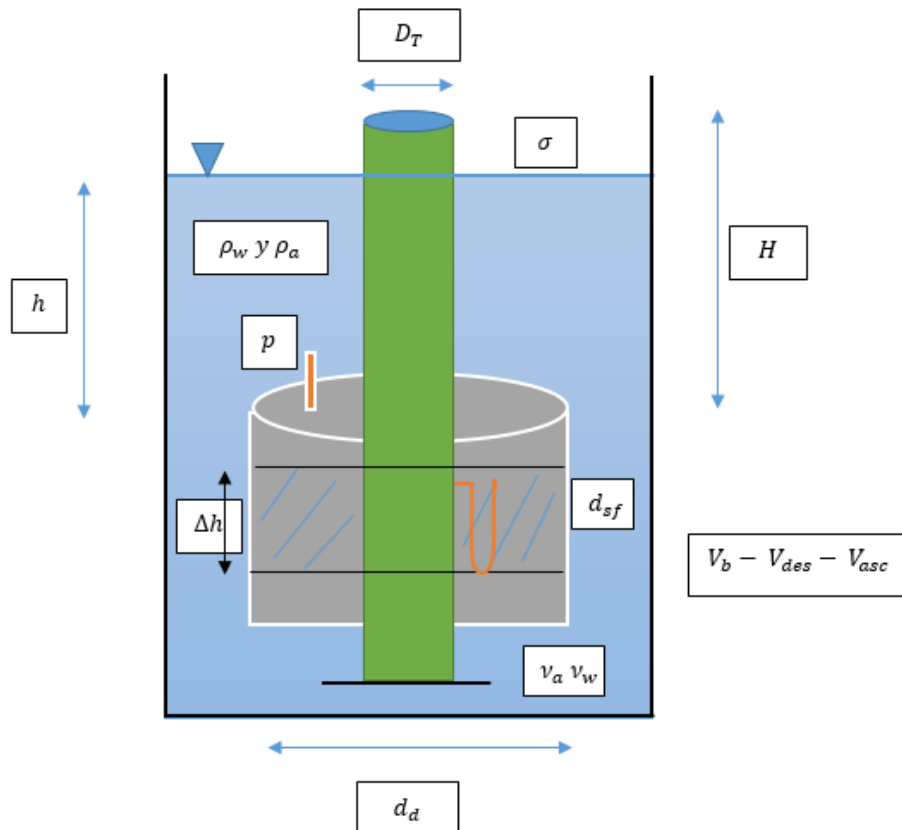


Figura 5.3. Variables adimensionales del experimento

Del esquema de la figura 5.3, se tienen las siguientes definiciones de variables

- 1  $D_t$  Es el diámetro del tubo.



- 2  $\sigma$  Es la tensión superficial de la superficie libre del agua.
- 3  $H$  Es la altura desde el disco hasta el final de la tubería.
- 4  $h$  Es la altura desde el disco hasta la superficie libre del agua.
- 5  $d_{sf}$  Es el diámetro del sifón.
- 6  $\Delta h$  Es la diferencia de alturas cuando empieza a llenar de agua o de aire y el desalojo del agua o aire por el sifón.
- 7  $\rho_w$  Es la densidad del agua.
- 8  $\rho_a$  Es la densidad del aire.
- 9  $\nu_w$  Es la viscosidad del agua.
- 10  $\nu_a$  Es la viscosidad del agua.
- 11  $p$  Es la presión del aire al entrar al instrumento.
- 12  $d_d$  Es el diámetro del disco.
- 13  $V_b$  Es la velocidad de la bala cuando es expulsada por el tubo.
- 14  $V_{des}$  Es la velocidad de llenado del aire en la cámara.
- 15  $V_{asca}$  Es la velocidad de llenado de agua en la cámara.

Variables	M	L	T
$D_t$	0	L	0
$\sigma$	M	0	$T^{-2}$
$H$	0	L	0
$h$	0	L	0
$d_{sf}$	0	L	0
$\Delta h$	0	L	0

$\rho_w$	$M$	$L^{-3}$	$0$
$\rho_a$	$M$	$L^{-3}$	$0$
$v_w$	$0$	$L^2$	$T^{-1}$
$v_a$	$0$	$L^2$	$T^{-1}$
$p$	$M$	$L^{-1}$	$T^{-2}$
$d_d$	$0$	$L$	$0$
$V_b$	$0$	$L$	$T^{-1}$

Se tienen 15 variables que contienen entre ellas las 3 dimensiones fundamentales, por lo que de acuerdo al teorema  $\pi$  o de Buckingham, se pueden formar 12 parámetros adimensionales (15-3). Para ello, hay que definir el tipo de variable:

$V_{des}$	$0$	$L$	$T^{-1}$
$V_{asc}$	$0$	$L$	$T^{-1}$

Variables independientes

$$f(D_t, \sigma, H, h, d_{sf}, \Delta h, \rho_w, \rho_a, v_w, v_a, p, d_d, V_{des})$$

Variables dependientes

$$f(V_b, V_{asc})$$

Expresando las variables anteriores en forma adimensional, se tiene:

Solución:

$$f(D_t, \sigma, H, h, d_{sf}, \Delta h, \rho_w, \rho_a, v_w, v_a, p, d_d, V_b, V_{des}, V_{asc})$$

$$\pi = m - r$$

$$\pi = 15 - 3 = 12$$

Variables repetitivas.

Geometría	$D_t = L$	$L = D_t$
Fluido	$\rho_w = \frac{M}{L^3}$	$M = \rho_w (D_t)^3$
Flujo	$V_{des} = \frac{L}{T}$	$T = \frac{D_t}{V_{des}}$

Por lo general, al hacer un análisis dimensional se recomienda formar parámetros o números adimensionales conocidos, como por ejemplo:

### Numero de Euler

$$\frac{f \text{ inercia}}{f \text{ presión}} = \frac{V}{\sqrt{2\Delta p/\rho}} = E$$

$V$  Es la velocidad del fluido.

$\Delta p$  Es la diferencia de presiones.

$\rho$  Es la densidad del aire

### Numero de Reynolds

$$\frac{f \text{ inercia}}{f \text{ viscosa}} = \frac{VL}{\nu} = R$$

$V$  Es la velocidad del fluido.

$L$  Es una longitud característica.

$\nu$  Es la viscosidad cinemática.

### Numero de Weber

$$\frac{f \text{ inercia}}{f \text{ tensión}} = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} = W$$

$\rho$  Es la densidad del fluido.

$V$  Es la velocidad del fluido.

$L$  Es una longitud característica.

$\sigma$  Es la tensión superficial.

Por tanto:

$$\sigma = \frac{M}{T^2} = \frac{\rho_w (D_t)^3}{\left(\frac{D_t}{V_{des}}\right)^2}$$

$$\pi_1 = \frac{\rho_w D_t V_{des}^2}{\sigma}$$

$$H = L = D_t$$

$$\pi_2 = \frac{H}{D_t}$$

$$h = L = D_t$$

$$\pi_3 = \frac{h}{D_t}$$

$$d_{sf} = L = D_t$$

$$\pi_4 = \frac{d_{sf}}{D_t}$$

$$\Delta h = L = D_t$$

$$\pi_5 = \frac{\Delta h}{D_t}$$

$$\rho_a = \frac{M}{L^3} = \frac{\rho_w (D_t)^3}{(D_t)^3} = \rho_w$$

$$\pi_6 = \frac{\rho_a}{\rho_w}$$

$$v_w = \frac{L^2}{T} = \frac{(D_t)^2}{\frac{D_t}{V_{des}}} = \frac{(D_t)^2 V_{des}}{D_t}$$

$$\pi_7 = \frac{D_t V_{des}}{v_w}$$

$$v_a = \frac{L^2}{T} = \frac{(D_t)^2}{\frac{D_t}{V_{des}}} = \frac{(D_t)^2 V_{des}}{D_t}$$

$$\pi_8 = \frac{D_t V_{des}}{v_a}$$

$$p = \frac{M}{LT^2} = \frac{\rho_w (D_t)^3}{D_t \left(\frac{D_t}{V_{des}}\right)^2}$$

$$\pi_9 = \frac{V_{des}}{\sqrt{2 p / \rho_w}}$$

$$d_d = L = D_t$$

$$\pi_{10} = \frac{d_d}{D_t}$$

$$V_b = \frac{L}{T} = \frac{D_t}{\frac{D_t}{V_{des}}}$$

$$\pi_{11} = \frac{V_b}{V_{des}}$$

$$V_{asc} = \frac{L}{T} = \frac{D_t}{\frac{D_t}{V_{des}}}$$

$$\pi_{12} = \frac{V_{asc}}{V_{des}}$$

## 6. Pruebas experimentales

### 6.1 Ensayos preliminares del funcionamiento del dispositivo

Inicialmente se realizaron unos ensayos preliminares cualitativas en un depósito de acrílico de 40 x 40 x 89 cm, ver figura 6.1, para efectos de ir entendiendo el fenómeno bajo estudio. Las dimensiones del dispositivo fueron: longitud del tubo principal de 60 cm, diámetro exterior de 10.1 cm, diámetro interior de 9.5 cm, diámetro del disco 20.0 cm con grosor de 6.0 mm. La entrada del suministro de aire con diámetro exterior 1.0 cm, diámetro interior 7.0 mm, sifón en material de acrílico de 3/8", 1/2" y 3/4" de 7.0 cm de longitud y cámara de aire o faldón de 10.7 cm. Para estas pruebas se utilizó sedimento en el fondo del depósito para visualizar la posible resuspensión.

Como resultado de estas pruebas preliminares se encontró: Para el sifón de 3/8" no se observó un comportamiento adecuado, no impulsó el aire, solamente a tres cuartas partes del tubo y únicamente llega a dar un impulso, después llega el burbujeo continuo. Con el sifón de 1/2" hubo mejoras del funcionamiento del dispositivo, el impulso de la generación de la burbuja aún no era suficiente, debido a que no llena el tubo en su totalidad y el impulso solo llegó al borde del tubo.

Con el sifón de 3/4" se apreció que la burbuja llena el tubo adecuadamente, sin embargo fue necesario cambiarlo por uno de material de PVC debido a que en la zona curva del sifón el área se reducía por estrangulamiento en el caso del material en acrílico, lo cual mejoró aún más el funcionamiento del dispositivo, tanto la succión y como la resuspensión de los sedimentos del fondo del depósito.

Para cambiar la frecuencia de generación de la burbuja se modificó la longitud del sifón de 3/4" de 7.0 cm a 6.0 cm, con lo que el impulso se redujo de 9.0 a 2.8 segundos en promedio, en cada impulso la remoción de sedimento disminuyó considerablemente, pero la burbuja de aire llena completamente el tubo al salir por encima del borde hasta 7.0 cm.

En una segunda serie de experimentos en este dispositivo, se aumentó el disco del sifón de 20 cm a 35 cm y el impulso de sedimento aumentó así como también el tiempo de impulso. Con estos cambios se aclaró mejor el funcionamiento del dispositivo y se plantearon realizar sistemáticamente las pruebas descritas a continuación.



Figura 6.1. Primer dispositivo ensayado.

### **6.1.1 Primer serie de experimentos**

Para las dimensiones mostradas en la figura 6.2, se elaboraron una serie de pruebas con diferentes condiciones, presentándose los resultados solo de tres pruebas, disco constante de 24 cm de diámetro y longitud de sifón de 9.5, 11.4 y 15 cm.

Para cada prueba se analizó se determinó la velocidad de la burbuja de aire, volumen de aire, gradiente de velocidad, gasto de descarga, volumen de agua desplazada y tiempo de emisión de una burbuja y otra.

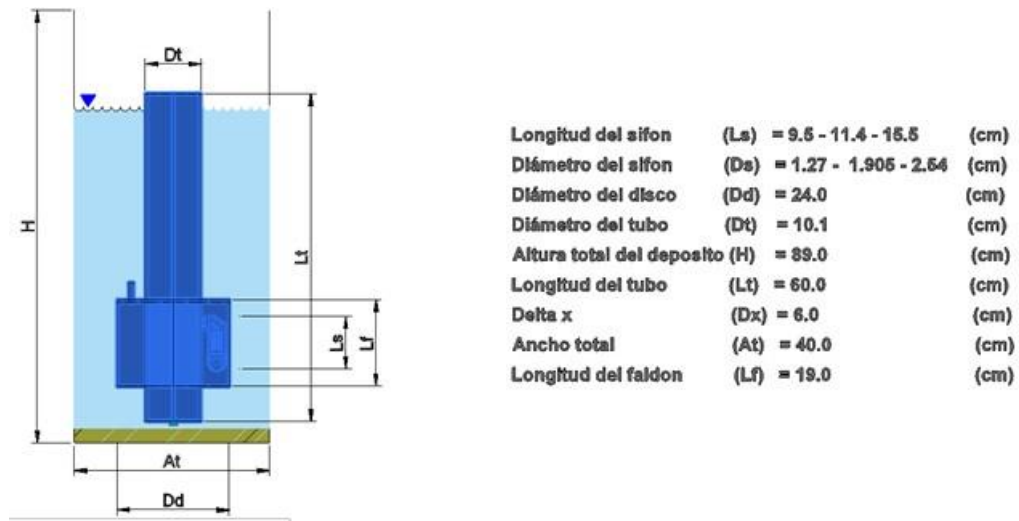


Figura 6.2. Dimensiones del primer dispositivo ensayado.

**Experimento 1.** Se realizó con un tubo de acrílico de 10.1 cm de diámetro, con un sifón de ½ pulgada de diámetro y longitud de 9.5 cm, diámetro del disco de 24 cm y longitud del tubo de 60 cm, como se muestra a continuación:

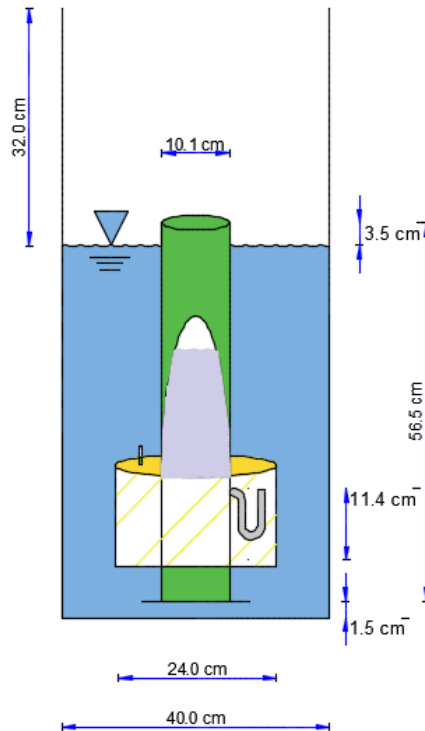


Figura 6.3. Geometría en el experimento 1.



### 1.- Cálculo del volumen de aire de una burbuja y otra

Si se propuso un diámetro de la cámara principal de 10.1 cm ( $r=5.05$  cm), entonces, la cámara debe ser capaz de almacenar la cantidad de aire requerida, para formar la burbuja que debe llenar completamente el diámetro del tubo principal,

$$V_c = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (6.1)$$

Dónde

$V_c$  Volumen de la burbuja ( $cm^3$ )

$\pi$  Constante igual a 3.1416

$r$  Radio del tubo principal (cm)

por lo tanto, el volumen de la burbuja es:

$$V_c = \frac{4}{3} \pi (5.05)^3 = 539.4643 \text{ cm}^3$$

El volumen de la cámara de aire es de

$$Vol_{aire} = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \Delta h = \frac{\pi}{4} (24^2 - 10.1^2) 7.8 = 2,903.712 \text{ cm}^3$$

Como  $2,903.712 \text{ cm}^3 > 539.4643 \text{ cm}^3$  se aceptan las dimensiones propuestas. Es decir, la cámara con estas dimensiones puede almacenar el aire requerido para formar la burbuja.

### 2.- Volumen de agua desplazada

El volumen de agua desplazada ( $cm^3$ ) es igual al área que ocupa la burbuja (área del tubo principal) multiplicada por la longitud que recorre la burbuja durante su ascenso:

$$V_d = AL = \pi r^2 L \quad (6.2)$$

Como la burbuja se tiene a la salida del sifón, esta tiene inicialmente un diámetro de 1.27 cm y conforme asciende se ensancha hasta cubrir el diámetro del tubo

principal. Para cuestiones de cálculo se considera un diámetro promedio de la burbuja:

$$\varnothing \text{ burbuja} = 10.1 \text{ cm} \therefore r = 5.05 \text{ cm}$$

Donde el volumen del agua desplazada será:

$$Vd = \pi(5.05 \text{ cm})^2(41 \text{ cm}) = 1045.6025 \text{ cm}^3$$

### 3.- El tiempo entre la emisión de una burbuja y otra

El tiempo entre la emisión de una y otra burbuja resulta de dividir el volumen de la cámara de aire ( $\text{cm}^3$ ) entre el gasto de aire que se inyecta al equipo.

$$t = \frac{Vc}{Q_{\text{aire}}} \quad (6.3)$$

De acuerdo a lo indicado, en la tabla siguiente se muestran los resultados:

Q aire		Vc (cm <sup>3</sup> )	Tiempo (s)
(l/min)	(cm <sup>3</sup> /s)		
<b>150</b>	2500.00	2903.71	1.16
<b>160</b>	2666.67	2903.71	1.09
<b>170</b>	2833.33	2903.71	1.02
<b>180</b>	3000.00	2903.71	0.97
<b>190</b>	3166.67	2903.71	0.92
<b>200</b>	3333.33	2903.71	0.87

Tabla 6.1. Cálculo del tiempo entre burbujas.

### 4.- El gasto de agua desplazada será entonces:

$Q_{aire}$	Vd ( $cm^3$ )	Tiempo (s)	Q ( $cm^3/s$ )
<b>150</b>	1045.60	1.16	900.23
<b>160</b>	1045.60	1.09	960.24
<b>170</b>	1045.60	1.02	1020.26
<b>180</b>	1045.60	0.97	1080.27
<b>190</b>	1045.60	0.92	1140.29
<b>200</b>	1045.60	0.87	1200.31

Tabla 6.2. Cálculo del gasto de agua desplazada.

### 5.- Determinación de los gradientes de velocidad

Los gradientes de velocidad a determinar en este punto son los que se presentan en las diferentes secciones por las que circulan al agua dentro del equipo, desde que ingresa (cerca del fondo del recipiente) hasta que es expulsada para reintegrarse al volumen restante, (Beutelsspacher, S. 2001).

Como el recorrido que sigue el agua en el equipo es similar al que se presenta en un floculador hidráulico, el gradiente se calculó empleando la ecuación siguiente:

$$G = \sqrt{\frac{H\gamma Q}{\mu V}} \quad (6.4)$$

Dónde

$G$  = Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )

$H$  = Pérdida de carga (cm)

$\gamma$  = Peso específico del agua ( $\frac{1 \times 10^{-3} kg}{cm^3}$ )

$Q$  = Gasto de agua ( $cm^3/s$ )

$\mu$  = Viscosidad dinámica (para  $20^{\circ}C$ ,  $\mu = 1.03 \times 10^{-8} \text{ kg s/cm}^2$ )

$\forall$  = Volumen ( $\text{cm}^3$ )

En este caso los gradientes se calcularon en las secciones mostradas en la figura 6.4. Los resultados se señalan en la tabla 6.3

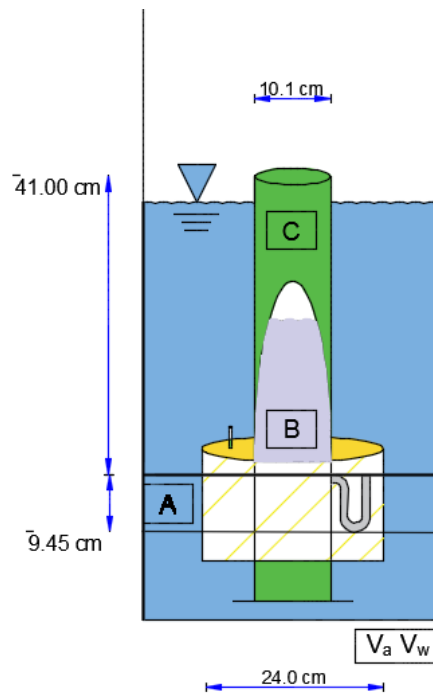


Figura 6.4. Secciones en el cálculo del gradiente de velocidad.

<b>Q<sub>aire</sub> (l/mi n)</b>	<b>Pun to</b>	<b>A (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Q (cm<sup>3</sup> /s)</b>	<b>H (cm)</b>	<b>L (cm)</b>	<b>Vol (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>G (s<sup>-1</sup>)</b>
(1)	(2)	(3)	(4)	$(5) = \frac{1}{19.62} \left( \frac{(4)}{0.6(3)} \right)^2$	(6)	(7)=(3) )*(6)	$(8) = \frac{(5)(1 \times 10^{-3})(4)}{\sqrt{(1.03 \times 10^{-9})(7)}}$
<b>150</b>	A	372.2 7	900. 23	0.83	9.45	3517. 95	143.42
	B	1.27		71137.25	18.9 0	24.00	508948. 28
	C	80.19		17.84	41.0 0	3287. 79	688.71
<b>160</b>	A	372.2 7	960. 24	0.94	9.45	3517. 95	158.00
	B	1.27		80938.33	18.9 0	24.00	560681. 92
	C	80.19		20.30	41.0 0	3287. 79	758.72
<b>170</b>	A	372.2 7	1020 .3	1.06	9.45	3517. 95	173.04
	B	1.27		91371.9	18.9 0	24.00	614059. 48
	C	80.19		22.92	41.0 0	3287. 79	830.95
<b>180</b>	A	372.2 7	1080 .3	1.192	9.45	3517. 95	188.53
	B	1.27		102437.6 7	18.9 0	24.00	669030. 07

$Q_{\text{aire}}$ (l/min)	Punto	A (cm <sup>2</sup> )	Q (cm <sup>3</sup> /s)	H (cm)	L (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	G (s <sup>-1</sup> )
<b>190</b>	C	80.19	1140.3	25.69	41.00	3287.79	905.34
	A	372.27		1.33	9.45	3517.95	204.46
	B	1.27		114135.75	18.90	24.00	725549.63
<b>200</b>	C	80.19	1200.3	28.63	41.00	3287.79	981.82
	A	372.27		1.47	9.45	3517.95	220.81
	B	1.27		126466.36	18.90	24.00	783577.79
	C	80.19		31.72	41.00	3287.79	1060.34

Tabla 6.3. Cálculo de los gradientes de velocidad.

**Experimento 2.** Se realizó con un tubo de acrílico de 10.1 cm de diámetro, con un sifón de 3/4 de pulgada de diámetro, con una longitud de 11.40 cm, disco de 24 cm y longitud del tubo de 60 cm, ver figura 6.5.

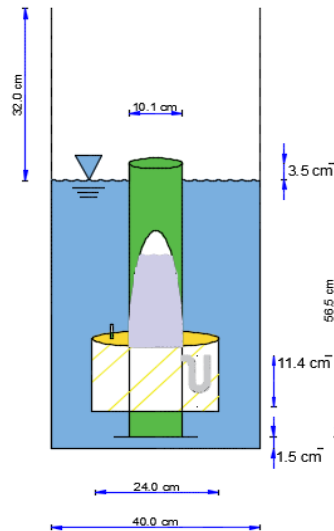


Figura 6.5. Características del dispositivo del experimento 2.

### 1.- Cálculo del volumen de aire de una burbuja y otra

La burbuja debe llenar completamente el diámetro del tubo principal, para un diámetro del tubo principal de 10.1 cm ( $r=5.05$  cm), entonces:

$$V_c = \frac{4}{3} \pi (5.05)^3 = 539.4643 \text{ cm}^3$$

El volumen de la cámara de aire es,

$$Vol_{aire} = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \Delta h = \frac{\pi}{4} (24^2 - 10.1^2) 9.7 = 3,611.036 \text{ cm}^3$$

Como  $3,611.036 \text{ cm}^3 > 539.4643 \text{ cm}^3$  se aceptan las dimensiones propuestas.

### 2.- Volumen de agua desplazada

Al no cambiar el diámetro del tubo principal, el volumen será igual que en el experimento anterior, es decir:

$$Vd = \pi(5.05 \text{ cm})^2(41 \text{ cm}) = 1045.6025 \text{ cm}^3$$

### 3.- El tiempo entre la emisión de una burbuja y otra

El tiempo entre la emisión de una y otra burbuja resulta de dividir el volumen de la cámara de aire ( $cm^3$ ) entre el gasto de aire que se inyecta al equipo. De acuerdo a lo indicado en la tabla siguiente se muestran los resultados:

$Q_{\text{aire}}$		$V_c$ ( $cm^3$ )	Tiempo (s)
(l/min)	( $cm^3/s$ )		
<b>230</b>	3833.33	4243.89	1.11
<b>240</b>	4000.00	4243.89	1.06
<b>250</b>	4166.67	4243.89	1.02
<b>260</b>	4333.33	4243.89	0.98
<b>270</b>	4500.00	4243.89	0.94
<b>280</b>	4666.67	4243.89	0.91

Tabla 6.4. Cálculo del tiempo entre burbujas.

**4.- El gasto de agua desplazada es la siguiente:**

$Q_{\text{aire}}$	$V_d$ ( $cm^3$ )	Tiempo (s)	$Q$ ( $cm^3/s$ )
<b>230</b>	1045.602	1.11	944.45
<b>240</b>	1045.602	1.06	985.51
<b>250</b>	1045.602	1.02	1026.58
<b>260</b>	1045.602	0.98	1067.64
<b>270</b>	1045.602	0.94	1108.70
<b>280</b>	1045.602	0.91	1149.77



Tabla 6.5. Cálculo del gasto de agua desplazada.

### 5.- Cálculo del gradiente de velocidad

Los gradientes de velocidad se determinaron en las secciones señaladas en la figura 6.4, similar que en el experimento 1.

Qaire (l/min)	Punt o	a (cm <sup>2</sup> )	Q (cm <sup>3</sup> /s )	H (cm)	L (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	G (s <sup>-1</sup> )
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = $\frac{1}{19.62} \left( \frac{(4)}{0.6(3)} \right)^2$	(6)	(7)=(3) *(6)	(8) = $\sqrt{\frac{(5)(1 \times 10^{-3})(4)}{(1.03 \times 10^{-8})(7)}}$
<b>150</b>	A	372.2 7	944.45	0.91	11.4 0	4243.8 8	140.32
	B	2.85		15547.72	22.8 0	64.98	148120. 23
	C	80.19		19.64	41.0 0	3287.7 9	740.08
<b>160</b>	A	372.2 7	985.51	0.99	9.45	3517.9 5	164.27
	B	2.85		16929.08	22.8 0	64.98	157884. 49
	C	80.19		21.38	41.0 0	3287.7 9	788.86
<b>170</b>	A	372.2 7	1026.5 7	1.08	11.4 0	4243.8 8	159.01
	B	2.85		18369.02	22.8 0	64.98	167852. 87

Qaire (l/min)	Punto	a (cm <sup>2</sup> )	Q (cm <sup>3</sup> /s)	H (cm)	L (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	G (s <sup>-1</sup> )
<b>180</b>	C	80.19	1067.6 3	23.20	41.0 0	3287.7 9	838.67
	A	372.2 7		1.164	11.4 0	4243.8 8	168.64
	B	2.850		19867.82	22.8 0	64.98	178023. 39
<b>190</b>	C	80.19	1108.7 1	25.10	41.0 0	3287.7 9	889.49
	A	372.2 7		1.25	11.4 0	4243.8 8	178.47
	B	2.85		21426.18	22.8 0	64.98	188396. 52
<b>200</b>	C	80.19	1149.7 6	27.06	41.0 0	3287.7 9	941.32
	A	372.2 7		1.35	11.4 0	4243.8 8	188.47
	B	2.85		23042.16	22.8 0	64.98	198955. 85
<b>200</b>	C	80.19	1149.7 6	29.105	41.0 0	3287.7 9	994.07

Tabla 6.6. Cálculo de los gradientes de velocidad.

**Experimento 3.** En la figura 6.6 se muestran las dimensiones para este experimento. La diferencia con los anteriores es que la longitud del sifón es de 15.5 cm.

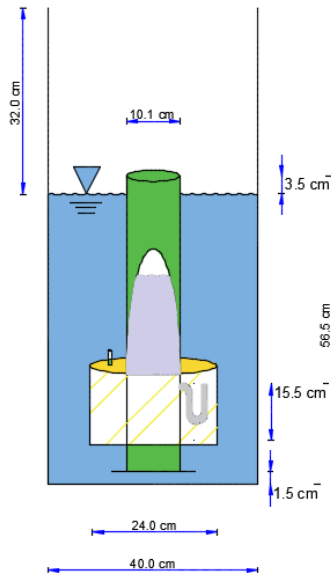


Figura 6.6. Dimensiones del dispositivo del experimento 3.

### 1.- Cálculo del volumen de aire de una burbuja y otra

El volumen de la burbuja es el mismo que en los casos anteriores ya que no cambia el diámetro del tubo principal de 10.1 cm ( $r=5.05$  cm), entonces:

$$V_c = \frac{4}{3} \pi (5.05)^3 = 539.4643 \text{ cm}^3$$

El volumen de la cámara de aire es de

$$Vol_{aire} = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \Delta h = \frac{\pi}{4} (24^2 - 10.1^2) 13.8 = 5,137.35 \text{ cm}^3$$

Como  $5,137.35 \text{ cm}^3 > 539.4643 \text{ cm}^3$  se aceptan las dimensiones propuestas.

### 2.- Volumen de agua desplazada

Para cuestiones de cálculo se considera un diámetro promedio de la burbuja:

$$\varnothing \text{ burbuja} = 10.1 \text{ cm} \therefore r = 5.05 \text{ cm}$$

Donde el volumen del agua desplazada será:

$$Vd = \pi(5.05 \text{ cm})^2(41 \text{ cm}) = 1045.6025 \text{ cm}^3$$

### 3.- El tiempo entre la emisión de una burbuja y otra

El tiempo entre la emisión de burbujas resulta de dividir el volumen de la cámara de aire ( $cm^3$ ) entre el gasto de aire que se inyecta al equipo, ver tabla siguiente.

<b>Q<sub>aire</sub></b>		<b>V<sub>c</sub> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tiempo (s)</b>
<b>(l/min)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>/s)</b>		
<b>320</b>	5333.33	5710.63	1.07
<b>330</b>	5500.00	5710.63	1.04
<b>340</b>	5666.67	5710.63	1.01
<b>350</b>	5833.33	5710.63	0.98
<b>360</b>	6000.00	5710.63	0.95
<b>370</b>	6166.67	5710.63	0.93

Tabla 6.7. Cálculo del tiempo entre generación de burbujas.

**4.- El gasto de agua desplazada será entonces:**

<b>Q<sub>aire</sub></b>	<b>V<sub>d</sub> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Q (cm<sup>3</sup>/s)</b>
<b>320</b>	1045.60	1.07	976.52
<b>330</b>	1045.60	1.09	1007.04
<b>340</b>	1045.60	1.01	1037.55
<b>350</b>	1045.60	0.98	1068.07
<b>360</b>	1045.60	0.95	1098.58
<b>370</b>	1045.60	0.93	1129.10

Tabla 6.8. Cálculo del gasto de agua desplazada.

### 5.- Cálculo del gradiente de velocidad

Los gradientes de velocidad calculados se muestran en la tabla 6.9.

<b>Q<sub>aire</sub> (l/min)</b>	<b>Punto</b>	<b>a (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Q (cm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>H (cm)</b>	<b>L (cm)</b>	<b>Vol (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>G (s<sup>-1</sup>)</b>
<b>(1)</b>	(2)	(3)	(4)	$(5) = \frac{1}{19.62} \left( \frac{(4)}{0.6(3)} \right)^2$	(6)	$(7) = (3) * (6)$	$(8) = \sqrt{\frac{(5)(1 \times 10^{-3})(4)}{(1.03 \times 10^{-8})(7)}}$
<b>150</b>	A	372.2 7	976.52	0.97	15.5 7	5796.24	126.23
	B	2.85		16621.5 3	31.4 0	89.49	132699.7 9
	C	80.19		21.00	41.0 0	3287.79	778.09
<b>160</b>	A	372.2 7	1007.0 4	1.04	15.5 7	5796.24	132.20
	B	2.85		17676.7 4	31.4 0	89.49	138969.2 1
	C	80.19		22.33	41.0 0	3287.79	814.85
<b>170</b>	A	372.2 7	1037.5 5	1.10	15.5 7	5796.24	138.25
	B	2.85		18764.0 6	31.4 0	89.49	145332.2 8
	C	80.19 0		23.702	41.0 0	3287.79	852.16

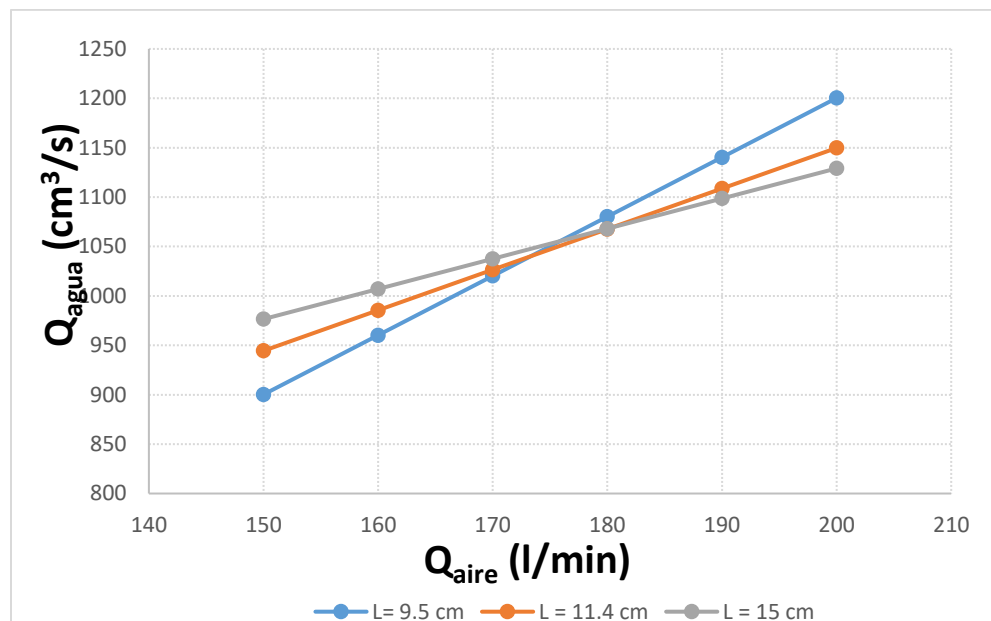
<b>Q<sub>aire</sub></b> <b>(l/min)</b>	<b>Punto</b>	<b>a</b> <b>(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Q</b> <b>(cm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>H (cm)</b>	<b>L</b> <b>(cm)</b>	<b>Vol</b> <b>(cm<sup>3</sup>)</b>	<b>G (s<sup>-1</sup>)</b>
<b>180</b>	A	372.270	1068.07	1.165	15.57	5796.24	144.39
	B	2.850		19884.204	31.40	89.49	151791.72
	C	80.190		25.116	41.00	3287.79	890.04
<b>190</b>	A	372.270	1098.58	1.233	15.57	5796.24	150.62
	B	2.850		21036.435	31.40	89.49	158341.97
	C	80.190		26.572	41.00	3287.79	928.44
<b>200</b>	A	372.270	1129.10	1.302	15.57	5796.24	156.94
	B	2.850		22221.511	31.40	89.49	164986.02
	C	80.190		28.069	41.00	3287.79	967.40

Tabla 6.9. Cálculo de los gradientes de velocidad.

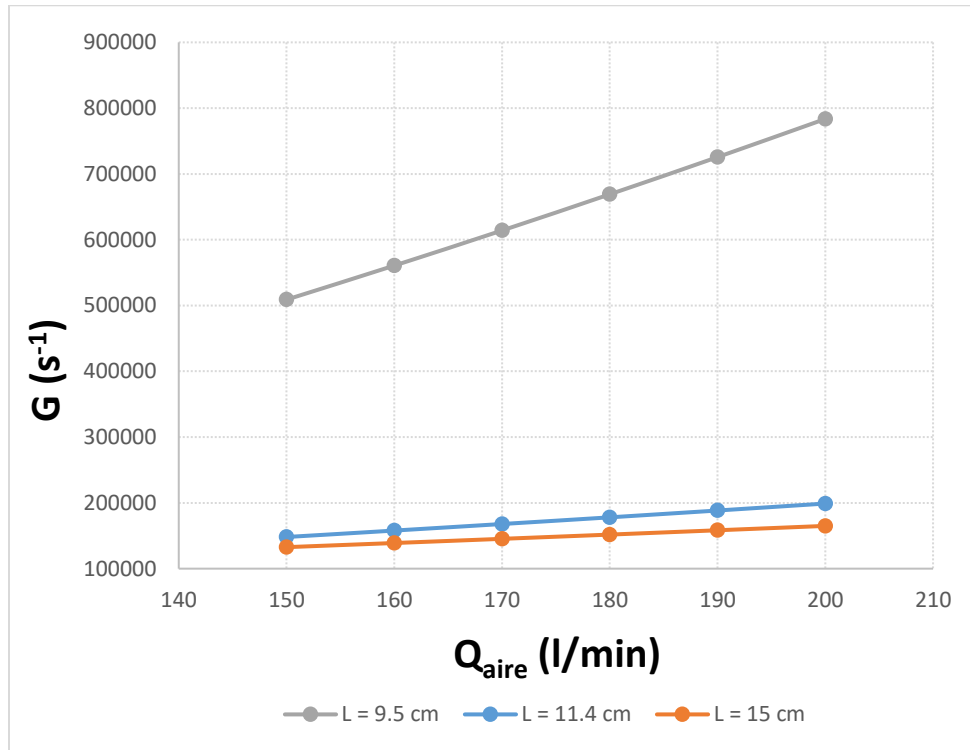
En las gráficas 6.1 y 6.2 puede resumirse los cálculos mostrados anteriormente. La primera gráfica muestra la variación del volumen de agua desplazado en función de la presión de aire inyectada, para cada longitud de sifón ensayada. La segunda gráfica señala la variación del máximo gradiente de velocidad (sección B, figura 6.4) respecto del gasto de aire suministrado y de la longitud del sifón.

Lo que se observa es que el hecho de que se incremente la longitud del sifón no necesariamente el volumen desplazado como el gradiente de velocidad se incrementan, al contrario los valores mayores de estas variables se determinaron para el caso de la menor longitud de sifón, es decir para  $L = 9.5$  cm.

Con el objeto de buscar diferenciar de una mejor manera el funcionamiento del dispositivo respecto a su geometría y variables involucradas, se calcularon los parámetros adimensionales formulados en el capítulo anterior, ver tabla 6.10. En este caso se consideran además los experimentos realizados anteriormente por José Alfredo González (Espinoza A, J et al, 2008).



Gráfica 6.1 Variación del gasto de agua desplazada respecto al gasto de aire suministrado.



Gráfica 6.2 Gradiente de velocidad respecto al gasto de aire suministrado.



Ensayes	Vbala	Vascenso	Vdescenso	$\pi_1 = \frac{\rho_w D_t V_b^2}{\sigma}$	$\pi_2 = \frac{H}{D_t}$	$\pi_3 = \frac{h}{D_t}$	$\pi_4 = \frac{d_{sf}}{D_t}$	$\pi_5 = \frac{\Delta h}{D_t}$	$\pi_6 = \frac{\rho_w}{\rho_a}$	$\pi_7 = \frac{D_t V_{des}}{v_w}$	$\pi_8 = \frac{D_t V_{des}}{v_a}$	$\pi_9 = \frac{V_{des}}{\sqrt{2 p / \rho_w}}$	$\pi_{10} = \frac{d_d}{D_t}$	$\pi_{11} = \frac{V_b}{V_{des}}$	$\pi_{12} = \frac{V_{asc}}{V_{des}}$
1	0.894	0.104	0.035	1114.041	3.733	3.485	0.126	0.936	829.876	3520.457	228.716		1.366	25.477	2.972
2	1.056	0.135	0.065	1553.470	3.733	3.485	0.167	1.040	829.876	6539.424	424.852		1.366	16.196	2.063
3	1.110	0.218	0.076	1717.309	3.733	3.485	0.167	1.542	829.876	7622.642	495.226		1.366	14.609	2.870
4*	0.715	0.041	0.005	176.304	12.840	12.840	0.508	0.720	829.876	131.276	8.529		5.520	135.224	7.733
5*	0.767	0.080	0.009	365.316	13.560	13.560	0.508	1.800	829.876	217.651	25.453		5.520	87.508	9.080
6*	0.971	0.129	0.011	325.071	7.400	7.400	0.282	1.222	829.876	478.153	17.258		3.067	90.741	12.063

Tabla 6.10. Valores de los parámetros adimensionales para los experimentos anteriores.

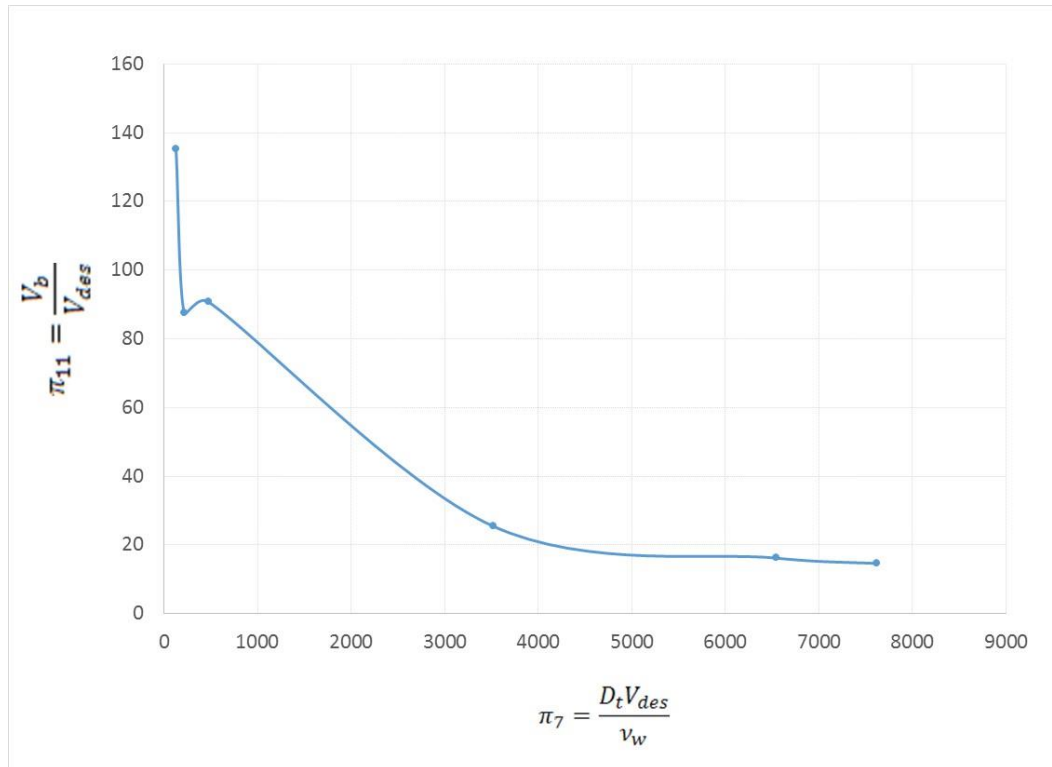
Las tres primeras pruebas son del presente estudio y las otras tres pruebas son descritas en Espinoza A J *et al* , 2008.

Datos constantes	DATOS PRESENTE ESTUDIO			Unidades	DATOS * (González J A, 2008)		
$\rho_w$	1000.00			kg/m3			
$\rho_a$	1.205			kg/m3			
$v_w$	0.000001007			m2/s			
$v_a$	0.00001550			m2/s			
Dt	0.101	0.101	0.101	m	0.025	0.025	0.045
h	0.352			m	0.321	0.339	0.333
H	0.377			m	0.321	0.339	0.333
dd	0.138			m	0.14	0.16	0.175
$\sigma$	0.0725			kg/s2			
Dsf	0.0127	0.0169	0.0169	m	0.0127	0.0127	0.0127
$\Delta h$	0.0945	0.105	0.1557	m	0.018	0.045	0.055

Tabla 6.11. Valores constantes utilizados en el cálculo de los parámetros adimensionales.

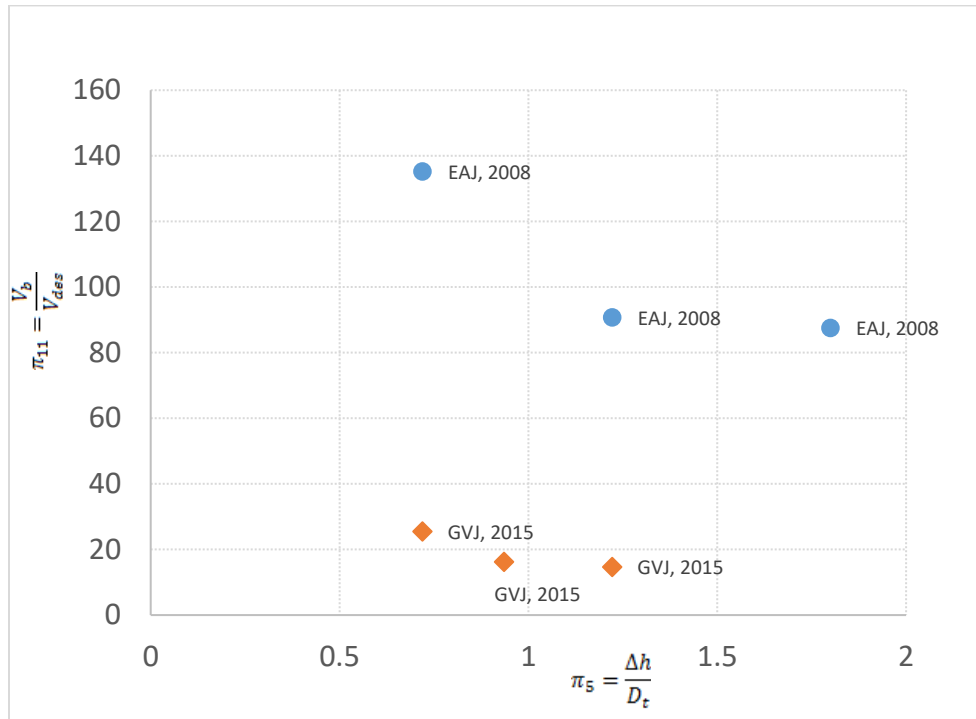
De todos los parámetros adimensionales establecidos, solamente uno de ellos no pudo calcularse por no tenerse el dato de la presión suministrada ( $\pi_9$ ).

Analizando solo aquellos parámetros que varíen para cada condición o ensaye, se tiene:

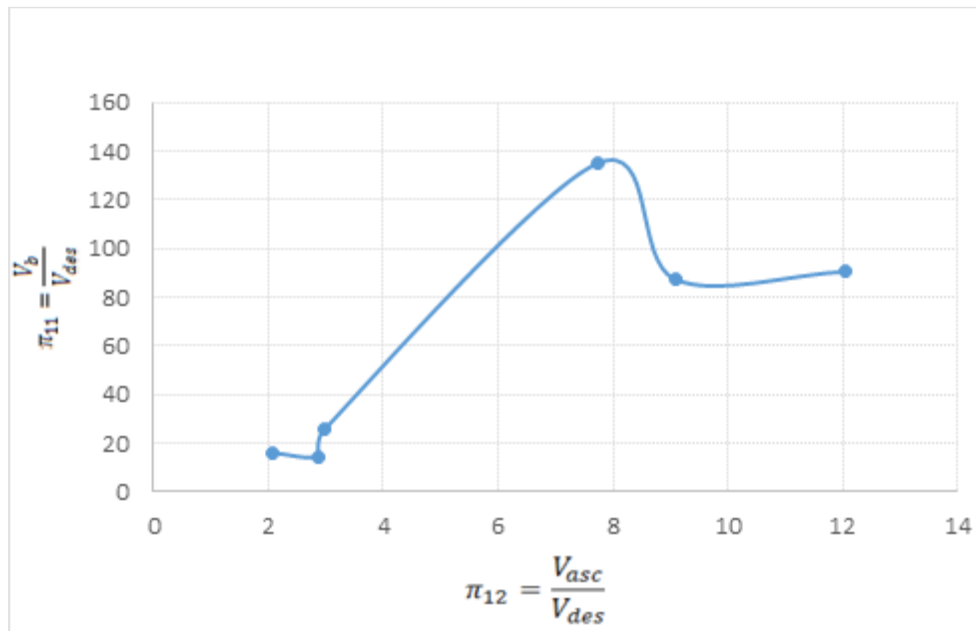


Gráfica 6.3 Velocidad burbuja / descendente – Reynolds  $V_{des}$

La gráfica 6.3 muestra la variación de la relación de la velocidad de la burbuja/velocidad de descenso respecto al número de Reynolds del agua. A medida que se incrementa el número de Reynolds, la relación la velocidad de la burbuja/descenso disminuye. Los puntos cercanos al eje de las ordenadas corresponden a los experimentos realizados en 2008, lo que significa que la geometría o dimensiones del dispositivo es muy importante en el funcionamiento del sistema. El mismo comportamiento se puede encontrar en las gráficas 6.4 y 6.5, es decir es muy clara la distinción entre los dos conjuntos de datos, los obtenidos en 2008 y los del presente estudio.



Gráfica 6.4 Velocidad burbuja / descendente - distancia de llenado de aire/diámetro del tubo principal.



Gráfica 6.5 Velocidad burbuja / descendente – Velocidad  
ascendente/descendente.

## 6.2 Modificación del Dispositivo experimental

Para analizar más objetivamente el funcionamiento del dispositivo alternativo de desazolve respecto a los efectos de escala que pudieran existir debido al tamaño del dispositivo ensayado anteriormente, se emigró a una instalación más grande. Aprovechando un módulo existente en el laboratorio, se conformó una instalación 1.65 m de largo por un ancho de 0.77 m y una altura de 1.67 m, ver figura 6.7. La longitud del tubo principal aumentó de 0.60 m a 1.20 m, los discos de 24 cm a 30, 37 y 43 cm y los sifones de  $\frac{3}{4}$  a 1 pulgada con longitudes de 11.5 a 20 cm como máximo.

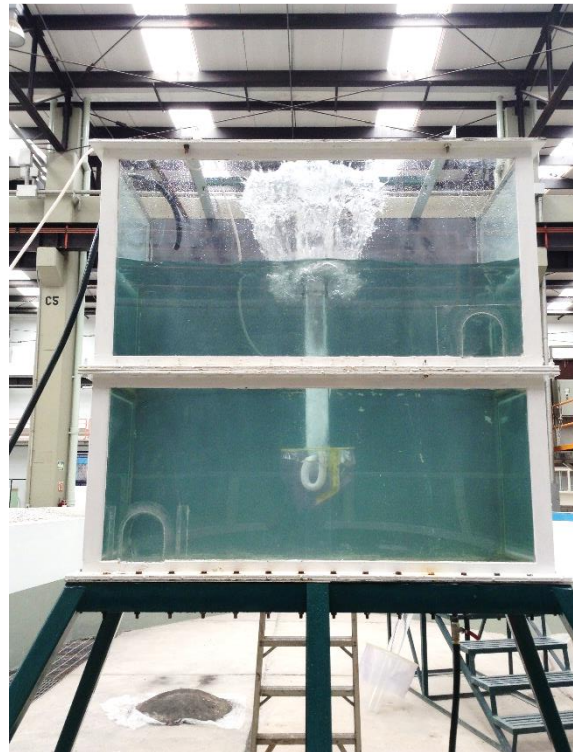


Figura 6.7. Segundo dispositivo utilizado.

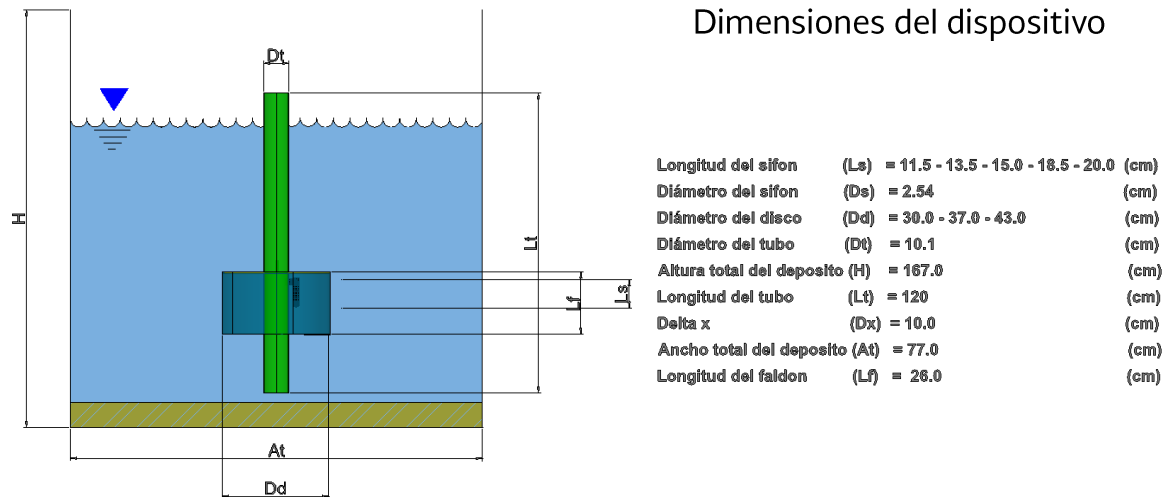


Figura 6.8. Dimensiones del segundo dispositivo.

En esta instalación se realizaron 15 pruebas con tres diámetros del disco (30, 37, 43 cm), el sifón de una pulgada de diámetro y cinco longitudes (11.5, 13.5, 15.0, 18.5, 20.0 cm) y cambios de presión de aire en la entrada al dispositivo. Para el buen funcionamiento del dispositivo se observó que se necesitaba una carga mínima de columna de agua, lo cual se comenta más adelante.

En la tabla siguiente se muestran las velocidades de ascenso de la burbuja respecto a la presión suministrada, para las diferentes geometrías de la cámara de aire:

No. Pruebas	L. Sifón [cm]	Tamaño disco [cm]	Velocidad (cm/s)			
			20 [lb./pul <sup>2</sup> ]	30 [lb./pul <sup>2</sup> ]	40 [lb./pul <sup>2</sup> ]	50 [lb./pul <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	11.50	30	116.583	119.839	123.722	128.936
<b>2</b>	13.50	30	117.343	119.584	125.514	130.384
<b>3</b>	15.00	30	119.315	122.514	130.938	133.381
<b>4</b>	18.50	30	116.694	118.114	123.000	125.000

No. Pruebas	L. Sifón [cm]	Tamaño disco [cm]	Velocidad (cm/s)			
			<b>20</b> <b>[lb./pul<sup>2</sup>]</b>	<b>30</b> <b>[lb./pul<sup>2</sup>]</b>	<b>40</b> <b>[lb./pul<sup>2</sup>]</b>	<b>50</b> <b>[lb./pul<sup>2</sup>]</b>
<b>5</b>	20.00	30	122.570	123.469	124.676	126.294
<b>6</b>	11.50	37	112.741	118.061	122.132	126.148
<b>7</b>	13.50	37	104.344	105.909	120.782	120.826
<b>8</b>	15.00	37	120.935	120.929	138.154	136.368
<b>9</b>	18.50	37	118.536	123.174	131.936	133.359
<b>10</b>	20.00	37	131.749	132.601	133.036	136.882
<b>11</b>	11.50	43	112.336	119.824	122.650	128.103
<b>12</b>	13.50	43	105.123	116.020	116.336	116.580
<b>13</b>	15.00	43	116.278	120.632	121.203	123.458
<b>14</b>	18.50	43	121.272	123.197	125.227	127.184
<b>15</b>	20.00	43	119.026	121.130	122.148	122.212

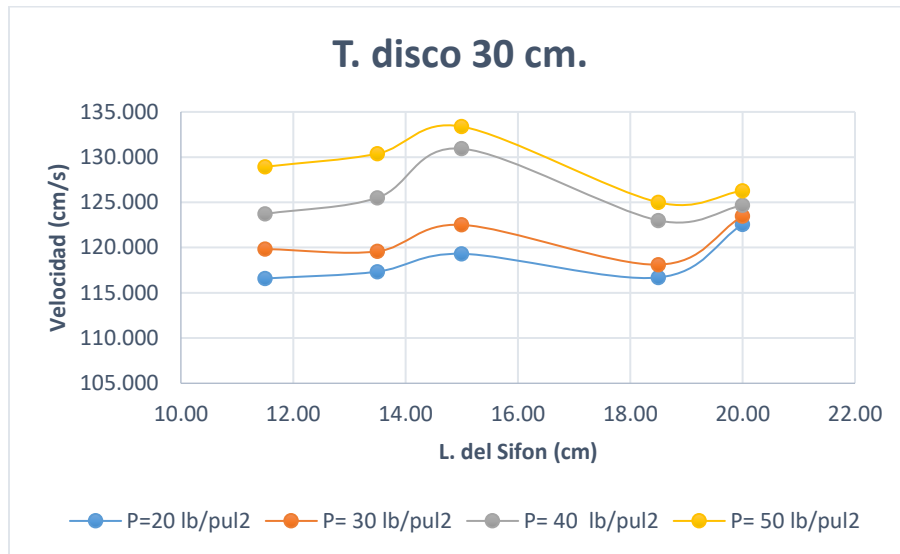
Tabla 6.12. Velocidad de la burbuja para diferentes condiciones de presión suministrada.

En la realización de los ensayos se detectó que para tener un comportamiento adecuado en la generación de la burbuja, es recomendable tener una carga mínima o tirante de agua de 120 cm en el depósito y la salida del tubo no sobrepase más allá de 10 cm la superficie libre del agua.

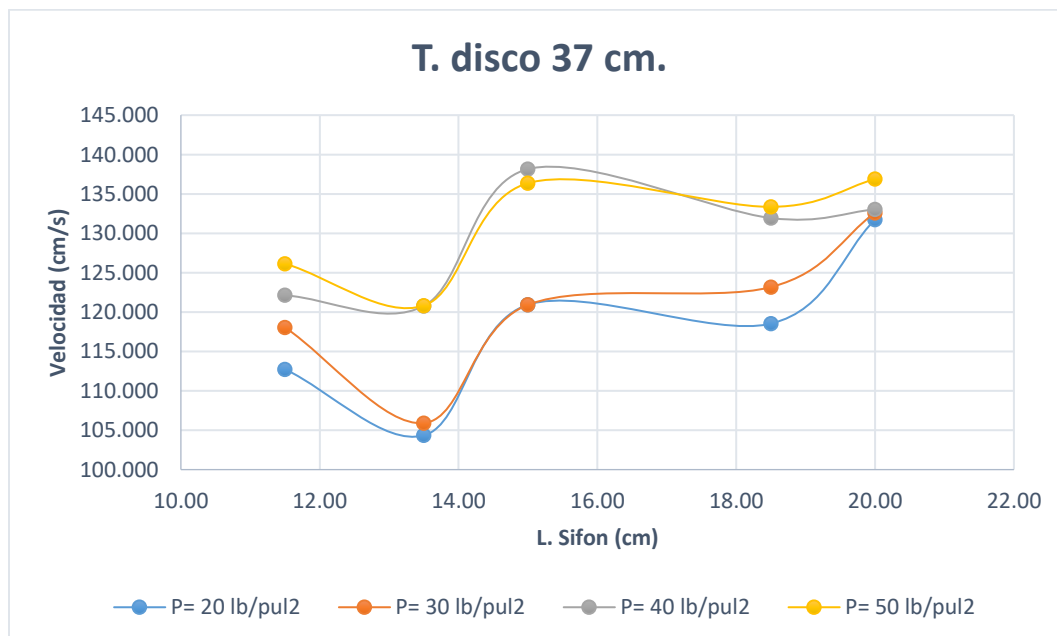
A partir de los datos de la tabla anterior, se graficaron las velocidades de ascenso de la burbuja de aire respecto a las variables de geometría de la cámara de aire y la presión de aire suministrada. En las gráficas 6.7, 6.8 y 6.9 se muestran los resultados de los experimentos para los 3 casos de diámetro del disco de la cámara de aire ensayados. El comportamiento de la variación de la



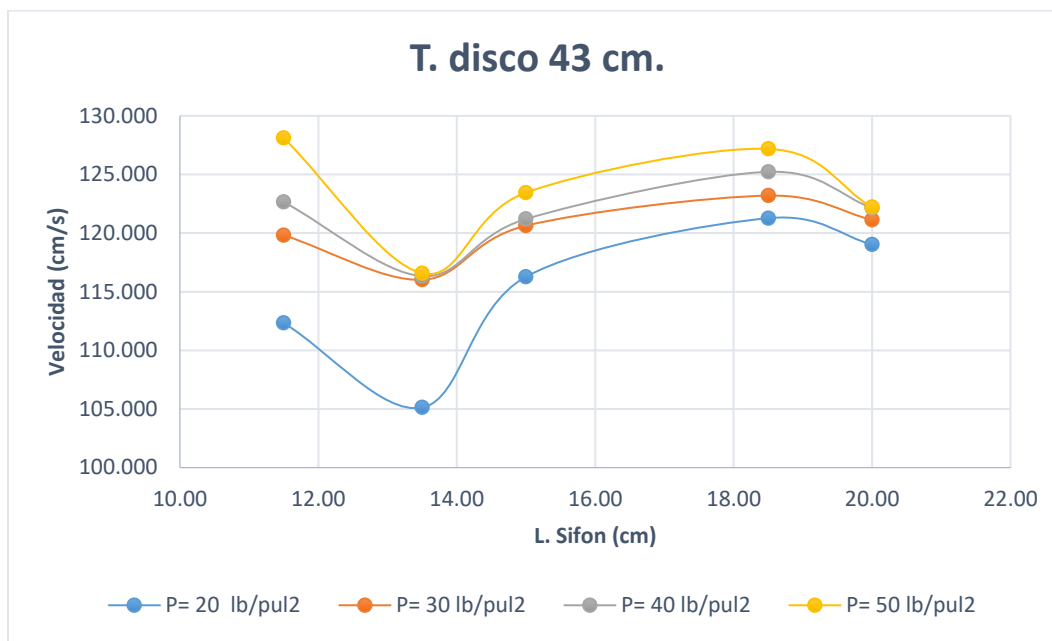
velocidad de la burbuja en ambos casos es irregular. Se tienen algunos rasgos definidos, por ejemplo a mayor presión de aire mayor velocidad de la burbuja, en algunos casos la velocidad de la burbuja se incrementa con la longitud del sifón pero en otros disminuye. El mismo patrón sucede con el diámetro del disco de la cámara de aire, el hecho de incrementarse dicho valor, no garantiza que se tengan mayores velocidades de la burbuja de aire.



Gráfica 6.6 Velocidad de la bala de aire para cada longitud del sifón con disco de 30 cm.



Gráfica 6.7 Velocidad de la bala de aire para cada longitud del sifón con disco de 37 cm.



Gráfica 6.8 Velocidad de la bala de aire para cada longitud del sifón con disco de 43 cm.

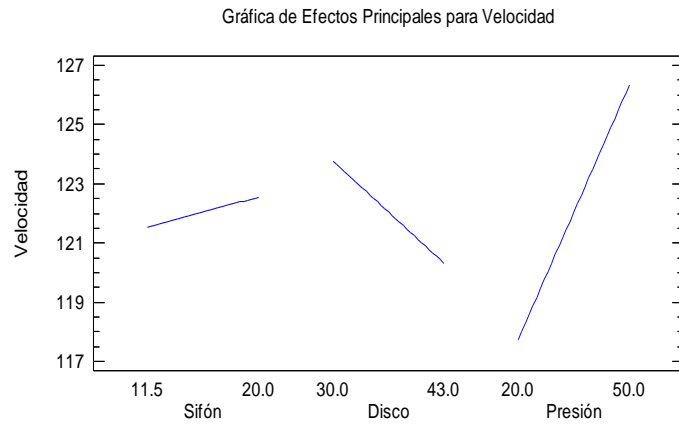
Para tener una mejor claridad del comportamiento de la velocidad de ascenso de la burbuja respecto a las variables geométricas del dispositivo, se analizaron los datos de la tabla 6.12 con el programa Statgraphics Centurion v15 1.0.2, utilizando como herramienta estadística un diseño factorial  $2^3$ . En la tabla 6.13 se muestran los resultados de los efectos estimados para cada variable e interacción entre ellas, respecto a la velocidad de ascenso de la burbuja de aire. El valor medio de la velocidad resultó ser de 122.04 cm/s, la presión suministrada para generar la burbuja tiene mayor efecto en el incremento de la velocidad de dicha burbuja y posteriormente la longitud del sifón. Con el incremento del tamaño del disco la velocidad de la burbuja disminuye. Sin embargo estos resultados se modifican cuando se analiza la interacción entre las variables.

La gráfica 6.10 corrobora lo mencionado, la velocidad de ascenso de la burbuja se incrementa con la presión de aire y el tamaño del sifón y disminuye con el incremento del tamaño del disco. La interacción entre las variables es muy importante, ver gráfica 6.11, la combinación disco-presión tiene efectos positivos sobre la velocidad de la burbuja, mientras que la combinación sifón-presión disminuye la velocidad de la burbuja, resultado contrario cuando se analiza de forma individual cada variable.

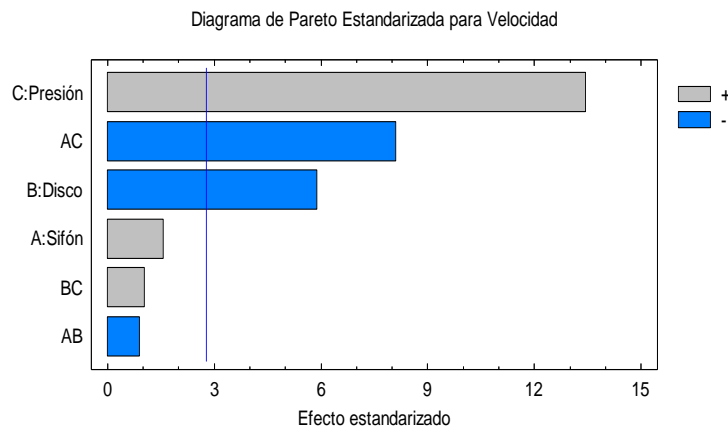
<b>Efecto</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error Estd.</b>	<b>V.I.F.</b>
<b>Promedio</b>	122.043	0.278934	
<b>A:Sifón</b>	1.02252	0.648532	1.00013
<b>B:Disco</b>	-3.44739	0.584257	1.00664
<b>C:Presión</b>	8.60108	0.640123	1.0052
<b>AB</b>	- 0.586931	0.649255	1.00168
<b>AC</b>	-5.27784	0.650893	1.0002
<b>BC</b>	0.675455	0.643851	1.00012

Errores estándar basados en el error total con 8 g.l.

Tabla 6.13. Efectos estimados para velocidad (cm/s).



Gráfica 6.9 Gráfica de efectos principales para velocidad.



Gráfica 6.10 Diagrama de Pareto estandarizada para la velocidad.

### 6.3 Incremento de la longitud del tubo principal

Para analizar el efecto de la longitud del tubo principal o en otras palabras, la profundidad del cuerpo de agua en el funcionamiento del dispositivo, se modificó la altura del tanque de 1.67 m a 2.50 m, con una longitud de 1.65 m de largo por un ancho de 0.77 m, figura 6.9, con lo que el tubo principal aumentó de 1.20 m a 2.30 m, y se ensayaron tres pruebas para las que se obtuvieron las mayores velocidades de ascenso de la burbuja del experimento anterior, es decir se seleccionaron las combinaciones: 1) Longitud de sifón de 13.5 cm y diámetro del disco de 30 cm, 2) Longitud de sifón de 15 cm y diámetro del disco de 37 cm y 3) Longitud de sifón de 11.5 cm y diámetro del disco de 43 cm. En la figura 6.10 se muestra esquemáticamente las dimensiones del dispositivo para estas pruebas.

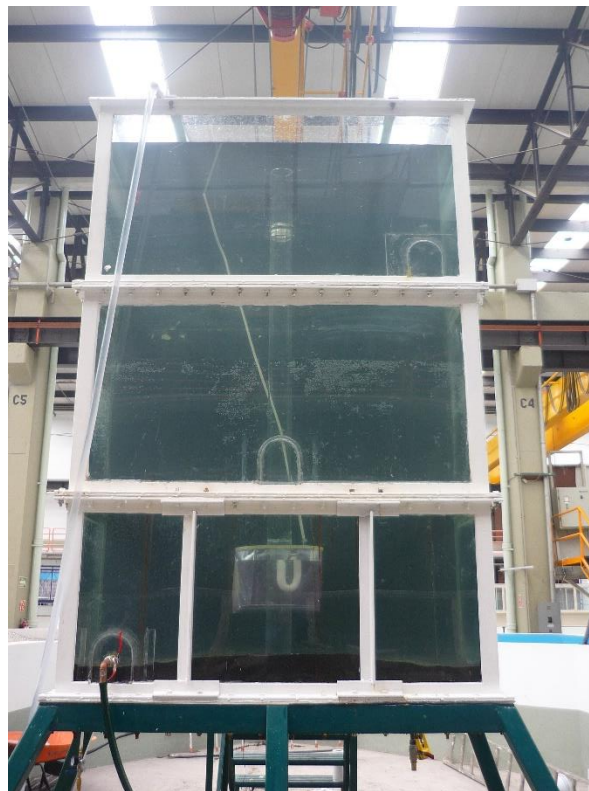


Figura 6.9. Incremento de la longitud del dispositivo.

En la tabla 6.14 se presentan los resultados para estas pruebas, identificándose como (TL), tubo largo de 2.3 m. Se indica también los resultados para las pruebas del caso del tubo de longitud  $L = 1.2$  m, identificándose como (TC).

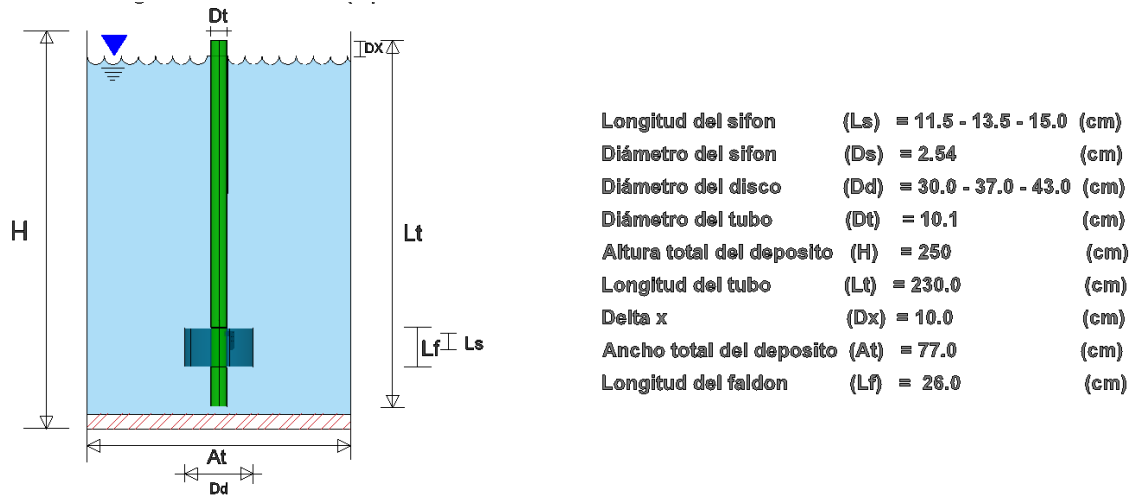


Figura 6.10. Geometría del último dispositivo ensayado.

En términos generales, puede notarse que para el caso del tubo largo (TL), las velocidades de la burbuja son mayores que para el caso del tubo corto (TC).

No. de prueba	L. Sifón [cm]	Tamaño disco [cm]	Velocidad (cm/s)			
			20 [lb/pulg <sup>2</sup> ]	30 [lb/pulg <sup>2</sup> ]	40 [lb/pulg <sup>2</sup> ]	50 [lb/pulg <sup>2</sup> ]
TC1	13,50	30	117,34	119,58	125,51	130,38
TC2	15,00	37	120,93	120,93	138,15	136,37
TC3	11,50	43	112,34	119,82	122,65	128,10

TUBO			10	20	25	30
LARGO			[lb/pulg <sup>2</sup> ]	[lb/pulg <sup>2</sup> ]	[lb/pulg <sup>2</sup> ]	[lb/pulg <sup>2</sup> ]
O						
TL1	13,00	30	129.45	135.86	134.09	131.09
TL2	15,00	37	131.08	132.50	131.78	130.63
TL3	11,50	43	133.35	136.64	135.64	134.19

Tabla 6.14. Comparación de velocidades de ascenso de la burbuja.

Pueden encontrarse diferencias entre dichas velocidades que van desde un 10% hasta un 22%, situación que da a pensar que la profundidad del cuerpo de agua también es importante en la generación y ascenso de la burbuja. También hay que hacer notar que los experimentos para el tubo largo (TL) solo fueron realizados hasta una presión de aire de 30 lb/pulg<sup>2</sup>, ya que para presiones de aire mayores se distorsiona la formación de la burbuja y no se tiene un funcionamiento adecuado del dispositivo, lo que pone en evidencia nuevamente que la profundidad o sumergencia de la cámara de aire es importante en la formación de la burbuja.

Posteriormente a estas pruebas, se realizaron experimentos con material sólido para efectos de determinar para que condición se tiene una mayor resuspensión de sedimento. Se estableció trabajar cada condición para una misma presión de aire de 20 lb/pulg<sup>2</sup> ya que para tal presión el tren de burbujas es más regular; y un tiempo de funcionamiento del dispositivo de 5 minutos.

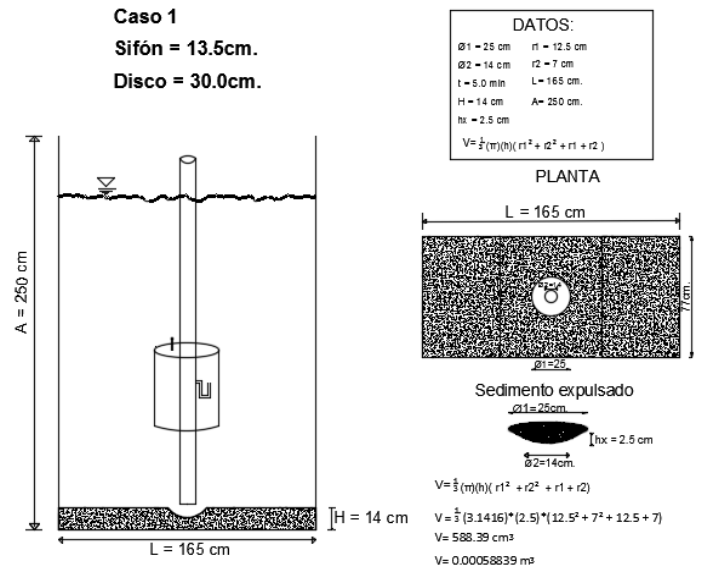


Figura 6.11. Prueba 1. Sifón 13.5 cm y disco 30 cm.

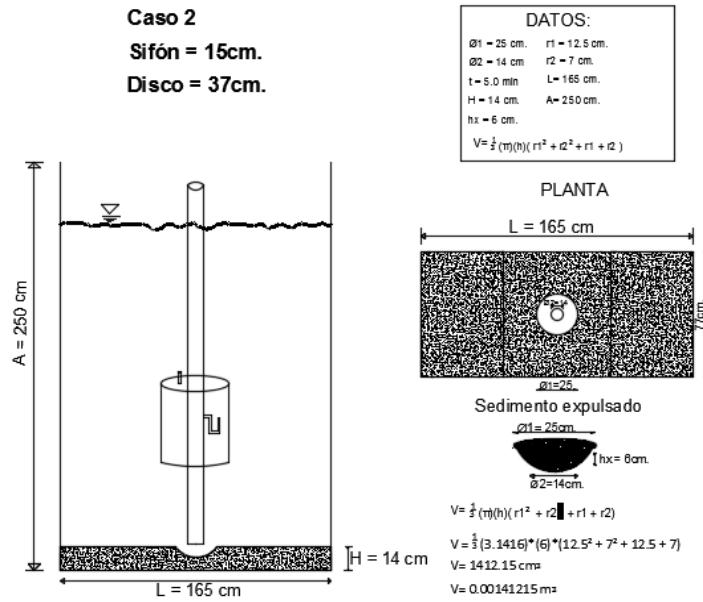


Figura 6.12. Prueba 2. Sifón 15 cm y disco 37 cm.



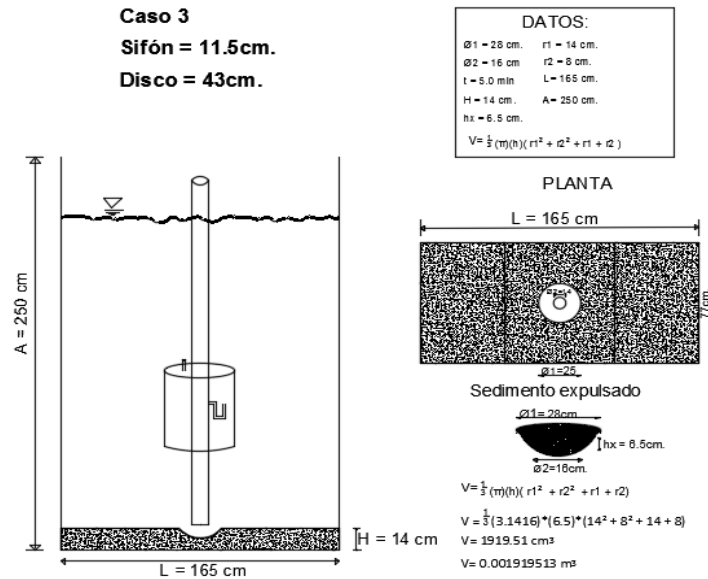


Figura 6.13. Prueba 3. Sifón 11.5 cm y disco 43 cm.

Como se puede observar en la tabla 6.15, el volumen de sedimento resuspendido se incrementa conforme aumenta tamaño del disco, pero no sucede lo mismo con el sifón, esto quizá por la correlación que existe entre la geometría del disco-sifón. Otro aspecto a señalar de estos resultados es que el diámetro máximo de la “fosa” de erosión llegó hasta los 0.28 m, es decir casi 3 veces el diámetro del tubo principal del dispositivo.

No. De Prueba	Tamaño del disco (cm)	Tamaño del sifón (cm)	Volumen de sedimento resuspendido (m <sup>3</sup> )
1	30	13.5	0.00058839
2	37	15	0.00141214
3	43	11.5	0.00181060

Tabla 6.15. Volumen de sedimento desalojado en 5 minutos.

## 7. Simulación numérica

A partir de los resultados de los experimentos, se establecieron las geometrías que se tratarán de simular numéricamente con el Software Phoenix, herramienta computacional para modelación de fluidos en 3D:

Por ejemplo, para el primer dispositivo ensayado se tomó la siguiente geometría:

	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)
Tubo	60.00	10.10	0.40
Disco		24.00	0.70
Sifón	15.00	2.54	0.30
Toma de aire	4.50	0.70	0.10
Faldón	19.00	24.00	0.05

Tabla 7.1. Geometría para el primer dispositivo ensayado experimentalmente.

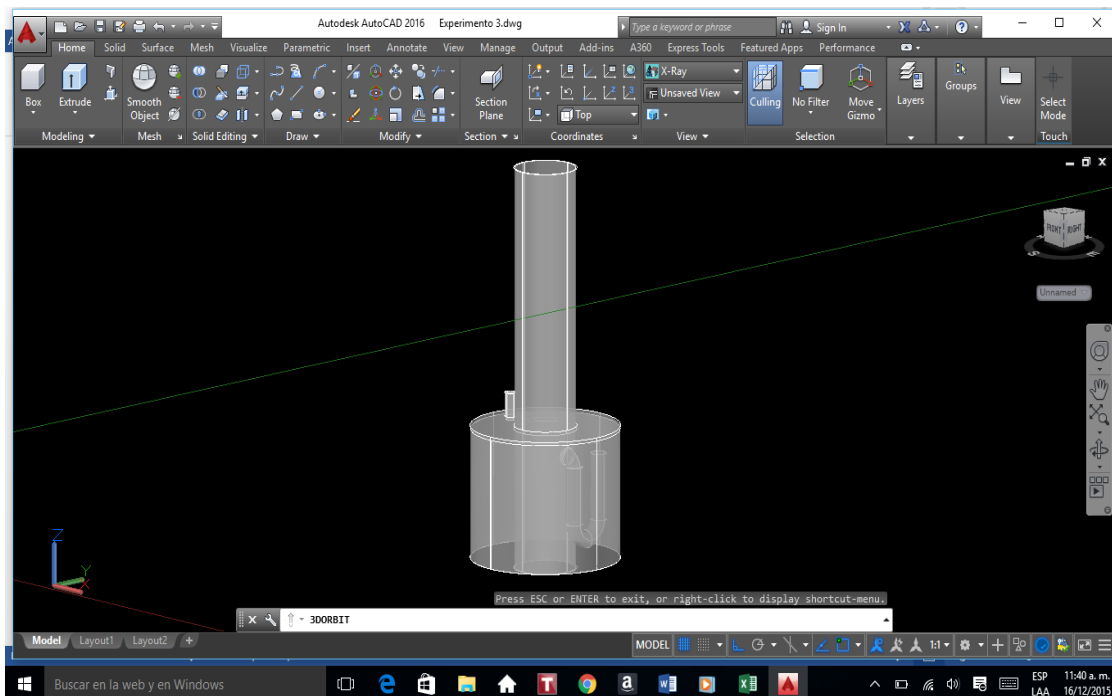


Figura 7.1. Modelo en 3D del dispositivo para la geometría de la tabla 7.1

Para el dispositivo más largo ensayado experimentalmente, se consideraron las tres geometrías y se generaron los archivos de los sólidos en AutoCad, como en el caso anterior.

	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)
<b>Tubo</b>	<b>230.00</b>	<b>10.10</b>	<b>0.40</b>
<b>Disco</b>		<b>30.00</b>	<b>0.70</b>
<b>Sifón</b>	<b>13.50</b>	<b>2.54</b>	<b>0.30</b>
<b>Toma de aire</b>	<b>4.50</b>	<b>0.70</b>	<b>0.10</b>
<b>Faldón</b>	<b>26.00</b>	<b>30.00</b>	<b>0.05</b>

Tabla 7.2. Geometría para el dispositivo más largo, primer caso.

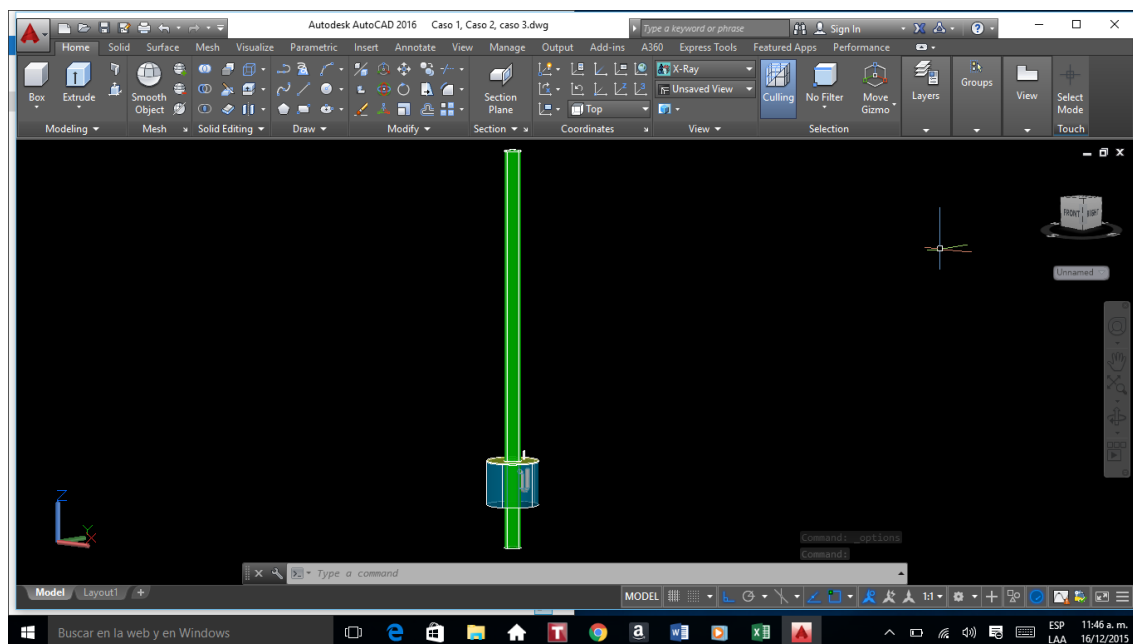


Figura 7.2. Modelo en 3D del dispositivo para la geometría de la tabla 7.2.

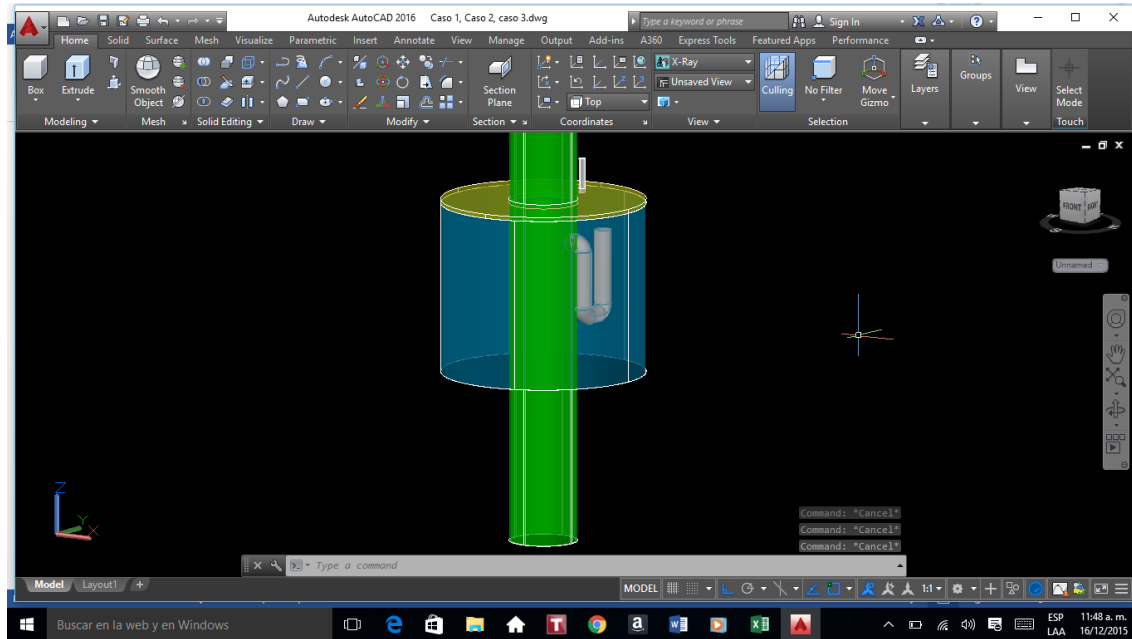


Figura 7.3. Acercamiento a la cámara del dispositivo, geometría de la tabla 7.2.

	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)
Tubo	230.00	10.10	0.40
Disco		37.00	0.70
Sifón	15.00	2.54	0.30
Toma de aire	4.50	0.70	0.10
Faldón	26.00	37.00	0.05

Tabla 7.3. Geometría para el dispositivo más largo, segundo caso.

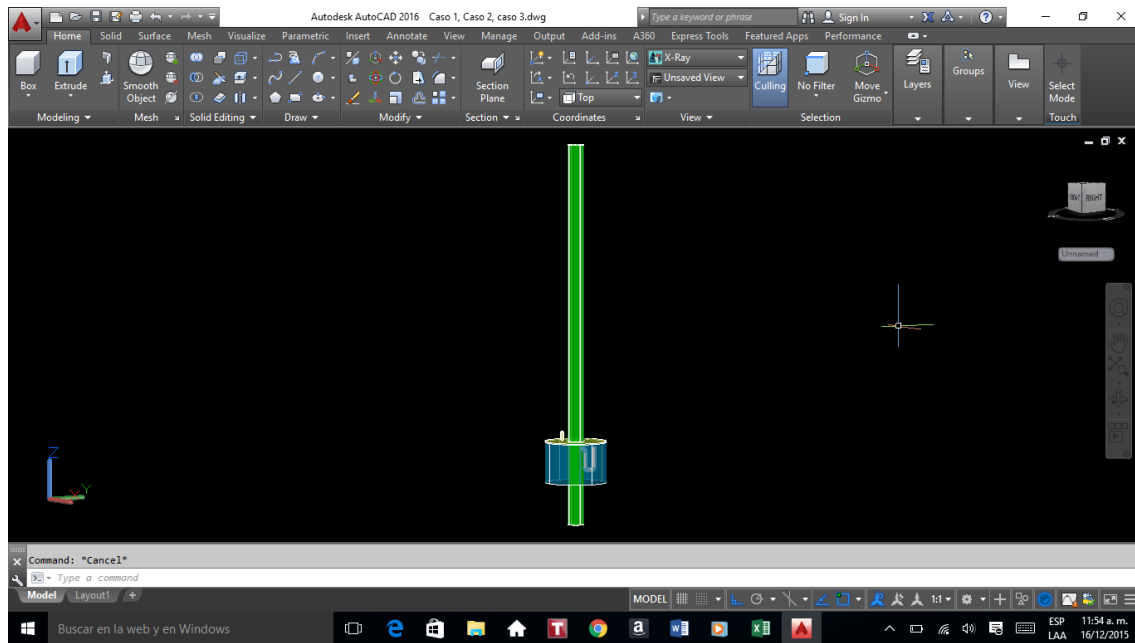


Figura 7.4. Modelo en 3D del dispositivo para la geometría de la tabla 7.3.

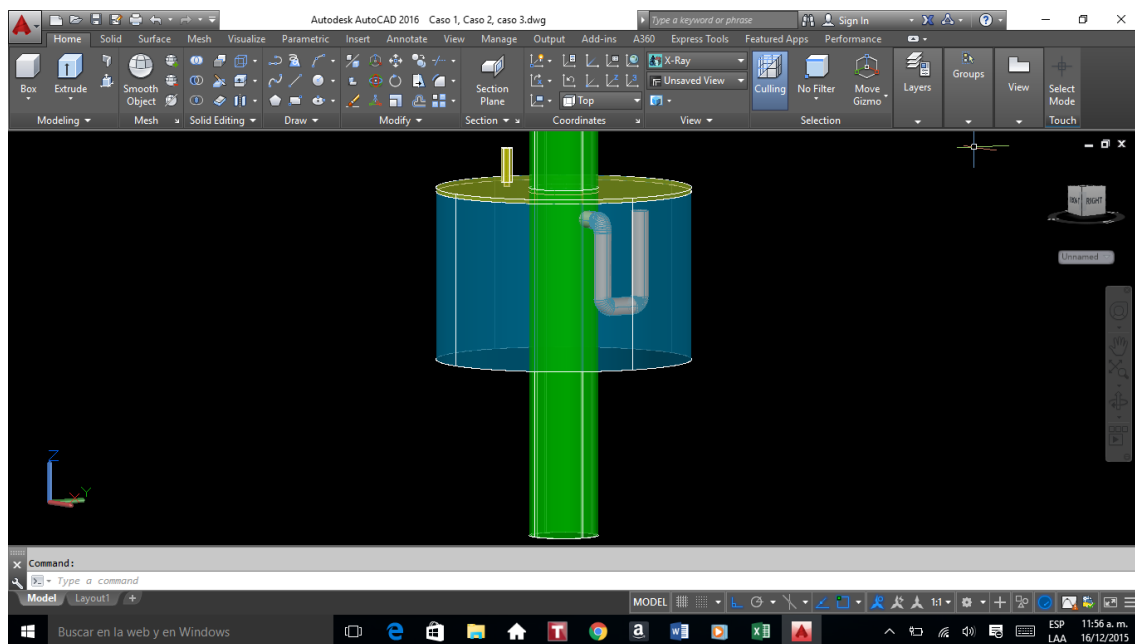


Figura 7.5. Acercamiento a la cámara del dispositivo, geometría de la tabla 7.3.

	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)
<b>Tubo</b>	<b>230.00</b>	<b>10.10</b>	<b>0.40</b>
<b>Disco</b>		<b>43.00</b>	<b>0.70</b>
<b>Sifón</b>	<b>11.50</b>	<b>2.54</b>	<b>0.30</b>
<b>Toma de aire</b>	<b>4.50</b>	<b>0.70</b>	<b>0.10</b>
<b>Faldón</b>	<b>26.00</b>	<b>43.00</b>	<b>0.05</b>

Tabla 7.4. Geometría para el dispositivo más largo, tercer caso.

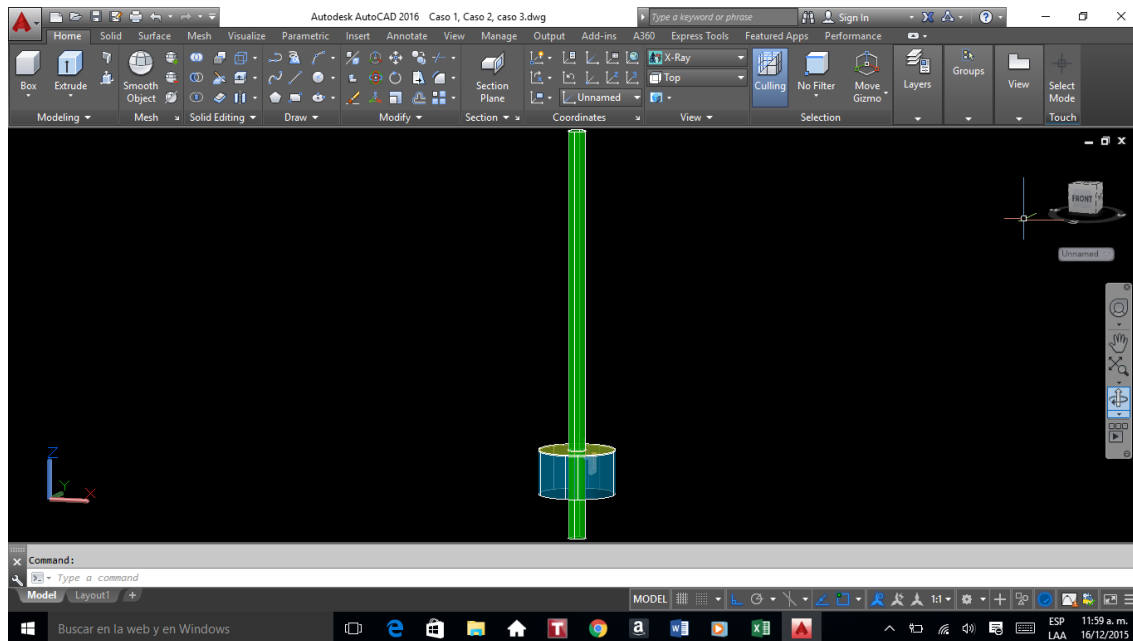


Figura 7.6. Modelo en 3D del dispositivo para la geometría de la tabla 7.4.

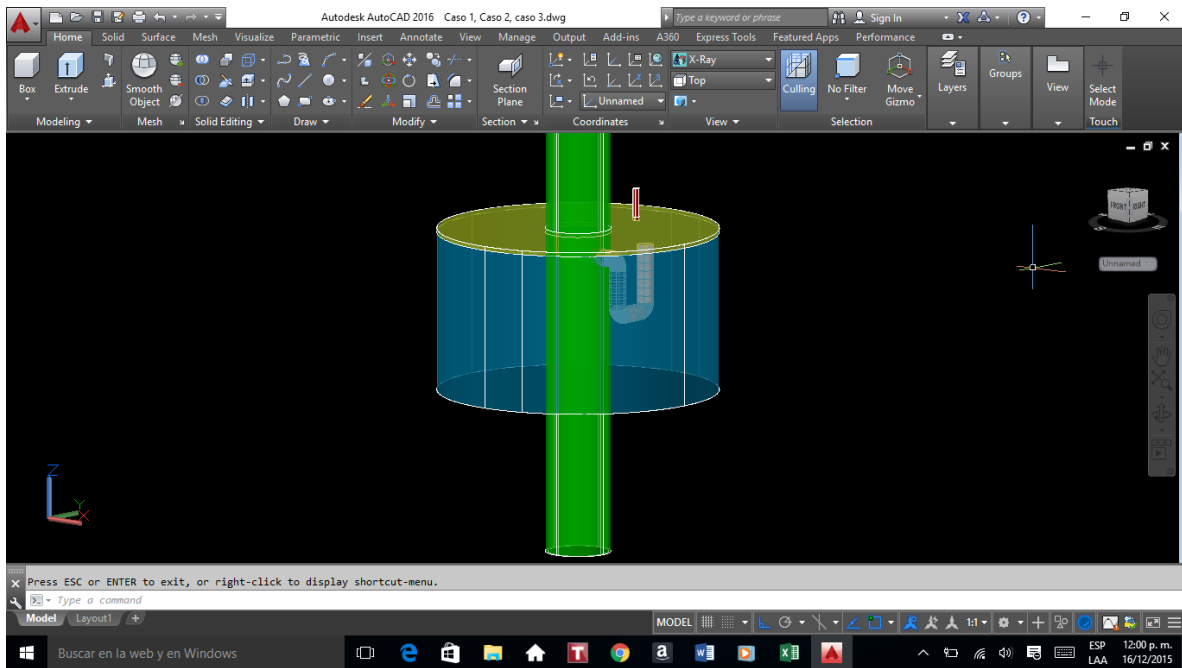


Figura 7.9. Acercamiento a la cámara del dispositivo, geometría de la tabla 7.4.

## 8. Conclusiones y recomendaciones

El problema de sedimentación en vasos de presas pequeñas y grandes, lagos y lagunas, es una situación que habrá de atenderse en el corto y mediano plazo. En nuestro país muchos cuerpos de agua han perdido la capacidad de almacenar o regular por lo que su vida operativa está muy disminuida e incluso algunas obras representan un riesgo al no operar adecuadamente ante la pérdida de capacidad de almacenamiento.

La remoción de sedimentos en presas de almacenamiento es una alternativa para incrementar la vida operativa de las obras. En México, existen más de 2000 presas pequeñas y bordos con riesgo potencial de quedar fuera de servicio. Para contribuir a disminuir esta problemática, en este informe se analizó experimentalmente un dispositivo alternativo para ayudar al desazolve de cuerpos de agua pequeños. Dicho dispositivo funciona a través de la generación de una burbuja de aire cuya velocidad de ascenso es función de la geometría de la cámara de aire y de la presión suministrada.

Las primeras pruebas realizadas con el objeto de ver la posibilidad de ensayar un dispositivo para resuspensión de sedimentos fue en 2008, mismas que fueron retomadas en el presente año 2015, al utilizar el mismo dispositivo.

Las pruebas del dispositivo alternativo descritas en este informe fueron realizadas en tres depósitos o tanques de agua de dimensiones: 0.40 X 0.40 X 0.89 m, 0.77 X 1.65 X 1.67 m y 0.77 X 1.65 X 2.5 m. En cada caso se ensayaron diferentes geometrías del tamaño del disco y longitud del sifón.

Para el caso del segundo tanque o depósito se realizaron 15 pruebas de manera sistemática. Estas pruebas fueron analizadas mediante un diseño estadístico factorial  $2^3$  para tener una mejor comprensión del funcionamiento del dispositivo, para ello se utilizó el software Statgraphics Centurion v15 1.0.2. Las variables analizadas fueron: el tamaño del disco, longitud del sifón y presión de aire suministrada respecto a la velocidad de ascenso de la burbuja.

Cada variable de manera individual presenta un comportamiento diferente que cuando interactúan entre ellas. La presión de aire resultó ser de mayor importancia que el diámetro del disco y la longitud del sifón para incrementar la velocidad de ascenso de la burbuja. La combinación presión-disco es más relevante que la combinación presión-sifón para una mayor velocidad de ascenso de la burbuja. Es conveniente comentar que para valores superiores a la presión máxima ensayada ( $P = 50 \text{ lb/pulg}^2$ ) se tuvieron problemas para la



formación de la burbuja, lo cual indica que los resultados obtenidos son válidos para la geometría ensayada en estos experimentos.

Al ensayar en un tanque o depósito más largo, considerando el efecto de la sumergencia o profundidad del agua, se encontraron diferencias entre las velocidades de ascenso de la burbuja entre un 10% hasta un 22%, siendo mayores para el caso del dispositivo con el tubo largo. También se detectó en estos experimentos que la formación adecuada y ascenso de la burbuja solo fue posible hasta una presión de aire de 30 lb/pulg<sup>2</sup>, ya que para presiones de aire mayores se distorsionaba la formación de la burbuja y no se tenía un funcionamiento adecuado del dispositivo.

En general, de los resultados de las pruebas realizadas pueden hacerse las siguientes precisiones:

6. Para discos y sifones cada vez más grandes, la velocidad de la burbuja no necesariamente aumentará.
7. Para las geometrías ensayadas del dispositivo, se requiere al menos una carga o columna de agua 115 cm, para que funcione adecuadamente el dispositivo.
8. Para presiones mayores a 50 lb/pul<sup>2</sup> en la inyección de aire en la cámara, el dispositivo no funciona, el aire se escapa o libera de la cámara sin llegar a formar la burbuja.
9. Para un mejor funcionamiento del dispositivo, la parte final del tubo principal, no debe estar más de 5 cm fuera de la superficie del agua.
10. Para un correcto funcionamiento el dispositivo debe estar completamente vertical para que la burbuja no se desvíe hacia un lado y el golpe de succión sea uniforme.

Se recomienda seguir ensayando y explorando la aplicabilidad del dispositivo alterno presentado en este informe, incluso debe probarse en un caso real y práctico en campo, y evaluar su funcionalidad en forma global, que involucre no solo el proceso de resuspensión del sedimento, sino también se analice el proceso de captura, transporte y deposición del sedimento removido.

## Bibliografía

- ARMENCOL, J. M. (1996). *Phosphorus budgets and forms of phosphorus in the Sau reservoir sediment: An interpretation of the limnological record. Hydrobiologia 143: 331-336.*
- Beutelspacher., I. (2001). "Equipo floculador accionado con aire",. Jiutepec, Morelos: Facultad de Ingeniería.
- Brandt, C. (1989). *The size distributions of throughfall drops under vegetation canopies. Catena 16: 507-524.*
- Brooks, K., Ffolliott, P., Gregersen, H., & DeBano, L. (2003). *and the management of watersheds. Iowa State Press. 574 p.*
- COOKE, D. E. (1993). *Restoration and Mcirzagerneizt.*
- Einstein, H. A. (1964). "River Sedimentation." In V. T. Chow (editor), *Handbook of Applied Hydraulics. McGraw-Hill, New York.*
- Espinoza A, M Joselina et al (2008) *Técnicas Experimentales e Ingeniería de Obras Hidráulicas, Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos, IMTA, México.*
- Faulkner. D., a. M. (1996). *Persisting Sediment Yields and Sediment Delivery Changes", Water Resources Bulletin. 31 (4): 817-829.*
- Fournier, F. (1972). *Soil conservation. Nature and environment series. Council of Europe. 194 p.*
- García-Chevesich, P. (2008). *Procesos y control de la erosión. Outskirts Press. Denver, CO. 276 p.*
- Geney, R. S. (1998). *Improving Water Quality by Reservoir Management Waterworld News (nov/dic: 10-13).*
- Harper, D. (1992). "Eutrophication of Freshwaters". Chapman & Hall, Londres: 321.
- Hjulstrom, F. (1935). *The morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. Bulletin of Geological Institute of Uppsala 25: 221-527.*
- Jesus Martinez Barron, A. S. (2008). *Dragado en puertos maritimos. Mexico. D.F.*

- Macdonel, G. (2001). *Ingeniería Marítima Portuaria* (pp. 449). Alfa Omega .
- MARGALEF, R. D. (1976). *Linzrziología de los embalses españoles. Dirección Gral. Obras Hidráulicas. MOPU. Madrid. 422 pp.*
- Martinez. (1995). "Métodos para oxigenación de embalses de centrales hidroeléctricas". México: Facultad de ingeniería UNAM.
- Mason, C. F. (1991). *Biology of Freshwater Pollution, Longman Scientific & Tchnical, . Nueva York: 2a ed, pp 95-138.*
- Morgan, R. (2005). *Soil erosion and conservation. National Soil Resources Institute. Cranfield University. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK. 304 p.*
- Morris, G. e. (2006). "Reservoir Sedimentation Handbook", McGraw-Hill Book Co., New York. 1998. Electronic version of the original 1998 publication by McGraw-Hill Book Co. U.S. Department of the interior, "Erosion and sedimentation Manual", Sedimentati.
- Piza, J. O. (2002). *Ingeniería Marítima y Portuaría.*
- Terrence, J., Foster, G., & Renard, K. (2002). *Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control. John Wiley and Sons, New York, NY. 338 p.*
- Vanoni, V. (1975). *Sedimentatiorz Engineering, ASCE Task Committee for the Preparation of the Manual on Sedimentation of the Sedimentation Committee of the Hydraulics Division reprinted 1977).*
- Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation Engineering. ASCE, New York.*
- Verner, B. (1994). "Longterm effect of hypolimnetic aeration of lakes and reservoirs with especial consideration of drinking water quality and preparating cost, "EPA-440/5-84-001, pp 134-138.