



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

Diseño y operación de un hidrociclón  
para mejorar la técnica de lavado de suelos

**T E S I S**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**INGENIERÍA AMBIENTAL - SUELO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**P R E S E N T A**

**ING. EDGAR SALVADOR DOROTEO REYES**

**TUTORA:**

**DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES**



**2010**

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dra. Ramírez Zamora Rosa María.

**Secretario:** M. en C. García Gómez Rolando Salvador.

**Vocal:** Dra. Iturbe Argüelles Rosario.

**1er Suplente:** M. en I. Silva Martínez Ana Elisa.

**2do Suplente:** M. en I. Santos Jallath José Enrique.

Lugar donde se realizó la Tesis:

*Laboratorio de Bioprocesos e Ingeniería Ambiental, Instituto de Ingeniería.*

*TUTORA DE TESIS*

**Dra. Rosario Iturbe Argüelles**

---

FIRMA

## DEDICATORIA

**A mis queridos papás, Aurelia y Salvador, por todo el amor y apoyo incondicional que me brindaron en esta etapa de mi vida, que no hubiese sido posible gracias a sus consejos y palabras de aliento. Los quiero mucho.**

**A mi hermana Ingrid, por todo el apoyo y charlas interminables que me ayudaron a tomar decisiones importantes en esta vida tan loca y acelerada.**

El hombre encuentra a Dios detrás de  
cada puerta que la ciencia logra abrir  
(Albert Einstein)

## AGRADECIMIENTOS

A mi Universidad por brindarme los conocimientos, la diversión, la pluralidad de ideas y sobre todo las herramientas para luchar por un México mejor.

**“Por ese azul y oro luchare sin cesar, cubriendo de gloria a mi universidad”**

A la Dra. Rosario Iturbe Argüelles por su dirección, apoyo, confianza y valiosos comentarios, que lograron que este trabajo madurará y fuera posible.

Al M. en C. José de Jesús Huevo Casillas, por su asesoramiento y valiosos comentarios.

Al Ing. Francisco Javier Reyes Carmona y el Dr. Humberto de la Concha, investigadores de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional, por su asesoría y valiosos comentarios que ayudaron a enriquecer este trabajo.

A la M. en I. Alejandrina Castro Rodríguez, por su apoyo en mi estadía en el Instituto de Ingeniería y comentarios valiosos en mi vida profesional.

A mi queridísima amiga Lilia Corona por sus consejos y apoyo incondicional, en todo este tiempo.

A los amigos: Magaly Miss, Jessica López, Adriana Cruz, Alma Cortés, Luisa Dionisio, Berenice Santiago, Erick Moncayo, Fernando Muñoz, Fabián Neira, Andrés Ramos, Rodrigo Alva, Iván López, Raúl Hermenegildo y Víctor Vargas, por su amistad y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, gracias por los buenos momentos.

A los integrantes de Grupo de Remediación de Suelos y Acuíferos, por su apoyo y ayuda.

A los miembros del jurado por el tiempo invertido en la revisión y por sus comentarios a la tesis.

Al Instituto de Ingeniería por brindarme el apoyo y facilidades para llevar a cabo la experimentación.

A Conacyt por el apoyo económico que me brindo en la realización de la Maestría.

Definitivamente la sacarosa es más que  $C_2H_{22}O_{11}$ , es un estado metaestable de la realidad que hasta hoy, no he podido descifrar. Lo que es un hecho, que entre mayor es el mal, mas lo haces parte de tu vida.

(ESDR, 2010)



## ÍNDICE

	<b>Apartado</b>	<b>Página</b>
<b>0.</b>	<b>Resumen</b>	6
<b>1.</b>	<b>Introducción</b>	7
<b>2.</b>	<b>Antecedentes</b>	11
<b>3.</b>	<b>Objetivos, hipótesis y justificación</b>	12
3.1.	Objetivo general	12
3.2.	Objetivos específicos	12
3.3.	Justificación	12
3.4.	Hipótesis	12
<b>4.</b>	<b>Marco Teórico</b>	13
4.1.	Mezclado	13
4.1.1.	Definición de mezclado	13
4.1.2.	Elementos de un equipo de mezclado	14
4.2.	Clasificadores mecánicos	16
4.2.1.	Clasificación	16
4.2.2.	Equipos de separación	17
4.3.	Hidrociclón	18
4.3.1.	Funcionamiento de un hidrociclón	19
4.3.2.	Zonas de operación de un hidrociclón	19
4.3.3.	Patrones de flujo	20
4.3.4.	Correlaciones para el diseño de un hidrociclón	23
4.3.5.	Geometría del hidrociclón	26
4.3.6.	Aplicaciones del hidrociclón	28
4.4.	Contaminación del suelo	29
4.4.1.	Definición de suelo	29
4.4.2.	Remediación fisicoquímica	29
4.4.3.	Lavado de Suelos	30
4.5.	Normatividad Mexicana para suelos contaminados con hidrocarburos	32
<b>5.</b>	<b>Metodología</b>	34
5.1.	Origen del suelo	34
5.2.	Caracterización del suelo	34
5.3.	Pruebas microcosmos para la elección de surfactante	36
5.4.	Pruebas de lavado	37
5.5.	Caracterización de la pulpa de entrada al hidrociclón	37
5.6.	Pruebas de separación de sólidos	38
<b>6.</b>	<b>Diseño de experimentos</b>	39
6.1.	Aplicación de diseño de bloques completamente aleatorizado en la operación	40



---

	del hidrociclón	
<b>7.</b>	<b>Resultados y análisis</b>	<b>42</b>
7.1.	Caracterización del suelo	42
7.2.	Pruebas preliminares de lavado	45
7.3.	Pruebas de Lavado	47
7.4.	Caracterización de la pulpa de entrada al hidrociclón	48
7.5.	Diseño y simulación de hidrociclón	51
7.5.1.	Generalidades del simulador.- Aspen Plus	51
7.5.2.	Desarrollo de diseño y simulación de hidrociclón	54
7.6.	Construcción de hidrociclón y adaptación del sistema	58
7.7.	Pruebas de separación de partículas	60
7.8.	Pruebas de lavado con hidrociclón	71
7.9.	Resultados del diseño de experimentos	73
7.10.	Costos de operación del sistema	74
<b>8.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>77</b>
<b>9.</b>	<b>Referencias</b>	<b>79</b>
<b>10.</b>	<b>Apéndices</b>	<b>83</b>
10.1.	Apéndice A	83
10.2.	Apéndice B	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Apartado</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1.	Refinería 18 de Marzo, 1940	8
Figura 2.2.	Refinería 18 de Marzo 2009	9
Figura 2.3.	Mezcladora de Suelo	10
Figura 2.4.	Sedimentación de partículas	10
Figura 4.1.	Impulsores	15
Figura 4.2.	Diagrama esquemático de un hidrociclón	18
Figura 4.3.	Diagrama de zonas de influencia de hidrociclón	19
Figura 4.4.	Patrones de flujo en las regiones superiores de un hidrociclón	22
Figura 4.5.	Componentes de la velocidad en un hidrociclón	23
Figura 4.6.	Dimensiones de un hidrociclón	26
Figura 4.7.	Diagrama esquemático de los elementos de un proceso de lavado de suelos	31
Figura 5.1.	Suelo contaminado	34
Figura 5.2.	Balanza para determinar contenido de agua	35
Figura 5.3.	Microondas para extracción de hidrocarburos fracción pesada	36



Figura 6.1.	Diseño de bloques completamente aleatorizados	39
Figura 7.1.	Curva granulométrica de suelo de estudio	42
Figura 7.2.	Sistema de Agitación utilizado en las pruebas de tratabilidad de lavado de suelos	46
Figura 7.3.	Porcentaje de remoción de HFP, por surfactante	46
Figura 7.4.	Suelo después del lavado mecánico	48
Figura 7.5.	Equipo y mallas para tamizado	49
Figura 7.6.	Curvas granulométricas de suelo inicial y suelo tratado	49
Figura 7.7.	Reómetro Fann en operación	50
Figura 7.8.	Equipos del modulo de separación de sólidos	51
Figura 7.9.	Diagrama de dimensiones de hidrociclón en Aspen Plus	53
Figura 7.10.	Diagrama de proceso de separación de sólidos	54
Figura 7.11.	Menú de condiciones para la simulación del proceso	55
Figura 7.12.	Datos solicitados en las corrientes de proceso de separación de sólidos	55
Figura 7.13.	Diseño final de hidrociclón en dos perspectivas	57
Figura 7.14.	Hidrociclón Físico	58
Figura 7.15.	Estructura de sistema experimental	59
Figura 7.16.	Grafica de caída de presión	61
Figura 7.17.	Monitoreo del flujo	63
Figura 7.18.	Interior del tanque mezclador	64
Figura 7.19.	Curvas granulométricas descarga inferior	65
Figura 7.20.	Curvas granulométricas derrame	66
Figura 7.21.	Distribución de tamaño de partícula en descarga inferior 20% p/p sólidos	67
Figura 7.22.	Distribución de tamaño de partícula en derrame 20% p/p sólidos	68
Figura 7.23.	Distribución de tamaño de partícula en descarga inferior 30% p/p sólidos	69
Figura 7.24.	Distribución de tamaño de partícula en derrame 30% p/p sólidos	70
Figura 7.25.	Remociones de lavado en hidrociclón	72
Figura A1.	Picnómetros para determinación de densidad real	87
Figura A2.	Probetas para densidad aparente	87

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Apartado</b>	<b>Página</b>
Tabla 4.1.	Elementos de un mezclador	14
Tabla 4.2.	Proporciones geométricas de dos familias de hidrociclones	27
Tabla 4.3.	Proporciones geométricas para hidrociclón según Petty	27
Tabla 4.4.	Distribución de tamaño de partículas	29
Tabla 4.5.	Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante	32



Tabla 4.6.	Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburo en suelo	33
Tabla 4.7.	Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo	33
Tabla 6.1.	Análisis de varianza de un diseño de bloques completamente aleatorizado	39
Tabla 6.2.	Arreglo de experimento	40
Tabla 7.1.	Contaminación en suelo de estudio	43
Tabla 7.2.	Densidad del suelo de estudio	44
Tabla 7.3.	Determinación de nitrógeno en el suelo	44
Tabla 7.4.	Características de los surfactantes utilizados en este estudio	45
Tabla 7.5.	Condiciones de operación de pruebas de lavado	48
Tabla 7.6.	Densidad del lodo	50
Tabla 7.7.	Rangos de dimensiones de hidrociclón usadas en Aspen Plus	53
Tabla 7.8.	Datos necesarios para el diseño del hidrociclón	54
Tabla 7.9.	Resultados de la configuración del hidrociclón	56
Tabla 7.10.	Distribución de la eficiencia del hidrociclón por tamaño de partícula	56
Tabla 7.11.	Configuración final de hidrociclón	56
Tabla 7.12.	Especificaciones de tubería	58
Tabla 7.13.	Especificaciones de bombas	60
Tabla 7.14.	Arreglo experimental	60
Tabla 7.15.	Monitoreo de la bomba de mezclado	61
Tabla 7.16.	Monitoreo de la bomba de alimentación	61
Tabla 7.17.	Monitoreo del flujo en la descarga inferior a flujo máximo	62
Tabla 7.18.	Monitoreo del flujo en el derrame a flujo máximo	62
Tabla 7.19.	Separación de sólidos	63
Tabla 7.20.	Eficiencia del hidrociclón	64
Tabla 7.21.	Remociones del sistema	72
Tabla 7.22.	Resultados de la eficiencia del hidrociclón	73
Tabla 7.23.	Porcentaje de finos en descarga inferior	74
Tabla 7.24.	Porcentaje de finos en derrame	74
Tabla 7.25.	Datos de bomba de alimentación	75
Tabla 7.26.	Tarifas de consumo de energía México	75
Tabla A1.	Potencia de microondas	84
Tabla A2.	Purificación de extracto	85
Tabla B1.	Porcentajes de suelo retenido, suelo de estudio	88
Tabla B2.	Porcentajes de remoción en sistema microcosmos	88
Tabla B3.	Porcentajes de suelo retenido, suelo tratado	89
Tabla B4.	Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 20% Q <sub>max</sub>	89
Tabla B5.	Porcentajes de suelo retenido, derrame al 20% Q <sub>max</sub>	90
Tabla B6.	Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 20% Q=150lpm	90
Tabla B7.	Porcentajes de suelo retenido, derrame al 20% Q=150 lpm	91





---

Tabla B8.	Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 20% Q=200 lpm	91
Tabla B9.	Porcentajes de suelo retenido, derrame al 20% Q=200 lpm	92
Tabla B10.	Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 30% Qmax	92
Tabla B11.	Porcentajes de suelo retenido, derrame al 30% Qmax	93
Tabla B12.	Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 30% Q= 200 lpm	93
Tabla B13.	Porcentajes de suelo retenido, derrame al 30% Q= 200 lpm	94
Tabla B14.	Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 30% Q= 150 lpm	94
Tabla B15.	Porcentajes de suelo retenido, derrame al 30% Q= 150 lpm	95
Tabla B16.	Tratamiento de hidrocarburo fracción pesada	95
Tabla B17.	Anova para eficiencia de hidrociclón	96
Tabla B18.	Anova para concentración de finos en descarga inferior	96
Tabla B19.	Anova para concentración de finos en derrame	97



## O. RESUMEN

Actualmente existen tres tipos de tecnologías para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos: biológicas, fisicoquímicas y térmicas.

Este trabajo aborda un complemento a la técnica de lavado de suelos, en el tratamiento del agua de lavado que utiliza surfactantes. La problemática a la que se pretende dar solución es para suelos contaminados con hidrocarburos, con contenido de finos, que son difíciles de separar de la suspensión que se forma en la etapa final, después del lavado, debido a la formación de coloides. La modificación considera la separación de sólidos por medio de un hidrociclón.

La técnica de lavado de suelos consiste en lavar el suelo, contaminado con hidrocarburos, que contiene partículas finas (limos y arcillas), con una solución con surfactantes mediante un mezclado mecánico, durante el cual se forma una suspensión muy difícil de separar de las partículas finas del suelo. Es por esta razón que resulta ineficiente usar un sistema de sedimentación convencional.

Por las razones anteriores, se decidió diseñar, construir y probar un hidrociclón, para hacer esta separación de sólidos en menor tiempo. Se seleccionó el surfactante Tween 80 a una concentración del 0.5% p/p como agente de lavado, logrando remociones de Hidrocarburos Fracción Pesada (HFP) en una sola carga de 60%, en un sistema microcosmos de lavado. En las pruebas a mayor escala se obtuvieron remociones del 35%.

El suelo original del experimento consiste en una arena bien graduada con finos y después del lavado mecánico se aprecia un aumento de limos y arcillas de 5% a 12%; esto, como consecuencia del choque de las partículas con las paredes de la cuba y con las paletas del impulsor.

Se realizó una caracterización de la pulpa con la finalidad de realizar la simulación del hidrociclón con ayuda del programa Aspen Plus, y el modelado virtual en Solid Edge. Algunas de las características más sobresalientes del diseño son el diámetro del hidrociclón de 10 cm y un diámetro de corte de 0.1 mm. El material de construcción del hidrociclón consistió en tubería de acero al carbón de diferentes dimensiones.

La separación de las partículas sólidas por medio del hidrociclón fue muy satisfactoria, logrando eficiencias de 70%, con un flujo de 200 lpm y 30% de sólidos en la alimentación, así como también se logró un diámetro de corte de 45 micrómetros, que favorece la captación de sólidos de mayor tamaño en la descarga inferior.

El incremento de los finos en el derrame es consecuencia del aumento del flujo y de la concentración en la alimentación, aunque la concentración de sólidos en ningún caso rebasó la unidad, mientras que en la descarga inferior llegó a ser 4 veces superior. Esto demuestra que el sistema funciona como concentrador de sólidos. Adicionalmente se llevaron a cabo pruebas de lavado con el hidrociclón, donde se obtuvieron remociones del 40% de Hidrocarburos Fracción Pesada en una sola carga, en condiciones de recirculación.

Los resultados mostraron que los objetivos y la hipótesis del trabajo se cumplen ya que el sistema resultó ser eficiente para concentrar y separar las partículas finas.

La mezcla de suelo en medio acuoso, generado por el lavado de suelos, disminuyó sus tiempos de tratamiento, utilizando un hidrociclón para la separación de sólidos. Por lo que el diseño y operación del hidrociclón contribuyó en la mejora de la técnica de lavado de suelos contaminados con hidrocarburos con contenido de finos.



## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el medio ambiente ha sufrido cambios muy significativos, esto a raíz de la interacción del hombre con la naturaleza. La contaminación del suelo, el aire y el agua son problemas ambientales que se deben atender con rapidez e inteligencia. Parte de la contaminación que ha modificado el equilibrio ecológico es la generada por la Industria petrolera, la cual es una actividad necesaria para la generación de combustibles y materia prima en procesos de transformación.

La explotación y el procesamiento de petróleo en México es una actividad económica fundamental, ya que depende de ellas en gran parte la economía del país. Por otro lado, es común saber de la existencia de accidentes tales como derrames de derivados del petróleo (gasolina, diesel, turbosina, etc.) o de crudo, en suelo y agua, por lo que es necesario actuar de forma adecuada para solucionar este problema.

Existen varias técnicas de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, biológicas, químicas y fisicoquímicas. En la presente investigación se abordó una técnica fisicoquímica denominada lavado de suelo asistido por surfactantes. El lavado de suelos es un proceso en el cual se llevan a cabo varias operaciones unitarias como el mezclado, separación y flotación del contaminante; el proceso consiste en llevar a cabo un lavado, donde por medio de un surfactante diluido en agua a cierta concentración se adiciona al suelo contaminado y se homogeneiza. Esta técnica se ha probado que es muy eficiente para suelos contaminados con hidrocarburos; además, se ha usado extensivamente en Europa y de forma limitada en Estados Unidos y en México.

Con este proceso se genera una mezcla homogénea de suelo-solución, la cual es necesario separar de manera eficiente y rápida, ya que la etapa final de la técnica consiste en tratar el agua residual que va a contener surfactante, hidrocarburo y agua. Para llevar a cabo este tratamiento, es necesario que la solución residual contenga el mínimo de partículas de suelo, ya que se ha observado que cuando el suelo contaminado contiene partículas finas se forma una suspensión que dificulta la separación, además de incrementar los costos.

El proceso de mezclado implícito en el lavado de suelos, lleva consigo una reducción de tamaño de partícula ya que se parte de una distribución de tamaño variable, que puede incrementar el tiempo de sedimentación (Doroteo, 2008). Por ende se propone un sistema de separación denominado hidrociclón.

Los hidrociclones son equipos muy útiles para la separación de partículas sólidas según la rapidez de asentamiento en un fluido, debido a que el agua es el fluido de uso más común en el lavado de suelos, aunque su funcionamiento y eficiencia va a ser determinado por varios factores, como el tamaño de partícula antes y después del proceso de lavado, concentración de la pulpa, densidad y viscosidad, entre otras (Ormsby, 1976).

En este trabajo se pretende diseñar y operar el proceso de separación suelo-solución final de lavado, donde el suelo de estudio está contaminado con hidrocarburos y contiene un porcentaje de aproximadamente un 5% de finos. Este factor dificulta en gran manera la separación, por lo que se propone solucionar con un hidrociclón a escala de laboratorio logrando un proceso continuo, de bajos tiempos de operación.



## 2. ANTECEDENTES

La ex refinería 18 de Marzo ubicada en Azcapotzalco, Distrito Federal, por muchos años se dedicó a la refinación y distribución de derivados del petróleo. En 1933, la compañía petrolera "El Águila" puso en operación esta refinería con una capacidad de refinación de 7500 barriles diarios. Cabe mencionar que era operada por iniciativa privada, y fue hasta después de la expropiación petrolera cuando se realizaron trabajos para incrementar la capacidad de refinación a 50,000 barriles diarios. Petróleos Mexicanos inauguró, el 20 de noviembre de 1946, la refinería "18 de Marzo", que se aprecia en la Figura 2.1.



Figura 2.1.- Refinería 18 de Marzo, 1940. PEMEX, 2009

En 1976 se amplió la capacidad de procesamiento a 105,000 barriles diarios, por lo que ésta llegó a contar con 14 plantas de refinación, tres unidades petroquímicas, 218 tanques de almacenamiento y terminales de embarques y reparto. La refinería enviaba los productos finales a las Terminales de la Zona del Valle de México.

Instalaciones durante la operación de la refinería:

- 14 plantas de refinación
- 3 plantas petroquímicas
- 218 tanques de almacenamiento
- Servicios auxiliares
- Terminal de embarques y reparto
- Terminal de lubricantes
- Talleres y almacenes
- Edificios administrativos
- Colonia de empleados



Los casi 60 años de operación de la refinería ocasionaron derrames de hidrocarburos en el suelo y por ende se afectó el subsuelo y el acuífero somero de esta zona. El **18 de marzo de 1991** la refinería cerró sus operaciones y en una parte de los terrenos se construyó una moderna Terminal de Almacenamiento y Reparto.

Entre 1991 y 2007, Pemex Refinación realizó diversas acciones relativas al desmantelamiento de la ex refinería entre las que destacaron: recuperación de hidrocarburos en fase libre, reubicación de plantas de proceso, desmantelamiento de instalaciones, retiro y disposición de residuos superficiales. Recuperación de emulsiones agua-aceite y retiro de tanques subterráneos. Asimismo, Pemex solicitó la realización de diversos estudios de diagnóstico con el propósito de determinar las acciones a seguir en los terrenos de la ex refinería. Destacan por su importancia los estudios de caracterización por instituciones de investigación y empresas nacionales e internacionales (PEMEX, 2009).

Es por esta razón que se procedió a realizar un plan de remediación y se iniciaron trabajos de esta índole, donde la Universidad Nacional Autónoma de México, específicamente el Instituto de Ingeniería realizó trabajos de remediación. En la Figura 2.2 se presenta el terreno y los trabajos de extracción de suelo.



Figura 2.2.- Refinería 18 de Marzo, 2009. PEMEX, 2009

Se procedió a tomar algunas muestras del suelo de estudio para realizar pruebas preliminares de lavado de suelos, ya que fue la técnica propuesta por el Grupo de Saneamiento de Suelos y Acuíferos del Instituto de Ingeniería, consecuencia del grado de contaminación, como de la granulometría de los lotes de estudio.

Como primera etapa se realizó una caracterización del suelo, la cual se presenta en el capítulo 7 de esta tesis. El suelo del sitio de estudio es arenoso con finos y mal graduado. Las concentraciones de hidrocarburos fracción pesada sobrepasaban los límites máximos permisibles, establecidos por la NOM-138-SEMARNAT-2003 para suelo de uso industrial.



Con estos datos se realizaron pruebas preliminares de lavado, con la finalidad de obtener las condiciones de operación más viables para el proceso. Primero se probaron el surfactante y la concentración del mismo, además de la idónea proporción de sólidos, para obtener remoción de Hidrocarburos Fracción Pesada (HFP).

Se llevó a cabo el lavado del suelo en un sistema mezclador de tipo horizontal y con un impulsor helicoidal, donde la proporción de sólidos fue del 40% y una concentración de surfactante de 0.5% en peso. En la Figura 2.3, se observa el impulsor de tipo helicoidal, el cual apenas desarrolla 10 rpm, que es suficiente para mantener en movimiento la mezcla y logre la transferencia del contaminante a la fase acuosa en la cuba de mezclado de 10 litros de volumen. Este sistema fue probado para la remoción de hidrocarburos totales del petróleo (HTP), donde se lograron remociones superiores al 70% (Leyva, 2006).



Figura 2.3.- Mezcladora de Suelo

Al cabo de varias pruebas se observó que al momento de separar las partículas de suelo ya tratadas de la solución de lavado era necesario esperar alrededor de 48 h, para que las arcillas y los limos sedimentaran, y se decantara el sobrenadante.

A continuación se muestra la mezcla a diferentes tiempos. El primer frasco de izquierda a derecha muestra un tiempo de sedimentación de 48 h, el segundo de 24 h y el último de apenas 1 h.



Figura 2.4.- Sedimentación de partículas



En trabajos anteriores se planteó que el lavado de suelos con un sistema mecánico, utilizando únicamente agua sin algún surfactante logró remociones importantes (Leyva, 2006; López, 2004).

De igual forma se encontró que la remoción del contaminante fue debida a un proceso físico de separación de partículas en el lavado de suelos mecánico o fuera del sitio, ya que el efluente contenía una gran cantidad de finos, consecuencia de una formación de emulsión y de un tiempo de sedimentación largo. (Leyva, 2006).

Al realizar un lavado de suelos con un mezclador de tipo mecánico, el contenido de finos aumento, como consecuencia del esfuerzo cortante a que es sometida la mezcla, además del choque que se da entre las partículas con las paredes de la cuba mezcladora y el choque de las paletas del impulsor (Doroteo, 2008), es por esto, que si se parte de una granulometría conocida inicial, después de pasar el suelo por el tratamiento fisicoquímico, se observa un aumento gradual que lleva un contenido de finos del 15%.

Es importante recalcar que en un suelo contaminado la mayor concentración del contaminante se encuentra presente en los finos (limos y arcillas), debido a su gran área superficial (U.S.EPA, 1991). Es por esta razón, que algunos expertos proponen la separación y eliminación de las partículas finas, antes del lavado.

Por lo anterior se decidió realizar este trabajo de investigación, donde el problema principal es la separación de las partículas sólidas (suelo tratado) de la solución final de lavado, donde se pretende disminuir el tiempo de espera en la sedimentación de las partículas y por ende el mejoramiento de la técnica fisicoquímica para lavado de suelos contaminados.



### 3. OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y JUSTIFICACIÓN

#### 3.1. Objetivo general

Diseñar y operar un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos contaminados con hidrocarburos con contenido de finos.

#### 3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el suelo proveniente de la ex refinería 18 de Marzo, ubicada en la Ciudad de México.
- Realizar pruebas de lavado en un sistema microcosmos para conocer el tensoactivo más eficiente, al llevar a cabo el lavado de suelos contaminado con hidrocarburos.
- Aplicar un modelo (Aspen Plus) para diseñar un hidrociclón para la separación de partículas después del lavado del suelo.
- Determinar las condiciones de operación del hidrociclón para separar la mezcla generada en el tratamiento de lavado de suelos.
- Determinar la viabilidad del proceso, al aplicar la operación del hidrociclón.

#### 3.3. Justificación

El proceso de lavado de suelos ha presentado una problemática al momento de tratar suelos contaminados con hidrocarburos con contenido de finos, ya que al momento de realizar la separación de las partículas de suelo del agua de lavado se requieren de altos tiempos de sedimentación debido a las velocidades de sedimentación de los suelos finos, es por esta razón, que se propone diseñar y operar un equipo de separación física, denominado hidrociclón con el fin de reducir estos tiempos del tratamiento fisicoquímico.

#### 3.4. Hipótesis

El uso del hidrociclón en el proceso de lavado de suelos permitirá acelerar la etapa de sedimentación de partículas, mejorando así la eficiencia del proceso de lavado de suelos.





## 4. MARCO TEÓRICO

### 4. Mezclado

#### 4.1.1. Definición de mezclado

El mezclado es una de las operaciones unitarias de la ingeniería química más difíciles de someter a un análisis científico. Hasta el presente no se ha desarrollado ninguna fórmula o ecuación aplicable al cálculo del grado de realización de una mezcla, o la velocidad con que se realiza, en determinadas condiciones (Climent, 2007). Esta operación unitaria que ha proporcionado solución a infinidad de problemas industriales, en la actualidad busca ser optimizada y dependerá de diferentes factores, tales como especificaciones del proceso, configuración del sistema y la experiencia adquirida.

Existen diferentes mecanismos que interactúan en el mezclado:

- Convección: Generada por la acción del bombeo proporcionada por el impulsor, el movimiento del fluido en diferentes direcciones del tanque mezclador y la separación del sólido del líquido en pequeñas partes.
- Macro mezclado: Es causado por el flujo turbulento en forma de vórtice. Región muy pequeña en el impulsor donde la dispersión de sólidos es muy alta.
- Esfuerzo cortante: En el macro mezclado los sólidos son dispersados en un régimen laminar, y por ende pueden ser sometidos a disgregación, cambio de forma y tamaño; consecuencia del movimiento de las láminas del fluido con respecto al impulsor.
- Micro mezclado: Se genera la difusión de reactivos si es el caso por un gradiente de concentraciones (Mixing Solutions, 2009).

Otra definición de mezclado es la incorporación de dos o más porciones disímiles de un material, con lo que se logra un nivel deseado de uniformidad, ya sea físico o químico en el caso de reacción química (Holland, *et. al.*, 1995).

Existen varias aplicaciones del mezclado como las que se enuncian a continuación:

- Homogeneización de líquidos miscibles
- Suspensión de sólidos
- Transferencia de calor

Con lo que respecta a la suspensión de sólidos en un líquido se debe tomar en cuenta el régimen de flujo y por ende la velocidad de agitación, así como también el nivel de la mezcla en el tanque, esto se verá reflejado en el consumo de potencia.

Algunos parámetros que se deben tomar en cuenta para la selección del sistema de mezclado son los siguientes:

- Viscosidad
- Densidad
- Presión de operación



- Temperatura de operación
- Tiempo de mezclado
- Volumen a desplazar

#### 4.1.2. Elementos de un equipo de mezclado

En la Tabla 4.1 se muestran las principales características que se deben tomar en cuenta para el diseño de un equipo de mezclado, desde las partes mecánicas hasta el comportamiento de los componentes de la mezcla heterogénea.

Tabla 4.1.- Elementos de un mezclador (Oldshue, 1983)

<b>1. Diseño del Proceso</b>	a) Fluido mecánico de los impulsores
	b) Régimen de flujo requerido por el proceso
	c) Escalamiento: Hidráulico, similitud
<b>2. Características en la potencia consumida por el impulsor</b>	d) Relación del impulsor vs hp, velocidad, y diámetro
<b>3. Diseño mecánico</b>	e) Impulsores
	f) Forma del tanque
	g) Características generadas por el motor

##### a) Impulsor

La función del impulsor es convertir la energía rotacional del eje mezclador a energía cinética en las partículas, con la finalidad de lograr una correcta combinación del flujo, y la turbulencia requerida para el proceso (Mixing solutions, 2009). Además fuerza a los líquidos, gases y sólidos a moverse en cierta dirección.

El movimiento provocado por el impulsor se describe mediante patrones de flujo primario y secundario, donde el primario es el flujo rotacional o tangencial del fluido. La mayor parte de la energía transferida del impulsor al fluido es consumida por este movimiento, aun cuando es de menor importancia en procesos relacionados con el mezclado (Oldshue, 1983).

Ningún diseño de impulsor es capaz de tener un rendimiento óptimo bajo condiciones de proceso, por lo que el rendimiento del mismo proceso depende de la adecuada selección de éste (Torres, *et. al.*, 2002).

##### Tipo de Impulsores

Los impulsores se pueden dividir en dos clases, de flujo axial y de flujo radial. La clasificación depende del ángulo que forman las aspas con el plano de rotación del impulsor (Ver fig. 4.1).



### - **Impulsores de flujo axial**

Los impulsores de flujo axial son todos los que tienen aspas que forman un ángulo menor a  $90^\circ$  con el plano de rotación. Las hélices y las turbinas de aspas inclinadas son representativas de este flujo. Con frecuencia se utilizan impulsores axiales para la agitación de volúmenes superiores a  $3.8 \text{ m}^3$  o menos de 1.8 m de diámetro del impulsor, cuando resulta satisfactorio el proceso con menos de 2.2 kW (Takahashi, *et. al.*, 1992).

### - **Impulsores de flujo radial**

Este tipo de impulsores tiene aspas paralelas al eje de la flecha motriz. Los más pequeños de aspas múltiples, se conocen como turbinas, las mayores de velocidades más bajas con dos o cuatro aspas se denominan ruedas de paleta.

El diámetro de una turbina se encuentra entre 0.3 a 0.6 veces el diámetro del tanque. Las aspas curvas ayudan en el arranque de un impulsor entre sólidos sedimentados. La mayor parte de las operaciones de agitación en gran escala de suspensiones sólido-líquido se hacen con ruedas de paletas o turbinas que se introducen en la parte superior (Perry, 1985).



Figura 4.1.- Impulsores

### b) **Geometría del tanque**

La geometría del tanque es importante para cualquier proceso de mezclado, según Oldshue (1983) la óptima es aquella donde el tanque es cilíndrico y vertical, ya que la energía consumida es aprovechada en mayor proporción, que utilizando cualquier otra geometría. Cabe resaltar que esto muchas veces depende del proceso y sobre todo, de los costos de operación que esto conlleve.

### c) **Deflectores**

Son bandas planas verticales, colocadas radialmente a lo largo de la pared del tanque. Por lo general son cuatro deflectores, con anchuras comunes de  $1/10$  y  $1/12$  del diámetro del tanque. Su utilidad es aumentar la turbulencia y no permitir la formación de vórtice, aunque aumenta el consumo de potencia debido al esfuerzo de corte desarrollado por los deflectores (Perry, 1985).



#### d) Velocidad y potencia de rotación del impulsor

Los datos de velocidad se usan para calcular la circulación y descarga del impulsor, pero no se usan directamente para el diseño del tanque mezclador. Las velocidades de rotación para un impulsor se basan por lo común en pruebas o correlaciones de resultados obtenidos experimentalmente.

#### 4.2. Clasificadores mecánicos

##### 4.2.1. Clasificación

Es la operación de la separación de material granular en dos o más productos basado en la velocidad con la que las partículas caen en el seno del fluido (Alcalá, *et. al.*, 2008). Aunque también es definido como separación de las partículas según la rapidez de asentamiento en un fluido (Kelly, *et. al.*, 1990). En un medio viscoso, como el agua o el aire, existe resistencia al movimiento y su viscosidad se incrementa con la velocidad. Cuando se ha alcanzado el equilibrio entre la fuerza de gravedad y las fuerzas de resistencia del fluido, el cuerpo alcanza su velocidad terminal y después cae a una velocidad uniforme.

En la mayoría de los dispositivos de separación, los clasificadores producen dos productos. La corriente de respuesta positiva y la corriente de respuesta negativa, esta primera contiene partículas de asentamiento más rápido, como las arenas, producto de descarga inferior, además contiene por lo general poca agua, lo que implica que se separe la corriente del dispositivo por gravedad, por medios mecánicos y simple presión inducida.

La corriente de respuesta negativa es denominada derrame o lamas, la cual consta de partículas de asentamiento más lento en el agua restante, y en esencia se descarga como consecuencia del desplazamiento que sobre ella ejerce la alimentación.

Al hacer variar la fuerza efectiva de separación, la clasificación puede efectuarse también en etapas para dar lugar a productos intermedios o fracciones de cierto tamaño.

La clasificación se puede presentar de la siguiente forma:

- Separación en fracciones de tamaño relativamente grueso y relativamente fino.
- Efectuar una concentración de las partículas más pesadas y pequeñas de las partículas más grandes y ligeras.
- Dividir la distribución de tamaños de gran intervalo en fracciones.
- Restringir la distribución de propiedades de las partículas que van a entrar a un proceso de concentración.
- Controlar molienda en circuito cerrado.

Existe un parámetro denominado radio de asentamiento el cual se define como la razón de tamaño de dos partículas que tienen la misma velocidad terminal y se puede clasificar en:



- Asentamiento libre: Las partículas en un medio fluido, están presentes en una concentración menor al 15% con respecto al volumen total de la pulpa.
- Asentamiento retardado: Las partículas se mueven a una velocidad ligeramente menor a su velocidad máxima debido a la interferencia entre partículas, es decir, a medida que la cantidad de sólidos aumenta en la pulpa las partículas se interfieren unas con otras en sus movimientos de caída libre.

#### 4.2.2. Equipos de separación

Los clasificadores se caracterizan por dos aspectos que se sobreponen: el método de descarga del producto arenoso y el punto de referencia para el movimiento relativo agua/partícula.

Se han diseñado y construido muchos tipos de clasificadores y pueden agruparse en dos, dependiendo la dirección de la corriente del fluido:

- a) Clasificadores de corriente vertical: Son aquellos en los que se da un asentamiento retardado. Se caracterizan porque la separación de las partículas de acuerdo a sus tamaños se realiza en una corriente vertical de agua, la cual arrastra a las partículas pequeñas y deja sedimentar a las grandes.

Existe varios sistemas tales como:

- Clasificador de columnas (Elutriador)
  - Clasificador Fahrenwald
  - Clasificador Spitzkasten
  - Clasificador ondulado Rheax
  - Hidrociclón
- b) Clasificadores de corriente horizontal: Son aquellos en los que la clasificación se da por asentamiento libre. Se caracterizan porque la separación de las partículas se realiza en una corriente de agua horizontal, la cual arrastra a las partículas finas y deja sedimentar a las grandes. Además cuenta en un dispositivo mecánico para remover partículas de gran tamaño. Algunos ejemplos de estos clasificadores son:
    - Cono de asentamiento
    - Clasificador de rastrillos
    - Clasificador de espiral tipo Akins



### 4.3. Hidrociclón

A continuación se describen algunos de los usos, importancia, diseño y desarrollo del hidrociclón que revolucionó la industria minera en la separación de sólidos.

El primer sistema hidrociclónico fue patentado en el año de 1891 por Bretnei, poco más de un siglo, su aplicación principal fue de tipo industrial, cerca de los años 40. Los hidrociclones originalmente fueron diseñados para promover la separación sólido-líquido, pero actualmente suele usarse para sólido-sólido (Klima, *et. al.*, 1998), líquido-líquido (Capela *et. al.*, 1996; Smyth, *et. al.*, 1996) y separación gas-líquido (Marti, 1996). Se han planteado nuevas aplicaciones para la separación de microorganismos en fermentaciones y biodegradación (Yuan *et. al.*, 1996; Cilliers, *et. al.*, 1997).

Los ciclones son básicamente un cilindro vertical fijo, con una entrada tangencial en el borde superior para la alimentación, este tipo de sistemas son operados con suspensiones de sólidos y algunas veces con gases o líquidos. Se denomina hidrociclón al sistema que trabaja con suspensiones de sólidos con agua, ésta es inyectada a una velocidad y presión relativamente alta, utilizando la fuerza centrífuga para acelerar la sedimentación de las partículas.

La alimentación entra a alta velocidad, describiendo una espiral convergente hacia el centro hasta encontrar la salida, la trayectoria circular crea un campo de aceleración centrífuga donde las partículas sólidas son más densas que el líquido, se desplazarán radialmente hacia fuera hasta chocar con la pared y caer hacia la salida de fondo (descarga inferior).

Figura 4.2 (Lynch, *et. al.*, 1975).

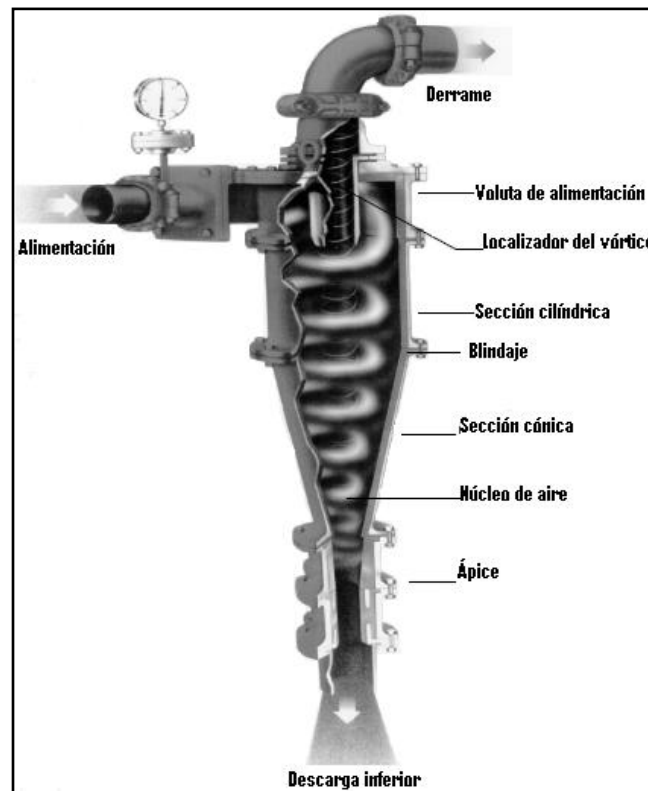


Figura 4.2.- Diagrama esquemático de un hidrociclón. (Krebs, 2009)

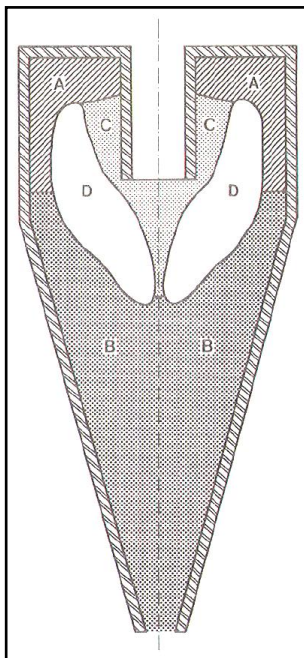


#### 4.3.1. Funcionamiento de un hidrociclón

Este se fundamenta en que la alimentación de la pulpa a suficiente presión, ingresa tangencialmente a la sección cilíndrica del hidrociclón por la parte superior. La fuerza centrífuga actuará sobre las partículas gruesas que son proyectadas siguiendo una trayectoria helicoidal hacia el extremo inferior de las paredes del hidrociclón y luego descienden, donde son colectadas y descargadas por el ápice (Kelly, *et. al.*, 1990). Mediante el efecto de la estrangulación del paso de la parte cónica inferior la pulpa rotante se separa en dos flujos, uno que se dirige a las paredes del ciclón y otro que asciende. De esta manera el material grueso o más pesado se concentra en las paredes, siendo expulsado por la parte inferior denominada ápice y el material más liviano por la parte superior llamado derrame. La gravedad específica juega un papel muy importante en la clasificación de las partículas, ya que controla la consistencia de la descarga del hidrociclón.

- a) *Entrada de material:* En esta parte se controla la entrada de material, la velocidad de la pulpa y tiene la finalidad de pre-orientar a las partículas a su punto tangencial de contacto con las paredes del cilindro.
- b) *Derrame:* Es otra parte importante en la operación, ya que es el más crítico y su tamaño tiene influencia en la presión para un volumen determinado y generalmente se tiene que entre más grande es su diámetro, mayor proporción de sólidos van al derrame y por el contrario, si el localizador del vórtice tiene un diámetro pequeño significa un derrame fino con baja concentración de sólidos. Para todo tipo de pulpa, debe buscarse un balance óptimo con una dilución permitida entre el localizador del vórtice más grande y la presión más baja posible para el objetivo que se desee.
- c) *Ápice:* Su función es descargar el suelo grueso, de tal forma que se obtenga su máxima densidad, por lo tanto debe ser de tamaño adecuado para permitir la máxima salida de suelo en la forma cónica.

#### 4.3.2. Zonas de operación de un hidrociclón



En la Figura 4.3 se muestra un mapa de las zonas de influencia en un hidrociclón.

*Zona A.*- Predomina la pulpa no clasificada en la parte estrecha adyacente a la pared cilíndrica del ciclón.

*Zona B.*- Esta zona ocupa gran parte del cono del hidrociclón y contiene una gran cantidad de partículas gruesas. La distribución del tamaño es prácticamente uniforme y es similar al producto que se obtiene en el ápice.

*Zona C.*- En esta zona existe una gran proporción de producto fino, ubicada alrededor del localizador del vórtice y se extiende por debajo de la parte posterior.

*Zona D.*- A través de esta región se da la clasificación radialmente, así el tamaño de las partículas disminuye al máximo al estar más cerca del eje del hidrociclón.

Figura 4.3.- Diagrama de zonas de influencia de un hidrociclón. (Renner, *et. al.*, 1978)



Se ha demostrado que a una caída de presión dada a través de un ciclón, un incremento en el diámetro del localizador del vórtice, da como resultado un punto de corte mayor y un incremento en la capacidad.

El tamaño de la abertura del ápice determina la densidad de la descarga inferior y deberá ser lo bastante grande para eliminar los sólidos gruesos que están siendo separados por el ciclón, además permite la entrada del aire a lo largo del eje del ciclón para estabilizar el vórtice (Renner, *et. al.*, 1978).

### 4.3.3. Patrones de flujo

La forma y tamaño de un hidrociclón tiene un efecto muy importante en la estructura del flujo interno de la fase continua, es decir, la separación o clasificación de la fase dispersa (Bradley, *et. al.*, 1959; Svarovsky, 1984).

El flujo generado en el remolino del hidrociclón genera una fase dispersa muy pesada que se mueve hacia el exterior y la fase dispersa más ligera se mueve hacia al centro. El flujo es una característica primordial para el funcionamiento correcto de un hidrociclón.

Cuando se estudian hidrociclones es necesario saber los grupos de números adimensionales de interés que expliquen cuantitativamente como se está llevando el flujo dentro del sistema (Castilho, *et. al.*, 2000); algunos de estos números se enuncian a continuación.

### Números adimensionales

En la operación de un hidrociclón se pueden considerar dos números de Reynolds. El primero es el de la partícula definido como  $Re_p$ , y las correlaciones para  $d_{50}$  tienden a indicar que ocurre un comportamiento de asentamiento laminar.

Es claro que también existe un  $Re$  para el hidrociclón mismo,  $Re_c$ , que comprende una dimensión característica del dispositivo. La relación normalmente adoptada es:

$$Re_c = \frac{D_c v_I \rho_I}{\mu} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde :

$D_c$  : Diámetro del hidrociclón (L)

$v_I$  : Velocidad de entrada al hidrociclón ( $LT^{-1}$ )

$\rho_I$  : Densidad de la pulpa ( $ML^{-3}$ )

$\mu$  : Viscosidad de la pulpa ( $ML^{-1}T^{-1}$ )

Los valores típicos para el funcionamiento de un hidrociclón se encuentran en el intervalo de  $10^4 - 10^6$ , los cuales implican un flujo turbulento en la alimentación tangencial del hidrociclón. Esto no significa que predomine la





turbulencia, ya que se sabe que las condiciones laminares pueden mantenerse a un Re más alto en los canales curvados (Kelly, *et. al.*, 1990).

Se ha encontrado, en efecto, que existe un **Rec óptimo de 10<sup>4</sup>**, abajo del cual predominan los efectos laminares y de transición, y superior a este valor los efectos predominantes son los centrífugos (Rietema, 1960).

El número de Stokes (Stk<sub>50</sub>) está definido de la siguiente manera:

$$Stk_{50} = \frac{[\rho_s - \rho] v [d'_{50}]^2}{18 \mu D_c} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde :

$\rho_s$  : Densidad de solido (ML<sup>-3</sup>)

$v$  : Velocidadde alimentación del hidrociclón (LT<sup>-1</sup>)

$\rho$  : Densidad del liquido (ML<sup>-3</sup>)

$\mu$  : Viscosidad de la pulpa (ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>)

$d'_{50}$  : Punto de corte reducido(L)

$D_c$  : Diametro del hidrociclón (L)

Existe otro numero adimensional que relaciona la caída de presión en el sistema y se denomina numero de Euler (Eu).

$$Eu = \frac{\Delta P}{[\rho v^2]^2} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde :

$\Delta P$  : Caída de presión (ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>)

$v$  : Velocidadde alimentación del hidrociclón (LT<sup>-1</sup>)

$\rho$  : Densidad del liquido (ML<sup>-3</sup>)

Los números adimensionales enunciados anteriormente muestran cuantitativamente las condiciones preferenciales del sistema de separación; donde el tamaño de partícula genera un equilibrio entre el derrame y la descarga inferior.

### Flujos generales

El patrón de flujo más significativo en un hidrociclón es la espiral dentro de otra espiral. La alimentación genera ambas espirales, las cuales giran en una misma dirección, la inversión de la velocidad se aplica solamente en la componente vertical.



En la Figura 4.4 se ilustran otras dos características del flujo en el hidrociclón. La primera es el lugar geométrico de la velocidad vertical *zero* y la segunda, que se eleva desde el ápice y pasa hacia afuera a través del localizador del vórtice, es el núcleo de aire, cuya presencia indica la estabilidad del vórtice.

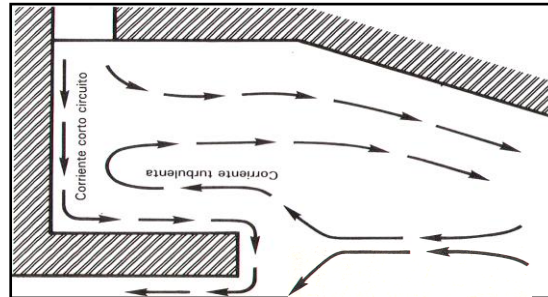


Figura 4.4.- Patrones de flujo en las regiones superiores de un hidrociclón (Bradley, *et. al.*, 1959)

La velocidad del líquido o de los sólidos en un punto cualquiera puede descomponerse en tres componentes; el vertical, el radial y el tangencial (Figura 4.5) (Kelly, *et. al.*, 1990).

### Velocidad vertical del líquido en un hidrociclón

El componente vertical de la velocidad de la corriente del líquido indica la magnitud de las dos espirales, y por lo tanto se relacionaron la distribución volumétrica del producto entre la descarga inferior y el derrame.

La característica más notable del componente vertical que aparece en la Figura 4.5, es el lugar geométrico o envolvente de la velocidad vertical *zero*. Abajo del localizador del vórtice, todo el líquido se desplaza hacia arriba dentro de la envolvente, y hacia abajo por el exterior de la misma (Castilho, *et. al.*, 2000).

### Velocidad radial del líquido

El componente de la velocidad radial es la corriente de líquido contra la cual deben asentarse las partículas a causa de la fuerza centrífuga si han de ser separadas en la parte inferior. La forma general de estas componentes se ilustra en la Figura 4.5 y se observa que va normalmente hacia el interior. Es la más pequeña de los tres componentes y aumenta hasta un máximo en la pared.

Las velocidades radiales situadas en la región que queda arriba de la base del localizador del vórtice deben tener fuertes corrientes orientadas hacia adentro a lo largo de la cubierta superior que resultan de las corrientes en corto circuito, y debajo de ésta, el componente puede estar orientado hacia fuera a causa de las corrientes turbulentas.

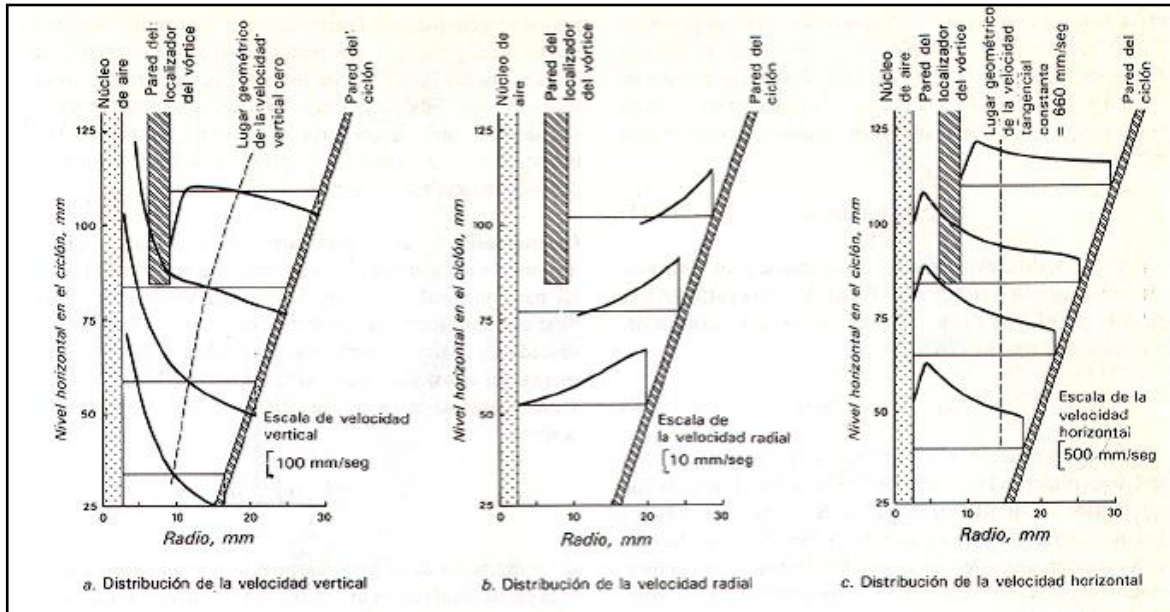


Figura 4.5.- Componentes de la velocidad de un hidrociclón (Kelsall, 1970).

### Velocidad tangencial del líquido

Abajo del localizador del vórtice, las envolventes de la velocidad tangencial constante son dos cilindros coaxiales situados dentro del hidrociclón y la velocidad es inversa. Aparentemente en la ecuación 4.4  $n$  depende principalmente de las variables de diseño que de las de operación. Los valores de  $n$  son típicamente de 0.4 a 0.9. (Kelsall, 1970). Esto debe compararse con la región exterior de un vórtice libre en donde el momento angular se conserva y la relación es:

$$v_{(t)} r^n = \text{constante} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde :

$v_{(t)}$  : Velocidad en un tiempo (t)

r : Distancia Radial

n : Exponente obtenido empíricamente

### 4.3.4. Correlaciones para el diseño de un hidrociclón

El comportamiento dentro de un hidrociclón es muy complejo y variable, a pesar de la simpleza del sistema mecánico. Las relaciones teóricas son inferiores a las empíricas, esto a consecuencia de las simplificaciones que deben hacerse en el desarrollo matemático y práctico. Es muy frecuente que con pulpas diluidas (<15%) pueden hacerse predicciones razonables del comportamiento del hidrociclón.

Es común que muchas de las correlaciones presentadas por varios autores procuren cubrir una amplia gama de



condiciones, las cuales, debido al gran número de variables que se relacionan generen un error considerable.

Las variables que afectan el rendimiento del hidrociclón pueden dividirse en dos grupos: las que dependen del tamaño y las proporciones del hidrociclón (variables de diseño), y las que son independientes del tamaño y de las proporciones (variables de operación). Las variables de diseño incluyen los tamaños de la alimentación, y las aberturas del localizador del vórtice y del ápice, el tamaño del hidrociclón y su forma (Kelly, *et. al.*, 1990). Las variables de operación dependen de la corriente de alimentación y comprenden las siguientes:

- Caída de presión (y rapidez de flujo de la alimentación)
- Concentración de los sólidos (o concentración de líquido -líquido)
- Tamaño y forma de los sólidos
- Densidades de los sólidos (o de los líquidos)
- Densidad media del líquido
- Viscosidad media del líquido

Debido a que muchas de estas variables ejercen interacción, no es posible considerarlas de manera individual. En vez de esto, se evalúa el rendimiento del hidrociclón en función de las correlaciones aplicando tres criterios: la curva de rendimiento (frecuentemente como una correlación para  $d_{50}$ ), la relación de derrame a descarga interior y la caída de presión.

### Correlaciones teóricas para $d_{50}$

El punto de corte al 50% denominado como  $d_{50}$  es el parámetro más importante para describir el rendimiento del hidrociclón, siendo equivalente a la abertura de una criba, se han hecho intentos para correlacionarlo con las variables de operación y de diseño.

Muchas de las relaciones teóricas utilizan la hipótesis de la órbita en equilibrio, es decir, equilibran la fuerza centrífuga que actúa hacia afuera contra la fuerza de arrastre debida al flujo de líquido entrante, lo cual resulta en la ecuación siguiente:

$$d_{50} = \left[ \frac{18\mu \cdot v_{(r)} r}{(\rho_s - \rho_l) v^2(t)} \right] \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde :

$v_{(r)}$  : Velocidad radial en el hidrociclón

$\rho_s$  : Densidad del sólido

$\rho_l$  : Densidad de la pulpa



Las ecuaciones finales derivadas de ésta difieren en cuanto a la suposición del lugar geométrico de velocidad cero. Una de las correlaciones más rigurosas (Bradley, *et. al.*, 1959) se basa en el lugar geométrico ilustrado en la Figura 4.4 en donde incorpora dos parámetros  $n$  y  $K_c$ .

$$d_{50} = 3(0.38)^n \frac{D_I^2}{K_c} \left[ \frac{\mu}{D_c I_v} \cdot \frac{(1 - R_{(+)} l)}{\rho_s - \rho_l} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Donde :

$d_{50}$  : Diámetro de corte, donde es el tamaño de la separación

$K_c$  : Parámetro que depende del diseño

$D_I$  : Diámetro interior de la entrada de alimentación

$D_c$  : Diámetro interior del hidrociclón

$I_v$  : Flujo volumétrico de la entrada

$R_{(+)}$  : Fracción de masa del líquido de la alimentación que sale por la descarga inferior

$\theta$  : Ángulo del cono del hidrociclón

Rietema (1960) afirma que el enfoque de la órbita en equilibrio no es válido porque supone que las partículas tienen suficiente tiempo para alcanzar las velocidades de equilibrio y que esto puede no ser cierto respecto a los tiempos cortos de residencia que ocurren en los hidrociclones. Su enfoque supone que la partícula de  $d_{50}$  es aquella partícula que comienza su recorrido en el centro de la admisión, y que apenas logra llegar a la pared en el ápice. La correlación se obtuvo considerando el movimiento de la partícula de  $d_{50}$  sobre la distancia  $DI$  en el tiempo de residencia disponible, suponiendo condiciones laminares. El segundo miembro de la ecuación es aproximadamente constante y se le llama el número característico del ciclón,  $Cy_{50}$ . En la práctica puede ser difícil de evaluar, pero aparentemente tiene un valor mínimo de alrededor de **3.5**, y puede considerarse que un hidrociclón "óptimo" es capaz de lograr dicha cifra.

En realidad, el movimiento de  $\frac{1}{2} DI$  de la partícula en equilibrio sólo se justifica si el producto de la descarga inferior es pequeño, la concentración de la pulpa es baja y si ocurre turbulencia insignificante.



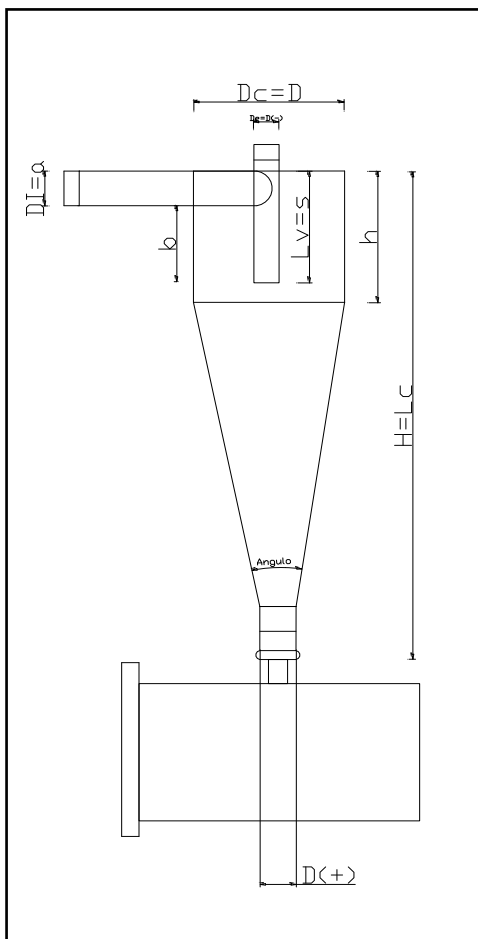
#### 4.3.5. Geometría del hidrociclón

Se mencionó anteriormente que existen dos tipos de variables que van a definir el comportamiento de un hidrociclón, y estas son las variables de operación y las variables de diseño.

Estas últimas son las que dependen del tamaño y las proporciones del hidrociclón y van directamente relacionadas con la geometría que se ajuste a la operación que se pretende realizar; en este caso se procurará alcanzar la máxima eliminación de agua de la pulpa generada en el lavado de suelos.

En el diseño de un hidrociclón el localizador del vórtice es una parte muy importante, ya que ésta pretende minimizar la corriente en corto circuito, como se aprecia en la Figura 4.4. Para lograr esto, el localizador del vórtice debe ser mayor que el lugar geométrico de la velocidad tangencial máxima para que las partículas grandes puedan ser arrastradas hacia afuera.

En el otro extremo, el localizador del vórtice no debe quedar fuera de la sección del manto del lugar geométrico de la velocidad vertical cero, ya que algunas partículas podrían entonces quedar sujetas a una velocidad radial hacia adentro en la sección cilíndrica, y ésta podría arrastrarlas hacia la corriente de derrame.



El análisis del diámetro de la alimentación no acepta la lógica con tanta facilidad, particularmente porque afecta tanto al  $d_{50}$  como a la caída de presión. Rietema (1960) sugiere que  $DI$  (y otras proporciones) pueden seleccionarse para un fin particular sobre la base de minimizar su  $Cy_{50}$  (Kelly, *et. al.*, 1990).

En general, para un hidrociclón no importa la variación de las proporciones. A continuación se muestra una configuración (Castilho, *et. al.*, 2000).

$$\begin{aligned}
 DI &= Dc/7 & \theta &= 10^\circ-30^\circ \\
 Lc/Dc &= 3 & D(-) &= Dc/5 \\
 Lv/Dc &= 0.4 & D(+) &= Dc/15
 \end{aligned}$$

Para identificar las proporciones que se indican en las diferentes estructuras de un hidrociclón, según las necesidades del proceso, se presentan en el siguiente esquema las dimensiones del hidrociclón, aunque muchos autores las han definido con diferente nomenclatura como se presenta en la Figura 4.6.

Figura 4.6.- Dimensiones de un hidrociclón



Se han propuesto muchas configuraciones por familias de hidrociclones, las cuales son representativas por el autor, como las que se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2.- Proporciones geométricas de dos familias de hidrociclones (Castilho, *et. al.*, 2000)

Hidrociclón	Di/Dc	D(-)/Dc	Lc/Dc	h/Dc	s/Dc	Angulo
Bradley	1/7	1/5	--	1/2	1/3	9º
Rietema	0.28	0.34	5	--	0.40	20º

Actualmente se han propuesto nuevas configuraciones que procuran el mezclado y la clasificación, tal como la que presenta en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3.- Proporciones geométricas para hidrociclón (Kelly, *et. al.*, 1990)

Hidrociclón	Di/Dc	D(-)/Dc	Lc/Dc	h/Dc	s/Dc	Angulo
Petty	1/5	2/5	--	4	2π/5	--

Los ángulos de cono más grandes son mejores para la clasificación, pero hay un límite superior debido a que ocasionan que el  $d_{50}$  aumente con una disminución de la capacidad de procesamiento. El efecto puede contrarrestarse parcialmente alargando la sección cilíndrica.

Si el hidrociclón se va a usar para operaciones de eliminación de agua, es conveniente que tenga unas proporciones ligeramente diferentes (Rietema, 1960):

$$\begin{aligned} DI &= Dc/4 & Lc/Dc &= 5 \\ D(-) &= Dc/3 & Lv/Dc &= 0.4 \end{aligned}$$

En la práctica se emplean también a menudo estas proporciones para la clasificación en molineta en circuito cerrado, porque las aberturas más grandes reducen la caída de presión. En el tamaño de la abertura ocurre un límite superior cuando la corriente de entrada comienza a incidir sobre el localizador del vórtice, es decir:  $2 DI + D(-) < Dc$

La entrada no debe estar abajo del centro del localizador del vórtice, y una entrada de involuta de forma rectangular contra la cubierta superior tiene ventajas sobre una entrada circular, si bien pueden no justificarse las complicaciones adicionales de manufactura y ajuste. En algunos casos, los diámetros de los tubos de entrada y del derrame deben ser mayores que el tamaño real de la abertura del hidrociclón, y en el caso de este último tubo, debe tenerse cuidado de evitar efectos de sifón que pudieran alterar los patrones de flujo dentro del hidrociclón.

La descarga inferior es normalmente una de tipo libre, y el tamaño de la abertura se ajusta por lo general de manera que satisfaga la aplicación. La apariencia de la descarga puede adoptar tres formas:

1.- "De remolino" o "de rociado", en la cual el sólido y el líquido se descargan en un rocío violento que adopta la forma de cono hueco. Esta se utiliza para obtener la máxima separación de sólidos.



2.- "De chorizo" o de "cable", en la cual la descarga es una espiral sólida giratoria, que representa el contenido mínimo de líquido.

3.- "De sobrecarga", en la cual la descarga es una corriente recta, sin gran energía y sin movimiento en espiral.

Si la abertura del ápice es demasiado pequeña, no es posible lograr la descarga completa del material de sobretamaño, lo cual tiene como consecuencia un acarreo de partículas al derrame. Si el tamaño del ápice es demasiado grande, la descarga inferior contendrá demasiada agua, y consecuentemente llevará consigo demasiadas partículas finas.

#### 4.3.6. Aplicaciones del hidrociclón

El hidrociclón es en extremo versátil, en cuanto a que puede usarse como espesador, clasificador y separador. En un tiempo relativamente breve se ha convertido en una pieza de equipo establecida para un gran número de procesos industriales, como en este caso, en la implementación del sistema de lavado de suelos asistido por surfactantes.

Es claro que este sistema de separación tiene desventajas, pero su implementación es consecuencia del claro dominio de sus ventajas.

Generalmente los hidrociclones son empleados para las siguientes operaciones:

- Espesamiento de pulpas de tamaño de grano muy fino, suspensiones, etcétera
- Deslame
- Clasificación selectiva
- Concentración o clasificación para enriquecimiento de fracciones finas de minerales pesados

Las ventajas principales de un hidrociclón se centran en torno a su sencillez, su tamaño reducido y el bajo costo en comparación con otros equipos de separación. Debido a que un hidrociclón produce una alta acción de corte, puede ser superior en el tratamiento de material floculado y de suspensiones de viscosidad aparente relativamente alta. Esto se ha atribuido a una dependencia de la viscosidad del líquido más que de la viscosidad de la pulpa, aunque algunos autores mencionan que puede ser debida a la capacidad del hidrociclón para vencer el esfuerzo cortante crítico que ocurre con las pulpas de Bingham de naturaleza plástica (Kichberg, *et. al.*, 1975). Algunas de las aplicaciones en minería, son los procesos de flotación para concentrar minerales de Pb, Cu, Zn, Ag, entre otros.

Actualmente se han utilizado para el tratamiento de procesos de recuperación de oro en los sulfuros refractarios, así como también en la concentración de bacterias en sistemas de lixiviación.





#### 4.4. Contaminación del Suelo

##### 4.4.1. Definición de suelo

El nombre de suelo se deriva de la palabra en latín “*solum*”, la cual significa piso o superficie de tierra. Es la capa más superficial de la corteza terrestre, resultado de la interacción de varios factores ambientales, tanto geológicos, fisiográficos, climáticos y biológicos con el material parental que proviene de la roca madre (Van, 2007).

Agentes físicos y biológicos, como lo son el aire, las escorrentías de agua, cambios de temperaturas, y reproducción de microorganismos, modifican en todo momento la estructura de la corteza terrestre, haciendo cambios en su superficie, con la finalidad de encontrar un equilibrio con la atmósfera, la hidrósfera, y la biósfera (Mirsal, 2004).

Los fragmentos de roca se entremezclan con restos orgánicos: heces, organismos muertos o en descomposición, fragmentos de vegetales, microorganismos, etcétera y con el paso del tiempo todos estos materiales se van estratificando y terminan por formar lo que se denomina suelo.

Existen varias clasificaciones de suelos para la determinación de la distribución de tamaño de partícula, en este caso se tomará en cuenta la clasificación del sistema de Mohr de 10 fracciones, que se presenta en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4- Distribución de tamaño de partículas (Mohr, et.al. 1959)

División del suelo	Tamaño (mm)	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )
Arena muy gruesa	2.00-1.00	2000-1000
Arena gruesa	1.00-0.50	1000-500
Arena mediana	0.50-0.20	500-200
Arena fina	0.20-0.10	200-100
Arena muy fina	0.10-0.05	100-50
Limo grueso	0.05-0.02	50-20
Limo	0.02-0.005	20-5
Limo fino	0.005-0.002	5-2
Arcilla	0.002-0.0005	2-0.5
Arcilla coloidal	<0.0005	<0.5

##### 4.4.2. Remediación fisicoquímica

Los tratamientos fisicoquímicos utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para transformar, separar o inmovilizar el contaminante. Son tratamientos económicamente factibles y la mayoría se encuentra disponible comercialmente, por lo cual, son las técnicas más empleadas para la remediación de diferentes matrices contaminadas con residuos peligrosos, metales e hidrocarburos desde hace décadas. Estas



tecnologías involucran una variedad de procesos tales como: mezclado, filtración, neutralización, sorción, absorción, evaporación y floculación, entre otros.

Aunque las tecnologías fisicoquímicas pueden desarrollarse “*in situ*” o fuera del sitio, la principal desventaja de su aplicación en la remediación de sitios contaminados con metales radica en que la mayoría requiere de la excavación del suelo y de al menos un proceso secundario de tratamiento o de disposición final del contaminante transformado, separado o inmovilizado, incrementándose los costos del tratamiento (Van, 2007).

#### **4.4.3. Lavado de suelos**

El lavado de suelos *in situ* y fuera del sitio es una tecnología, en la cual el suelo contaminado se excava y se lava con agua o soluciones de extracción en una unidad de lavado con el fin de disolver, suspender o precipitar el contaminante, lográndose así su transferencia a la fase acuosa. El lavado de suelos, a diferencia de la inundación, puede concentrar los contaminantes en un volumen menor de suelo, debido a la separación entre partículas finas y gruesas, reduciendo así el volumen del material contaminado (partículas finas).

#### **Descripción del proceso**

El proceso consiste de tres etapas: mezclado, lavado y enjuagado; el material contaminado se tamiza para retirar las partículas de mayor tamaño. Posteriormente, el suelo se adiciona a la unidad de lavado, en donde se mezcla y se lava con el uso de agua con o sin aditivos, en un proceso en lote o continuo. Al finalizar el lavado del suelo, la fase líquida se envía a una planta de tratamiento de aguas, mientras que la fase sólida se enjuaga nuevamente con agua limpia.

Durante el lavado de suelos en la unidad de mezclado los contaminantes son disueltos para después ser suspendidos en la fase acuosa y ser removidos con tratamientos secundarios. Se adicionan por lo general agentes químicos en la unidad de lavado que por lo general son solubles en agua con la finalidad de incrementar la eficiencia de la remoción del contaminante.

Agentes quelantes: Forman complejos solubles con iones metálicos. Uno de los más usados es el ácido etilendiamino tetracético (EDTA). Otros ácidos usados como agentes quelantes son los ácidos cítrico, málico y acético.

Ácidos y bases: Movilizan, neutralizan o transforman el contaminante. Las soluciones ácidas se aplican principalmente para incrementar la solubilidad de muchos metales, mientras que las alcalinas se usan para remover fenoles y metales ligados a la fracción orgánica del suelo.

Surfactantes: Sustancia que posee una actividad superficial o interfacial. Estas moléculas tienen propiedades relativamente equilibradas, ya que son hidrófilas e hidrófobas. Existen surfactantes aniónicos, catiónicos, zwitteriónicos, entre otros (Lange, 1999).



En la Figura 4.7 se esquematiza de forma muy general el proceso de lavado de suelos, referido a operaciones unitarias, como son: mezclado, lavado, enjuagado y por último **separación de las partículas**, con el fin de disponer de un suelo ya tratado.

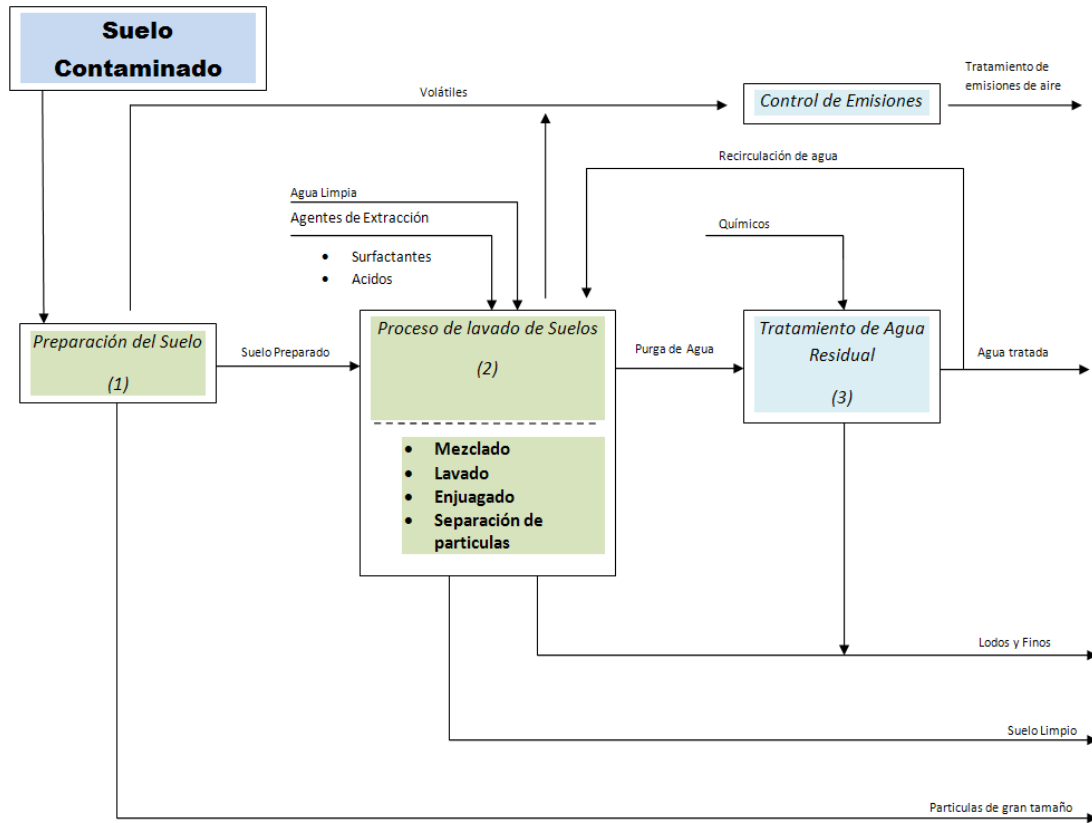


Figura 4.7.- Diagrama esquemático de los elementos de un proceso de lavado de suelos (U.S.EPA, 1991).

La U.S.EPA (1991) menciona que un alto porcentaje de la contaminación debida a compuestos orgánicos se encuentra principalmente en las partículas de suelo denominadas limos y arcillas, en este tipo de partículas la separación física de la arena y la grava de los finos aumentan la remoción de los contaminantes orgánicos, así como la separación de la fase solida de la solución de lavado. Este tipo de tecnología por lo general necesita de la conjunción de sistemas de tratamiento de agua y de lodos generados, ya que el consumo de agua es una variable que lleva implícito el tratamiento de lavado y una técnica correcta de la disposición del agua residual.

### Separación de partículas

La investigación realizada a partir del proceso de lavado de suelos, muestra que un gran porcentaje de la contaminación por compuestos orgánicos, esta contenida principalmente en los limos y las arcillas. Esta situación puede ser tratada después del lavado por medio de una separación física, ya que los tiempos de sedimentación son muy largos para este tipo de partículas, aunque se utiliza de la misma forma para gravas y arenas.



El lavado de suelos reduce significativamente el volumen de suelo contaminado. A raíz del mezclado, las arenas de tamaños mayores de 50-80 micras pueden ser fácilmente separadas de la solución de lavado debido a su alta velocidad de sedimentación, utilizando un arreglo de cámaras de sedimentación. La mayoría de las partículas finas permanecen suspendidas en el agua de lavado, estos procesos de sedimentación son lentos, pero factibles, al ser combinados con otros equipos (U.S.EPA, 1991).

#### 4.5. Normatividad Mexicana para suelos contaminados con hidrocarburos

La norma NOM-138-SEMARNAT-2003 se refiere a los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Esta norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para quienes resulten responsables de la contaminación con hidrocarburos en suelos. Su vigilancia del cumplimiento corresponde a la SEMARNAT por conducto de la PROFEPA (SEMARNAT, 2008). En la Tabla 4.5 se muestra claramente las fracciones que deberán analizarse si se llega a contaminar un suelo con un producto de refinación determinado.

Tabla 4.5.- Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante (Semarnat, 2008)

Producto contaminante	Hidrocarburos					
	Fracción pesada	HAPs	Fracción media	HAPs	Fracción ligera	BTEX
Mezclas	X	X	X	X	X	X
Petróleo crudo	X	X	X	X	X	X
Combustóleo	X	X				
Parafinas	X	X				
Petrolatos	X	X				
Aceites	X	X				
Gasóleo			X	X		
Diesel			X	X		
Turbosina			X	X		
Keroseno			X	X		
Creosota			X	X		
Gasavión					X	X
Gasolvente					X	X
Gasolinas					X	X
Gasnafta					X	X

En la Tabla 4.6 se observan los límites máximos permisibles para las diferentes fracciones del petróleo en el suelo, además se aprecia, que éstas son dependientes del tipo de suelo, que es clasificado según su uso.



Tabla 4.6.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo (Semarnat, 2008)

Fracción de hidrocarburos	Uso de suelo predominante (mg/kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Ligera	200	200	500
Media	1,200	1,200	5,000
Pesada	3,000	3,000	6,000

Igualmente se presenta en la Tabla 4.7 una lista de los límites máximos de hidrocarburos de tipo cancerígenos, presentes en un tipo de suelo determinado, aunque en este caso no se realizó un análisis del suelo en este rubro, por lo que solo se menciona.

Tabla 4.7.- Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo (Semarnat, 2008)

Hidrocarburos específicos	Uso del suelo predominante (mg/kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Benceno	6	6	15
Tolueno	40	40	100
Etilbenceno	10	10	25
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100
Benzo(a)pireno	2	2	10
Dibenzo(a,h)antraceno	2	2	10
Benzo(a)antraceno	2	2	10
Benzo(b)fluoranteno	2	2	10
Benzo(k)fluoranteno	8	8	80
Indeno(1,2,3-cd)pireno	2	2	10



## 5. METODOLOGÍA

En este capítulo se abordará lo relacionado con los métodos y técnicas aplicados tanto para la caracterización del suelo y la pulpa, necesarios para llevar a cabo el diseño y construcción del hidrociclón, con la finalidad de tratar de comprobar la hipótesis planteada en esta investigación y cumplir con los objetivos.

### 5.1. Origen del suelo

El suelo de estudio es un suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo (Figura 5.1), que proviene de la ex refinería 18 de Marzo ubicada en la Ciudad de México. La contaminación que presenta el suelo es debida a continuos derrames ocurridos mientras la refinería estuvo en operación, ya que actualmente se encuentra inactiva.



Figura 5.1.- Suelo contaminado

### 5.2. Caracterización del suelo

Para la caracterización del suelo se realizó la granulometría, contenido de agua, densidad aparente, densidad real y contenido de hidrocarburos fracción pesada de petróleo (HFP), todas estas técnicas se encuentran referidas a métodos que se plantean en la NOM-021- RECNAT-2000, en la NOM-138-SEMARNAT-2003 y en algunos métodos de la American Society of Testing and Materials (ASTM, 1998).

#### Granulometría

El objetivo de este análisis de tamaño de partícula, fue para determinar la distribución peso-tamaño de las partículas minerales elementales del suelo así como también definir la clasificación del suelo. Esta técnica permite determinar cuantitativamente la distribución de las partículas del suelo según su tamaño, determinado por la malla anterior y posterior. La prueba se realizó por medio de un método mecánico (ASTMD422-63), utilizando una serie de mallas (Apéndice A).



## Contenido de Agua

El contenido de agua tiene por unidad la masa y es directamente dependiente de los aportes externos de agua, de la capacidad de drenaje del suelo y de la evaporación (Seoánez, 1999). Generalmente se expresa en porcentaje y su medición es gravimétrica, es decir, por diferencia de pesos entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco.

El equipo que se utilizó para determinar el contenido de agua fue una balanza Ohaus MB200 (Figura 5.2), la cual utiliza un principio gravimétrico, en el cual con una fuente de calor, evapora el agua presente y muestra el porcentaje de humedad que va perdiendo de la muestra. En el apéndice A se describe el procedimiento para realizar esta determinación.



Figura 5.2.- Balanza para determinar contenido de agua

## Determinación de hidrocarburos fracción pesada (HFP)

La extracción en fase sólida tiene como finalidad, separar el contaminante de interés por medio de disolventes, en este caso los hidrocarburos fracción pesada presentes en la muestra de suelo.

La NOM-138-SEMARNAT-2003 sugiere la extracción de HFP por medio de soxhlet, sin embargo, en este caso se decidió emplear la técnica de extracción asistida por microondas, la cual presenta ventajas que han sido comprobadas en el Grupo de Saneamiento de Suelos y Acuíferos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Dentro de las más importantes, cabe destacar un menor consumo de solvente, un menor tiempo de extracción, una mejor purificación del extracto y por ende una mayor cuantificación de HFP (López, 2004).

Es por esto, que se decidió utilizar el método de extracción asistida por microondas para la determinación de HFP (Figura 5.3). El procedimiento es descrito en el apéndice A.

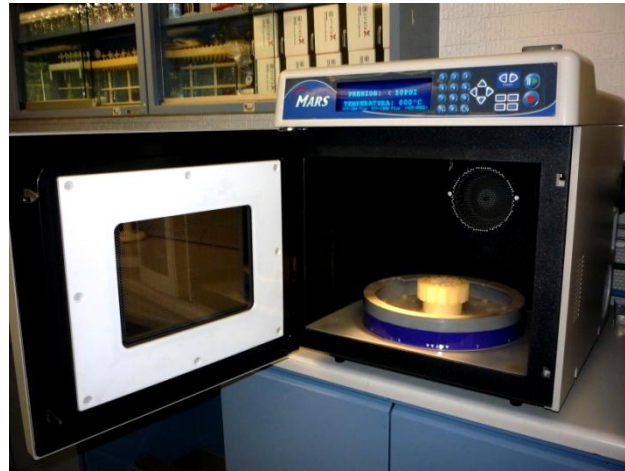


Figura 5.3.- Microondas para extracción de hidrocarburos fracción pesada

### Determinación de la densidad real

La densidad real de un suelo se calcula a partir del conocimiento de dos parámetros; la masa y el volumen de una cierta cantidad de suelo. La masa se determina pesando directamente el suelo y el volumen de manera indirecta por el cálculo de la masa y la densidad del agua (o cualquier otro fluido) desplazado por la muestra de suelo. Ver método en apéndice A.

### Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente refleja la masa de una unidad de volumen de suelo seco y no perturbado, para que incluya tanto la fase sólida como el aire dentro de ella. Es decir, se toma en consideración el volumen de los poros que existen en el suelo de estudio, además este valor permite establecer equivalencias entre las relaciones masa/masa y masa superficie. El método es descrito en el apéndice A.

### 5.3. Pruebas microcosmos para la elección del surfactante

De manera teórica es muy difícil predecir la remoción de los hidrocarburos que se pueden obtener con cada surfactante, debido a que el comportamiento del lavado depende de factores que son muy variables; como lo son las características químicas y físicas del suelo y las del contaminante. Por ello, es indispensable realizar pruebas experimentales para elegir un surfactante con el que se obtengan los mejores resultados.

Procedimiento.

- Se coloca una cantidad conocida de suelo, y se agrega agua a determinada concentración de surfactante, en viales de aproximadamente 40 ml de volumen. Los surfactantes utilizados se muestran en la Tabla 7.4, algunos de estos surfactantes fueron utilizados en trabajos anteriores (Climent, 2007), con la finalidad de seleccionar el





que proporcione mayor remoción y además conocer la afinidad iónica o no iónica del contaminante. La concentración de sólidos fue de 33% y 50% p/p, cabe mencionar que ambas concentraciones fueron arbitrarias, con la finalidad de conocer el comportamiento de la cantidad de agua en la remoción.

- Los viales se acomodan en un agitador de flecha, y son agitados durante 24 horas.
- Terminado el proceso, el suelo lavado se deja sedimentar durante dos horas para posteriormente retirar el agua y secarse durante tres días aproximadamente.
- Ya contando con el suelo seco, se procede a determinar el contenido de hidrocarburo fracción pesada y se calcula el porcentaje de remoción.

#### 5.4. Pruebas de Lavado

Las pruebas de lavado se llevaron a cabo mezclando el suelo de estudio a una concentración de sólidos con solución tensoactiva elegida en las pruebas microcosmos, es decir las condiciones de mayor remoción de contaminante. Con la finalidad de conocer las características del lodo generado que será tratado para separar y/o concentrar los sólidos en el hidrociclón, por lo que se propuso la siguiente metodología. Cabe mencionar que se llevó a cabo en un equipo de mezclado de características conocidas.

1. En la cuba de mezclado del equipo mecánico se coloca el suelo contaminado con la solución surfactante.
2. Se opera 15 minutos el equipo, con las siguientes características: velocidad: 96 rpm, un kilogramo de suelo y un litro de solución.

De esta manera, se procede directamente a alimentar la pulpa generada de este proceso al hidrociclón.

#### 5.5.- Caracterización de la pulpa de entrada al hidrociclón

##### Determinación de la densidad de un lodo

1. En un picnómetro de volumen exacto y conocido ( $V_p$ ). Se pesa vacío ( $W_p$ ).
2. Se llena el picnómetro en este caso del lodo generado después del proceso de lavado.
3. Se pesa nuevamente el picnómetro ( $W_{pl}$ ).

Cálculos

La densidad de un lodo se determina con la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad de lodo} = \frac{W_{pl} - W_p}{V_p} \quad \text{Ecuación 5.1}$$



## Determinación de la viscosidad de un lodo

La viscosidad es una propiedad de los fluidos que es de gran importancia en múltiples procesos industriales, además de ser una variable de gran influencia en las mediciones de flujo de fluidos, el valor de viscosidad se usa como punto de referencia en la formulación de nuevos productos, facilitando la reproducción de la consistencia de un lote a otro.

Procedimiento.

1. Se procede a preparar la pulpa a la concentración de sólidos usada en las pruebas de lavado, con la finalidad de reproducir la mezcla.
2. Se mezcla perfectamente, por aproximadamente 5 ó 10 minutos, con ayuda de un equipo mecánico.
3. Se procede a colocar la mezcla en la cuba del reómetro para iniciar las corridas de medición de la viscosidad.
4. Se comienza con velocidades bajas del reómetro, tomando lecturas cada 2 minutos.
5. Se repite esto para tener un duplicado que nos permita comparar los resultados y definir una viscosidad promedio.

### 5.6.- Pruebas de separación de sólidos

La separación de las partículas se realizó mediante el hidrociclón, el cual fue necesario adaptar a un sistema de bombeo, y se muestra en la Figura 7.15. A continuación se describe la forma de llevar a cabo la separación.

1. Agregar el agua requerida y cantidad de surfactante para lograr la concentración de 0.5 % p/p, en el tanque mezclado, además debe de estar encendida la bomba de recirculación, para lograr la homogeneización de la mezcla.
2. Agregar y mezclar el suelo con la finalidad de lograr la concentración de sólidos requerida.
3. Se enciende la bomba para alimentar el hidrociclón a un flujo y concentración de sólidos definida, cabe mencionar que el flujo estará definido por la válvula de alimentación.
4. Se obtienen muestras del derrame y del ápice a los cinco minutos de operación del sistema, para su posterior tratamiento.
5. Se deja sedimentar aproximadamente por una hora las muestras del derrame y el ápice, para después ser separadas y hacer análisis posteriores.
6. Se descarga el tanque de almacenamiento y se procede a efectuar otra corrida.



## 6. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para aplicar un modelo estadístico se analizaron varias posibilidades, como lo fueron el cuadrado latino, diseño factorial entre otros, y se decidió que el diseño que más se acoplaba era el de bloques completamente aleatorizado o también conocido como RCBD (randomized complete block desing).

En cualquier experimento la variabilidad que surge de un factor perturbador puede afectar los resultados, ya que este factor de diseño es probable que tenga un efecto sobre la respuesta, pero en el cual no existe un interés específico, ya que en muchas ocasiones es desconocido e incontrolable.

Se sabe que la aleatorización es una técnica de diseño que se utiliza para protegerse de los efectos perturbadores. La formación de bloques es una técnica de diseño en extremo importante que se utiliza ampliamente en la experimentación industrial.

Supóngase que se tienen  $a$  tratamientos que van a compararse y  $b$  bloques. El diseño de bloques completamente aleatorizados se muestra en la Figura 6.1. Hay una observación por tratamiento en cada bloque, y el orden en que se corren los tratamientos dentro de cada bloque se determina al azar. La única aleatorización de los tratamientos se hace dentro de los bloques (Montgomery, 2008).

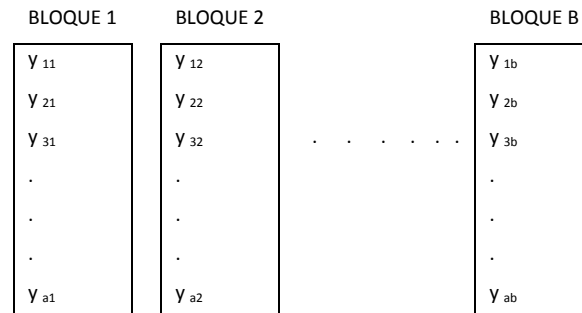


Figura 6.1.- Diseño de bloques completamente aleatorizados

El modelo estadístico del RCBD se define de la siguiente manera.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij} \quad \{i = 1, 2, 3, \dots, a \quad |j = 1, 2, 3, \dots, b\} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde:

$\mu$ : Media global

$\tau$ : Efecto del tratamiento i-ésimo

$\beta$ : Es el efecto de bloque j-ésimo

$\epsilon$ : Término del error NID

Se considera inicialmente que los tratamientos y los bloques son factores fijos. Se usa el modelo de las medias para el RCBD.

$$y_{ij} = \mu_{ij} + \epsilon_{ij} \quad \{i = 1, 2, 3, \dots, a \quad |j = 1, 2, 3, \dots, b\} \quad \text{Ecuación 6.2}$$



Donde  $\mu_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j$ . Sin embargo, en el experimento en que se utilice RCBD, el objetivo es probar la igualdad de las medias de los tratamientos. Por lo tanto las hipótesis de interés son:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a \quad \text{Ecuación 6.3}$$

$$H_1 = \text{al menos una } \mu_1 \neq \mu_j$$

Al expresar simbólicamente las sumas de cuadrados:

$$SS_T = SS_{\text{Tratamientos}} + SS_{\text{Bloques}} + SS_E \quad \text{Ecuación 6.4}$$

Puesto que existen  $n$  observaciones  $SS_T$  tiene  $N-1$  grados de libertad. Hay  $a$  tratamientos y  $b$  bloques, de donde  $SS_{\text{Tratamientos}}$  y  $SS_{\text{Bloques}}$  y tienen  $a-1$  y  $b-1$  grados de libertad, respectivamente.

Debido a que con frecuencia el supuesto de la normalidad es cuestionable, considerar como una prueba F exacta para la

$$F_0 = \frac{MS_{\text{Bloques}}}{MS_E} \quad \text{Ecuación 6.5}$$

igualdad de las medias de los bloques no es una buena práctica en general. Es por esta razón que la prueba F no se incluye en el análisis de varianza. Sin embargo como procedimiento aproximado para investigar el efecto de la variable formación de bloques, examinar el cociente  $\frac{MS_{\text{Bloques}}}{MS_E}$  es muy razonable. Si este cociente es muy grande, implica que el factor formación de bloques tiene un efecto considerable y que la reducción del ruido obtenida para la formación de bloques probablemente fue inútil para mejorar la precisión de la comparación de las medias de los tratamientos. El procedimiento puede resumirse en un esquema de análisis de varianza como el que se muestra en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1.- Análisis de varianza de un diseño de bloques completamente aleatorizados

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_0$
Tratamientos	$SS_{\text{Tratamientos}}$	$a-1$	$\frac{SS_{\text{Tratamientos}}}{a-1}$	$\frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_E}$
Bloques	$SS_{\text{Bloques}}$	$b-1$	$\frac{SS_{\text{Bloques}}}{b-1}$	
Error	$SS_E$	$(a-1)(b-1)$	$\frac{SS_E}{(a-1)(b-1)}$	
Total	$SS_T$	$N-1$		

### 6.1. Aplicación de diseño de bloques completamente aleatorizado en la operación del hidrociclón

Para realizar un diseño de experimentos es necesario tomar en cuenta varios factores, los cuales van a estar relacionados al diseño, construcción y operación del sistema. A continuación, se enuncian los factores que influyen en proceso de separación de partículas.



VARIABLES DE DISEÑO:

- Derrame
- Alimentación
- Localizador de vórtice
- Sección cilíndrica
- Diámetro del hidrociclón
- Sección cónica
- Ángulo de cono

VARIABLES DE OPERACIÓN:

- Caída de presión en el sistema
- Flujo de alimentación de pulpa
- Concentración de sólidos en la alimentación
- Tamaño y forma de sólidos
- Densidad de sólidos y líquidos
- Densidad Media de líquidos
- Viscosidad media de líquidos

PARÁMETROS DE RESPUESTA

- Distribución del tamaño de partícula
- Eficiencia del hidrociclón
- Concentración de sólidos en derrame y ápice

En la Tabla 6.2 se presenta la distribución de bloques y tratamientos, para llevar a cabo la experimentación con el hidrociclón fabricado.

Tabla 6.2.- Arreglo de experimento

Concentración de sólidos (% p/p)	Flujos (lpm)		
	Bloque 1.- 150	Bloque 2.- 200	Bloque 3.- Máximo
Tratamiento 1.- 20	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>
Tratamiento 2.- 30	Y <sub>21</sub>	Y <sub>22</sub>	Y <sub>23</sub>



## 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 7.1.- Caracterización del suelo

El suelo de estudio proviene de una zona contaminada en la ex Refinería 18 de Marzo, en la cual se realizaban operaciones relacionadas con la actividad petroquímica, tales como refinación de crudo. Por lo que para su caracterización se evaluaron diferentes propiedades, tales como; la granulometría, el contenido de agua, la densidad aparente, la densidad real, la concentración de hidrocarburos tanto fracción pesada, media y ligera. En la Figura 5.1 se puede apreciar parte del suelo empleado en el tratamiento.

#### Granulometría

Para determinar este parámetro se empleó el método ASTM D42263 (Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, 1998) donde se define la distribución de tamaño de partícula, y por ende el tipo de suelo de estudio. A continuación se presenta la curva granulométrica (Figura 7.1) generada a partir de los datos obtenidos del análisis granulométrico que se muestra en el apéndice 10.2, realizado en el laboratorio.

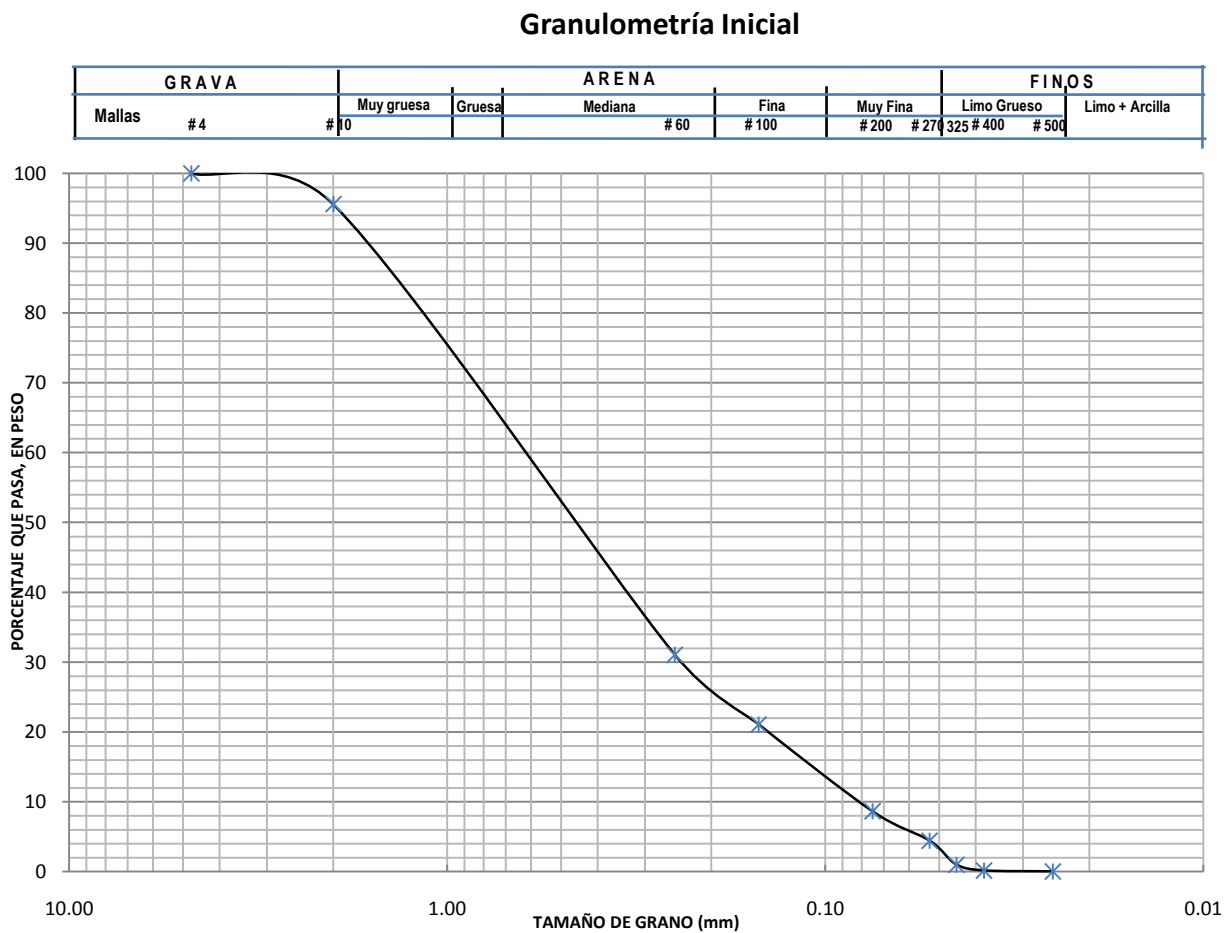


Figura 7.1.- Curva granulométrica de suelo de estudio



Adicionalmente se calculó, el coeficiente de uniformidad y de curvatura, en el apéndice 10.1, se muestra la descripción de cómo obtener estos valores:

Cálculos.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.6}{0.075} = 8 \quad \text{Ecuación 7.1}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} = \frac{(0.25)^2}{0.6 \cdot 0.075} = 1.38 \quad \text{Ecuación 7.2}$$

Tanto con la curva granulométrica, como el coeficiente de uniformidad y de curvatura, y los porcentajes de las diferentes fracciones del tamizado del suelo de estudio, se puede definir que el tipo de suelo es una **arena bien graduada con finos** (ASTM, 1998). Cabe mencionar que el contenido de finos es de aproximadamente el 3%, entre limo y arcilla, ya que como se puede observar en la curva granulométrica el valor es prácticamente despreciable.

Indudablemente al momento de ser sometido el suelo a un lavado mecánico, el contenido de finos se verá modificado de manera considerable, incrementándose este porcentaje, consecuencia del esfuerzo cortante y choque de las partículas en el sistema.

### Concentración de hidrocarburos

Al llevar a cabo la caracterización del suelo se midieron varios parámetros, tales como las características físicas y químicas. En la Tabla 7.1 se muestran los valores obtenidos de contaminación por hidrocarburos del petróleo, estos valores están referidos a los métodos de muestreo y de caracterización de la NOM-138-SEMARNAT-2003.

Tabla 7.1.- Contaminación en suelo de estudio

No	Descripción	% Contenido de Agua	Hidrocarburos fracción pesada HFP (mg/kg)	Hidrocarburos fracción media HFM (mg/kg)	Hidrocarburos fracción ligera HFL (mg/kg)
1	Suelo Inicial	2	12,536	6,633	1,157
2	Duplicado	2	15,002	6,620	1,124

Los resultados que se obtuvieron del suelo de estudio fueron comparados con los límites máximos permisibles que establece la norma NOM-138-SEMARNAT-2003 para un uso de suelo industrial, donde se determinó que tanto la fracción pesada, media y ligera se encuentran por arriba de los límites. Se realizó un duplicado de este análisis con la finalidad de comparar ambos datos y generar una concentración promedio.



## Características químicas del suelo

Con lo que respecta a la determinación de los parámetros del suelo de estudio, se puede enunciar la densidad real y aparente del suelo, la cual se presentan en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2.- Densidad del suelo de estudio

No	Descripción	Densidad aparente (g/ml)	Densidad Real (g/ml)
1	Suelo Inicial	0.9368	2.2220
2	Duplicado Suelo inicial	0.9381	2.3984

Como se puede observar en ambas determinaciones de la densidad real y aparente, los valores obtenidos fueron congruentes con la distribución de partículas obtenida en la granulometría, ya que por lo general para suelos arenosos la densidad real varía entre 1 – 1.3 g/ml (Maderey, *et. al.*, 2005).

Estos valores serán requeridos para realizar el diseño del hidrociclón, ya que se ven influenciados su operación y diseño en gran parte por las características del suelo. También se realizó una determinación de algunos componentes químicos como el nitrógeno total, orgánico y amoniacal, ya que estos parámetros son importantes para conocer la relación que existe entre el carbono (Tabla 7.3). (Cabe mencionarse, que este análisis se realizó en un laboratorio externo al Instituto de Ingeniería).

Tabla 7.3.- Determinación de nitrógeno en el suelo

Compuesto	Suelo Inicial (mg/kg)	Duplicado suelo inicial (mg/kg)
Nitrógeno Amoniacal	8.1	8.7
Nitrógeno Orgánico	602.9	751.2
Nitrógeno Total	611.0	759.9





## 7.2.- Pruebas preliminares de lavado

### Elección del surfactante

El lavado de suelos es una técnica fisicoquímica en la cual se busca desorber, remover, trasladar o secuestrar el contaminante de la fase sólida a la fase líquida, es por esta razón que se utilizan agentes químicos para lograr este fin. Esta técnica requiere de una perfecta elección de surfactante, ya que las características de este agente van a determinar la remoción del contaminante en el suelo; para ello se llevaron a cabo lavados con diferentes surfactantes para elegir el de mayor remoción y continuar con las pruebas a mayor escala.

Los surfactantes se eligieron según su naturaleza y cabe mencionar que algunos se han utilizado en trabajos anteriores dentro del Grupo de Saneamiento de Suelos y Acuíferos del Instituto de Ingeniería, mostrando resultados satisfactorios (Galindo, 2006; Climent, 2007; Doroteo, 2008). En la Tabla 7.4 se muestra las características de los tipos de surfactantes utilizados.

Tabla 7.4.- Características de los surfactantes utilizados en este estudio

Surfactante	Nombre Químico	Naturaleza	P.M. (g/mol)	CMC (mg/l)	HLB	Costo (\$/Kg)
Brij 72	Polietilenglicol	No iónico	359	NR	NR	26.33
Surfactol 203	Sulfosuccinato de dioctilo y sodio	Aniónico	444.57	NR	NR	40
Tween 60	Polietilenglicol sorbitan monostearato	No iónico	474	NR	NR	23.10
Tween 20	Polisorbato	No iónico	1228	9000	NR	23.76
Polafix Lo	Oxido de Lauril Dimetil Amina	No iónico	229.4	NR	NR	28.40
Surfactol A	Ester fosfatado	Aniónico	NR	NR	NR	65.00
Tween 80	Monoleato de sorbitán Poe=20	No iónico	1310	65.4	15	23.32
Brij 35	Lauril éter Poe=23	No iónico	1206	39.6	16.7	26.33
Brij 58	Cétil éter Poe=20	No iónico	1122	84.15	15.6	32.45
Emulgin 600	Nonil Fenol Poe=6	No iónico	483	45.06	11	NR
Emulgin 1000	Nonil fenol Poe=10	No iónico	660	49.5	13.5	NR
Texapon 40	Lauril éter sulfato de sodio	Aniónico	442	1458	4	16.35
Surfactol G	NR	Aniónico	NR	NR	NR	NR
Polafix CAPB	Propil coco-amida betaína	Zwitteriónico	359	100400	NR	28.20

NR.- No registrado en bibliografía o no proporcionado por el fabricante. P.D.E.- Cadena de Polioxietilado.

P.M.- Peso Molecular. CMC.- Concentración Micelar Crítica. HLB.- Balance Hidrofílico Lipofílico

Teniendo las características de los surfactantes se procedió a realizar pruebas a una concentración de suelo, conocida a las mismas condiciones de operación.

Para el lavado microcosmos se procedió a llevar a cabo dos relaciones, que consideran un 50% y un 30% de sólidos, debido a que se requiere que entre menor cantidad de agua utilizada se reduzcan los costos de operación.

Se reportan pruebas de lavado en las cuales se llegan a utilizar hasta un 60% de líquido, dando resultados confiables para la determinación del surfactante (Torres, *et. al.*, 2006), a continuación se presentan las dos relaciones que se emplearon en este trabajo.

- **(R1) Relación 1: 5 g de suelo con 10 ml de mezcla de agua con surfactante.**
- **(R2) Relación 2: 5 g de suelo con 5 ml de mezcla de agua con surfactante.**



Las constantes en el proceso de lavado fueron la concentración de surfactante, la cual fue del 0.5 % p/p, se eligió esta concentración a consecuencia de que en una investigación anterior se lograron remociones de cerca del 90% de hidrocarburos fracción pesada (Doroteo, 2008), durante 24 horas de agitación, y a temperatura y presión (referidas a Ciudad de México). En la Figura 7.2 se observa el sistema de pruebas de tratabilidad de lavado de suelos.

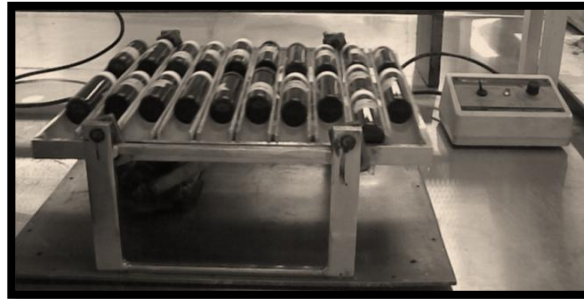


Figura 7.2.- Sistema de Agitación utilizado en las pruebas de tratabilidad de lavado de suelos

Con estos parámetros controlados se procedió a realizar el lavado, dejar secar el suelo y a determinar la concentración de hidrocarburo fracción pesada contenida en el suelo al final del proceso. En el apéndice B se muestran los resultados de remoción obtenidos en dos diferentes proporciones de contenido de agua en una Tabla resumen. En la Figura 7.3 se muestra de manera gráfica el comportamiento de los diferentes surfactantes en las dos relaciones anteriormente planteadas.

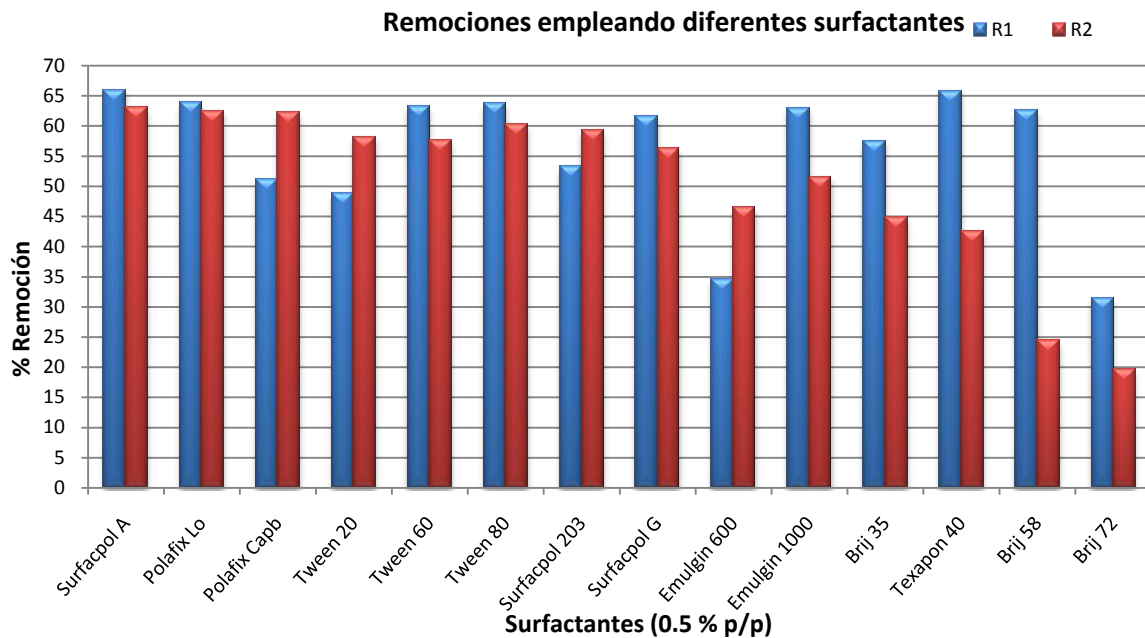


Figura 7.3.- Porcentaje de remoción de HFP, por surfactante

Se puede observar que los mayores porcentajes de remoción, no rebasaron el 66%, por lo que se hizo la siguiente discriminación:



**Para R1:**

**Surfactol A = 66% > Texapon 40 = 65.8 % > Polafix Lo = 63.9 % > Tween 80 = 63.7% > Tween 60 = 63.2 > Brij 58 = 62.6 %**

**Para R2:**

**Surfactol A= 63% > Polafix Lo = 62.5% > Polafix Capb = 62.2% > Tween 80 = 60.2 %.**

La decisión de utilizar el tween 80, fue debido a que su costo oscila entre los \$23.32/kg, mientras que el surfactol A oscila entre los \$65/kg. Cabe resaltar que los surfactantes que tuvieron un mejor rendimiento en la operación de lavado fueron los no iónicos, es decir existe una mayor afinidad al contaminante, para contar con una información mayor de los costos se recomienda observar la Tabla 7.4. Cabe mencionar que el tween 80 es un surfactante que ha dado muy buenos resultados en remoción de hidrocarburos en suelos con finos, de aproximadamente el 60% en lavado fuera del sitio, además con la técnica "in-situ" se ha observado una remoción de hasta un 50% (Leyva, 2006).

Se sabe que los compuestos no polares, tales como hidrocarburos, la solubilización se realiza en el interior lipofílico de las micelas. Las cuales pueden convertirse en microgotas de varios centenares de Angstroms, recubiertas de una capa surfactante (Salager, 1993). Estas estructuras son denominadas microemulsiones, tienen la finalidad de solubilizar una considerable cantidad de hidrocarburos. Es por esta razón que se da la transferencia del contaminante de la fase sólida a la fase líquida, y esto se ve reflejado en cuanto la concentración de surfactante decrece por debajo de la concentración micelar crítica, y por ende la desaparición de las micelas libera los aditivos que estas últimas solubilizan, y se produce una separación de fases, que resulta en una turbidez o una precipitación.

### 7.3.- Pruebas de Lavado

Las pruebas de lavado que se realizaron con el suelo de estudio fueron hechas con una concentración de sólidos y de solución tensoactiva conocida que se describen en la Tabla 7.5, con la finalidad de obtener las características del lodo generado que se tratara para separar los sólidos de los líquidos en el hidrociclón o en su defecto hacer una concentración de finos.

En esta prueba se utilizó una mezcladora de tipo vertical con las siguientes características.

- Volumen de cuba de 10 l
- Velocidad desarrollada en la flecha igual a 96 rpm
- Tipo de impulsor: Impulsor cerrado de diámetro de 15 cm

Se realizaron las siguientes pruebas (Tabla 7.5), con variantes diversas, las cuales generarán una diferente remoción de Hidrocarburos Fracción Pesada (HFP), cabe mencionar que se eligieron dos surfactantes que mostraron las mejores remociones en el sistema microcosmos, como fue el caso del surfactol A y tween 80; este segundo reporta la literatura que es un surfactante que se degrada en poco tiempo (Galindo, 2006), además se ha demostrado que el uso de surfactantes reduce la adhesión de las bacterias en la superficie hidrofóbica, dando como resultado una baja actividad de biodegradación de hidrocarburos, fue por esto que algunos investigadores recomiendan la utilización de surfactantes fácilmente biodegradables como el Brij 30, Brij 35 y el **Tween 80** (Ghosh; Abiola, *et. al.*, 1997).



Tabla 7.5.- Condiciones de operación de pruebas de lavado

Prueba	Surfactante	Concentración de surfactante (p/p)	Concentración de sólidos.	Cantidad de solución (l)	Tiempo de mezclado (min)	Remoción de HFP
1	Surfacpol A	0.5	50%	1	15	41
2	Tween 80	0.5	50%	1	15	35
3	Tween 80	0.5	50%	1	15	38

Como se puede observar, las remociones para los dos surfactantes evaluados no varían en grado significativo, por lo que no es posible hacer una discriminación del surfactante o de las condiciones de operación, cabe mencionar que estas se eligieron arbitrariamente, ya que el fin de esta experimentación fue la de generar el lodo que se tratara en el sistema de separación, por lo que la siguiente parte que se realizó fue la caracterización de la pulpa.

Aunque en un grado estricto el surfacpol A logró tener la mayor remoción de HFP, el tween 80 solamente removió un 38%, que en variación es casi despreciable, considerando los costos de ambos surfactantes que difieren en casi tres veces.

#### 7.4.-Caracterización de la pulpa de entrada al hidrociclón

##### *Granulometría*

Se realizó una determinación de la granulometría del suelo generado después del lavado mecánico, en la Figura 7.4 se puede apreciar el suelo ya seco y disgregado listo para ser tamizado, el equipo empleado para tamizar se presenta en la Figura 7.5. En la literatura se reporta que el esfuerzo cortante ocasionado en el mezclado, genera que se incremente el contenido de finos (Doroteo, 2008) es por esta razón, que se decidió hacer la distribución de tamaño de partícula del lodo generado.



Figura 7.4.- Suelo después de lavado mecánico



Figura 7.5.- Equipo y mallas para tamizado

A continuación en la Figura 7.6 se presentan las curvas granulométricas de suelo inicial y después de haber sido sometido a un proceso de lavado de suelos.

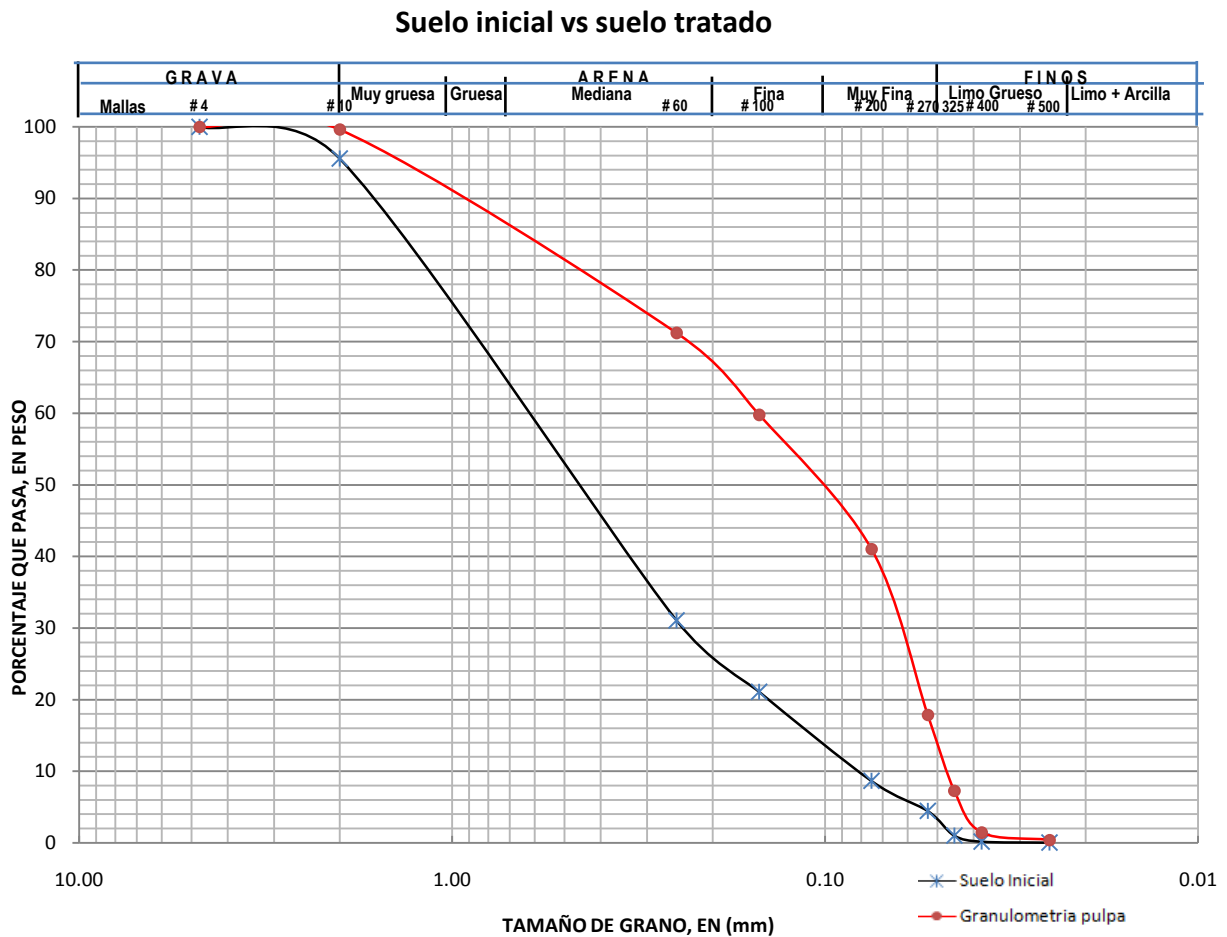


Figura 7.6.- Curvas granulométricas de suelo inicial y suelo tratado



En la Figura 7.6 se aprecia que la distribución de tamaño de partícula tiene en mayor concentración a la arena mediana, que son partículas de entre 0.5 – 0.2 mm, aunque los limos y las arcillas son cerca del 5% del total del suelo inicial. En contraste se muestra la curva granulométrica del suelo ya tratado por un lavado mecánico, en el cual se puede evidenciar que el incremento de finos fue de un 5% a un 12 %, que indudablemente ya es un valor significativo y que de alguna forma repercutirá en la separación de las partículas. Además la disminución de tamaño de partícula es muy evidente en las arenas, ya que de ser partículas de 0.5 mm pasan a ser partículas de hasta 0.1 mm, este fenómeno se debe en gran medida al esfuerzo de corte que genera el impulsor con respecto a la mezcla a tratar, así como también los continuos choques entre las paletas del impulsor y las paredes de la cuba mezcladora.

### Determinación de la densidad de la pulpa

Los resultados de la determinación de la densidad de la pulpa generada por el mezclado, se observan en la Tabla 7.6. Cabe mencionar que este valor es muy cercano a la densidad del agua, consecuencia de los efectos emulsificantes y plastificantes de la arcilla, de igual forma interviene el surfactante agregado ya que modifica la tensión superficial del agua y dependiendo de la concentración puede generar micelación y esto repercutir en las propiedades del lodo.

Tabla 7.6.- Densidad del lodo

Material	Densidad real (g/ml)
Lodo	P1.- 1.3290
	P2.- 1.3616

### Determinación de la viscosidad del lodo

Se determinó la viscosidad de la pulpa generada del mezclado del suelo contaminado con la solución surfactante, esto se realizó con un reómetro marca Fann rheometer (model 286). Las determinaciones se hicieron a 300 RPM, como lo recomienda el fabricante y a temperatura y presión constante, se tomaron varias lecturas a diferentes tiempos, decidiéndose tomar la viscosidad media como la representativa del proceso.

*VISCOSIDAD DE PULPA.- 0.5 g/cm.seg*

En la Figura 7.7 se muestra el reómetro en operación. Los parámetros obtenidos son necesarios para llevar a cabo la simulación, diseño y construcción del hidrociclón.



Figura 7.7.- Reómetro Fann en operación



## 7.5.- Diseño y simulación de hidrociclón

Para realizar el diseño del hidrociclón se recurrió a la revisión de la literatura que se presentó en el capítulo de marco teórico, donde el autor que obtuvo resultados confiables siendo situaciones similares a la del tema de estudio en la operación de hidrociclones es Vieira, *et. al.*, 2005, con un diseño tipo Rietema, por lo que se recurrió a este tipo de configuración empleando el programa Aspen Plus, que se basa en ecuaciones empíricas generadas por el diseñador.

### 7.5.1.- Generalidades del simulador.- Aspen Plus

Para la simulación se utilizó un software denominado Aspen Plus; que es una paquetería que suele emplearse para una gran variedad de modelado de procesos industriales, químicos, petroquímicos y de refinación. Este programa además contiene una librería de modelos de las operaciones unitarias que permite ajustarlo y acoplarlo a procesos más complejos.

Aspen Plus proporciona un marco de optimización en tiempo real, llevando un control de los procesos y una correcta toma de decisiones. Además contiene un módulo de separación de sólidos con diferentes equipos, entre ellos se encuentra el **Separador de sólidos - Hidrociclón**, en donde a continuación se describen sus características y bondades.

### Separador de sólidos – Hidrociclón

Este módulo de separación de sólidos que ofrece Aspen Plus, es la simulación de varios equipos, en este caso el de referencia es el hidrociclón, que es un equipo que aprovecha la fuerza centrífuga para separar una mezcla de sólidos de líquidos. En la Figura 7.8 se muestran los equipos que pueden ser simulados en el módulo de sólidos.

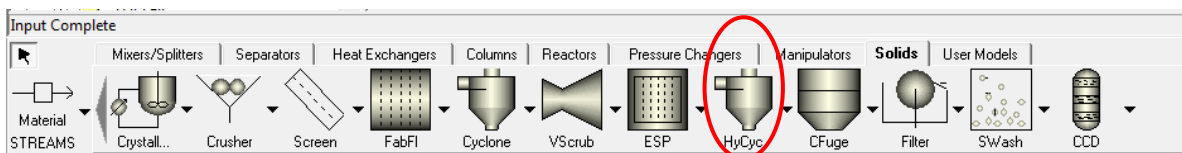


Figura 7.8.- Equipos del módulo de separación de sólidos

Permite usar dos modos de operación, el modo rating y el modo sizing, en el primero es necesario que el usuario especifique el diámetro del hidrociclón y por ende el modelo calculará el diámetro de la partícula en el cual se obtiene un 50 % de eficiencia, mejor conocido como el diámetro de corte 50. Con lo que respecta al modo sizing el usuario especifica la distribución de tamaño de partícula y la eficiencia requerida para el proceso, y por ende el modelo arroja el diámetro requerido del hidrociclón.

En ambos modos de cálculo, la caída de presión es determinada por el usuario, ya que el sistema así lo requiere, en la bibliografía se plantea que existe una caída de presión en el equipo de no mayor del 10% de la presión que ejerce la bomba (Bousso, 1990).



## Rangos de operación

El modelo HyCyc usa correlaciones empíricas y semiempíricas, por lo que los resultados pueden ser poco confiables cuando las condiciones de operación están fuera de los márgenes experimentales en que se basan los modelos; de manera general los datos deben encontrarse en los siguientes rangos:

- Diámetro de partícula entre 5 a 200 micrómetros
- Diámetro de hidrociclón entre 0.01 y 0.6 metros
- Caída de presión entre 35 y 345 kPa
- Eficiencia de separación entre 2% y 98%
- La concentración de sólidos debe ser menor al 40% de fracción en peso

## Ecuaciones de diseño

Las ecuaciones de cálculo que usa dicho programa para el cálculo de la eficiencia de separación son las siguientes.

$$E = \frac{\text{Flujo másico de sólidos (descarga inferior)}}{\text{Flujo másico de sólidos (derrame)}} \quad \text{Ecuación 7.3}$$

La reducción de la eficiencia está definida por la fracción de sólidos en la alimentación que se derrama por el localizador del vórtice, menos la fracción del líquido en la alimentación que se va a la descarga inferior.

$$E' = \frac{E - R_f}{1 - R_f} \quad \text{Ecuación 7.4}$$

Donde  $R_f$  es la fracción volumétrica en la descarga inferior para la alimentación.

La eficiencia reducida se obtiene con la siguiente ecuación;

$$E' = 100 \left\{ 1 - \left[ \exp \left[ \frac{d}{d_{50}} - 0.115 \right]^3 \right] \right\} \quad \text{Ecuación 7.5}$$

Donde:

$d$ : diámetro de las partículas.

$d_{50}$ : diámetro de partícula para la cual el 50% de la alimentación se obtendrá en la descarga inferior.

La ecuación que relaciona el diámetro de corte 50%, fue obtenida de la teoría que presenta Bradley en sus diseños, y la cual se enuncia a continuación.

$$\frac{d_{50} D_c}{D_i^2} = \frac{3(0.38)^n}{\alpha} \left\{ \frac{\mu D_e (1 - R_f)}{Q(\sigma - \rho)} \tan \frac{\theta}{2} \right\}^{0.5} \quad \text{Ecuación 7.6}$$





Donde:

Q: Flujo volumétrico en la alimentación

Dc: Diámetro del hidrociclón

D<sub>i</sub> : Diámetro de la entrada

n: Potencia de R es función de la distribución de la velocidad tangencial

α: Coeficiente de pérdida de velocidad en la entrada

σ: Densidad real del sólido

R<sub>f</sub>: Flujo en la alimentación

θ: Ángulo cónico del hidrociclón

ρ: Densidad del líquido

μ: Viscosidad del líquido

Las dimensiones mínimas y máximas que maneja el programa para el diseño de hidrociclones se aprecian en la Tabla 7.7.

Tabla 7.7.- Rangos de dimensiones de hidrociclón usadas en Aspen Plus

Dimensión	Mínimo	Máximo
Diámetro de entrada	1/7	1/3
Longitud	4	12
Diámetro del localizador del vórtice	1/8	1 / 2.3
Diámetro del ápice	1/10	1/5
Angulo de cono	9°	20°

A continuación se presenta un diagrama tomado de Aspen Plus, para conocer la nomenclatura de las dimensiones del hidrociclón y que deben ser tomadas en cuenta para su diseño y construcción.

Donde:

Dc: Diámetro del cuerpo del hidrociclón.

Di: Diámetro de la entrada de alimentación.

Do: Diámetro del localizador de vórtice.

Du: Diámetro del ápice.

L: Longitud del hidrociclón.

Θ: Angulo cónico.

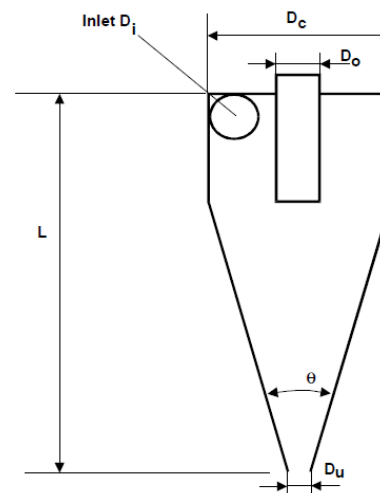


Figura 7.9.- Diagrama de dimensiones de hidrociclón en Aspen Plus



### 7.5.2.- Desarrollo de diseño y simulación de hidrociclón

Para realizar cualquier diseño es necesario tener caracterizada la alimentación, por lo que anteriormente se presentaron los resultados de la caracterización de la pulpa y del suelo que ingresará al hidrociclón. A continuación se presentan en la Tabla 7.8 los datos necesarios para realizar el diseño del hidrociclón.

Tabla 7.8.- Datos necesarios para el diseño del hidrociclón

Datos	Valores	unidades
Densidad real suelo	2.31	g/cm <sup>3</sup>
Densidad aparente del suelo	0.94	g/cm <sup>3</sup>
Densidad del lodo	1.35	g/cm <sup>3</sup>
Viscosidad del lodo	0.50	g/cm.seg
Densidad del agua	1.00	g/cm <sup>3</sup>
Flujo de entrada	0.2	m <sup>3</sup> /min
% sólidos	30	%

La configuración propuesta por Rietema (1961) para máxima eliminación de agua fue la siguiente:

$$D_i/D_c=0.28, \quad D_o/D_c=0.34, \quad L/D_c=5 \quad \text{ángulo de } 20^\circ.$$

Con ella, se realiza la simulación en el programa Aspen Plus, donde lo primero es generar el diagrama de flujo de proceso en el cual es necesario proporcionar las condiciones de operación. A continuación se presenta la Figura 7.10, con sus tres corrientes.

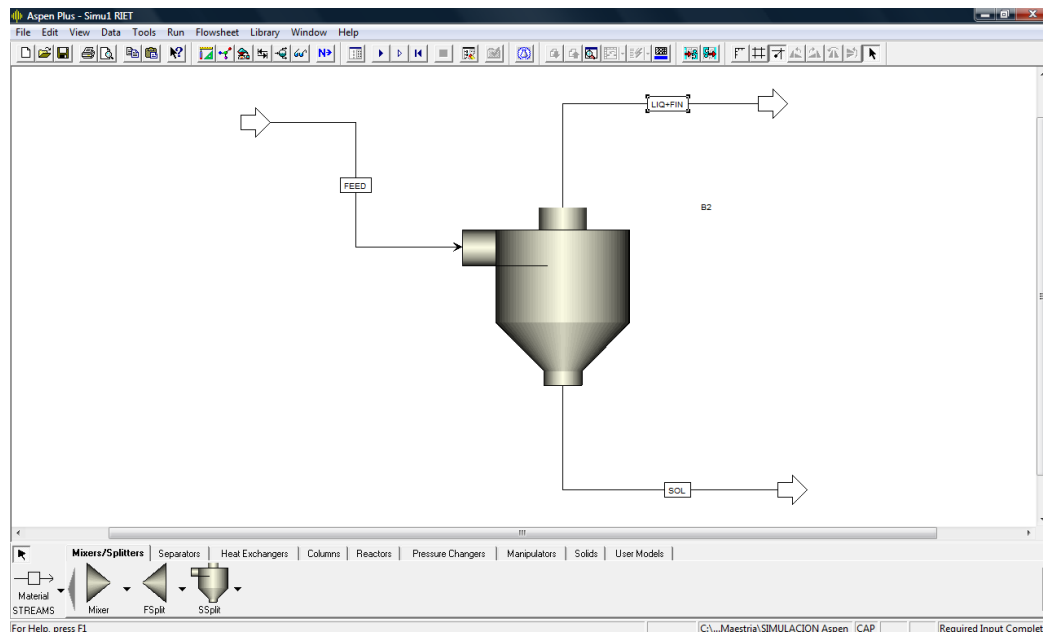


Figura 7.10.- Diagrama de proceso de separación de sólidos

Adicionalmente, es necesario introducir las condiciones de operación que regirán el proceso como se observa en el menú de la Figura 7.11. Principalmente las características de la pulpa, condiciones de operación (flujo, presión, temperatura), el tipo de simulación y sobre todo las corrientes de entrada y salida del proceso.

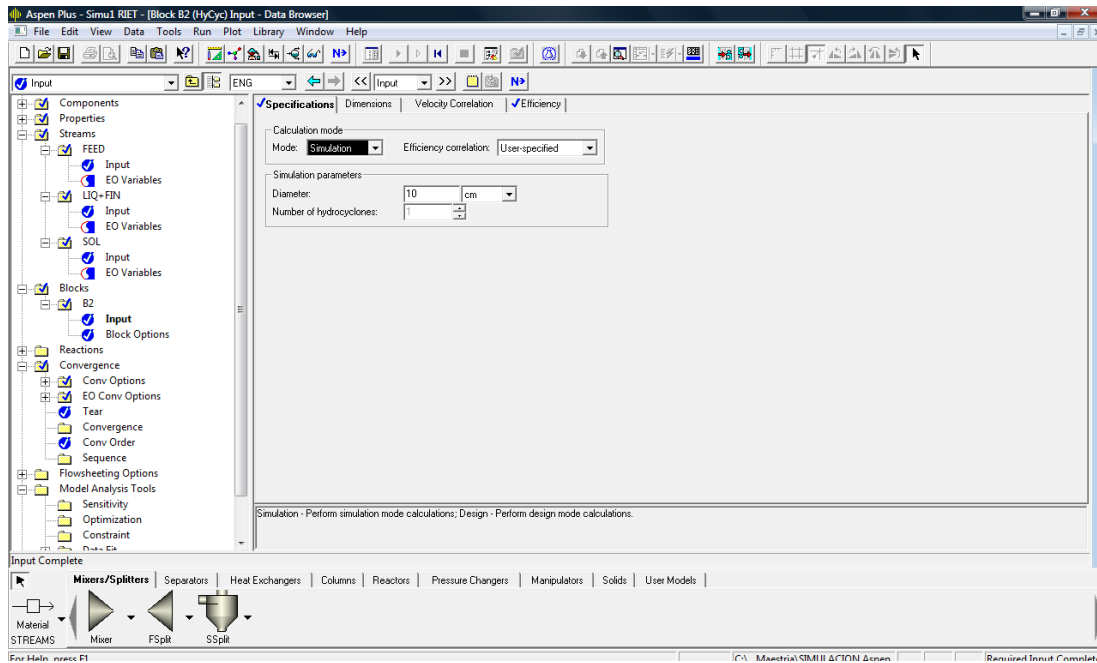


Figura 7.11.- Menú de condiciones para la simulación del proceso

En la Figura 7.12 se muestran las condiciones de operación en la alimentación del hidrociclón, donde se puede resaltar el flujo, la temperatura, la concentración de sólidos y la presión de la bomba, en este caso.

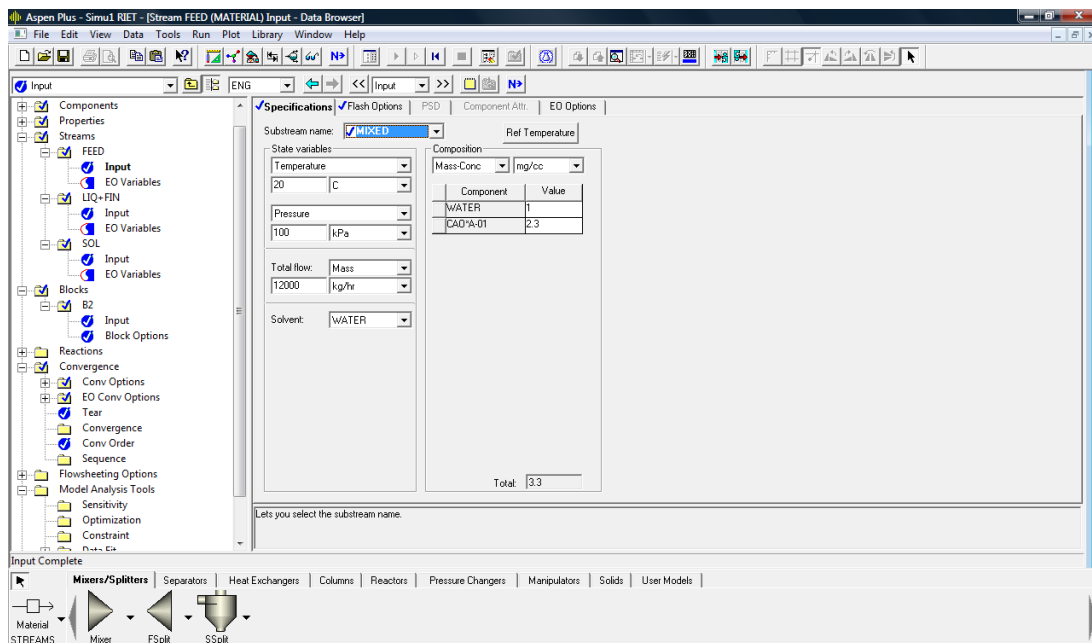


Figura 7.12.- Datos solicitados en las corrientes del proceso de separación de sólidos

Es necesario realizar cálculos de dimensionamiento del hidrociclón, por lo que se recurrió al diseño propuesto por Rietema (1961), donde el máximo aporte del sistema es la separación del agua, de la pulpa.



Tabla 7.9.- Resultados de la configuración del hidrociclón

Rietema		Eliminación de Agua		
Dimensión	Valor	Unidad	Descripción	
DI	0.03	m	Diámetro interior de la entrada de alimentación	
D(-)	0.03	m	Diámetro interior del localizador del vórtice	
D(+)	0.02	m	Diámetro interior del ápice	
Lc	0.50	m	Longitud del hidrociclón	
Lv	0.04	m	longitud de localizador del vórtice	
Área alimentación hidrociclón	0.0006	m <sup>2</sup>		
Velocidad alimentación	324.81	m/min		
Reh	14566.20		Turbulento	

En la Tabla 7.9 se presentan los resultados obtenidos tanto de la configuración, como de las condiciones de operación usadas en el dimensionamiento del hidrociclón, además de calcularse la eficiencia esperada según la distribución de tamaño de partícula obtenida en la granulometría de la pulpa generada del mezclado, donde se aprecia que el diámetro de corte es de aproximadamente 0.1 mm, la cual se presenta en la Tabla 7.10.

Tabla 7.10.- Distribución de la eficiencia del hidrociclón por tamaño de partícula

Diámetro de partícula (mm)	Eficiencia
4.76	1.00
2	1.00
0.85	0.98
0.6	0.96
0.425	0.93
0.25	0.81
0.15	0.61
0.075	0.28
0.062	0.21
0.053	0.16
0.044	0.12
0.037	0.09
0.025	0.04

Tabla 7.11.- Configuración final de hidrociclón

Dimensión	Valor (cm)
b	1.20
DI	2.80
D(-)	3.40
D(+)	1.61
Angulo $\Theta$	20°
Lc	50.00
Lv	4.00
h	14.00
Dc	10.00

Después de realizar los cálculos y considerando un diámetro de hidrociclón fijo en todo momento se obtuvo la configuración que se presenta en la Tabla 7.11. Con estos datos del dimensionamiento del equipo se procedió a su diseño físico y construcción. Al tener esta configuración se procedió a realizar el modelo para delimitar las dimensiones y tener una visión gráfica del sistema de separación, por lo que a continuación se presenta el modelo de hidrociclón en dos perspectivas para observar sus dimensiones con mejor detalle (ver Figura 7.13).

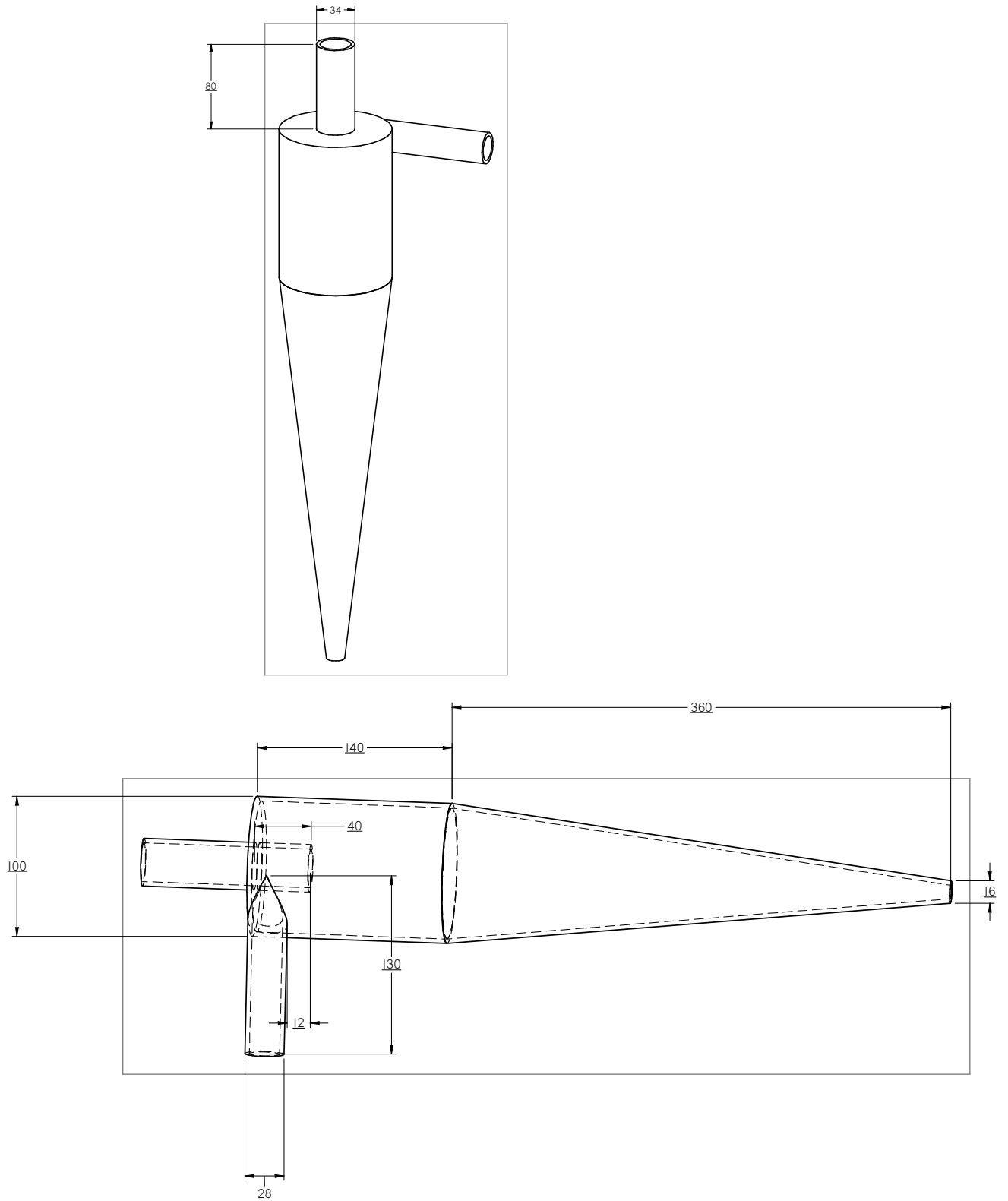


Figura 7.13.- Diseño final de hidrociclón en dos perspectivas (unidades en mm).



## 7.6.- Construcción del Hidrociclón y adaptación de sistema

Después de tener el diseño del hidrociclón (Figura 7.13), se inició su fabricación con las siguientes especificaciones de tubería (Tabla 7.12). Cabe resaltar que el rolado que se hizo fue diferencial, con el fin de lograr la estructura cónica del hidrociclón, ya que partió de una tubería de 4 pulgadas de diámetro, y se realizaron cortes diferenciales para lograr el ángulo del cono requerido.

Tabla 7.12.- Especificaciones de tubería

Parte Hidrociclón	Especificaciones
Alimentación	Tubo de acero al carbón 1", cedula 40, Presión de operación 15 kg/cm <sup>2</sup>
Cuerpo	Tubo de acero al carbón 4", cedula 40, Presión de operación 15 kg/cm <sup>2</sup>
Localizador del vórtice	Tubo de acero al carbón 1", cedula 40, Presión de operación 15 kg/cm <sup>2</sup>

Además para la alimentación se construyó una voluta interna en forma de espiral en la parte superior del hidrociclón con la finalidad de propiciar una mayor entrada tangencial y una mejor centrifugación. A continuación en la Figura 7.14 se aprecia una fotografía del hidrociclón.



Figura 7.14.- Hidrociclón Físico

Teniendo el hidrociclón rolado se procedió a realizar la alineación y conexión del sistema con el tanque mezclador, donde las partes fueron:

- Tanque de mezcla (1500 l)
- Bomba de mezclado
- Bomba de alimentación a hidrociclón



- Hidrociclón
- Válvulas

Estas partes son fundamentales en el proceso de separación de partículas, ya que de ellas depende la eficiencia del hidrociclón, por lo que se plantearon diferentes formas para realizar las conexiones de las líneas, que son las que a continuación se mencionan:

- Alimentación
- Derrame
- Descarga inferior

En la Figura 7.15 se muestra una fotografía del sistema, con el cual se realizaron las pruebas de separación de sólidos y se observan todos los elementos que fungirán en la operación.

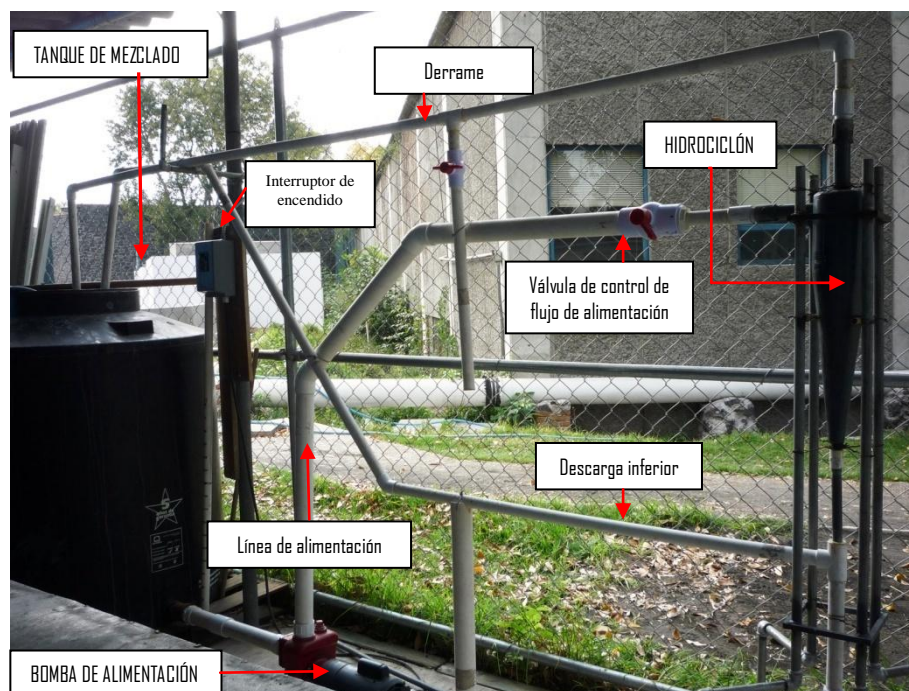


Figura 7.15.- Estructura de sistema experimental

El sistema instalado tiene el objetivo de reproducir el fenómeno de separación de sólidos por fuerza centrífuga, generada por el bombeo y el hidrociclón, cabe resaltar que tanto la línea del derrame como de la descarga inferior son recirculadas al tanque mezclador con la finalidad de mantener el volumen de pulpa constante, ya que las muestras serán tomadas de ambas líneas. A continuación se muestran las especificaciones tanto de la bomba de alimentación como de la bomba de recirculación, cabe mencionar que la eficiencia eléctrica de los motores según el fabricante es del 80%.



Figura 7.13.- Especificaciones de bombas

Elemento	Potencia (HP)	Tipo de impulsor	Presión a la descarga (kg/cm <sup>2</sup> )	Diámetro de entrada (in)	Diámetro de descarga (in)
Bomba de alimentación	2	Abierto	2.5	2	2
Bomba de mezclado	0.5	Cerrado	0.8	0.5	0.5

El sistema montado tiene como objeto llevar a cabo las pruebas de funcionalidad, separación y concentración de sólidos del agua de lavado. En el inciso 7.7 se presentan los resultados de la separación de partículas.

### 7.7.- Pruebas de separación de partículas

La separación tiene como finalidad concentrar la mayor cantidad de sólidos en la descarga inferior, y la menor en el derrame, aunque en algunos casos se genera una clasificación que separa partículas por tamaños, densidad de las partículas y otros factores que generan un efecto significativo en la separación de las fracciones de tamaño relativamente grueso y relativamente fino. Es por esto que se decidió trabajar a diferentes condiciones para observar la distribución de tamaño de partículas tanto en el derrame como en la descarga inferior, así como también la concentración de sólidos en la descarga inferior, planteándose el siguiente arreglo experimental como se aprecia en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14.- Arreglo experimental

Variable	Flujo 1: Máximo	Flujo 2: 200 lpm	Flujo 3: 150 lpm
Concentración sólidos 1: 20% p/p	<b>1.- DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTICULA</b> <b>2.- CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS</b> <b>3.- EFICIENCIA DEL HIDROCICLÓN</b> <b>DE</b> <b>A) DERRAME</b> <b>B) DESCARGA INFERIOR</b>		
Concentración sólidos 2: 30% p/p			

Teniendo las variables a modificar en la experimentación se procedió a comenzar pruebas de bombeo con agua únicamente, con la finalidad de calibrar la válvula de alimentación, la cual se puede observar en la Figura 7.15.

Se puede apreciar en la Tabla 7.16 que el flujo máximo que proporciona la bomba de alimentación del hidrociclón es de 238 lpm a una presión de 2.5 kg/cm<sup>2</sup>, condiciones de operación mínimas propuestas en la simulación del sistema.





### Variación de flujo

Tabla 7.15.- Monitoreo de la bomba de mezclado

No. evento	Tiempo (s)	Volumen (l)	Tiempo (min)	Flujo (l/min)
1	10.28	7.90	0.1713	46.11
2	7.90	6.75	0.1317	51.27
3	7.60	5.85	0.1267	46.18
4	6.71	5.35	0.1118	47.84
5	6.78	5.40	0.1130	47.79
6	6.63	5.65	0.1105	51.13
7	7.06	5.60	0.1177	47.59
8	6.72	5.21	0.1120	46.52
Promedio				48.05

Tabla 7.16.- Monitoreo de la bomba de alimentación

No. evento	Flujo (l/min)
1	260.16
2	245.41
3	225.30
4	211.81
5	229.11
6	246.16
7	244.59
8	250.94
9	232.66
10	242.56
Promedio	238.87

Un hidrociclón al ser sometido a operación tiene implícita una caída de presión con respecto a la presión que ejerce la bomba de alimentación y la presión de salida del sistema, es por esta razón que se han generado varios modelos numéricos con respecto a esta pérdida por fricción.

Wang, *et. al.*, 2006, explica por medio de un modelo numérico que para un flujo líquido-sólido la distribución de la caída de presión en un hidrociclón, es función del diámetro del localizador del vórtice. En la Figura 7.16 se observan las caídas de presión según el diámetro del localizador del vórtice, por lo que se espera que para un diámetro de 30 mm dimensionado en el hidrociclón experimental es de aproximadamente de 0.46 kg/cm<sup>2</sup>. Con esta premisa se corrobora que la bomba dimensionada fácilmente podrá abatir esta presión en el diseño construido en esta tesis.

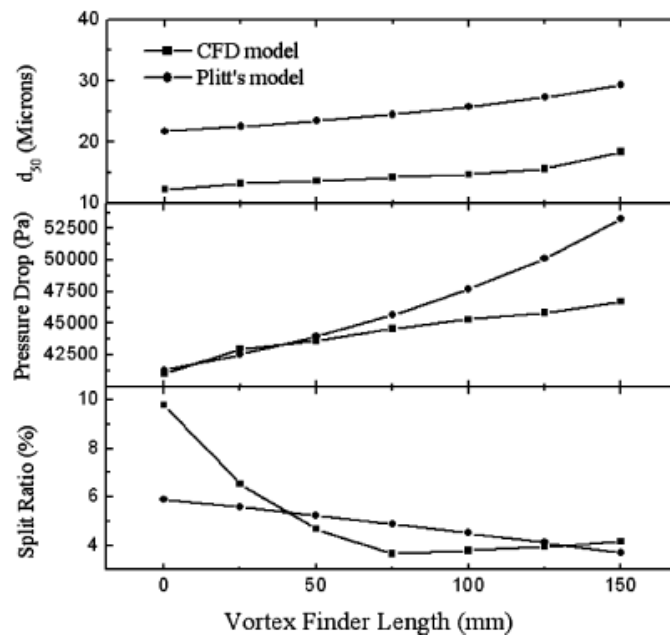


Figura 7.16.- Grafica de caída de presión (Wang, *et. al.*, 2006)



La medición del flujo en la descarga inferior y derrame se pueden apreciar en las Tablas 7.17 y 7.18, en ambas corrientes la variación es muy baja, aunque se recurrió a obtener un promedio que represente la medición de manera general.

Tabla 7.17.- Monitoreo del flujo en la descarga inferior a flujo máximo

No. evento	Tiempo (s)	Volumen (l)	Tiempo (min)	Flujo (l/min)
1	5.40	6.70	0.09	74.44
2	5.80	6.90	0.10	71.38
3	5.44	6.40	0.09	70.59
4	6.06	6.80	0.10	67.33
5	5.53	6.58	0.09	71.39
6	5.94	6.95	0.10	70.20
7	4.84	5.40	0.08	66.94
8	5.35	6.55	0.09	73.46
9	6.00	6.17	0.10	61.70
10	5.58	6.10	0.09	65.59
Promedio				69.30

Tabla 7.18.- Monitoreo del flujo en el derrame a flujo máximo

No. evento	Tiempo (s)	Volumen (l)	Tiempo (min)	Flujo (l/min)
1	2.94	9.10	0.05	185.71
2	2.31	6.70	0.04	174.03
3	3.63	9.36	0.06	154.71
4	3.97	9.56	0.07	144.48
5	3.50	9.20	0.06	157.71
6	3.41	10.00	0.06	175.95
7	3.31	9.80	0.06	177.64
8	3.82	11.30	0.06	177.49
9	2.72	7.75	0.05	170.96
10	2.57	7.58	0.04	176.96
Promedio				169.57

En las dos tablas anteriores se muestra la variación de flujo de la descarga inferior y el derrame generado por el bombeo de un impulsor abierto, el cual tiene la finalidad de aceptar una mezcla de concentración alta de sólidos y de diámetros variables. Se puede observar esta distribución en la granulometría presentada en la grafica 7.6.

Los flujos que se manejan en el derrame en promedio son de 169 l/min, mientras que en la descarga inferior de 69 l/min, casi 2.5 veces de diferencia, consecuencia de la centrifugación en el sistema, así como también un Reynolds turbulento. En la Figura 7.17 se muestra de manera gráfica la variación del flujo de más de 20 lpm, en flujos mayores a los 100 lpm, causado por la interacción de los sólidos y la simple estructura del hidrociclón, ya que la caída de presión es una variable que modifica su eficiencia, pero no en gran medida, ya que esta no rebasa  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ .

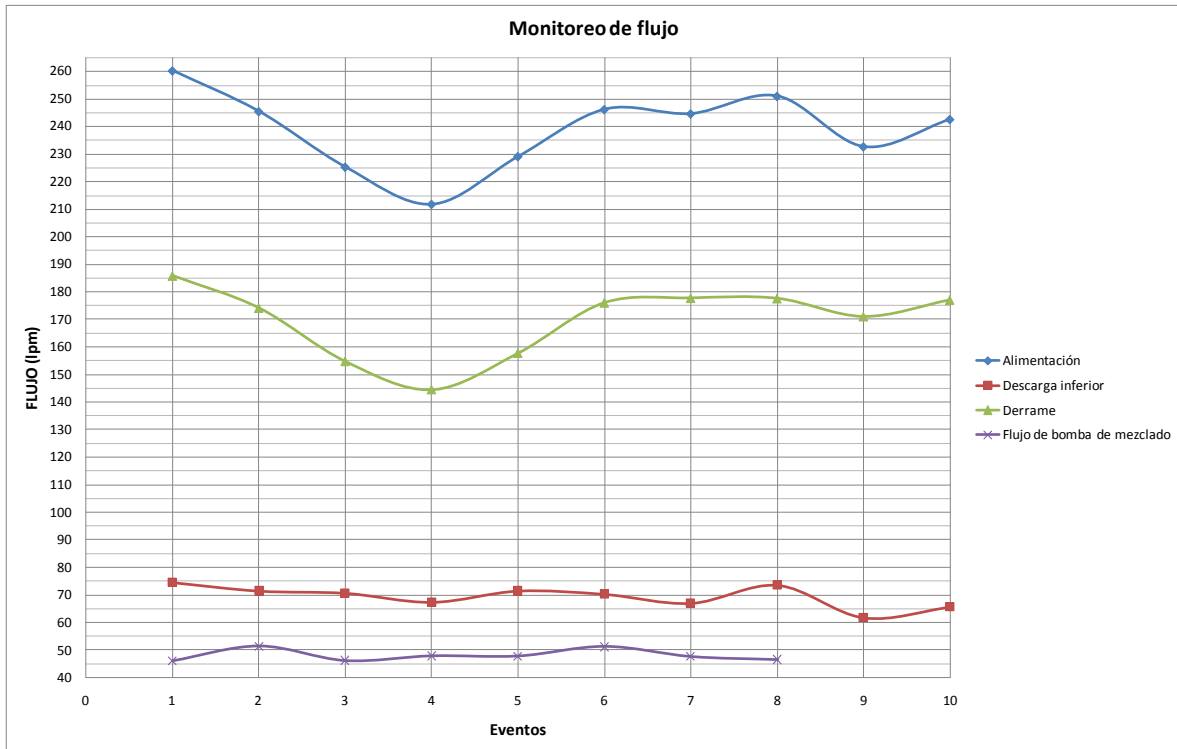


Figura 7.17.- Monitoreo del flujo

Teniendo el monitoreo del flujo, se procedió a realizar las pruebas con las combinaciones planteadas en el Tabla 7.14, por lo que la primera parte fue determinar la concentración de sólidos en el derrame y la descarga inferior, que se muestran en la Tabla 7.19.

Tabla 7.19.- Separación de sólidos

	20% p/p			30% p/p		
	Q máx.	Q200	Q150	Q máx.	Q200	Q150
<b>Porcentaje de sólidos (descarga inferior)</b>	4.25	3.95	14.22	3.91	4.20	3.95
<b>Porcentaje de sólidos (derrame)</b>	1.18	0.82	1.00	0.87	0.77	0.63

La separación de partículas de suelo del agua residual, se muestra en la Tabla 7.19, donde se observa la concentración de sólidos tanto en la descarga inferior, como en derrame.

En todos los casos la recuperación de sólidos por la descarga inferior, es en 4 o más veces superior que la concentración obtenida en el derrame. Como es el caso de una concentración de 20% de sólidos y un flujo de 150 lpm, donde la concentración alcanzada, fue de 14% p/p en la descarga inferior y de apenas 1% p/p en el derrame.

La concentración de sólidos en la descarga inferior fue mucho menor a la concentración de alimentación, esto es consecuencia de que el mezclado en el tanque de almacenamiento no fue eficiente, y en consecuencia la sedimentación de las partículas de mayor tamaño es casi inmediata, realmente esto no repercute en gran medida en el objetivo, ya que lo que se pretende es la concentración de las partículas que tienden a mantenerse suspendidas en largos periodos, entiéndase finos. En la Tabla 7.20 se muestra con más detalle la cantidad de sólidos recuperada, así como la



alimentación real al hidrociclón. Se muestra en la Figura 7.18 el interior del tanque mezclador, donde se realizó el proceso de mezclado y de recirculación.



Figura 7.18.- Interior del tanque mezclador

De estos datos se puede concluir que la mejor condición de operación fue en la que la mayor cantidad de sólidos están presentes en la descarga inferior y la menor cantidad de estos en el derrame, que en este caso pertenece a los 150 lpm al 20% de sólidos en el tanque mezclador.

En el capítulo de marco teórico, se mostraron las ecuaciones que describen el comportamiento y funcionalidad de un hidrociclón. En la Tabla 7.20 se muestra la eficiencia del hidrociclón a las diferentes condiciones a la que fue sometido, donde podemos observar que la menor es del 58% mientras que la más alta fue de un 78%. La ecuación que se utilizó para determinar la eficiencia del sistema fue la siguiente:

$$E = \frac{\text{Flujo másico de solidos (descarga inferior)}}{\text{Flujo másico de solidos (alimentación)}} \quad \text{Ecuación 7.7}$$

Tabla 7.20.- Eficiencia del hidrociclón

	20% p/p			30% p/p		
	Qmax	Q200	Q150	Qmax	Q200	Q150
<b>Qmásico descarga inferior (kg/min)</b>	2,87	1,89	4,53	2,36	2,53	1,25
<b>Qmásico derrame (kg/min)</b>	2,05	1,26	1,31	1,34	1,08	0,69
<b>Qmásico de la alimentación (kg/min)</b>	4,93	3,16	5,84	3,70	3,62	1,95
<b>Eficiencia de hidrociclón</b>	0,58	0,60	0,78	0,64	0,70	0,64

Otra parte importante que se analizó en la Tabla 7.20, es la cantidad real de sólidos que estaban presentes en la alimentación al hidrociclón, los datos de peso se encuentran en el apéndice B.

Se partió de concentraciones de 20% y 30% p/p de sólidos y se inicio el mezclado, el cual se llevo a cabo con la recirculación de una bomba centrífuga ½ HP. Este sistema no fue suficiente para mantener suspendidos todos los sólidos



y en consecuencia la concentración que se estuvo alimentando al hidrociclón fue menor a la que realmente estaba contenida en el tanque.

El mejor mezclado en el tanque, permitió tener un flujo de 5.84 kg/min, mientras que el peor fue de 1.95 kg/min de sólidos en la alimentación, lo cual no representa en ningún caso la cantidad real del tanque, sino apenas un 15% p/p de sólidos.

La combinación con la cual se logro una mayor recuperación de sólidos en la descarga inferior fue con un flujo de 150 lpm y una concentración en el tanque de mezclado de 20%, obteniendo 4.5 kg/min en la descarga inferior y 1.31 kg/min de sólidos en el derrame. El flujo másico alimentado al hidrociclón para obtener estos resultados fue de 5.84 kg/min de sólidos, y una eficiencia del 78%.

Definitivamente con lo que respecta a la concentración en el tanque de 30%, el mejor flujo fue el de 200 lpm, obteniendo una eficiencia de 70%, así como una recuperación de sólidos en la descarga inferior de 2.53 kg/min, y en el derrame de 1.08 kg/min, de una alimentación real al hidrociclón de 3.62 lpm.

Se realizaron las curvas granulométricas tanto de la distribución de tamaño de partícula en la descarga inferior como del derrame a las condiciones anteriormente descritas.

En la Figura 7.19 se muestran la distribución granulométrica perteneciente a la descarga inferior, se aprecian seis curvas debido a que se realizaron las pruebas a tres flujos y dos concentraciones de sólidos. Además se muestra en la parte superior de la grafica una graduación alterna al eje de las abscisas con la finalidad de mostrar de una forma más explicativa la distribución de tamaño de partícula.

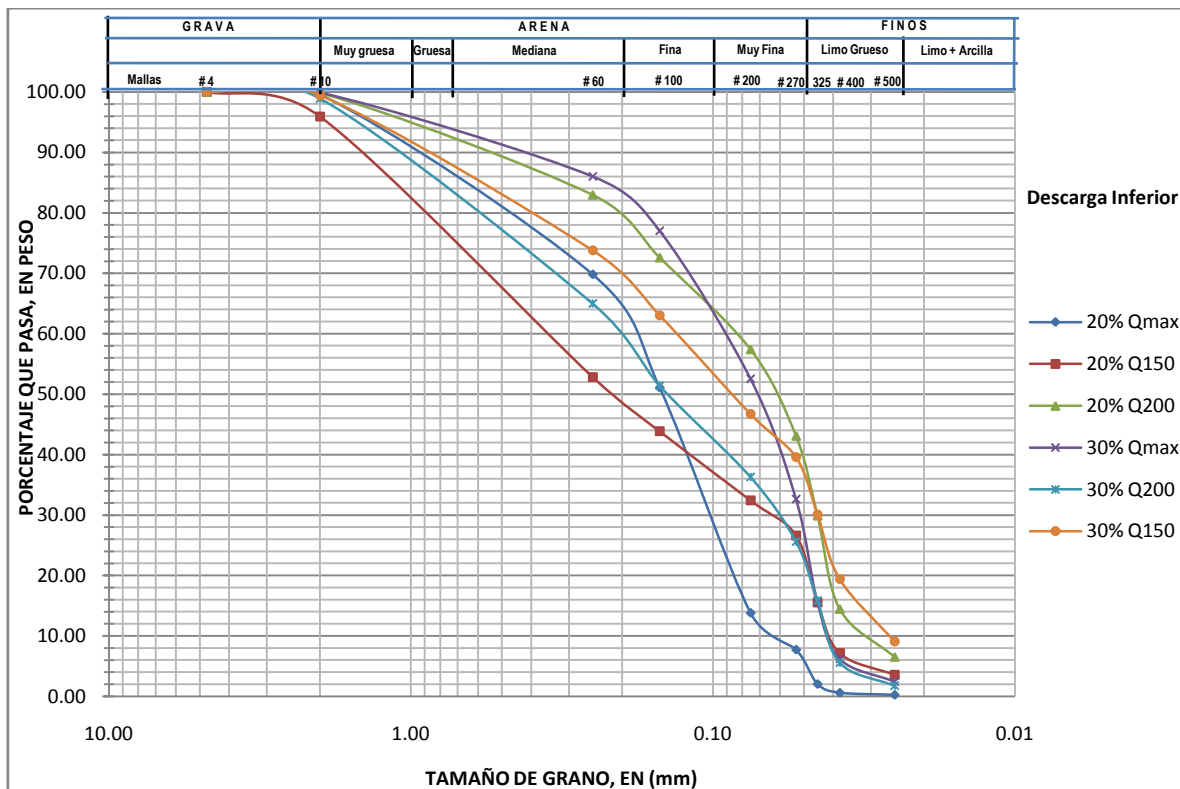


Figura 7.19.- Curvas granulométricas descarga inferior



Observando las curvas granulométricas generadas (datos apéndice B), las distribuciones de mayor concentración de finos, fue de 30% p/p de sólidos en la alimentación y un flujo de 150 lpm y a 20% p/p de sólidos a un flujo de 200 lpm, en estas dos curvas la mayor proporción son arenas y un poco más del 30% son finos, esto quiere decir que la separación de las partículas por la descarga inferior está siendo satisfactoria, debido a que se esta recuperando gran parte finos, aunque no necesariamente es la mejor condición.

Se analiza la curva del 20% p/p de sólidos y un flujo de 150 lpm más del 70% del suelo son arenas y el resto finos, por lo que la separación esta siendo eficiente, al contrastar estos datos con la eficiencia del equipo presentada en la Tabla 7.20.

En la Figura 7.20 se muestran las curvas pertenecientes a la distribución del derrame y se puede observar que la gran mayoría se superponen y contienen un aproximado del 80% de finos y un 20% de arena, por lo que se puede decir que es un suelo con alto contenido de finos.

Se planteó en la tesis realizar una separación de las partículas de suelo del agua de lavado, aunque en las curvas granulométricas para el derrame (Figura 7.20) se observa una distribución de sólidos, que predominantemente son finos. En la Tabla 7.19, se observa que la concentración de estos sólidos presentes en el derrame no rebasa mas allá del 1% p/p, comparado con las concentración de sólidos en la líneas tanto de la descarga inferior como de la alimentación.

Esta separación nos permite hacer un análisis de los finos más detallada, pero será suficiente con decir que se está logrando una separación de las partículas de suelo del agua de lavado.

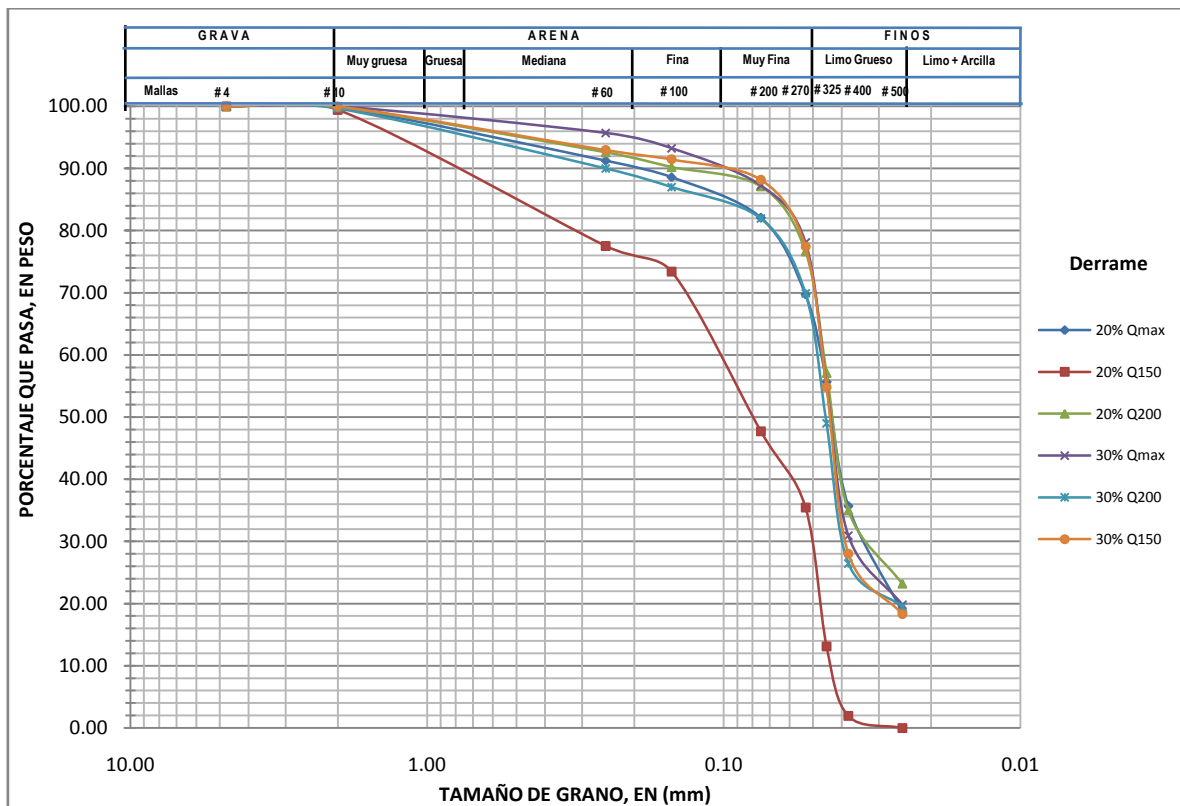


Figura 7.20.- Curvas granulométricas derrame



La curva granulométrica para una concentración del 20% de sólidos y un flujo de 150 lpm, muestra una distribución de tamaño de partículas definida como arena y una cantidad muy mínima son finos, mientras que en las otras curvas podemos observar un mismo comportamiento y predominantemente existen mayor cantidad de finos.

Las condiciones de operación con una mejor separación de partículas fueron un flujo de 200 lpm y una concentración de 30% de sólidos, ya que la descarga inferior contuvo una gran cantidad de arenas y limos, mientras el derrame predominantemente son limos y arcillas, así como también la eficiencia del sistema fue de 70%.

Se decidió hacer un análisis más formal, presentando los datos en barras, con los porcentajes perteneciente a cada una de las fracciones de suelo, como se observa en las Figuras 7.21 y 7.22.

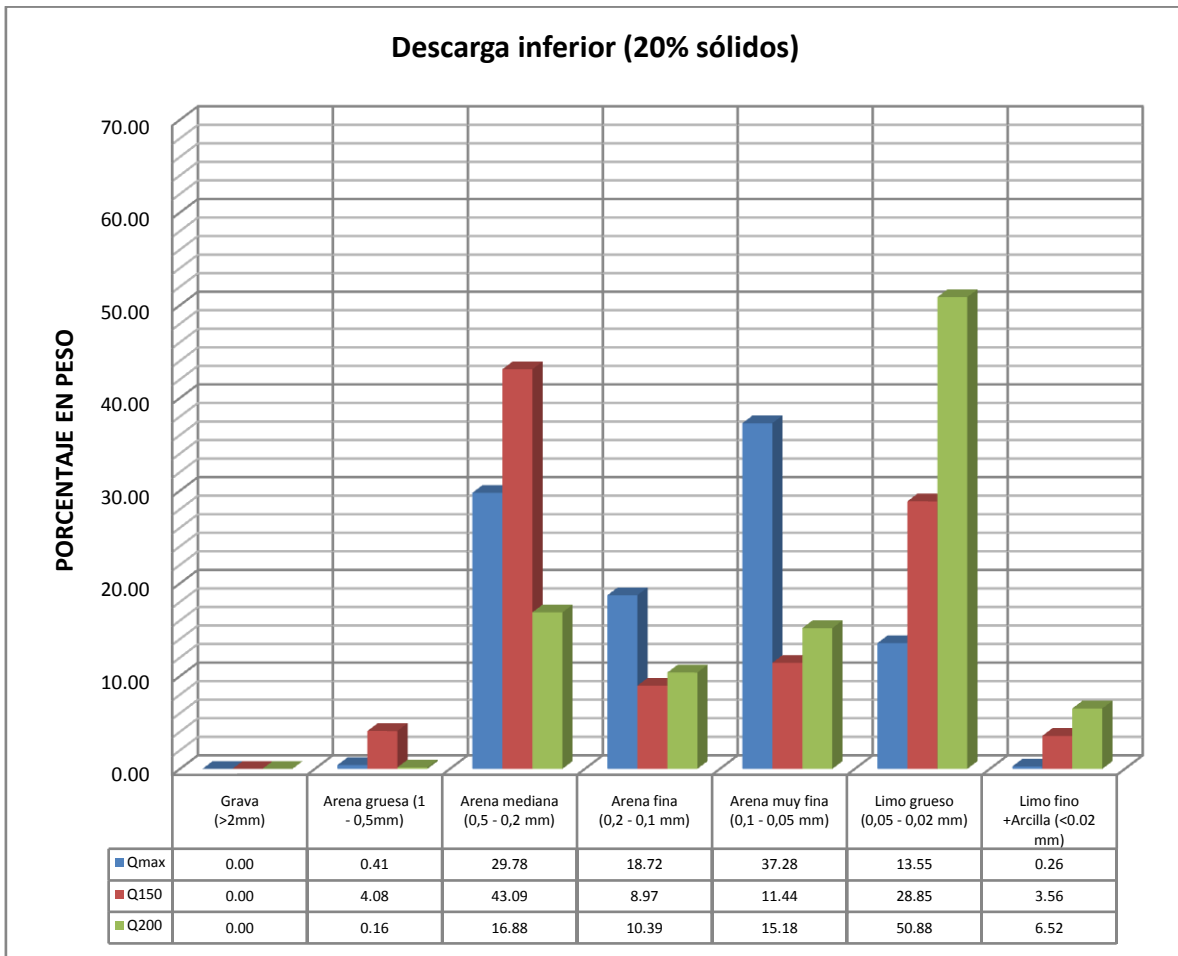


Figura 7.21.- Distribución de tamaño de partícula en descarga inferior 20% p/p sólidos

En la distribución de la descarga inferior con 20% de sólidos en la alimentación se observa que para un flujo de 200 lpm, se logra una mejor separación de limos de cerca del 50%, mientras que el resto son arenas.

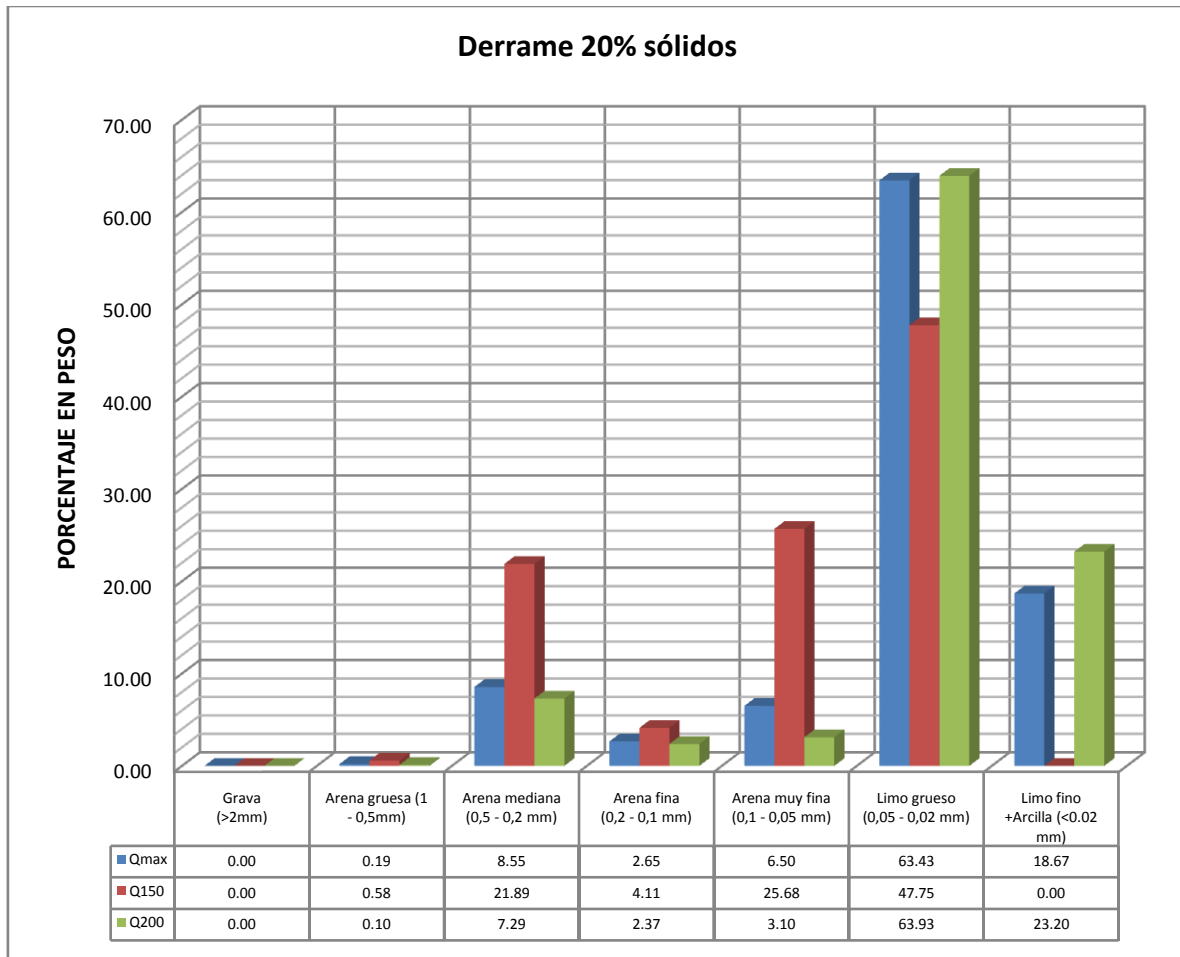


Figura 7.22.- Distribución de tamaño de partícula en derrame 20% p/p sólidos

En la Figura 7.22 se observa la distribución para el derrame donde la mayor proporción es el limo y arcilla en todos los flujos manejados, aproximadamente el 80%, lo cual hace que la separación sea mejor y se incrementa la eficiencia del hidrociclón. Se pueden observar diferencias notables en los flujos de 200 lpm y el máximo, ya que las arenas en su gran mayoría están siendo captadas por la descarga inferior, aunque es conveniente resaltar que la concentración de sólidos no rebasa el 1% p/p, aunque este valor no es despreciable para la separación, ya que el diámetro de corte nos garantiza la separación.



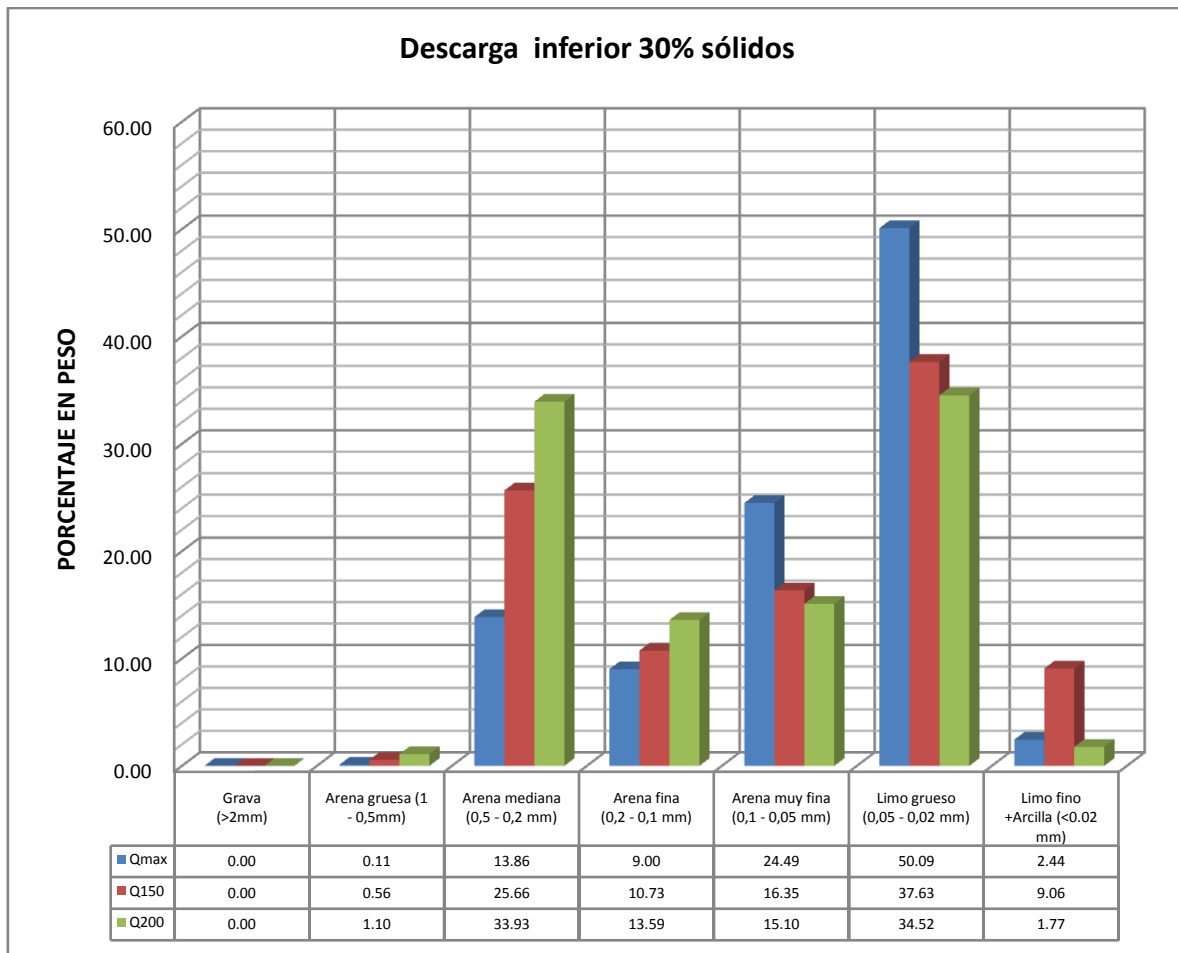


Figura 7.23.- Distribución de tamaño de partícula en descarga inferior 30% p/p sólidos

En la Figura 7.23 se muestra la distribución del tamaño del partícula para una concentración de 30% p/p de sólidos en la descarga inferior. Para un flujo máximo, la concentración de limos es de casi el 50%, mientras que a flujos menores la concentración de finos tiende a disminuir, ocurriendo lo contrario con las arenas, esto se puede deber a la caída de presión en el hidrociclón.

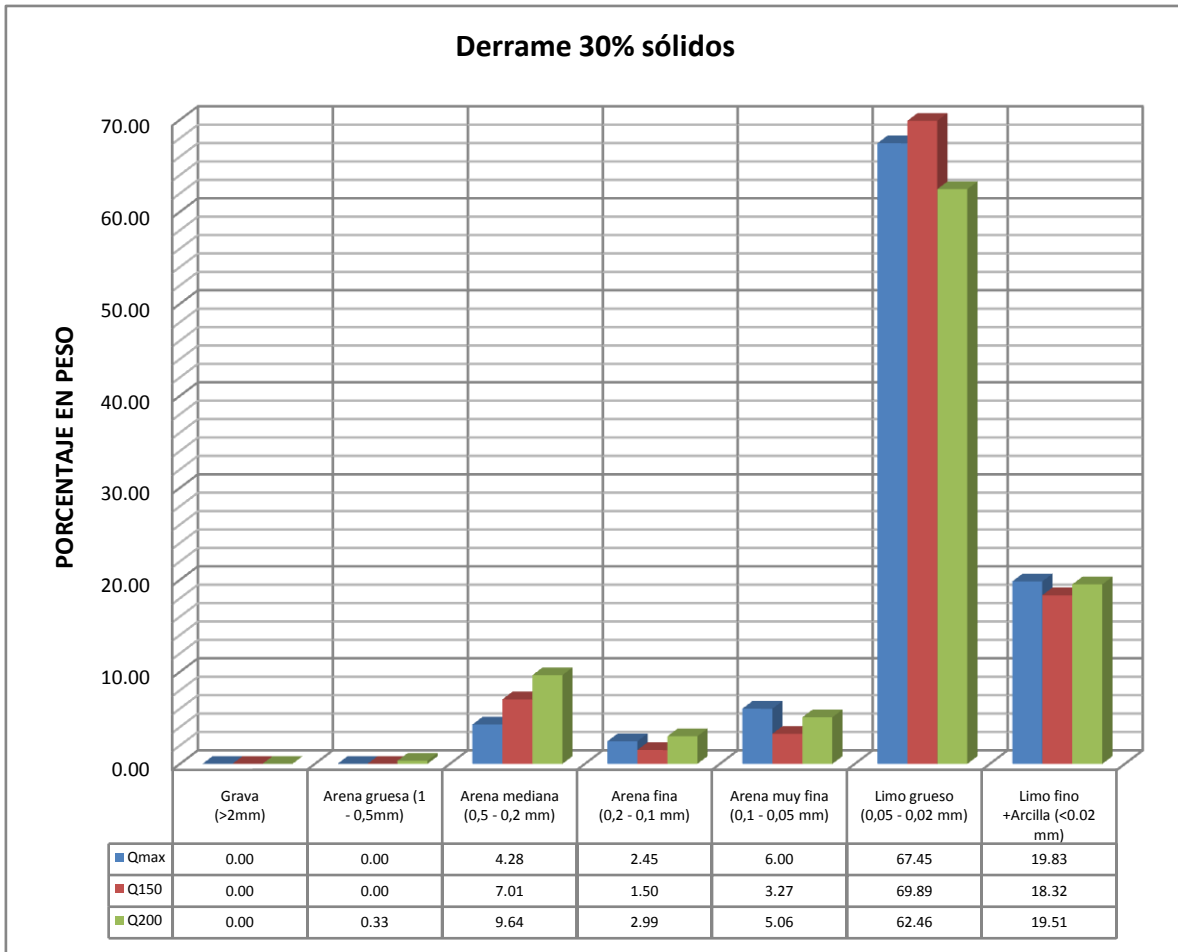


Figura 7.24.- Distribución de tamaño de partícula en derrame 30% p/p sólidos

Con lo que respecta a la distribución de tamaño de partícula en el derrame, es evidente que a un 30% p/p de sólidos existe una tendencia a los finos con cerca del 90% del total obtenido en esta línea, mientras que las arenas se encuentran en 8 %. De igual forma existe una tendencia de que al aumentar el flujo aumenta la concentración de sólidos.

En los gráficos anteriores el flujo de 150 lpm, no favorece una concentración de finos en el derrame y mucho menos en la descarga inferior, sino todo lo contrario, ya que disminuye el corte y la concentración de sólidos. Es evidente que el diámetro de corte de partículas que mas favorece la separación y la concentración de sólidos es de 45 micrómetros.

La combinación de variables que muestra una mayor separación, por lo menos en las características iniciales que se han probado es un flujo de 200lpm en 20% de sólidos y de 200lpm y flujo máximo para 30% de sólidos, cabe mencionar que la eficiencia del hidrociclón está referida a la concentración de sólidos que como se puede evidenciar, llega a ser en algunos casos en la descarga inferior del 14%.



Se puede concluir que de los resultados obtenidos, las variables de operación elegidas para la separación y concentración de sólidos son:

- Flujo de 200 lpm
- Concentración de 30% de sólidos

### **7.8.- Pruebas de lavado con hidrociclón**

Teniendo las condiciones del sistema establecidas es necesario realizar pruebas, pero ahora con surfactante a las condiciones que mostraron una mayor remoción de HFP en las pruebas microcosmos, es decir una concentración de tween 80 al 0.5% p/p. Conviene aclarar que el sistema no fue diseñado para realizar un lavado, pero se han efectuado pruebas en las cuales se ha ocupado el hidrociclón, tanto como filtro y lavador del suelo (U.S.EPA, 1991).

Esta prueba tiene la finalidad de determinar la remoción de HFP sin necesidad de ser sometido a un lavado mecánico, por lo que se utilizara el mismo método planteado para la separación de partículas descrito en el capítulo de metodología.

Para ello, fue necesario hacer la determinación de hidrocarburo fracción pesada, para conocer la remoción de contaminantes lograda, por esa razón se hicieron las siguientes determinaciones, tomando en consideración que se variaron las condiciones de las pruebas.

Condiciones de pruebas 1 y 2:

- Flujo de 200 lpm
- Concentración de sólidos 30% p/p
- Agua
- Tiempo de recirculación de 5 min

Condiciones de pruebas 3 y 4:

- Flujo de 200 lpm
- Concentración de sólidos de 30% p/p
- Concentración de surfactante 0.5 % p/p
- Tiempo de recirculación de 5 min

Nota: La prueba 4 es un segundo lavado cambiando el agua con la misma concentración de surfactante.

En la Tabla 7.21 se observan las remociones obtenidas. Se realizó un duplicado de cada uno de los análisis de HFP con la finalidad de corroborar los resultados para después obtener el promedio, en la Figura 7.25 se aprecia de forma grafica el comportamiento de las remociones obtenidas en el sistema.



Tabla 7.21.- Remociones del sistema

Prueba	Descripción	HFP (mg/kg)	%Remoción
1	Derrame	14078	6.16
2	Descarga inferior	11119	25.88
3	Lavado 1 (Descarga inferior)	8459	43.62
4	Lavado 2 (Descarga Inferior)	7722	48.53

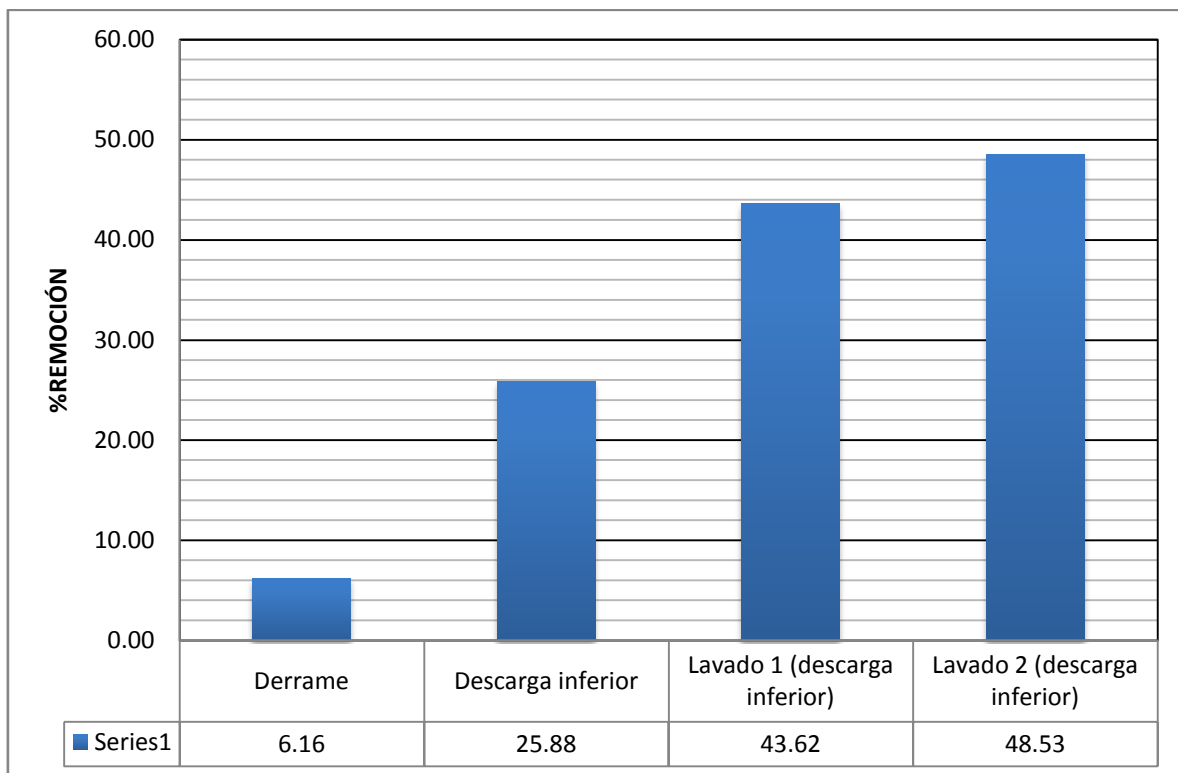


Figura 7.25.- Remociones de lavado en hidrociclón

Las remociones obtenidas demuestran que el agua como solución de lavado no tiene una muy buena remoción del contaminante, ya que como se puede apreciar en la prueba 1 que pertenecen al derrame, la remoción es de apenas el 6%, mientras que en la descarga inferior es de 25%, esto se debe a que el agua no es capaz de desorber el contaminante de la matriz sólida.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América (U.S.EPA, 1991) propone una separación del limo, arcilla y material húmico antes de llevar el lavado de suelo, ya que en estas fracciones se encuentra la mayor proporción de los contaminantes, consecuencia de su gran área superficial, que como se observa en el polígono de la prueba 1 que corresponde al derrame, la concentración de finos es alta y se puede decir que máxima en algunos casos.



Es por esta razón que la concentración de hidrocarburos fracción pesada es de arriba de 14,000 mg/kg, obteniendo una remoción de escasamente el 6%, mientras que en las demás pruebas fue superior al 25%.

Se procedió a agregar una nueva carga de suelo pero ahora con una concentración de surfactante conocida en este caso el Tween 80. En la prueba 3 se logró un aumento en la remoción de casi el doble, comparado con la prueba 2, es decir de casi el 40%, aunque comparándola con el lavado mecánico realizado en secciones anteriores es casi la misma remoción en una sola carga, de esto se puede concluir que el lavado mecánico es mas eficiente en el lavado de suelos, mientras que el hidrociclón podría ser considerado como un equipo de pulimiento de la limpieza.

Lo que corresponde a la última prueba podemos percatarnos que la remoción se incrementa en una mínima proporción de apenas el 5%, comparado con la prueba 3, esto es al realizar la segunda carga de agua con surfactante, por lo que no sería muy rentable usar este sistema en una segunda carga.

Estos resultados a primera vista son remociones bajas comparadas con otros sistemas, pero en gran medida esto se debe a que el mezclado es una operación unitaria que no se puede evadir en el lavado de suelo, ya que es donde se da la mayor transferencia del contaminante.

Aunque cabe mencionar que se ha probado el hidrociclón, como sistema para lavar el suelo, pero es evidente que el mezclado que se da en el tanque es deficiente, es decir el Njs (velocidad mínima para mantener suspendidos todos los sólidos en un tanque) no es propicio para realizar la desorción de HFP.

El hidrociclón, como medio para la separación y concentración de partículas es eficiente, aunque como sistema lavador es deficiente si no se cuenta con un buen mezclado. Lo que sí se puede asegurar es que el sistema disminuye los tiempos de separación de partículas y por ende el tiempo del proceso fisicoquímico.

### 7.9.- Resultados del diseño de experimentos

De acuerdo con lo explicado en el capítulo seis con respecto a la aplicación del modelo de bloques completamente aleatorizados, se muestran las Tablas 7.22, 7.23 y 7.24, los datos obtenidos para la eficiencia y concentración de finos en la descarga del hidrociclón, con dos concentraciones de sólidos en la alimentación y tres flujos. Cabe mencionar que estos datos están expresados en porcentajes con la finalidad de hacer el análisis de varianza que se presenta en las Tablas B17, B18 y B19.

Tabla 7.22.- Resultados de la eficiencia del hidrociclón

Porcentaje de sólidos (% p/p)	Flujos(lpm)		
	150	200	Máximo
20	78	60	58
30	64	70	64



Tabla 7.23.- Porcentaje de finos en descarga inferior

Porcentaje de sólidos (% p/p)	Flujos (lpm)		
	150	200	Máximo
20	32,41	57,40	13,81
30	46,69	36,29	52,53

Tabla 7.24.- Porcentaje de finos en derrame

Porcentaje de sólidos (%p/p)	Flujos (lpm)		
	150	200	Máximo
20	47,75	87,13	82,1
30	88,21	81,97	87,28

En todos los casos se obtiene que el estadístico de prueba  $F_0$  fue menor al que se obtiene de un alfa con intervalo de confianza de 95%, probabilidad de 0.05 y grados de libertad de 2,2; lo cual garantiza que se acepta la hipótesis nula.

Esto significa que no existen diferencias entre los tratamientos, es decir, que en el primer caso variar el flujo no afecta la eficiencia del hidrociclón (Tabla B17).

Tampoco influye de manera significativa el flujo en la distribución de tamaño de partícula, en este caso la cantidad de finos, tanto en la descarga inferior como en el derrame, como se observa en las Tablas B18 y B19 que se encuentran en el apéndice b.

Lo anterior es causa del diseño que se realizó, ya que se planteó que el flujo de operación del sistema fue de 200 lpm, para las condiciones de separación y diámetro de corte del suelo de estudio, además el mezclado que se llevó a cabo en el tanque no fue tan eficiente, lo cual provocó una separación de partículas de menor diámetro y una concentración de sólidos menor en la alimentación.

#### 7.10.- Costos de operación del sistema

Los costos en proceso de transformación, separación o simple manufactura llevan implícito un costo en consumo de energía por unidad funcional, es por esta razón, que se presenta a continuación la obtención y análisis del costo generado del proceso que se estudia en la tesis.

La fuerza centrífuga que se genera en el hidrociclón es causada por la bomba de alimentación, la cual es un sistema de impulsor abierto para evitar problemas en la carcasa y sistema mecánico debido a los sólidos, esta a su vez va acoplada a un motor eléctrico el cual consume energía.



Se realizó el análisis del motor eléctrico, tomando en consideración la alineación del sistema, y el tratamiento realizado para dicho fin, y algo muy importante los datos proporcionados por el fabricante. Como se sabe es necesario realizar el costo por metro cubico tratado; es por esta razón que se realizó el cálculo de la energía consumida del sistema. Por lo cual es necesario tener los datos del sistema, los cuales son presentados en la Tabla 7.25.

Tabla 7.25.- Datos de bomba de alimentación

Datos	Valor
Potencia (hp)	2
Revoluciones (rpm)	3500
Amperaje (amp)	26 – 13
Eficiencia (%)	74.8
Factor de potencia	0.78

Se realizaron los cálculos pertinentes, con la finalidad de conocer el consumo de energía, por metro cubico tratado, considerando la tarifa para industrial temporal, que reporta la Comisión Federal de Electricidad para el mes de marzo de 2010, la cual se puede observar en la Tabla 7.26.

Tabla 7.26.- Tarifas de consumo de energía en México (CFE, 2010)

Dic./2009	Enero	Febrero	Marzo
Cargo por demanda (\$/kW)			
130.83	130.97	131.21	132.27
Cargo por energía (\$/kWh)			
3.749	3.684	3.855	4

Convirtiendo el flujo de la bomba a unidades pertinentes para el análisis, tenemos.

$$Q = 200 \frac{l}{min} \left| \frac{1m^3}{1000l} \right| \left| \frac{60 min}{1 h} \right| = 12 \frac{m^3}{h}$$

Convirtiendo la potencia a unidades pertinentes, tenemos.

$$P = 2hp \left| \frac{0.745699 kW}{1hp} \right| = 1.5 kW$$

Con el flujo y la potencia podemos calcular el consumo de energía, con la ecuación siguiente.

Consumo de energía

$$C.E. = \frac{Potencia}{Flujo de operación} \quad \text{Ecuación 7.8}$$

$$C.E. = \frac{1.5 kW}{12 \frac{m^3}{h}} = 0.125 \frac{kW.h}{m^3}$$



Teniendo el valor que se consume, procedemos a convertir en costo, con las tarifas vigentes en México para energía eléctrica de uso industrial temporal, que podemos observar en la Tabla 7.26.

Calculando el gasto por metro cubico tratado únicamente en costo energético

$$\text{Costo (\$)} = \left[ 0.125 \frac{\text{kW}\cdot\text{h}}{\text{m}^3} \right] \left[ 4 \frac{\$}{\text{kWh}} \right] = 0.5 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Se obtiene que por cada metro cúbico tratado de pulpa, se va a gastar aproximadamente 0.5 pesos, el es un precio factible, considerando que el costo por metro cubico tratado de suelo contaminado con el proceso de lavado de suelos es de 1769 pesos (Iturbe, *et. al.*, 2004), esto representa al menos el 1%, aunque cabe resaltar que aun no se han considerado los costos por operación y de inversión inicial, sino únicamente el costo consumido de energía.

Con todo lo anterior, se puede considerar que la separación de los sólidos es factible, consecuencia del costo que su operación implica, y además de lograr eficiencias significativas en el proceso de lavado de suelos.





## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se diseñó y operó un hidrociclón, logrando la separación de partículas sólidas de la solución final de lavado, y mejorando sustancialmente la técnica de lavado de suelos contaminados con hidrocarburos con contenido de finos.

Se determinó que el suelo de estudio es una arena bien graduada con finos, donde el porcentaje inicial de finos fue del 5%, el cual al ser sometido a un proceso fisicoquímico de lavado se observó un incremento al 15%.

También se determinó que la concentración de hidrocarburos fracción pesada inicial fue de 15,000 mg/kg, para hidrocarburos fracción media de 6,626 mg/kg y de hidrocarburos fracción ligera de 1,140 mg/kg; todos los valores se encontraron por arriba de los límites máximos permisibles que marca la NOM-138-SEMARNAT-2003 para suelo de uso industrial.

El mayor porcentaje de remoción de hidrocarburos fracción pesada obtenida en el sistema microcosmos para la relación de 33% de sólidos fue del 66% con el surfacpol A y el texapon 40, seguidos por el polafix y el tween 80 con un 63% de remoción. Con lo que respecta al 50% de sólidos el surfacpol A, polafix Lo y polafix capb mostraron un 63 % de remoción mientras el tween 80 de apenas el 60%.

En las pruebas de lavado a mayor escala se obtuvo que el surfactante surfacpol A mostró una remoción de hidrocarburos fracción pesada de un 40%, cabe mencionar que esto se realizó en una sola carga y en un tiempo de mezclado muy corto. Con lo que respecta al surfactante tween 80 se obtuvo una remoción considerable del 38%, además por su bajo costo y biodegradación, fue el más apto para realizar el tratamiento del suelo, por lo que se determinó trabajar con una concentración de 0.5 % p/p, ya que es la condición óptima y rentable para llevar a cabo el lavado de suelos asistido por surfactante.

El diseño de hidrociclón se realizó con una configuración de máxima eliminación de agua, para así lograr la separación de los sólidos.

Al realizar la simulación en el programa Aspen Plus, se obtuvo un diámetro de corte al 50% de 0.075 mm mientras que experimentalmente fue de 0.05 mm. Conociendo la granulometría del suelo de estudio las partículas de mayor tamaño al diámetro de corte fueron en su 100% captadas por la descarga inferior, consecuencia de una mejor separación de partículas.

La construcción del hidrociclón fue con acero al carbón, cédula 40, para brindar resistencia y mejor operación al sistema, sin dejar a un lado la configuración generada en el modelo virtual.

La combinación de variables que muestra una mayor separación en el hidrociclón fabricado fueron: 150 lpm y 20% de sólidos en el tanque de mezclado, logrando recuperaciones en la descarga inferior de 14% y en el derrame de 1 % p/p de sólidos, con una eficiencia de 78% en el sistema.



Se logró otra combinación de variables que fue 200lpm y 30% de sólidos en el tanque de mezclado, obteniendo una eficiencia de separación del 70%, además la recuperación fue de 4% en la descarga inferior y en el derrame de 0.7% de sólidos.

Se realizaron pruebas de lavado en el hidrociclón utilizando tween 80 y tiempos de recirculación cortos, donde se obtuvieron remociones para una carga de 43% y para dos cargas del 48%, ambos valores comparados con el lavado mecánico resultaron altos, aunque el aumento de eficiencia entre una y dos cargas fue de apenas el 5%, lo cual no es factible, pero indudablemente podría incrementarse al aumentar el tiempo de recirculación.

Al realizar el análisis de costos de operación del hidrociclón se obtuvo que para realizar la separación de un metro cúbico de pulpa tiene un costo de alrededor de \$0.5, lo cual es factible, ya que para tratar un metro cúbico de suelo contaminado por la técnica de lavado de suelos cuesta aproximadamente \$1769.

Se puede asegurar que la operación unitaria de mezclado, no puede ser suprimida del tren de tratamiento, es por esta razón que se debe realizar de manera conjunta para obtener mejores resultados de descontaminación.

Es claro que las variables que lograron que la técnica de lavado de suelos asistido por surfactantes fuera eficiente son; tensoactivo utilizado, en este caso el tween 80 al 0.5%p/p, características generadas en el diseño, la concentración de sólidos en el agua residual y la concentración final de contaminante, ya que fue posible hacer la discriminación de estas variables por medio de eficiencias y de análisis de varianza.

La mezcla de suelo en medio acuoso generado por el lavado de suelos disminuyó los tiempos de sedimentación y de operación al implementar el hidrociclón en el tren de tratamiento.

La contaminación de suelos con hidrocarburos, en el cual, el suelo contiene finos, es un problema muy común en México es por esta razón que se realizó esta investigación, de tal manera de no suprimir los finos, sino simplemente llevar a cabo un tratamiento conjunto y obtener resultados de remoción satisfactorios.



## 9. REFERENCIAS

- Abiola, A., Olenyk, M.,** *Effects of amendment surfactants on bioremediation of hydrocarbon contaminated soil by composting, Annual soil Science, Workshop, 1997.*
- Alcalá, E., Flores, A., Beltrán, A.,** *Manual de Capacitación de Mineros, Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas-SERGEOTECCMIN, Bolivia, 2000, pg. 1-14.*
- Bouso, J.,** *Nuevos tipos de hidrociclones, ERAL, México, 1990, pg. 2-7.*
- Bradley, D., Pulling, D.,** *Flow Patterns in the Hydraulic cyclone and their interpretation in terms of performance, Trans, Inst., Chem, Eng., 1959, pg. 34-45.*
- Bretnei, E.,** *US Patent no. 453, 105, 1981.*
- Capela, C., Hackenberg, C., Russo, C., Medronho, R.,** *Theoretical analysis of oily water hydrocyclones, Hydrocyclones, Publicaciones de Ingeniería Mecánica, Londres, 1996, pg. 383-398.*
- Castilho, L., Medronho, R.,** *A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones, Minerals Engineering, vol. 13, no.2, Brasil, 2000, pg. 183-191.*
- CFE** (Comisión Federal de Electricidad), *“Conoce tu tarifa”, CFE, 2010, <http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetarifa/Paginas/Tarifas.aspx>.*
- Cilliers, J., Harrison, S.,** *The application of mini-hydrocyclones in the concentration of yeast suspensions, The Chemical Engineering Journal, 1997, pg. 21-26.*
- Climent, M.,** *Estudios del mezclado en el proceso de lavado de suelos contaminados con hidrocarburos, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2007.*
- Doroteo, E.,** *Efecto de algunas variables sobre el consumo de potencia y la eficiencia de lavado de un suelo contaminado por hidrocarburos del petróleo, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2008.*
- Faisal I., Tahir, H., Ramzi, H.,** *An overview and analysis of site remediation technologies, Science Direct, Canada, 2004.*
- Gaddy, D., Grichar, C., Heck, S., Lange, B., Liljestrød, W., Love, B., Robinson, L.,** *Mud Equipment Manual, Handbook 6: Hydrocyclones, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1988, pg. 6.1-6.40.*
- Galindo, C.,** *Biodegradación de surfactantes en tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos, Instituto Politécnico Nacional, México, 2006.*
- Ghosh, M.,** *Kinetic considerations in surfactant-enhanced bioavailability of soil, The sixth International in situ and on site Bioremediation symposium, Battlle, 1997, pg. 575-580.*
- Holland, A., Chapman, F.,** *Liquid mixing and processing in stirred tanks, Reinhold, Estados Unidos de America, 1995.*
- INE** (Instituto Nacional de Ecología), *“Fuentes de contaminación en México”, INE, 2007, <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/372/fuentes.html>.*
- INEGI** (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), *“Suelo, comparativo Internacional”, INEGI, 2010, <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx?s=est>.*
- Iturbe, R., Flores, C., Chavez, C.,** *Remediation of Contaminated soil using soil washing and biopile methodologies at a field level, Soils and sediments, México, 2004, pg. 1-8.*
- Iturbe, R., Flores, R., Torres, L. G.,** *Subsoil contaminated by hydrocarbons in an out-of-service oil distribution and storage station in Zacatecas, México, Environmental Geology, vol. 44, México, 2003, pg. 608-620.*



- Kelly, E., Spottiswood, D., *Introducción al Procesamiento de Minerales*, Noriega-Limusa, México, 1990, pg. 227-260.
- Kelsall, D., *A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone*, Trans. Inst. Chem. Eng., 1970, pg. 87-104.
- Kirchberg, H., Töpfer, E., Sheibe, W., *The effects of suspension properties on separating efficiency of mechanical classifiers*, Procesos Mineros, Cagliari, 1975, pg. 219-244.
- Klima, M., Kim, B., *Dense-medium separation of heavy-metal particles from soil using a wide-angle hydrocyclone*, Journal of Environmental Science and Health, Parte A, Estados Unidos de América, pg. 1325-1340.
- Krebs, FL Smidth, “Products Krebs Cyclo-wash”, Krebs, <http://www.krebs.com/products.php/product/26/Krebs+CycloWash%AE>.
- Lange, Robert K., *Surfactants*, Hanser Publishers, Munich, Estados Unidos de América, 1999, pg. 1-23.
- Leyva, D., *Comparación de técnicas de saneamiento en un suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo en Tabasco*, Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2006.
- López, J., *Cambios físicos, químicos y biológicos en un suelo contaminado con hidrocarburos debido al saneado con la técnica de lavado de suelos*, Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2004.
- López, J., Iturbe, R., Torres, L. G., *Washing of soil contaminated with PAHs and Heavy Petroleum Fractions using two anionic and one ionic surfactant: Effect of Salt addition*, Journal of environmental science and health, vol. 39, no. 9, México, 2004, pg. 2293-2306.
- Lynch, A., Rao, T., *Modelling and Scale – up of hydrocyclone classifiers*, Int. Min. Process, Cagliari, 1975, pg. 245-269.
- Maderey, R. E., Jiménez, R. A., *Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*, Instituto de Geografía, UNAM, 2005, pg. 57-65.
- Marti, S., *Analysis of gas carry-under in gas-liquid cylindrical cyclones*, Hydrocyclones, Publicaciones de Ingeniería Mecánica, Londres, 1996, pg. 399-421.
- Mirsal, A., *Soil Pollution*, Springer, Alemania, 2004.
- Mixing Solutions, “Service all mixers”, 2009, <http://www.mixingsolutions.com/mixing/mixing-principles.html>.
- Mohr, E. C. J., Van Baren, F. A., *Tropical soils*, Interscience Publishers Ltd, Londres, 1959.
- Montgomery, D., *Diseño y análisis de experimentos*, Limusa, México, 2008, pg. 126-130.
- Neesse, Th., Dueck, J., Minkov, L., *Separation of finest particles in hydrocyclones*, Mineral Engineering, Vol. 17, Alemania, 2004, pg. 689-696.
- Norma Oficial Mexicana, NOM-138-SEMARNAT/SS-2003**, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación, Secretaría de medio Ambiente y recursos Naturales, 2003.
- Oldshue, Y. J., *Fluid Mixing Technology*, Mc Graw Hill, Estados Unidos de América, 1983.
- Ormsby, G., *Mud Equipment Manual, Hydrocyclones*, Gulf Publishing Company, United States of America, 1982.
- PEMEX (Petróleos Mexicanos), “Remediación de la ex Refinería 18 de Marzo”, PEMEX, 2009, <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=122>.
- Perry, H., *Manual del Ingeniero Químico*, vol. 6, Mc Graw-Hill, Estados Unidos de América, 1985, pg. 19.5-19.15.



**Pontificia Universidad Católica de Chile**, Escuela de Ingeniería, “*Ingeniería Geotécnica-Mecánica de Suelo-Mecánica de rocas*”, 2001, [www.ing.puc.cl/~ingeot/ice1603/lab1/lab1.htm](http://www.ing.puc.cl/~ingeot/ice1603/lab1/lab1.htm).

**PROFEPA** (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente), “*Análisis Nacional de emergencias ambientales*”, PROFEPA, 2010, <http://www.profepa.gob.mx/PROFEPA/EmergenciasAmbientales/AnalisisNacionaldeEmergenciasAmbientales>.

**Renner, V., Cohen, H.**, *Measurement and Interpretation of size distribution of particles within a hydrocyclone*, Trans-IMM, 1978, pg. 139-145.

**Rietema, K.**, *Performance and design of Hydrocyclones*, Chem. Eng. Sci., 1960, pg. 298-320.

**Roldan, E., Dyakowski, T., Lee, M., Dickin, F., Williams, R.**, *Desing and modeling of hydrocyclones and hydrocyclone networks for fine particle processing*, Minerals Engineering, Vol. 6, Gran Bretaña, 1993, pg. 41-54.

**Salager, J.**, *Surfactantes en solución acuosa*, Universidad de los Andes, Venezuela, 1993.

**SEMARNAT** (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), “*Leyes y Normas*”, SEMARNAT, 2008, <http://www.semarnat.gob.mx/leyesyformas/>.

**Seoáñez, C.**, *Contaminación del suelo. Estudios, tratamiento y gestión*, Mundi-Prensa, México, 1999.

**Smyth, I., Thew, M.**, *A study of the effect of dissolved gas on the operation of liquid-liquid hydrocyclones*, Hydrocyclones, Publicaciones de Ingeniería Mecánica, Londres, 1996, pg. 357-368.

**Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (ASTM)**, D 2487-98, Estados Unidos de América, 1998.

**Svarovsky, L.**, *Hydrocyclones*, Holt, New York, 1984.

**Takahashi, K., Gidoh, Y., Yokota, T.**, *Particle-impeller impact in an agited vessel equipped whit a rushton turbine*, Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 25, no. 1, Tokio, 1992, pg. 73-77.

**Timothy, J., Olson, A.**, *Hydrocyclone selection for Plant Design*, Krebs, 2002, [http://www.krebs.com/documents/75\\_hydrocyclone\\_selection\\_for\\_plant\\_design-mppd\\_oct\\_2002.pdf](http://www.krebs.com/documents/75_hydrocyclone_selection_for_plant_design-mppd_oct_2002.pdf).

**Toebermann, J., Werther, J., Rosenkranz, J., Gruhn, G.**, *Flowsheet simulation of soil-washing processes*, Chem. Eng. Technol., Weinheim, 1999, pg. 558-566.

**Torres, L. G., Bandala, E. R., Saquelares, J.**, *Caracterización y pruebas de tratabilidad de suelos contaminados con crudo proveniente de Tabasco: Efecto del tamaño de las partículas*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.

**Torres, L. G., Urquiza, G., Iturbe, R.**, *Characterization of soils contaminated with light, medium and heavy Mexican crude oils*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Coordinación de Ingeniería Ambiental, México, 2002.

**Turner, P., Olson, T., Wedeles, M., Kelton, G.**, *Hydrocyclone design for large sag mill circuits*, SAG Workshop, Chile, 2001.

**U.S.EPA** (United States Environmental Protection Agency), “*Soil Washing (Ex Situ Soil Remediation Technology)*”, Office of Emergency and Remediation Response, U.S.EPA, Washington, [http://www.clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Soil\\_Washing/cat/Overview/](http://www.clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Soil_Washing/cat/Overview/).

**U.S.EPA** (United States Environmental Protection Agency), *Guide for conducting treatability studies under CERCLA. Soil Washing*, United States Environmental Protection Agency, Estados Unidos de América, 1991.

**Van, D.**, *Remediation technologies screening matrix and reference Guide. 3ª Ed. Technology Innovation Office*, EPA, 2007.

**Vieira, L., Barbosa, B., Damasceno, J., Barrozo, M.**, *Performance analysis and design of filtering hydrocyclones*, Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 22, no. 1, Brasil, 2005, pg. 143-152.



**Wang, B., Yu, A.,** *Numerical study of the gas-liquid-solid flow in hydrocyclones with different configuration of vortex finder*, Chemical Engineering Journal, vol. 135, Australia, 2008, pg. 33-42.

**Yuan, H., Rickwood, D., Smyth, I., Thew, M.,** *An investigation into the possible use of hydrocyclones for the removal of yeast from beer*, Bioseparation, Londres, 1996, pg. 159-163.



## 10. APÉNDICES

### 10.1. Apéndice A

#### 1.- Método para determinación de Granulometría, ASTM D422-63

- Se seca el suelo, con el fin de eliminar el agua que contenga y facilitar el proceso de disgregación.
- La separación se efectúa por medio de mallas con una abertura de 1 ½, 1, ¾, ½, 3/8, ¼ pulgadas para la separación de las fracciones gruesas y medias del suelo. Los tamices número 10, 20, 40, 60, 80, 100 para la separación de fracciones finas del suelo.
- Las mallas se acomodan de la de mayor abertura a la de menor abertura.
- Se coloca una cantidad de suelo determinada en la malla superior y se comienza a agitar el arreglo de mallas por 15 o 20 minutos.
- Retirar las mallas una por una y depositar el contenido en recipientes o bolsas por separado, cuidando no tener pérdidas durante el trasvase.
- Pesar el suelo retenido por cada malla.
- Trazar la curva de distribución granulométrica.
- Calcular el coeficiente de uniformidad (Cu) y de curvatura (Cc).

#### Cálculos

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Ecuación 10.1} \quad \text{Coeficiente de uniformidad.}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad \text{Ecuación 10.2} \quad \text{Coeficiente de Curvatura.}$$

Donde:

$D_{60}$  Tamaño tal que el 60% en peso del suelo sea igual o menor.

$D_{10}$  Diámetro Efectivo. Es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10%, en peso del suelo.

$D_{30}$  Tamaño tal que el 30% en peso del suelo sea igual o menor.

#### 2.- Método para determinación de Humedad

- Encender la balanza de humedad y dejar calentar por alrededor de 20 minutos hasta alcanzar una temperatura estable y alrededor de 120°C.
- Programar el equipo a 45 minutos con calentamiento constante (120°C).
- Colocar una charola de aluminio sobre la balanza y tarar.



- Colocar en la charola 10 gramos de suelo, cerrar el equipo e iniciar el proceso de secado.
- Al término de los 45 minutos el equipo desplegara el porcentaje de humedad en el display.
- Se retira la charola se limpia y se procede a introducir una nueva muestra.

### 3.- Método de extracción por microondas

La técnica de determinación de hidrocarburos fracción pesada por medio de microondas se lleva a cabo como se describe en el siguiente procedimiento:

- Se debe conocer la humedad relativa de las muestras de suelo a tratar ya que es necesario para tener caracterizado el suelo y hacer el cálculo de Hidrocarburos Fracción Pesada del Petróleo (HFP).
- Teniendo los vasos de teflón limpio y seco, exclusivo para el horno de microondas, se pesan 3 g de muestra en cada uno, tratando que el suelo no se pegue en las paredes.
- Se agrega la cantidad de 40 ml de una mezcla 1:1 de acetona:hexano a cada uno de los vasos para posteriormente ser tapados y colocados en cada uno de los cartuchos del rack de extracción del microondas.
- Se debe tomar en consideración que el cartucho no.1 es el control, ya que en él se introduce un termopar que mide la temperatura y una sonda que mide la presión del recipiente, ya que estas dos variables controlan el proceso de extracción.
- Teniendo preparado los recipientes se procede a colocarlos en el carrusel del horno, colocándolos en el orden previsto. El recipiente control se coloca al final ya que se debe conectar tanto el termopar como la sonda de tal manera que no se enreden durante el proceso de extracción.
- Teniendo los recipientes dentro del horno se procede a determinar la potencia y el programa para llevar a cabo la extracción.

Tabla A1.- Potencia en Microondas

# Recipientes	Potencia ( W )
1-3	300
3-10	600
10-14	1200

- Al cargar el programa de extracción se debe verificar, que es el definido con HFP, el cual es un calentamiento en una rampa de 10 minutos hasta alcanzar la temperatura de 110°C, después de alcanzar la temperatura se continua con un calentamiento constante de 10 minutos..
- Al termino de la extracción el sistema inicia un enfriamiento de 20 minutos, al finalizar se proceden a sacar los recipientes, para ser enfriados en la campana de extracción de vapores por otros 20 minutos.
- Al término del enfriamiento se procede a abrir los recipientes para que los extractos sea filtrados.
- Para realizar la filtración es necesario tener matraces bola de base plana de una capacidad de 250 ml, estos deben estar a peso constante, tomando en cuenta que se debe tener registrado el peso de este.
- Se procede a realizar la filtración a presión atmosférica (755 mm Hg), con papel filtro Whatman No. 44.





- Al terminar de vaciar la fase acuosa del extracto se enjuaga con 2 ml de mezcla acetona:hexano, dos veces tanto el recipiente de teflón, el papel filtro y el embudo filtrador.
- Después de esto se procede a evaporar la mezcla acetona-hexano en el rotavapor a fin de que solo quede el extracto 1 que contiene HFP y algunos minerales.
- Los matraces con el extracto 1 son llevados a la estufa, para ponerlos a peso constante por 1 hora y después otra hora en el desecador para ser pesados nuevamente y así obtener por diferencia el peso del extracto 1, con el cual se calculara la cantidad de silica necesaria para purificar el extracto.

Tabla A2.- Purificación de extracto

Peso Extracto (mg)	Silica (g)
0 a 100	3
101 a 200	6
201 a 300	9

- Se procede a diluir nuevamente el extracto 1 con 70 ml de hexano únicamente, con agitación magnética hasta que el extracto se disuelva.
- Posteriormente se agrega la cantidad de silica necesaria y se agita por 5 minutos nuevamente, cabe decir que en este paso, ya deben estar a peso constante otro juego de matraces de las mismas características con peso conocido.
- Se procede a filtrar la silica que purifico el extracto 1, esta filtración es al vacío, por lo que es necesario el uso de un kitazato, embudo con tapón monohoradado, papel filtro Whatman No. 44 y pinzas.
- Después de filtrar la silica se procede a enjuagar 2 veces (2 ml de hexano) tanto el matraz que contenía el extracto 1, el embudo y el kitazato, para evitar pérdidas de extracto 2.
- Después se lleva los matraces al rotavapor para evaporar el hexano contenido y así obtener el peso del extracto 2.
- Después de evaporar el hexano se procede a llevar los matraces a la estufa donde permanecerán por 1 hora y otra más en el desecador, para después ser pesados y por diferencia de pesos obtener los mg/kg de hidrocarburos totales del petróleo.
- Se procede a lavar todo el material, tomando en cuenta que los recipientes de teflón se deben lavar con detergente libre de fosfatos y además con una esponja para evitar su deterioro.
- Por su parte los matraces bola de base plana se deben lavar con jabón y agua abundante a fin de quedar libres de cualquier suciedad.

Calculo de Peso de Hidrocarburos Fracción Pesada del Petróleo

$$\text{Pesofinal del matraz(g)} - \text{Peso inicial del matraz(g)} = \text{Peso de extracto(g)}$$

*Ecuación 10.3*



#### Calculo de Peso del Suelo Seco

$$\frac{(100 - \% \text{ Humedadrelativa})(\text{Pesode suelo humedo(g)})}{100} = \text{Pesode suelo seca(g)} \quad \text{Ecuación 10.4}$$

#### Calculo de partes por millón de hidrocarburo

$$\left[ \frac{\text{Pesode hidrocarburo extraído(g)}}{\text{Pesode suelo seco(g)}} \right] \left[ \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right] \left[ \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right] = \text{ppm de hidrocarburo (mg/kg)} \quad \text{Ecuación 10.5}$$

### 4.- Método para determinación de densidad real

- Pesar un picnómetro limpio (ver Figura A1) y perfectamente seco (1).
- Colocar en el interior del picnómetro 5 g de suelo usando un embudo plástico.
- Anotar el peso del matraz con suelo, manteniendo el matraz completamente limpio (evitar humedad y/o grasa en las manos) (2).
- Adicionar agua destilada hervida recientemente y fría hasta la mitad del volumen del matraz; girar este entre los dedos con mucha suavidad y colocarlo en el desecador de vacío.
- Hacer vacío durante 15 minutos para eliminar todo el aire retenido en el suelo. La succión de la bomba deberá aumentarse paulatinamente para evitar pérdidas de material por formación de espuma.
- Dejar reposar dentro del desecador por 30 minutos aproximadamente y eliminar el vacío del desecador paulatinamente, sacar el matraz y llenar hasta el aforo con agua destilada hervida y fría, secar perfectamente el exterior y pesar en la balanza analítica (3).
- Tomar la temperatura de la suspensión.
- Vaciar el matraz, enjuagarlo perfectamente y llenarlo hasta el aforo con agua destilada, hervida y fría.
- Pesar el matraz con agua y tomar la temperatura, anotarla (4).

#### Cálculos

Peso de las partículas de suelo (ps)

$$ps = (2) - (1) \quad \text{Ecuación 10.6}$$

Volumen de las partículas del suelo (vs)

$$vs = \frac{(4) - (1)}{\rho_w} - \frac{(3) - (2)}{\rho_w} = \frac{\text{Pesodel agua desplazada por partículas del suelo}}{\text{Densidad del agua}} \quad \text{Ecuación 10.7}$$

$$\text{Densidad real}(\rho_s) = \frac{ps}{vs} \quad \text{Ecuación 10.8}$$



Nota: Es necesario corregir el valor de la densidad del agua por efecto de la temperatura.



Figura A1.- Picnómetros para determinación de densidad real

### 5.- Método para determinación de densidad aparente

- Pesar una probeta (ver Figura A2) de 10 ml vacía.
- Agregar suelo hasta los 10 ml y golpear ligeramente diez veces, sobre una franela.
- Agregar más suelo, hasta completar nuevamente los 10 ml.
- Pesar la probeta con el suelo.
- Restar el peso de la probeta y calcular la densidad.

Cálculos

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Peso del suelo (g)}}{\text{Volumen de la probeta (ml)}} \quad \text{Ecuación 10.9}$$



Figura A2.- Probetas para densidad aparente



## 10.2. Apéndice B

### 1.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica del suelo inicial

Tabla B1.- Porcentajes de suelo retenido, suelo de estudio

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0,00	4,75	0,00	756,23	100,00	0,00
10	33,45	2,00	33,45	722,78	95,58	4,42
60	487,84	0,25	521,29	234,94	31,07	68,93
100	75,54	0,15	596,83	159,40	21,08	78,92
200	94,15	0,08	690,98	65,25	8,63	91,37
270	31,74	0,05	722,72	33,51	4,43	95,57
325	25,97	0,05	748,69	7,54	1,00	99,00
400	6,38	0,04	755,07	1,16	0,15	99,85
500	1,05	0,03	756,12	0,11	0,01	99,99
Charola	0,11	<0.025	756,23			
Peso Total	756,23					

### 2.- Remociones obtenidas en sistema microcosmos

Tabla B2.- Porcentajes de remoción en sistema microcosmos

No.	Descripción	% Remoción R1	% Remoción R2
1	Surfacpol A	66.01	63.02
2	Polafix Lo	63.93	62.52
3	Polafix Capb	51.14	62.24
4	Tween 20	48.82	58.14
5	Tween 60	63.23	57.70
6	Tween 80	63.74	60.27
7	Surfacpol 203	53.15	59.21
8	Surfacpol G	61.70	56.29
9	Emulgin 600	34.63	46.46
10	Emulgin 1000	62.92	51.51
11	Brij 35	57.51	44.79
12	Texapon 40	65.82	42.49
13	Brij 58	62.63	24.33
14	Brij 72	31.37	19.57



### 3.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica de suelo después de tratamiento

Tabla B3.- Porcentajes de suelo retenido, suelo tratado

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	557.50	100.00	0.00
10	1.99	2.00	1.99	555.51	99.64	0.36
60	158.41	0.25	160.40	397.10	71.23	28.77
100	63.8	0.15	224.20	333.30	59.78	40.22
200	104.62	0.08	328.82	228.68	41.02	58.98
270	129.12	0.05	457.94	99.56	17.86	82.14
325	59.06	0.05	517.00	40.50	7.26	92.74
400	32.57	0.04	549.57	7.93	1.42	98.58
500	5.78	0.03	555.35	2.15	0.39	99.61
Charola	2.15	<0.025	557.50			
Peso Total	557.50					

### 4.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica de la descarga inferior al 20% Qmax

Tabla B4.- Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 20% Qmax

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	334.74	100.00	0.00
10	1.37	2.00	1.37	333.37	99.59	0.41
60	99.67	0.25	101.04	233.70	69.82	30.18
100	62.68	0.15	163.72	171.02	51.09	48.91
200	124.78	0.08	288.50	46.24	13.81	86.19
270	20.33	0.05	308.83	25.91	7.74	92.26
325	19.04	0.05	327.87	6.87	2.05	97.95
400	4.81	0.04	332.68	2.06	0.62	99.38
500	1.19	0.03	333.87	0.87	0.26	99.74
Charola	0.87	<0.025	334.74			
Peso total	334.74					



### 5.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica del derrame al 20% Qmax

Tabla B5.- Porcentajes de suelo retenido, derrame al 20% Qmax

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	66.78	100.00	0.00
10	0.13	2.00	0.13	66.65	99.81	0.19
60	5.71	0.25	5.84	60.94	91.25	8.75
100	1.77	0.15	7.61	59.17	88.60	11.40
200	4.34	0.08	11.95	54.83	82.11	17.89
270	8.26	0.05	20.21	46.57	69.74	30.26
325	9.4	0.05	29.61	37.17	55.66	44.34
400	13.33	0.04	42.94	23.84	35.70	64.30
500	11.37	0.03	54.31	12.47	18.67	81.33
Charola	12.47	<0.025	66.78			
Peso total	66.78					

### 6.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica de descarga inferior al 20% Q = 150 lpm

Tabla B6.- Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 20% Q=150lpm

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	727.97	100.00	0.00
10	29.73	2.00	29.73	698.24	95.92	4.08
60	313.70	0.25	343.43	384.54	52.82	47.18
100	65.31	0.15	408.74	319.23	43.85	56.15
200	83.27	0.08	492.01	235.96	32.41	67.59
270	42.14	0.05	534.15	193.82	26.62	73.38
325	80.85	0.05	615.00	112.97	15.52	84.48
400	60.94	0.04	675.94	52.03	7.15	92.85
500	26.10	0.03	702.04	25.93	3.56	96.44
Charola	25.93	<0.025	727.97			
Peso total	727.97					



### 7.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica del derrame al 20% Q = 150 lpm

Tabla B7.- Porcentajes de suelo retenido, derrame al 20% Q=150 lpm

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	43.27	100.00	0.00
10	0.25	2.00	0.25	43.02	99.42	0.58
60	9.47	0.25	9.72	33.55	77.54	22.46
100	1.78	0.15	11.50	31.77	73.42	26.58
200	11.11	0.08	22.61	20.66	47.75	52.25
270	5.31	0.05	27.92	15.35	35.47	64.53
325	9.67	0.05	37.59	5.68	13.13	86.87
400	4.84	0.04	42.43	0.84	1.94	98.06
500	0.84	0.03	43.27	0.00	0.00	100.00
Charola	0	<0.025	43.27			
Peso total	43.27					

### 8.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica de descarga inferior al 20% Q = 200 lpm

Tabla B8.- Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 20% Q=200 lpm

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	214.02	100.00	0.00
10	0.34	2.00	0.34	213.68	99.84	0.16
60	36.12	0.25	36.46	177.56	82.96	17.04
100	22.23	0.15	58.69	155.33	72.58	27.42
200	32.49	0.08	91.18	122.84	57.40	42.60
270	30.63	0.05	121.81	92.21	43.08	56.92
325	28.24	0.05	150.05	63.97	29.89	70.11
400	33.05	0.04	183.10	30.92	14.45	85.55
500	16.97	0.03	200.07	13.95	6.52	93.48
Charola	13.95	<0.025	214.02			
Peso total	214.02					



**9.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica del derrame al 20% Q = 200 lpm**

Tabla 89.- Porcentajes de suelo retenido, derrame al 20% Q=200 lpm

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	49.35	100.00	0.00
10	0.05	2.00	0.05	49.30	99.90	0.10
60	3.6	0.25	3.65	45.70	92.60	7.40
100	1.17	0.15	4.82	44.53	90.23	9.77
200	1.53	0.08	6.35	43.00	87.13	12.87
270	5.17	0.05	11.52	37.83	76.66	23.34
325	9.65	0.05	21.17	28.18	57.10	42.90
400	10.91	0.04	32.08	17.27	34.99	65.01
500	5.82	0.03	37.90	11.45	23.20	76.80
Charola	11.45	<0.025	49.35			
Peso total	49.35					

**10.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica de descarga inferior al 30% Qmax**

Tabla 810.- Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 30% Qmax

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	252.32	100.00	0.00
10	0.28	2.00	0.28	252.04	99.89	0.11
60	34.98	0.25	35.26	217.06	86.03	13.97
100	22.72	0.15	57.98	194.34	77.02	22.98
200	61.80	0.08	119.78	132.54	52.53	47.47
270	50.27	0.05	170.05	82.27	32.61	67.39
325	43.06	0.05	213.11	39.21	15.54	84.46
400	23.58	0.04	236.69	15.63	6.19	93.81
500	9.47	0.03	246.16	6.16	2.44	97.56
Charola	6.16	<0.025	252.32			
Peso total	252.32					





### 11.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica de derrame al 30% Q<sub>max</sub>

Tabla B11.- Porcentajes de suelo retenido, derrame al 30% Q<sub>max</sub>

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	57.54	100.00	0.00
10	0	2.00	0.00	57.54	100.00	0.00
60	2.46	0.25	2.46	55.08	95.72	4.28
100	1.41	0.15	3.87	53.67	93.27	6.73
200	3.45	0.08	7.32	50.22	87.28	12.72
270	5.28	0.05	12.60	44.94	78.10	21.90
325	13.21	0.05	25.81	31.73	55.14	44.86
400	13.92	0.04	39.73	17.81	30.95	69.05
500	6.4	0.03	46.13	11.41	19.83	80.17
Charola	11.41	<0.025	57.54			
Peso total	57.54					

### 12.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica de descarga inferior al 30% Q=200 lpm

Tabla B12.- Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 30% Q= 200 lpm

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0	4.75	0.00	279.86	100.00	0.00
10	3.07	2.00	3.07	276.79	98.90	1.10
60	94.96	0.25	98.03	181.83	64.97	35.03
100	38.02	0.15	136.05	143.81	51.39	48.61
200	42.25	0.08	178.30	101.56	36.29	63.71
270	29.89	0.05	208.19	71.67	25.61	74.39
325	27.35	0.05	235.54	44.32	15.84	84.16
400	28.72	0.04	264.26	15.60	5.57	94.43
500	10.64	0.03	274.90	4.96	1.77	98.23
Charola	4.96	<0.025	279.86	0.00		
Peso total	279.86					



### 13.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica de derrame al 30% Q=200 lpm

Tabla B13.- Porcentajes de suelo retenido, derrame al 30% Q= 200 lpm

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	54.13	100.00	0.00
10	0.18	2.00	0.18	53.95	99.67	0.33
60	5.22	0.25	5.40	48.73	90.02	9.98
100	1.62	0.15	7.02	47.11	87.03	12.97
200	2.74	0.08	9.76	44.37	81.97	18.03
270	6.52	0.05	16.28	37.85	69.92	30.08
325	11.33	0.05	27.61	26.52	48.99	51.01
400	12.19	0.04	39.80	14.33	26.47	73.53
500	3.77	0.03	43.57	10.56	19.51	80.49
Charola	10.56	<0.025	54.13			
Peso total	54.13					

### 14.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica de descarga inferior al 30% Q=150 lpm

Tabla B14.- Porcentajes de suelo retenido, descarga inferior al 30% Q= 150 lpm

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0	4.75	0.00	216.23	100.00	0.00
10	1.22	2.00	1.22	215.01	99.44	0.56
60	55.48	0.25	56.70	159.53	73.78	26.22
100	23.21	0.15	79.91	136.32	63.04	36.96
200	35.35	0.08	115.26	100.97	46.70	53.30
270	15.45	0.05	130.71	85.52	39.55	60.45
325	20.49	0.05	151.20	65.03	30.07	69.93
400	23.06	0.04	174.26	41.97	19.41	80.59
500	22.37	0.03	196.63	19.60	9.06	90.94
Charola	19.60	<0.025	216.23			
Peso total	216.23					



### 15.- Porcentajes y pesos de la curva granulométrica del derrame al 30% Q=150 lpm

Tabla B15.- Porcentajes de suelo retenido, derrame al 30% Q= 150 lpm

Malla	Peso retenido (g)	Abertura (mm)	Peso retenido acumulado (g)	Peso que pasa acumulado (g)	% que pasa	% retenido
4	0.00	4.75	0.00	37.93	100.00	0.00
10	0	2.00	0.00	37.93	100.00	0.00
60	2.66	0.25	2.66	35.27	92.99	7.01
100	0.57	0.15	3.23	34.70	91.48	8.52
200	1.24	0.08	4.47	33.46	88.22	11.78
270	4.09	0.05	8.56	29.37	77.43	22.57
325	8.57	0.05	17.13	20.80	54.84	45.16
400	10.16	0.04	27.29	10.64	28.05	71.95
500	3.69	0.03	30.98	6.95	18.32	81.68
Charola	6.95	<0.025	37.93			
Peso total	37.93					

### 16.- Hidrocarburo fracción pesada de pruebas de lavado en hidrociclón

Tabla B16.- Tratamiento de hidrocarburo fracción pesada

#	Descripción	Peso suelo (g)	Peso matraz 1(g)	Peso matraz 1.1(g)	Peso matraz 2(g)	Peso matraz 2.1(g)	Humedad %	Suelo seco(g)	Peso Extracto(g)	HFP (mg/kg)
1	S0	3.0667	68.8222	68.9137	63.7530	63.7876	10.0000	2.7600	0.0346	12536
2	Overflow	3.0703	69.1024	69.2062	64.3152	64.3541	10.0000	2.7633	0.0389	14078
3	Duplicado S0	3.0736	70.8640	70.9474	63.5775	63.6190	10.0000	2.7662	0.0415	15002
4	Underflow	4.9465	64.5141	64.6037	65.5335	65.5830	10.0000	4.4519	0.0495	11119
5	Lavado 1	3.0062	64.3123	64.3673	65.5365	65.5587	12.7000	2.6244	0.0222	8459
6	Lavado 1 duplicado	3.0497	67.7710	67.8109	63.7452	63.7636	12.7000	2.6624	0.0184	6911
7	Lavado 2	3.7268	70.8609	70.8963	64.5151	64.5410	10.0000	3.3541	0.0259	7722
8	Lavado 2 duplicado	3.0374	73.0910	73.1200	68.8234	68.8517	10.0000	2.7337	0.0283	10352



**17.- Modelo completamente aleatorizado para eficiencia de hidrociclón variando concentración de sólidos**

Tabla B17.- Anova para eficiencia de hidrociclón

Fuente de variación	G.L.	SS	MS	F
Tratamientos	1	0,67	0,66	$F_0 = 0,01$
Bloques	2	101,33	50,66	$F_{2,2} = 19$ $F_0 < F$ <b>Acepta <math>H_0</math></b>
Error	2	165,33	82,66	
Total	5	267,33		

**18.- Modelo completamente aleatorizado para porcentaje de finos en la descarga inferior variando concentración de sólidos**

Tabla B18.- Anova para concentración de finos en descarga inferior

Fuente de variación	G.L.	SS	MS	F
Tratamientos	1	169.50	169.49	$F_0 = 0,37$
Bloques	2	187.28	93.64	$F_{2,2} = 19$ $F_0 < F$ <b>Acepta <math>H_0</math></b>
Error	2	904.89	452.44	
Total	5	1261.67		



**19.- Modelo completamente aleatorizado para porcentaje de finos en el derrame variando concentración de sólidos**

Tabla B19.- Anova para concentración de finos en derrame

Fuente de variación	G.L.	SS	MS	F
Tratamientos	1	273.11	273.10	$F_0 = 0,95$
Bloques	2	369.21	184.60	$F_{2,2} = 19$ $F_0 < F$ <b>Acepta <math>H_0</math></b>
Error	2	572.12	286.06	
Total	5	1214.44		