

**EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE PARTICULAS Y CONDICIONES DE
ENTRADA EN LA EFICIENCIA DE REMOCION DE DESARENADORES
CONVENCIONALES Y DESARENADORES DE PLACAS INCLINADAS**

ESTUDIANTES:

JIMMY FRANCISCO NARVAEZ A.

JOHN JAIRO GUERRERO CH.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL

SAN JUAN DE PASTO, FEBRERO DE 2010.

**EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE PARTICULAS Y CONDICIONES DE
ENTRADA EN LA EFICIENCIA DE REMOCION DE DESARENADORES
CONVENCIONALES Y DESARENADORES DE PLACAS INCLINADAS**

ESTUDIANTES:

JIMMY FRANCISCO NARVÁEZ A.

JOHN JAIRO GUERRERO CH.

**Trabajo de Investigación presentado como requisito parcial
para optar al título de ingeniero civil**

Director

HERNÁN JAVIER GÓMEZ ZAMBRANO

Ingeniero Civil

Magíster en Recursos Hidráulicos

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL

SAN JUAN DE PASTO, FEBRERO DE 2010.

NOTA DE RESPONSABILIDAD

La Universidad de Nariño no es responsable por las ideas, opiniones, resultados y/o conclusiones derivadas de la presente investigación.

Artículo 1 de acuerdo N° 324 de octubre de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño

NOTA DE ACEPTACION :

DIRECTOR

JURADO

JURADO

Pasto, 25 febrero de 2010

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

Hernán Gómez Zambrano: I.C. Msc. En Recursos Hidráulicos. Profesor Titular de la Universidad de Nariño. Por su gran colaboración, Orientación y motivación.

Roberto García C: I.A., Auxiliar de laboratorio de la Universidad de Nariño, por sus atenciones. Y su gran disposición en momentos De necesidad.

CONTENIDO

	Pág.
1. MARCO REFERENCIAL.....	31
1.1 GENERALIDADES.....	32
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS Y FORMAS DE SEDIMENTACION.....	33
1.2.1 Sedimentación de partículas discretas.....	32
1.2.2 Sedimentación de partículas floculentas.....	32
1.2.3 Sedimentación por caída libre e interferida.....	32
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS.....	33
1.4 TEORIA DE LA SEDIMENTACION.....	49
1.5 DESARENADORES CONVENCIONALES.....	35
1.5.1 Estudio de los desarenadores.....	36
1.5.2 Parámetros de diseño.....	40
1.6 DESARENADOR DE PLACAS INCLINADAS.....	42
1.6.1 Descripción del sistema.....	42

1.6.2 Fórmulas básicas.....	42
1.6.3 Cálculo de la longitud útil y de fondo en la zona de placas.....	47
1.7 TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN CHENG, (1997a, b).....	48
1.7.1. Para partículas individuales.....	49
1.7.2 Partículas afectadas por la concentración.....	50
1.8 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE VARIABLE.....	50
2. ADECUACIÓN DE LOS MONTAJES DE LABORATORIO.....	52
2.1 DESARENADOR CONVENCIONAL.....	52
2.2 DESARENADOR DE PLACAS.....	60
3. CONSTRUCCIÓN Y ARMADO DEL MONTAJE DE LABORATORIO.....	66
3.1 HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL MONTAJE DE LABORATORIO...	66
3.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS.....	67
3.2.1 Impermeabilización, limpieza y pintura del tanque existente.....	67
3.2.2 Construcción canaleta de salida.....	68
3.2.3 Construcción de la ampliación del tanque.....	69
3.2.4 Construcción del mezclador y dosificador.....	70

3.2.5 Instalaciones hidráulicas realizadas.....	72
3.3 ADECUACIÓN DESARENADOR DE PLACAS.....	76
4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO Y TOMA DE DATOS.....	76
4.1 OBTENCIÓN DEL SEDIMENTO.....	76
4.2 ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA.....	78
4.3 ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO DEL MATERIAL.....	78
4.4 PROCESO ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO DEL MATERIAL.....	78
4.4.1 Proceso para medición del caudal.....	82
4.5 SELECCIÓN DE MATERIAL.....	83
4.6 CALIBRACIÓN DEL CAUDAL SÓLIDO.....	85
4.7 PROCEDIMIENTO PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	85
4.7.1 Número de ensayos.....	85
4.8 PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE DATOS.....	86
4.8.1 Procedimiento de toma de datos.....	86
4.8.2 Procedimiento para calcular la eficiencia.....	88

5. PRUEBAS, ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN LOS SISTEMAS.....	88
5.1 PRUEBAS EN DESARENADOR CONVENCIONAL (DEFLECTOR DE COMPUERTA).....	88
5.1.1 Pruebas de variación de concentración.....	88
5.1.2 Pruebas con variación de altura de deflector de compuerta.....	96
5.1.3 Pruebas de variación de caudal.....	101
5.2 PRUEBAS EN DESARENADOR CONVENCIONAL (DEFLECTOR DE ORIFICIOS).....	102
5.2.1 Pruebas de variación de concentración.....	105
5.2.2 Pruebas con variación de caudal.....	109
5.3 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE OBSTACULIZADO C'D.	109
5.3.1 Cálculo del coeficiente de arrastre de partículas afectadas por la mezcla para deflector de compuerta.....	110
5.3.2 Cálculo del coeficiente de arrastre de partículas afectadas por la mezcla para deflector de orificios.....	114
5.4 ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN SISTEMA CONVENCIONAL (DEFLECTOR DE COMPUERTA).....	119
5.5 ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN SISTEMA CONVENCIONAL (DEFLECTOR DE ORIFICIOS).....	127

5.6. PRUEBAS EN SISTEMA DESARENADOR DE PLACAS (ENTRADA DISTRIBUIDA).....	128
5.6.1 Pruebas de variación de concentración.....	131
5.7 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE OBSTACULIZADO C'D.	134
5.8 ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN SISTEMA DE PLACAS (ENTRADA DISTRIBUIDA).....	139
5.9 PRUEBAS EN SISTEMA DESARENADOR DE PLACAS (ENTRADA NO DISTRIBUIDA).....	141
5.9.1 Pruebas de variación de concentración.....	143
5.10 ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN SISTEMA DE PLACAS (ENTRADA NO DISTRIBUIDA).....	144
5.11 RELACION CONCENTRACION - EFICIENCIA (SISTEMA DE PLACAS).....	146
5.12 ANALISIS GRAFICO DE RESULTADOS.....	146
5.12.1 Análisis de gráficas para el efecto de la concentración de partículas y condiciones de entrada en desarenador convencional.....	147
5.11.2 Análisis de gráficas para el efecto de la concentración de partículas y condiciones de entrada en desarenador de placas.....	148
5.12.3 Análisis de gráficas para la eficiencia de remoción para los dos sistemas desarenadores	150

6. METODOLOGIA DE DISEÑO PARA DESARENADOR CONVENCIONAL.....	150
6.1 USANDO DEFLECTOR DE COMPUERTA.....	150
6.2 USANDO DEFLECTOR DE ORIFICIOS.....	159
7. CONCLUSIONES.....	162
8. RECOMENDACIONES.....	163
BIBLIOGRAFÍA.....	164
ANEXOS.....	165

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Velocidad de asentamiento Gráfica de Fair Geyer.....	35
Figura 2. Esquema general de un desarenador convencional con indicación de las zonas definidas.....	35
Figura 3. Trayectoria de las partículas sedimentadas.....	37
Figura 4. Velocidad de sedimentación de partículas.....	41
Figura 5. Trayectoria de las partículas y descomposición de velocidades entre dos Placas.....	44
Figura 6. Diagrama de distribución de velocidades en la zona de entrada.....	45
Figura 7. Áreas perpendiculares de las placas	48
Figura 8. Longitud en un desarenador de placas.....	49
Figura 9. Dimensiones del tanque que existía en laboratorio.....	54
Figura 10. Dimensiones del tanque añadido la sección	52
Figura 11. Esquema ingreso a la zona de entrada.....	52
Figura 12. Distribuciones de orificios.....	56
Figura 13. Vertedero de salida.....	58

Figura 14. Deflector de orificios.....	59
Figura 15. Deflector de compuerta.....	59
Figura 16. Esquema desarenador de placas.....	65
Figura 17. Sistema de entrada distribuida con sección variable.....	66
Figura 18. Sistema de entrada tipo flauta.....	67
Figura 19. Sistema de salida.....	68
Figura 20. Equipo de eléctrico.....	68
Figura 21. Herramienta utilizada.....	68
Figura 22. Equipo de protección.....	69
Figura 23. Limpieza e Impermeabilización.....	69
Figura 24. Orificios para de ensamble.....	69
Figura 25. Ensamble canaleta.....	70
Figura 26. Remachado de canaleta.....	70
Figura 27. Terminado bordes.....	70
Figura 28. Masillado esquinas.....	70
Figura 29. Aplicación de pintura.....	71

Figura 30. Aplicación de anticorrosivo.....	71
Figura 31. Ensamble del sistema en el laboratorio.....	71
Figura 32. Construcción vertedero.....	72
Figura 33. Abertura salida de la canaleta.....	72
Figura 34. Soporte mezclador.....	72
Figura 35. Adaptación motor.....	72
Figura 36. Adaptaciones de banda.....	73
Figura 37. Armado del mezclador.....	73
Figura 38. Pintura.....	73
Figura 39. Terminado mezclador dosificador.....	73
Figura 40. Adaptación universal.....	74
Figura 41. Bomba que alimenta el sistema.....	74
Figura 42. Universal mezclador.....	74
Figura 43. Ensamble de codo 90°.....	74
Figura 44. Codo de entrada al mezclador y válvulas de compuerta.....	75

Figura 45. Distribución de orificios utilización taladro.....	75
Figura 46. Ensamble final.....	76
Figura 47. Medir.....	77
Figura 48. Cortar.....	77
Figura 49. Ensamble.....	79
Figura 50. Entrada tipo flauta.....	80
Figura 51. Curva granulométrica de la arena comprendida entre fina y muy fina.....	81
Figura 52. Material extendido para verificar su estado.....	81
Figura 53. Llenado material.....	81
Figura 54. Verificación de estado.....	81
Figura 55. Peso de la muestra.....	82
Figura 56. Llenado material.....	82
Figura 57. Extracción de aire.....	84
Figura 58. Baño María.....	84
Figura 59. Medición de caudal.....	85

Figura 60. Sistema de aforo.....	86
Figura 61. Dosificador de cono.....	86
Figura 62. Curva de calibración caudal sólido para válvula de 1”.....	86
Figura 63. Curva de calibración caudal sólido para válvula de 1 ¼”.....	86
Figura 64. Eficiencia de remoción de la partícula crítica Vs concentración total en sedimentador convencional con deflector de compuerta.....	86
Figura 65. Eficiencia Vs altura de compuerta en sedimentador convencional	86
Figura 66. Eficiencia de remoción Vs variación de caudal. Por lo que varía así mismo Froude en sedimentador convencional y para deflector de orificios.....	94
Figura 67. Eficiencia de remoción de la partícula crítica Vs concentración en sedimentador convencional con deflector de orificios.....	98
Figura 68. Eficiencia de remoción Vs variación de caudal.....	102
Figura 69. Eficiencia Vs concentración en desarenador de placas con entrada distribuida.....	109
Figura 70. Eficiencia Vs concentración en desarenador de placas con entrada tipo flauta o no distribuida.....	132
Figura 71. Comparación entre la velocidad de sedimentación calculada con la ecuación[2.43] y la eficiencia de remoción (valores experimentales obtenidos en laboratorio).....	144
Figura 72. Sedimentación de una mezcla de arena y agua entre dos placas planas inclinadas. En la práctica a < concentración.....	150

Figura 73. Sedimentación de una mezcla de arena y agua entre dos placas planas inclinadas. En la práctica a > concentración.....	151
Figura 74. Comparación entre los dos tipos de deflectores en desarenador convencional.....	152
Figura 75. Comparación entre los dos tipos de entrada en sedimentador de placas.....	153
Figura 76. Comparación entre los dos sistemas desarenadores.....	154

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de sedimentos naturales según su tamaño. Según La American Society of Testing Material (ASTM). Dada por Lane (Yang 1996)...	33
Tabla 2. Valores de a / t.....	39
Tabla 3. Datos para tanque desarenador convencional.....	42
Tabla 4. Datos para desarenador de placas.....	55
Tabla 5. Análisis granulométrico para una muestra de 1000gr.....	62
Tabla 6. Tabla de aforo.....	79
Tabla 7. Caudal sólido suministrado por el dosificador con llave de compuerta de 1”.....	81
Tabla 8. Caudal sólido suministrado por el dosificador con llave de compuerta de 1 ¼”.....	84
Tabla 9. Variación en los parámetros de ensayo.....	86
Tabla 10. Variación en los parámetros de ensayo.....	88
Tabla 11. Variación de la concentración.....	89
Tabla 12. Cálculos (ver figura 64).....	93

Tabla 13. Variación de la altura del deflector.	94
Tabla 14. Resultados (ver figura 65)	97
Tabla 15. Variación del caudal.....	98
Tabla 16. Cálculos (ver figura 66)	101
Tabla 17. Variación de la concentración.....	102
Tabla 18. Cálculos (ver figura 67)	105
Tabla 19. Variación de la caudal.....	106
Tabla 20. Resultados (ver figura 68)	109
Tabla 21. Cálculo de las propiedades de los sedimentos con variación de la concentración.	110
Tabla 22. Cálculo de las propiedades de los sedimentos con variación de la concentración.....	114
Tabla 23. Datos a analizar con regresión múltiple.....	116
Tabla 24. Logaritmos de los datos de la tabla 22.....	116
Tabla 25. Regresión múltiple de los datos Tabla 23.....	120
Tabla 26. Resultados al calcular la relación de eficiencias y B con las ecuaciones [6.35] y [6.36] y sus porcentajes de error.....	120
Tabla 27. Datos a analizar con regresión múltiple.....	122

Tabla 28. Logaritmos de los datos tabla 26.....	123
Tabla 29. Regresión múltiple de los datos de la Tabla 27.....	126
Tabla 30. Resultados al calcularla relación de eficiencias y B con las ecuaciones [6.47] y [6.48] y sus porcentajes de error.	127
Tabla 31. Parámetros necesarios para el análisis.....	128
Tabla 32. Datos arrojados en las pruebas (ver figura 69).....	131
Tabla 33. Cálculo de las propiedades de los sedimentos con variación de la concentración.....	135
Tabla 34. Datos a analizar con regresión múltiple.....	136
Tabla 35. Logaritmos de los datos variación de concentración tabla 33.....	136
Tabla 36. Regresión múltiple de los datos de la tabla 34 en Excel.....	139
Tabla 37. Corresponde a los parámetros necesarios para el análisis.....	140
Tabla 38. Datos arrojados en las pruebas (ver figura 70.....	143
Tabla 39. Datos a analizar con regresión múltiple.....	144
Tabla 40. Logaritmos de los datos.....	144
Tabla 41. Regresión múltiple de los datos de la tabla 39 en Excel.....	145

RESUMEN

La presente investigación forma parte de los proyectos pertenecientes a las líneas de investigación inscritas en la VIPRI de la Universidad de Nariño, dentro de la temática “transporte hidráulico de mezclas y flujo torrencial”. La presente investigación incluye el estudio del efecto que tendría la variación de concentración de partículas discretas y las condiciones de entrada en la eficiencia de remoción de partículas en los desarenadores de placas y desarenadores convencionales.

Las mezclas de agua y sedimentos naturales son muy comunes en la naturaleza están constituidas generalmente por sólidos como arena, grava, arcillas y varios tipos de minerales y agua. En la minería se manejan comúnmente mezclas de minerales en matrices aluviales y agua. El transporte hidráulico de sólidos (THS), adquiere su importancia en el diseño de sistemas desarenadores, presas pequeñas, manejo de lodos en plantas de tratamiento, etc.

Para que la ejecución de la presente investigación se adecuara un equipo de laboratorio que permitió realizar todos los procedimientos requeridos para la obtención de datos. El montaje de laboratorio cuenta con un tanque sedimentador convencional el cual se transformó en sedimentador de placas con facilidad, un dosificador de sólidos con mezclador de paletas, sistema de aforo de caudales de entrada y salida que permitieron el estudio del comportamiento de los parámetros involucrados.

Se obtuvo como resultados ecuaciones empíricas que explican el efecto de la concentración y las características de los deflectores en los desarenadores convencionales, que pueden ser usadas para efectos de diseño. Se comprobó el efecto de la concentración y las condiciones de entrada en los sedimentadores de placas inclinadas, aunque no fue posible establecer correlaciones matemáticas para diseño en estos últimos, se realiza una comparación cualitativa que da bases para continuar investigando este tema.

Palabras claves. Desarenador, sedimentador, concentración, transporte de mezclas.

ABSTRACT

The present investigation comprises of the projects pertaining to the lines of investigation enrolled in the VIPRI of the University of Nariño, within the thematic “hydraulic transport of mixtures and torrential flow”. The present investigation includes study of the effect that would have the variation of discrete particle concentration and the conditions of entrance in the removal efficiency of particles in the sand trap of plates and conventional sand trap.

The mixtures of water and natural sediments are very common in the nature are constituted generally by solids like sand, burdens, clays and several types of minerals and water. In the mining to minerals mixtures of in alluvial matrices and water are handled commonly. The hydraulic solid transport (THS), acquires its importance in the design of sand trap systems, imprisoned small, mud handling in treatment plants, etc.

So that the execution of the present investigation. The authors adapt myself laboratory equipment that allowed to make all the procedures required for the obtaining of data. The laboratory assembly counts on a conventional settler tank which was transformed into settler of plates with facility, a solid dispenser with mixer of trowels, system of gauging of entrance volumes and exit that they allowed the study of the behaviour of the involved parameters.

One obtained like results equations empiricists who explain the effect of the concentration and the characteristics of the baffle plates in the conventional settler that can be used for design effects. One verified the effect of the concentration and the conditions of entrance in the settler of inclined plates, although it was not possible to establish mathematical correlations for design in these last ones, is made a qualitative comparison that gives bases to continue investigating this subject.

Key Word: sand trap, settler, concentration, hydrotransport.

SIMBOLOGÍA

A_s = Área superficial.

A_t = Área transversal.

A_{tub} = Área de tubo.

A_o = Área neta perpendicular a las placas.

A_h = Área neta horizontal del decantador.

A_R = área perpendicular de las placas.

AT = área horizontal total del decantador (incluye el espesor de placas)

A_{min} = Área mínima.

a = Periodo de retención hidráulico.

a_a = Periodo de retención hidráulico asumido.

a_e = Separación de orificios cara a cara.

B = Ancho del sedimentador.

B_p = Ancho útil de placas.

C_d = Coeficiente de arrastre de la partícula individual.

C'_d = Coeficiente de arrastre de la partícula afectado por la mezcla.

C_{total} = Concentración total.

C_{pc} = Concentración de la partícula crítica.

CS = Carga superficial.

d = Diámetro de la partícula crítica.

d_* = Diámetro adimensional de la partícula individual.

d'_* = Diámetro adimensional de partícula con concentración.

D_{tub} = Diámetro de tubo.

e = Separación entre placas.

e_p = Espesor de placas.

g = Aceleración de la gravedad.

G = Peso de la muestra seca en gramos.

G_a = Peso o volumen de agua añadida ala muestra para completar el volumen de la probeta.

H = Altura del nivel del agua en el tanque.

H_A = Valor adimensional.

$K1$ = Término de la velocidad.

$K2$ = Término del diámetro.

h = Altura de la compuerta a partir de la base del tanque.

l = Longitud del vertedero.

L = Longitud del desarenador.

L_p = Longitud de la placa.

Lu = Longitud de la zona de placas

L_f = Longitud del fondo.

n = Número de orificios.

n_p = Es el número de puntos de datos.

NF = Número de Froude.

Np = Número de placas.

n_c = Exponente que cuantifica el efecto de la concentración.

Q_d = Caudal de diseño del sistema.

Q_s = Caudal de sólidos.

Q_L = Caudal de líquido para cada ensayo.

R = Reynolds del flujo.

R_s = Reynolds de la partícula individual.

R_m = Reynolds de la partícula afectado por la mezcla.

S = Gravedad específica.

S_c = Factor de sedimentación.

S_e = parámetro que indica la eficiencia de un sedimentador de alta tasa.

t_t = Tiempo que demora la partícula en un líquido en reposo, en tocar el fondo del depósito (t teórico)

t_e = Diámetro orificio

$T_{dosificaci\acute{o}n}$ = Tiempo de dosificación del material sólido.

v_1 y v_2 = Son los grados de libertad.

V_h = Velocidad horizontal.

V_s = Velocidad de sedimentación.

V_{s_i} = Velocidad de sedimentación inferior.

$V_{.t}$ = Velocidad de sedimentación teórica.

V_{sc} = Velocidad de de caída de partícula suspendida o carga superficial equivalente.

V_p = Velocidad promedio de flujo a través de la placa.

V_x = Velocidad de traslación de la partícula, la cual depende del ángulo θ .

V_{ol} = Volumen del tanque.

V_P = Volumen de la probeta

V_o = velocidad de flujo entre placas.

V_A = velocidad de arrastre.

V_m = Velocidad de asentamiento de la partícula afectado por la mezcla.

ν = viscosidad cinemática del agua.

θ = Angulo de inclinación de las placas o tubos.

Φ = Diámetro orificios.

$\eta_{p.c}$ = Eficiencia de remoción partícula más crítica.

η_{total} = Eficiencia total.

η_{teor} = Eficiencia teórica.

η_{exp} = Eficiencia experimental.

Δ' = Coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla.

ρ_w = Densidad del agua.

ρ_s = Peso específico de la arena.

ρ_m = Densidad de la mezcla.

ρ_w = Ss sólidos.

Δ = Coeficiente de densidad.

ν_w = Viscosidad del agua.

ν_m = Viscosidad de la mezcla.

INTRODUCCIÓN

La sedimentación es la operación por el cual se remueven las partículas sólidas de una suspensión mediante la fuerza de gravedad; que en algunos casos se denomina clarificación o espesamiento. Las formas de sedimentación usadas en la purificación del agua son: la sedimentación simple y la sedimentación después de coagulación y floculación o ablandamiento.

En esta investigación estudia la sedimentación simple; normalmente usada en tratamientos primarios con sistemas denominados desarenadores ya sean convencionales o de placas inclinadas; generalmente a este proceso se denomina presedimentación.

La sedimentación de partículas con diámetros menores a 0.2mm; es muy importante en el proceso de purificación de aguas primario, generalmente para bajar la concentración de sólidos o carga sobre filtros. Que para el caso de las arenas presentes en el agua al ser partículas que a lo largo de su recorrido no cambian su tamaño, forma o peso cuando sedimentan; las cuales pueden ocasionar múltiples daños ya sea en tuberías, bombas, válvulas, entre otros.

Existen muchos procesos de sedimentación y cada uno tiene ventajas y desventajas. El proceso más apropiado para una aplicación particular depende del agua a tratar así como las circunstancias y exigencias locales.

Los procesos de separación de partículas del fluido que son de interés para los ingenieros y científicos del agua son difíciles de describir por un análisis teórico, principalmente porque las partículas implicadas no son de tamaños regulares o tamaños uniformes. Por lo que la consideración de los sistemas ideales, es sin embargo, una guía útil para interpretar el comportamiento observado en casos más complejos.

Sin embargo con el desarrollo de esta investigación se logra identificar el efecto que produce la concentración de partículas sólidas y las condiciones de entrada de flujo sobre la eficiencia de remoción en desarenadores convencionales y se obtiene una metodología práctica de diseño que incluye el efecto de la concentración sobre la eficiencia de remoción y las condiciones de entrada, no solamente para uso en sistemas de acueductos, potabilización y tratamiento de aguas residuales sino para aplicación en otras actividades industriales que se requiera separar partículas de matrices concentradas como es el caso de la industria minera.

Para los sistemas desarenadores de placas inclinadas, se realizó un análisis descriptivo, similar al que presenta Arboleda (2001). En este análisis se encontró

que la concentración ejerce gran influencia en la eficiencia del desarenador, obteniéndose gráficas explicativas que demuestran tal efecto. Aunque no fue posible establecer ecuaciones que relacionen la eficiencia con la concentración, para efectos prácticos de diseño, lo que sirve como base para futuras investigaciones en este ámbito.

1. MARCO REFERENCIAL

El tema del proyecto está enmarcado en lo que se conoce como sistemas de sedimentación normal mente utilizada para mejorar la calidad del agua, que ha sido practicada, si bien desde los días en que el hombre recogía y almacenaba agua en jarros y otros recipientes, el agua almacenada y después vertida o sacada a cuchara con poca agitación mejorara en calidad, y esta técnica se ha usado hasta nuestros días.

El arte de la sedimentación progreso poco hasta la era industrial y su aumento de necesidades de agua. Los depósitos de almacenaje se desarrollaron como depósitos de sedimentación. Quizás los mayores depósitos construidos para este propósito lo fueron en Estados Unidos en Cincinnati, Ohio, donde los depósitos excavados cubicaban 392 millones de galones aproximadamente. El desarrollo de tanques de sedimentación condujo a la construcción de tanques de albañilería rectangulares que aseguraban la más clara distribución del caudal y la más fácil remoción de lodos¹.

1.1 GENERALIDADES

Si se toca el tema de los desarenadores se dice que normal mente son tanques grandes cuyo objetivo es remover arenas, barros y limos que de una u otra manera traiga el agua captada por la bocatoma y evitar así que estos materiales ocasionen la obstrucción o daño por abrasión en la tubería de conducción. Además de que esta sedimentación contribuye a clarificar primariamente el agua captada.

Las consideraciones para el diseño nos dice que en caso de que se tengan desarenadores con procesos manuales para la remoción de lodos, el depósito de lodo debe ser capaz de acumular un mínimo equivalente al 10% del volumen total del desarenador².

¹----- . "Manual de suministros de agua comunitaria quinta edición". American water Works asociation (2002) calidad y tratamiento del agua.

² **Roberto Salazar Cano** (2006). "Acueductos segunda edición". Desarenadores. Pasto 2006.

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS Y FORMAS DE SEDIMENTACION

Según Gómez (2002), los sedimentos son partículas sólidas que resultan de la disgregación de una roca por efecto de intemperización, teniendo por lo tanto origen inorgánico. Los sedimentos pueden ser clasificados según su tamaño, definiendo un diámetro de partícula, el cual establece la base para su clasificación.

Si son partículas muy grandes se miden métricamente. Si son medianas se miden por medio de tamices y se les asigna el diámetro de la abertura por el cual pasa, denominándose diámetro de tamiz. Si las partículas son muy pequeñas el tamaño se determina mediante la velocidad de sedimentación, asignándoles el diámetro de sedimentación, el cual corresponde al diámetro de una esfera de igual volumen que el de la partícula de sedimento. De acuerdo a estos criterios se presenta el cuadro 1 de clasificación de sedimentos según La American Society of Testing Material (ASTM) la cual será referencia para el desarrollo de la presente investigación.

Tabla 1 Clasificación de sedimentos naturales según su tamaño. Según La American Society of Testing Material (ASTM). Dada por Lane (Yang 1996)³.

DIÁMETRO DE PARTÍCULA [mm]	CLASE DE PARTÍCULA	Nº de TAMIZ Estándar	TIPO DE MEZCLA
64-32	Grava Muy Gruesa		Sedimentable
32-16	Grava Gruesa		Sedimentable
16-8	Grava Media		Sedimentable
8-4	Grava Fina	5 - +	Sedimentable
4-2	Grava Muy fina	10 -5	Sedimentable
2-1	Arena Muy Gruesa	18 - 10	Sedimentable
1-0.5	Arena gruesa	35 - 18	Sedimentable
0.5-0.25	Arena Media	60 - 35	Sedimentable
0.25-0.125	Arena Fina	120 - 60	Sedimentable
0.125-0.062	Arena Muy Fina	230 - 120	Sedimentable
0.062-0.034	Limo grueso		No-Sedimentable
0.034-0.016	Limo Medio		No-Sedimentable
0.016-0.008	Limo Fino		No-Sedimentable
0.008-0.004	Limo muy fino		No-Sedimentable
0.004-0.002	Arcilla Gruesa		No-Sedimentable
0.002-0.001	Arcilla Media		No-Sedimentable

³ Yang, Chih Ted. (1996) "Sediment Transport: Theory and Practice". McGraw-Hill. Series in Water Resources and Environmental Engineering. New York. 1996. Pg 1.18

1.2.1 Sedimentación de partículas discretas: Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída.

Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

1.2.2 Sedimentación de partículas floculentas: Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas como (forma, tamaño, densidad) sí cambian durante la caída. Se denomina sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación-floculación y la filtración rápida.

1.2.3 Sedimentación por caída libre e interferida: Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o *caída interferida* o sedimentación zonal.

Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una compresión o zona de compresión. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos.

1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS

Tomando la definición general que se tiene para una mezcla⁴, esta se produce cuando dos o más sustancias puras se mezclan y no se combinan químicamente. Una mezcla puede ser separada en sus componentes (sustancias) simplemente por métodos físicos. Estas pueden ser clasificadas en homogéneas y heterogéneas.

4--<http://www.unlu.edu.ar/~qui10017/Quimica%20COU%20muestra%20para%20IQ10017/Cap%A1tulo%20Vla.htm>

Mezclas heterogéneas: No son uniformes; en algunos casos, puede observarse la discontinuidad a simple vista (sal y carbón, por ejemplo); en otros casos, debe usarse una mayor resolución para observar la discontinuidad. El límite a partir del cual se distinguen los sistemas heterogéneos de los sistemas homogéneos lo constituye precisamente el ultramicroscopio. Los diferentes sistemas homogéneos que constituyen el sistema heterogéneo se denominan fases.

Mezclas homogéneas: Son totalmente uniformes (no presentan discontinuidades al ultramicroscopio) y presentan iguales propiedades y composición en todo el sistema, algunos ejemplos son la salmuera, el aire. Estas mezclas homogéneas se denominan soluciones.

Existen gran número de métodos para separar los componentes que forman una mezcla; en realidad, cada mezcla implicará el uso de uno o más métodos particulares para su separación en los componentes individuales. Se descubre brevemente solo algunos de estos métodos:

Es de anotar que en el flujo de mezclas no es muy común usar los términos generalizados de heterogéneas y homogéneas, sino de sedimentables y no sedimentables, aunque es posible hacer la equivalencia ya que las homogéneas suelen tener comportamiento de no sedimentables y las heterogéneas de sedimentables. Aunque una mezcla heterogénea en reposo es posible que se comporte como una mezcla homogénea en movimiento, especialmente en altas velocidades del flujo.

1.4 TEORIA DE LA SEDIMENTACION

La teoría de la sedimentación fue desarrollada por Hazen y Stokes. Su modelo de sedimentación de partículas se resume en la siguiente ecuación 2.1, que es la ecuación general de la sedimentación de partículas esféricas en un fluido en reposo.

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3}g(S-1)d/C_d} \quad [2.1]$$

Por lo que se concluye de la ecuación 2.1 que un sedimentador debe diseñarse para un determinado tamaño de partículas y para la temperatura mínima esperadas del agua.

Para flujo laminar ($R < 1$).

$$R = \frac{V_s * d}{\nu} \quad [2.2]$$

$$C_d = \frac{24}{R} \quad [2.3]$$

Si se sustituye en (2.1) se tiene.

$$V_s = \frac{g(S-1)d^2}{18\nu} \quad \text{Ecuación de Stokes.} \quad [2.4]$$

Remplazando para arenas:

$$V_s = 90 \frac{d^2}{\nu} \quad [2.5]$$

Para régimen de transición:

$$C_d = \frac{24}{R} + \frac{3}{\sqrt{R}} + 0.34 \quad [2.6]$$

Lo cual dificulta la determinación de la velocidad de sedimentación de la ecuación [2.1] Fair Geyer presenta una solución gráfica simplificando las expresiones (Ecuación de Allen), así: llamando $K1$ al término de la velocidad y $K2$ al término del diámetro.

$$X1 = K1 * d = \frac{[g(S-1)]^{1/3}}{\nu^2} * d \quad [2.7]$$

$$X2 = \frac{V_s}{K2} = \frac{V_s}{[g(S-1)\nu]^{1/3}} \quad [2.8]$$

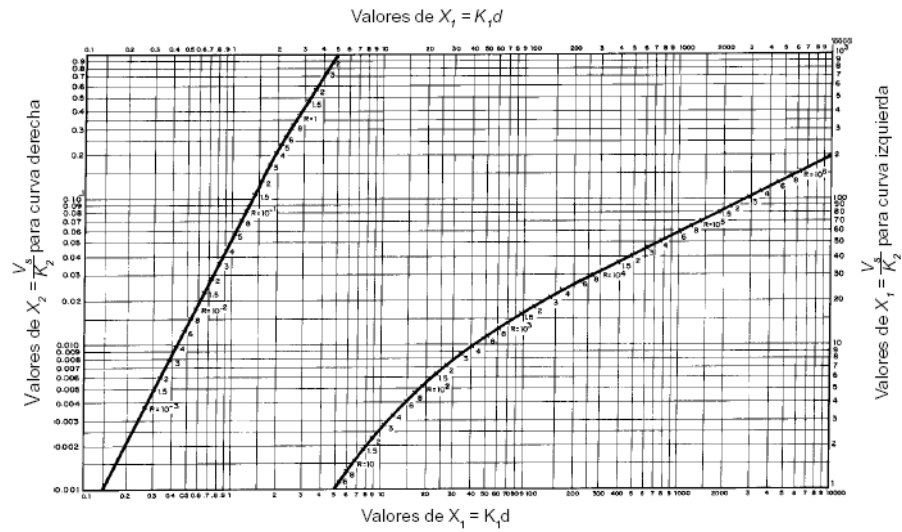
Para régimen turbulento $C_d = 0.4$ y la expresión se convierte en.

$$V_s = \sqrt{3.33 * g * (S-1) * d} \quad [2.9]$$

Para esto existe una **Figura 1**. Que permite calcular $X1$ Y $X2$ en función de $K1$, $K2$ y el diámetro asumido.

También es importante aclarar que cuando se habla de los regimenes de flujo laminar, transición y turbulento, se refiere no al régimen de la masa de agua sino al régimen de flujo en el entorno de la partícula.

Figura 1 Velocidad de asentamiento Gráfica de Fair Geyer

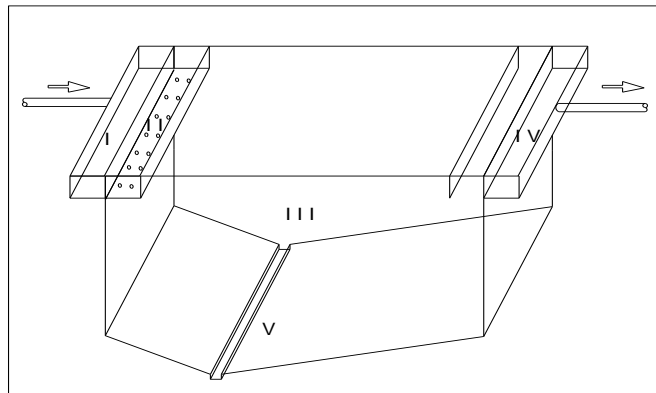


Fuente: De Arboleda Valencia Jorge (2001) "Fair Geyer"

1.5 DESARENADORES CONVENCIONALES

El desarenador esta compuesto por 5 zonas como se indica a continuación:

Figura 2 esquema general de un desarenador convencional con Indicación de las zonas definidas.



Fuente: Roberto Salazar Cano (2006)

Zona I Corresponde a la cámara de quietamiento; donde la velocidad adquirida por el agua entre la bocatoma y el desarenador se reduce en virtud del aumento de sección en dicha cámara.

Zona II Zona de entrada, constituida por un depósito de entrada (pantalla, canal, etc.) para distribuir uniformemente el flujo. La velocidad de paso por los orificios de entrada no debe exceder los 0.3m/s.

Zona III Corresponde a la zona de sedimentación. Destinada a la remoción de partículas.

Zona IV Zona de salida. Provista de una cortina para impedir el paso de hojas y un vertedero a lo largo del muro que asegure una distribución uniforme del flujo, que puede funcionar a caída libre o sumergido.

Zona V Corresponde a la zona de lodos. Destinada al depósito de sedimentos. La que constara de lo siguiente: un canal recolector con una pendiente mínima del 5%. Por el fono de esta zona arranca una tubería de lavado a la cual se llega mediante una válvula de compuerta lateral provista de un vástago, columnas de maniobra y rueda de manejo.

Esta tubería se conecta a la de rebose, para desagüe y lavado. La tubería de lavado se colocara a 1/3 de la longitud total apartar de la entrada. (Desarenador convencional **Figura 2**). La pendiente de la placa estará comprendida entre el 5% y 8%. Existen alternativas al desarenador convencional diseñar el fondo de depósito como tolvas. Con lo cual se facilita el auto lavado del mismo garantizando una operación continua del desarenador.

1.5.1 Estudio de los desarenadores. Para el estudio de los desarenadores se suponen las siguientes hipótesis:

Dentro de la zona de sedimentación el asentamiento de las partículas se verifica exacta mente como si el líquido estuviera quieto en un recipiente de igual profundidad.

El flujo es permanente (uniforme) lo que indica que lleva una velocidad determinada en sentido horizontal.

La concentración de partículas en la zona de sedimentación es uniforme en toda la sección transversal normal al flujo.

- Cualquier partícula que entre a la zona de lodos se considera removida.

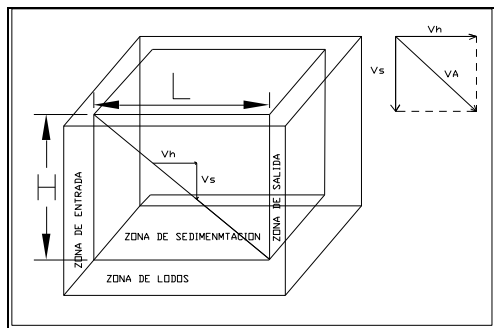
- El diseño de los sedimentadotes se efectúa con base en el tamaño de las partículas que se quiere remover.
- Pues se diseñara para las de menor tamaño pues las mayores se retendrán junta mente con ellas.
- La partícula se encuentra sometida a dos movimientos:

Uno de traslación horizontal con velocidad uniforme V_h ; V_h = velocidad horizontal.
 Uno de traslación vertical con velocidad uniforme V_s correspondiente a la velocidad de sedimentación de la articula de diámetro d .

La suma de estas dos velocidades da una velocidad resultante llamada velocidad de arrastre (V_A).

Si se sitúa una partícula de diámetro d_i en la posición más desfavorable o sea colocada en la superficie a una altura H del fondo y dado que los vectores de velocidad se suponen constantes, la trayectoria de la partícula será lineal.

Figura 3 trayectoria de las partículas sedimentadas



Fuente: de Roberto Salazar Cano (2006)

Si se llama H a la distancia a que esa articula toca el fondo, por semejanza de triángulos, se tendrá;

$$\frac{V_h}{V_s} = \frac{L}{H} = \frac{L * B}{H * B} = \frac{A_s}{A_t}$$

O también

$$\frac{H}{V_s} = \frac{L}{V_h} \quad [2.10]$$

Multiplicando el primer miembro por $A_t = B * H$ se tiene:

$$\frac{H}{V_s} = \frac{L * A_t}{V_h * A_t} \quad [2.11]$$

$$V_h = \frac{Q}{A_t} \quad [2.12]$$

$$\frac{H}{V_s} = \frac{Vol}{Q} \quad [2.13]$$

$$V_s = \frac{H * Q}{Vol} = \frac{Q}{A_s} \quad [2.14]$$

$$a = \frac{Vol}{Qd} \quad [2.15]$$

$$t_t = \frac{H}{V_s} \quad [2.16]$$

Donde la expresión [2.13] se convierte en: $a = t_t$ o sea $\frac{a}{t_t} = 1$

Lo que indica que en las condiciones teóricas ideales (V_h , V_s constantes y uniformes), el periodo de retención es igual al tiempo que demora la partícula en tocar el fondo del depósito. En la práctica las condiciones ideales no se cumplen, ya que un tanque cualquiera el agua circula a una cierta velocidad horizontal cuando existe un gasto a través de él. La acción del viento perturba la superficie del agua, la temperatura varía con la profundidad y se establecen corrientes verticales. Además los aditamentos de entrada y salida no pueden producir un desplazamiento cien por ciento uniforme. Debido a que no se cumplen las condiciones iniciales del desarrollo de la teoría. Habría partículas removidas con $V_{s_i} < V_s$.

Por lo que se adopta entonces un factor de seguridad en función de:

Porcentaje de remoción de partículas con $V_{s_i} < V_s$

$$\%Remocion = \frac{Node\ part\ con\ V_{s_i} < V_s}{Node\ part\ con\ V_{s_i} > V_s} \quad [2.17]$$

Un desarenador se diseña para remover un tamaño de partículas mínimo pues todos los tamaños superiores a este quedan removidos.

La clasificación de la eficiencia de las pantallas deflectoras se hace a través del tipo de deflectores que se tenga en el desarenador.

La igualdad anterior queda así:

$$\frac{a}{t} = \frac{\frac{V}{H}}{\frac{Q_d}{V_s}} = \frac{V_s * V}{H Q_d} = V_s \frac{A_s}{Q_d} = \frac{V_s}{\frac{Q_d}{A_s}} = \frac{V_s}{V_t} \quad [2.18]$$

Siendo:

V_s = velocidad sedimentación efectiva

$V_{.t}$ = velocidad de sedimentación teórica = $\frac{Q_d}{A_s}$

$\frac{V_s}{V_t}$ = numero de Hazen que se determina por medio de la tabla siguiente.

Hazen estudio para varios tipos de tanques de sedimentación la relación entre los periodos de retención y los porcentajes de cualquier desarticulas que se desee remover. El factor a/t del número de Hazen de determina por medio de la **Tabla 2**. Donde existen tabulados valores de a/t para diferentes condiciones y para remover diferentes porcentajes de partículas.

Tabla 2 valores de a/t

CONDICIONES	REMOCIÓN	REMOCIÓN	REMOCIÓN
	50%	75%	87%
Máximo teórico	0.5	0.75	0.875
Depósitos con muy buenos deflectores	0.73	1.52	2.37
Depósitos con buenos deflectores	0.76	1.66	2.75
Depósitos con deflectores deficientes o sin ellos	1.0	3.0	7.0

Fuente: De Roberto Salazar Cano (2006)

Los deflectores son pantallas que se proyectan a la entrada del desarenador para procurar que el flujo se reparta uniformemente generalmente se diseña para depósitos con buenos deflectores. El inconveniente de los datos de la **tabla 2** es que no hay una relación cuantificable entre las condiciones de los deflectores y la geometría de los mismos, por lo tanto en el diseño práctico no se sabe como transmitir por ejemplo la condición de “muy buenos deflectores” a las dimensiones constructivas del desarenador.

1.5.2 Parámetros de diseño

- **Periodo de detención.** El numeral A.11.2.4 del RAS 2000 especifica que el periodo de retención del agua en el desarenador no será menor a 20 minutos en cualquier nivel de complejidad.⁵
- **Velocidad horizontal y de arrastre.** Uno de los puntos mas importantes en este diseño es el de mantener una velocidad horizontal muy baja de modo que no influya apreciablemente en el asentamiento vertical de las partículas. La velocidad horizontal debe ser menor que la velocidad de arrastre de las partículas con el fin de evitar la resuspensión del sedimento.

Según la experiencia de Camp y Shiel la velocidad de arrastre se puede expresar como:

$$V_A = 125 * \sqrt{((S - 1) * d)} \quad [2.19]$$

Una forma de seleccionar la velocidad horizontal es considerarla inferior a la velocidad de arrastre entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ V_A .

La velocidad horizontal se puede considerar equivalente a la velocidad del flujo del agua

$$V_h = \frac{Qd}{At} \quad [2.20]$$

La relación entre la velocidad horizontal y velocidad de sedimentación será menor a 20

$$\frac{V_h}{V_s} < 20$$

- **Profundidad y volumen de almacenamiento.** La profundidad efectiva estará comprendida entre 0.75 y 1.5 m.

⁵ **Roberto Salazar Cano** (2006). “Acueductos segunda edición”. Desarenadores. Pasto 2006

- Profundidad máxima para efectos de almacenamiento podrá ser hasta 100% de la profundidad efectiva.
- Se recomienda que la relación longitud útil a profundidad efectiva sea de 10 a 1.

Recomendaciones de tipo general.

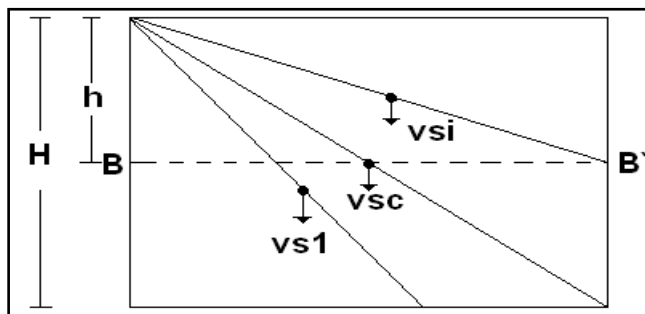
- La velocidad de paso por los orificios en la canaleta de entrada no debe exceder los 0.3 m/seg
- El ancho mínimo de los desarenadores 0.6 mts para facilitar su limpieza
- Relación Longitud ancho 3 :6
- A la entrada instalara un baffle o tabique a fin de hacer uniforme el flujo en el desarenador cuya altura será máximo 1/2 la profundidad efectiva

Dispositivos de salida. El dispositivo de salida del agua del desarenador consistirá en un canal con vertedero a todo lo ancho y ubicado afuera del tanque. A una distancia mínima de 0.3m / (para no aumentar la velocidad excesivamente de salida), se colocara una pantalla con un borde inferior sumergido de 0.3*0.45m a fin de romper las corrientes superficiales e impedir el paso de material flotante.

1.6 DESARENADOR DE PLACAS INCLINADAS

Se aplica los conceptos básicos de la teoría de la sedimentación en plaquetas inclinadas para el estudio de estos desarenadores.

Figura 4 velocidad de sedimentación de partículas.



Fuente: Roberto Salazar Cano (2006)

En desarenadores convencionales todas las partículas con $V_{s_i} > V_{sc}$ se consideran removidas en el proceso y la que tiene velocidad menor que ella V_{s_i} escapa con el flujo

$$V_{sc} = \frac{Q}{A_s} \quad [2.21]$$

V_{sc} = carga superficial en $m^3/m^2/día$

Por tanto para una misma suspensión según se tenga un V_{sc} mayor o menor quedaran removidas mayor o menor número de partículas, entre mayor sea la velocidad crítica seleccionada por el proyectista mayor número de partículas más finas que la crítica escapan, como se explica en la **Figura 4**. Si se coloca una bandeja B–B a una altura h menor que H se podrá recoger las partículas con velocidad V_{s_i} menor que V_{sc}

Hazen decía “la acción del tanque sedimentador depende de su área y no de su profundidad, una división horizontal producirá una superficie doble para recibir sedimentos en lugar que una sencilla y duplicará la cantidad de trabajo, tres de ellas la triplicará y así sucesivamente.

El problema para la aplicación de esta teoría radica en la limpieza de los lodos, lo cual se soluciona dando un ángulo de inclinación a las bandejas para que las partículas resbalen hacia el fondo.

1.6.1 Descripción del sistema. Consiste en una serie de láminas planas paralelas colocadas en un tanque apropiado con un Angulo de inclinación de modo que el agua ascienda por las celdas con un flujo laminar, esto permite cargas superficiales $\frac{Q}{A_s}$ mayores que las usadas en desarenadores superficiales (entre 4 y 10 veces), reduciendo considerablemente el área del tanque .Las tres diferencias básicas entre los desarenadores convencionales y los de plaquetas son:

- El fondo decantador de plaquetas es inclinado
- La profundidad del desarenador es muy baja, de forma que hay que construir un número considerable de celdas superpuestas para poder tratar volúmenes de agua que se acostumbra en la práctica.

- El flujo en el desarenador de placas es laminar con números de Reynolds entre 80 y 250

$$R = V_o * \frac{e}{\nu} \quad [2.22]$$

e = separación entre placas.

V_o = velocidad de flujo entre placas.

$$V_o = \frac{\text{Caudal Que Pasa Por Cada Placa}}{\text{Área entre placas}}$$

1.6.2 Fórmulas básicas. Según la teoría de Yao, cuando una partícula asciende con una velocidad media (V_o), arrastrada por el flujo entre dos placas planas paralelas que forman un ángulo θ con la horizontal resultante que determina la trayectoria de la partícula puede descomponerse en sus dos componentes V_x y V_y
Figura 5.

Si $\theta = 0$; $V_y = V_{sc}$, o sea que es la velocidad teórica de descenso de la partícula crítica en un desarenador horizontal. Esta velocidad (V_{sc}), (velocidad de sedimentación de la partícula), puede determinarse considerándose los triángulos BCF e IGH comparando sus lados así:

$$\frac{e}{V_y} = \frac{L_p}{V_x} \quad V_y = \frac{e * V_x}{L_p} \quad [2.23]$$

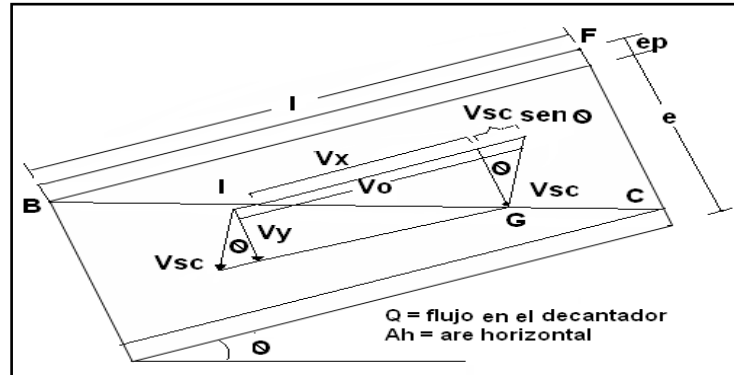
e = Profundidad del decantador.

L_p = Longitud de la placa.

$$\text{Longitud relativa} = \frac{L_p}{e}$$

$$V_x = L * V_y \quad [2.24]$$

Figura 5 trayectoria de las partículas y descomposición de velocidades entre dos Placas



Fuente: Arboleda valencia Jorge (2001)

$$V_y = V_x * \text{Cos } \theta \quad [2.25]$$

Por tanto:

$$V_x = V_o - V_{sc} * \text{Sen } \theta \quad [2.26]$$

Remplazando y despegando se obtiene la fórmula de Yao, para desarenadores de placas planas.

$$V_{sc} = \frac{V_o}{\text{Sen } \theta + L_p * \text{Cos } \theta} \quad [2.27]$$

$$\frac{V_{sc}}{V_o} (\text{SEN } \theta + L_c \text{COS } \theta) = 1 \quad [2.28]$$

La ecuación [2.28] indica que la eficiencia de un sedimentador de alta tasa que está caracterizada por un parámetro S_e :

$$\frac{V_{sc}}{V_o} (\text{SEN } \theta + L_c \text{COS } \theta) = S_e \quad [2.29]$$

El valor critico de S_e , S_c , para sedimentadores de placas paralelas es 1 como lo indica la ecuación [2.28]. Por lo tanto, teóricamente, cualquier partícula suspendida, con un valor de S_e mayor o igual que 1, en un sedimentador de placas paralelas, será removida⁶.

⁶ Roberto Salazar Cano (2006). "Acueductos segunda edición". Desarenadores. Pasto 2006.

El valor crítico de S_e , S_c , para sedimentadores de tubos circulares es 1.33. Por lo tanto, teóricamente, cualquier partícula suspendida, con un valor de S_e mayor o igual que 1.33, en un sedimentador de de tubos circulares, será removida.

El valor crítico de S_e , S_c , para sedimentadores de tubos cuadrados es 1.375. Por lo tanto, teóricamente, cualquier partícula suspendida, con un valor de S_e mayor o igual que 1.375, en un sedimentador de de tubos cuadrados, será removida.

En caso general la fórmula se transforma en:

$$V_{sc} = \frac{S_c * V_o}{\text{Sen} \theta + L_p * \text{Cos} \theta} \quad [2.30]$$

Donde:

S_c = Factor de sedimentación.

$S_c = 1$ Para placas planas,

$S_c = 1.33$ Para tubos circulares

$S_c = 1.375$ Tubos cuadrados

V_{sc} = velocidad de de caída de partícula suspendida

V_o = velocidad promedio de flujo a través de la placa

θ = Angulo de inclinación de las placas o tubos

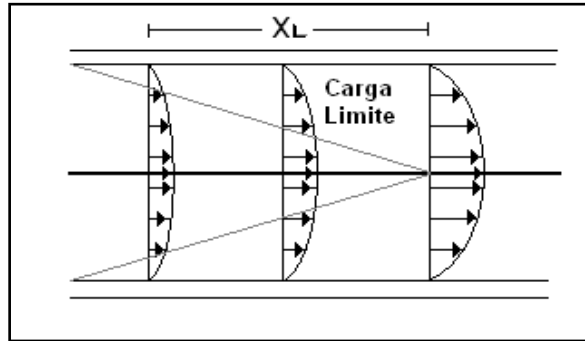
L_p = longitud de la placa

Para que las ecuaciones anteriores sean válidas es indispensable que se establezca entre placas un flujo laminar es decir un numero de Reynolds menor que 250. Sin embargo aunque Re sea bajo el flujo laminar no se establece de inmediato al entrar en un tubo o lámina ya que debido a la teoría de la capa limite en la cual, el régimen completamente desarrollado solo se obtiene a una distancia X_L medida desde la entrada y se considera como tal por definición. Cuando el perfil de velocidades no sufre modificaciones deberá descontarse del valor de L_p una longitud X_L (**Figura 6**)

El valor de L_c es la longitud de la placa (descontada la longitud inicial) donde no se establece flujo laminar completo, se puede calcular así:

$$L_c = \frac{1 - X_L}{e} = \frac{l}{e} - 0.013R \quad [2.31]$$

Figura 6 diagrama de distribución de velocidades en la zona de entrada



Fuente: Arboleda valencia Jorge (2001)

$$V_{sc} = \frac{V_o}{\text{Sen}\theta + L_c * \text{Cos}\theta} = \frac{V_o}{\text{Sen}\theta + \left[\frac{1}{e} - 0.013R\right] \text{Cos}\theta} \quad [2.32]$$

$$V_o = \frac{Q}{A_o} \qquad V_o = \frac{Q}{A_h * \text{Sen}\theta} \quad [2.33]$$

$$V_o = \frac{CS}{\text{Sen}\theta} \qquad CS = Q / A_h \quad [2.34]$$

Donde:

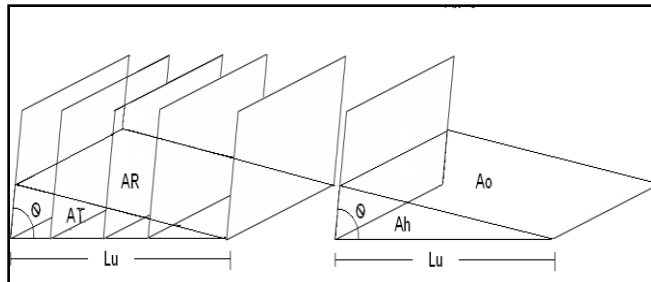
A_o = área neta perpendicular a las placas ver (Figura 7)

A_h = Área neta horizontal del decantador

CS = Carga superficial

Cálculo del área horizontal del decantador

Figura 7 áreas perpendiculares de las placas



Fuente: Roberto Salazar Cano (2006)

A_R = área perpendicular de las placas

AT = área horizontal total del decantador (incluye el espesor de placas)

$$\frac{A_o}{A_R} = E = \frac{e}{e + ep}$$

Luego

$$A_R = \frac{A_o}{E} = \frac{Q_d}{V_o * E}$$

$$At = \frac{A_R}{\text{Sen}\theta} = \frac{Q_d}{V_o * E * \text{Sen}\theta}$$

[2.35]

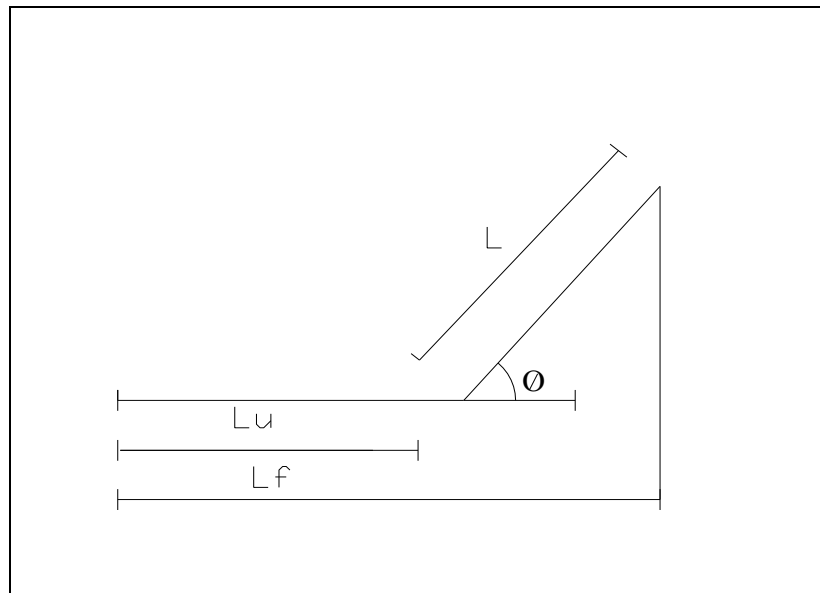
1.6.3 Cálculo de la longitud útil y de fondo en la zona de placas:

B = ancho del decantador

Lu = longitud de la zona de placas

L_f = longitud del fondo

Figura 8 longitud en un desarenador de placas



Fuente: Roberto Salazar Cano (2006)

$$L_f = Lu + L * \text{Cos}\theta$$

[2.36]

$$\text{Numerode placas}(Np) = \frac{Lu^* \text{ Sen } \theta}{e + e_p} \quad [2.37]$$

1.7 TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN CHENG, (1997a, b)

Gómez (2002) hace un exhaustivo análisis del efecto de la concentración sobre la velocidad de sedimentación de partículas. Proponiendo una metodología de cálculo que incluye la concentración, como se describe a continuación.

1.7.1. Para partículas individuales. Para partículas individuales la siguiente ecuaciones dada para calcular la velocidad de asentamiento.

$$V_s = \frac{R_s v_f}{d} \quad [2.38]$$

El coeficiente de arrastre de las partículas, es por Ec. [2.39]

$$C_D = \left[\left(\frac{32}{R_s} \right)^{\left(\frac{1}{1.5} \right)} + 1 \right]^{1.5} \quad [2.39]$$

R_s es el número de Reynolds de la partícula para sedimentos naturales, dado como:

$$R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2d_*^2)} - 5 \right)^{1.5} \quad [2.40]$$

Usando el diámetro adimensional de partícula d_* , definido como:

$$d_* = \left(\frac{(\Delta)g}{\nu^2} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} d \quad [2.41]$$

Δ : Es la gravedad específica sumergida, dada como:

$$\Delta = (S_s - 1) \quad [2.42]$$

Ec. [2.38] es válida para partículas de cualquier diámetro, aplicable desde el flujo de Stokes hasta altos números de Reynolds, comprobada con datos experimentales, mostrando un alto grado de exactitud en la predicción.

1.7.2 Partículas afectadas por la concentración. Debido a que la anterior ecuación ha sido desarrollada para ser aplicada estrictamente en sedimentación de partículas individuales o de concentraciones muy bajas y teniendo en cuenta que el caso más frecuente encontrado en el análisis y predicción en el transporte de sedimentos es aquel que más de una partícula solitaria cae a través de un fluido, se han realizado varias investigaciones para incluir el efecto de la concentración en la velocidad de asentamiento de partículas individuales, Graff, (1971), Duckworth, (1978), Oroskar, (1980) y Cheng, (1997b). Este último presenta la siguiente ecuación:

$$V_m = V_s (1 - C_{total})^{n_c} \quad [2.43]$$

C_{total} = Concentración volumétrica total.

En donde n es un exponente que cuantifica el efecto de la concentración. Cheng (1997b) presenta un estudio detallado para evaluar el valor de n, procediendo de manera similar que para una partícula individual, pero incluyendo la viscosidad y densidad de la mezcla en vez de las propiedades de agua limpia. De este modo se da la siguiente expresión para n_c :

$$n_c = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2 - 2C)}{(2 - 3C)} \right] + \text{Ln} \left[\frac{R_m}{R_s} \right]}{\text{Ln}[1 - C]} \quad [2.44]$$

Donde las variables implicadas en Ec. (30) se calculan como sigue:

$$R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d'_*)^2)} - 5 \right)^{1.5} \quad [2.45]$$

R_m = Número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla

d'_* = Diámetro adimensional de partícula individual

Y el diámetro adimensional de partícula con concentración, se define como:

$$d_*' = \left(\frac{\Delta' g}{\nu_m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d \quad [2.46]$$

Donde, ν_m es la viscosidad de la mezcla y Δ' es el coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla de agua-sólido, dado como:

$$\Delta' = \frac{(1-C)\Delta}{(1+C\Delta)} \quad [2.47]$$

Y la viscosidad de la mezcla, como:

$$\nu_m = \frac{2\nu_f}{2-3C} \quad [2.48]$$

El valor del coeficiente de arrastre afectado por la mezcla es calculado con la siguiente expresión.

$$C'_D = \left[\left(\frac{32}{R_m} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} \quad [2.49]$$

C'_D = Coeficiente de arrastre de partículas afectadas por la mezcla ⁷

1.8 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE VARIABLE.

El objeto de un análisis de regresión es investigar la relación estadística que existe entre una variable *dependiente* (Y) y una o más variables *independientes* (X_1, X_2, X_3, \dots). Para poder realizar esta investigación, se debe postular una relación funcional entre las variables. Tratar de explicar el comportamiento de Y con más de una variable preeditora usando una funcional lineal es el objetivo de regresión lineal múltiple. Frecuentemente, uno no es muy familiar con las variables que están en juego y basa sus conclusiones solamente en cálculos obtenidos con

⁷ Gómez, Z- H.J. "Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión: Estudio de la Velocidad Crítica de Depositación" Tesis de Grado para optar al título de Magister en Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Julio, 2002.

Los datos tomados. Es decir, si ocurre que el coeficiente de determinación R² sale bajo (digamos menor de un 30%), considerando además que su valor no se ha visto afectado por datos anormales. el modelo de regresión lineal múltiple

El modelo de regresión lineal múltiple con p variables predictivas y basado en n observaciones tomadas es de la forma:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} + e_i \tag{2.50}$$

Para i = 1,2,...,n. Escribiendo el modelo para cada una de las observaciones, éste puede ser considerado como un sistema de ecuaciones lineales de la forma

$$\begin{aligned} y_1 &= \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{21} + \dots + \beta_p x_{p1} + e_1 \\ y_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_{12} + \beta_2 x_{22} + \dots + \beta_p x_{p2} + e_2 \\ &\dots\dots\dots \\ y_n &= \beta_0 + \beta_1 x_{1n} + \beta_2 x_{2n} + \dots + \beta_p x_{pn} + e_n \end{aligned} \tag{2.51}$$

Que puede ser escrita en forma matricial como

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & x_{2p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & x_{np} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ e_n \end{bmatrix} \tag{2.52}$$

Y es un vector columna n dimensional, X es una matriz n x p', con p'=p+1, b es el vector de coeficientes de regresión a ser estimados, su dimensión es p' y e es un vector columna aleatorio de dimensión n Por ahora, las únicas suposiciones que se requieren son que E(e)=0 y que la matriz de varianza-covarianzas de los errores está dada por Var(e)=σ² I_n, donde I_n es la matriz identidad de orden n.

Para poder resolver se puede utilizar programas informáticos como AD+, SPSS y Minitab, Statgraphics, y Excel.

2. ADECUACIÓN DE LOS MONTAJES DE LABORATORIO

2.1 DESARENADOR CONVENCIONAL.

Planos en planta y perfil mirar: ANEXO R, ANEXO S Y ANEXO T

Por el aspecto económico y por motivo de que existía en laboratorio un tanque que ya no prestaba servicio en dicho lugar; surge la idea de aprovechar este tanque para hacerlo funcionar como un sistema de desarenador convencional y de placas inclinadas. Haciendo las respectivas modificaciones para cada caso. De manera que se procede a hacer actividades tales como limpieza, impermeabilización y pintura del mismo; para finalmente obtener el tanque que se indica en la **figura 9**.

Figura 9 dimensiones del tanque que existía en laboratorio

Longitud = 2.4m

Ancho = 1.18m

Alto = 0.6m



De manera tal que se añadió una sección con biseles incluidos a 60° y con las mismas dimensiones del tanque existente; para aumentar su altura y usarla como zona de placas planas de asbesto cemento. Por lo que sus dimensiones finales son como lo muestra la **figura 10**.

Figura 10 dimensiones del tanque añadido la sección

Longitud = 2m

**L zona entrada =
0.4m**

Ancho = 1.18m

Alto = 1.1m



Con los datos de la **tabla 3** Y un numero de Hazen de $a/t = 2,37$; para el 87.5% de remoción Se determinar la capacidad de caudal que puede tratar.

Tabla 3 datos para tanque desarenador convencional.

DATOS PARA DESARENADOR CONVENCIONAL
$\dot{A}s = 2,478 \text{ m}^2$
$T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$
$\nu = 0,01112 \text{ Cm}^2/\text{seg}$
$d = 0,0075 \text{ Cm}$
$S = 2,65 \text{ gr/cm}^3$

SOLUCIÓN

Para partículas de 0,0075 Cm aplicando la ley de stokes se tiene:

Usando ecuación [2.1]

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3}g(S-1)d/C_d} = 0,45488141\text{cm/seg}$$

Se calcula Reynolds con ecuación [2.3]

$$R = \frac{V_s * d}{\nu} = 0,3067995 < 10K$$

Stokes es aplicable y la velocidad de Sedimentación es la obtenida

La profundidad efectiva del desarenador estará comprendida entre 0,75m y 1,5 m; en el tanque de pruebas ésta será de 1,10 m

$$H = 110\text{cm}$$

Se calcula t_t con la ecuación [2.16]

$$t_t = \frac{H}{V_s} = 241,82\text{Seg} = 2,27\text{min}$$

De acuerdo al porcentaje de remoción (87,5 %) y al tipo de deflectores adoptado, se obtiene No de Hazen mediante tablas (a/t)

$$a/t = 2,37$$

$$a = 573,11641 \text{Seg} = 5,37 \text{ min}$$

Despejando el caudal se tiene $Vol = a_a Q_d$

Calculado Q_d con la ecuación [2.15]

$$Q_d = \frac{Vol}{a} = 4,76E-03 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ahora se compara el valor del Área superficial (A_s) con el volar del área mínima (A_{min})

$$A_{min} = \frac{Qd}{V_s} = 1,046 \text{ m}^2 < 2,478 \text{ m}^2 \quad \text{OK}$$

Según especificaciones, la máxima velocidad horizontal (V_h) es de 0,17 m/seg

Calculado V_h con la ecuación [2.20]

$$V_h = \frac{Qd}{At} = 0,0037 < 0,17 \text{ m/seg} \quad \text{OK}$$

Chequeo que la relación entre velocidad horizontal y velocidad sedimentación.

$\frac{V_h}{V_s}$ Sea inferior a 20

$$\frac{V_h}{V_s} = 0.81 < 20 \quad \text{OK}$$

Chequeo de Carga superficial con respecto a la carga superficial máxima la cual debe ser menor de $1000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ se verifica dicho valor

$$CS = \frac{Q}{A_s} = 165,83 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día} < 1000 \quad \text{OK} \quad [3.1]$$

Cuando se asume un período de retención de acuerdo a la RAS 2000 utilizar el procedimiento siguiente: calcular a y comparar con el periodo de retención $a_a \geq 20$ min. Si a calculado es mayor que a_a se determina el volumen con el valor de

a calculado, si a calculado es menor que a_a se calcula el volumen con el valor de a_a asumido.

$$a = 9.55 \text{ min}$$

$a < a_a$. No cumple tiempo de retención

En este caso se tiene el volumen del tanque como dato no variable. Por lo que se puede despejar el caudal de diseño de acuerdo a la ecuación [2.15]

$$Vol = a_a * Q_d$$

$$Q_d = \frac{Vol}{a_a} = 2,16E-03 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Con este caudal se garantiza un tiempo de retención de 20 min el mínimo sugerido por la RAS 2000. Con este nuevo caudal se vuelve a ser los chequeos.

Según especificaciones, la máxima velocidad horizontal (V_h) es de 0,17 m/s, ecuación [2.20]

$$V_h = \frac{Q_d}{A_t} = 0,0017 < 0,17 \text{ m/seg}$$

Chequeo que la relación entre velocidad horizontal y velocidad sedimentación

$\frac{V_h}{V_s}$ Sea inferior a 20

$$\frac{V_h}{V_s} = 0,22 < 20 \quad OK$$

Chequeo de Carga superficial con respecto a la carga superficial máxima la cual debe ser menor de 1000 m³/m²/día se verifica dicho valor.

Usando ecuación [3.1]

$$CS = \frac{Q_d}{A_s} = 79,20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día} < 1000 \quad OK$$

La entrada del agua entre el mezclador y la estructura de entrada al desarenador se efectuara por medio de una tubería de 2 1/2" como se muestra en la **figura 11**. Garantizando una velocidad > 0,30m/seg.

Figura 11 esquema ingreso a la zona de entrada.



$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{Q}{V} \quad [3.2]$$

Donde:

$$D = 2 1/2''$$

$$Q_d = 2 \text{ LPS}$$

Despejando la velocidad de [3.2] se tiene:

$$V = \frac{Q_d * 4}{D^2 * \pi} = 0.68 \text{ m/seg} > 0.3 \text{ m/s OK}$$

Estructura de entrada

Para lograr una buena repartición del flujo y por objetivo de la investigación se adopta como estructura de entrada un deflector de compuerta y un deflector con orificios. La compuerta de acuerdo a la propuesta se hará variar su altura como lo indica la **Figura 14**. Para el deflector de orificios se calcula el diámetro de los mismos para obtener una velocidad de entrada no mayor a $V = 0,3 \text{ m / seg}$.

Se toma $V = 0,3 \text{ m / seg}$

Área de los orificios (**A**)

$$Q_d / V = A = 0,00757 \text{ m}^2$$

Estimando una contracción = 0,61

$$\frac{A_{\text{chorro}}}{A_{\text{total}}} = 0,61$$

El área de los orificios se incrementa así:

$$A_{\text{real}} = 0,00757 / 0,61 = 0,01241 \text{ m}^2$$

Para hallar el número de orificios (se adopta diámetro 1/2" pulgada)
 1/2" = 0,0127 mts

$$n = \frac{4 * Areal}{\pi * D^2} = 97,851 \quad \text{Se adopta } 100 \text{ orificios} \quad [3.3]$$

$$A_{Total} = 0,01267 m^2$$

Distribución:

Distribución se efectúan en 10 filas de 10 orificios (a_e = espaciamento,
 t_e = diámetro orificio)

Para las 10 filas **ancho de del tabique** 1.1 m

$$n(a_e + t_e) = L$$

$$L/n - t_e = 0,1053m$$

$$a_e + t_e = 0,12m$$

$$\frac{(a_e + t_e)}{2} = 0,06m$$

Para las 10 columnas **largo de del tabique** 1.1 m

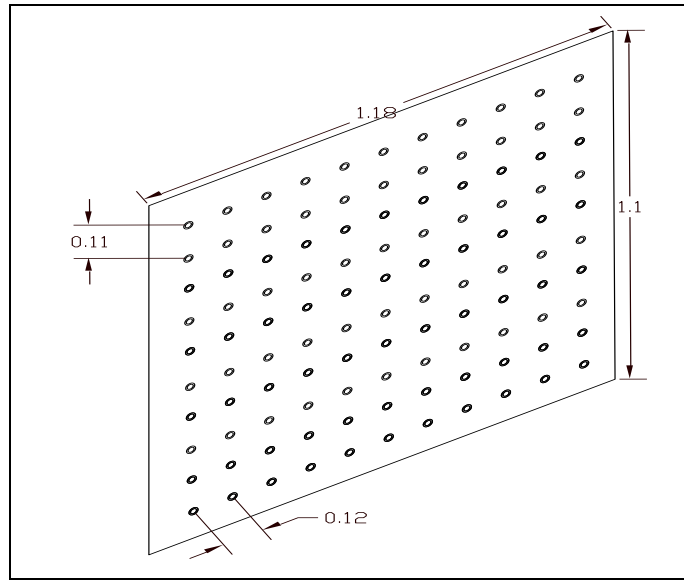
$$L/n - t_e = 0,0973m$$

$$a_e + t_e = 0,11m$$

$$\left(\frac{a_e + t_e}{2} \right) = 0,055m$$

La distribución queda como en la **Figura 12**.

Figura 12 distribuciones de orificios



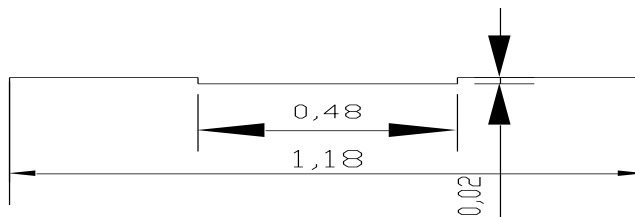
Deflector de orificios ver fotografía **ANEXO E**

Estructura de salida

La estructura se hará a través de un vertedero de pared delgada de longitud $l = 48$ cm a lo ancho del tanque. Para estas condiciones se tendrá la siguiente lámina de agua sobre la corona.

$$Hv = \left(\frac{Q}{K * l} \right)^{2/3} = 0,0188m \quad [3.4]$$

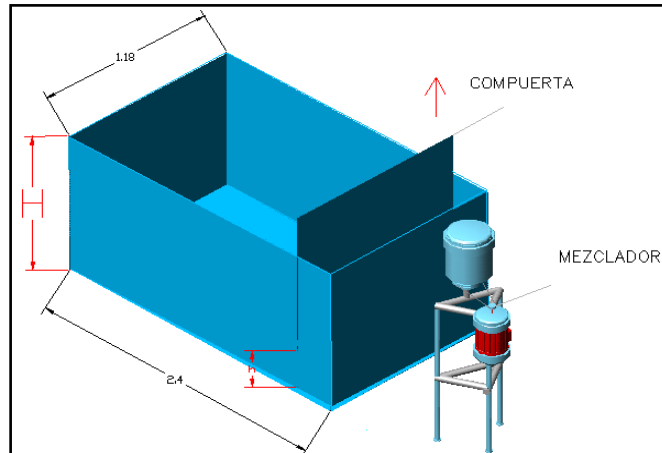
Figura 13 vertedero de salida



Los dos tipos de entrada para el desarenador convencional se los pude observar en las **Figuras 14** y **15** respectivamente. Para el caso del deflector de compuerta (**Figuras 14**) no lleva diseño ya que se prueban 5 variaciones de altura para ver el

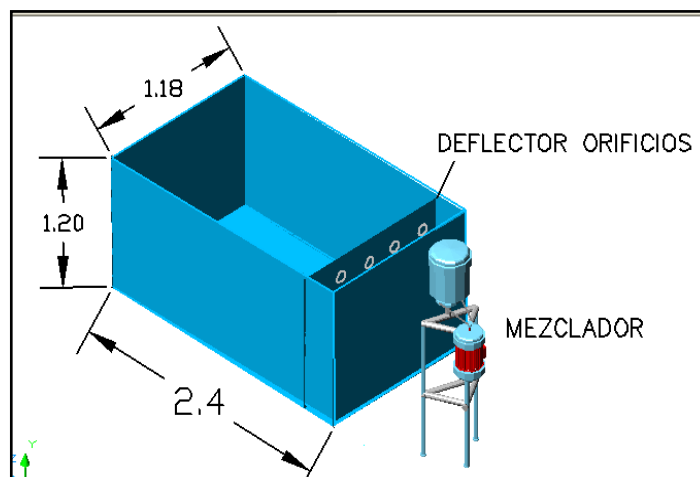
efecto que causa a medida que se aumenta la altura de la compuerta a la que se denomina (h).

Figura 14 deflector de compuerta



Deflector de compuerta ver fotografía **ANEXO D**

Figura 15 deflector de orificios



2.2 DESARENADOR DE PLACAS

Planos en planta y perfil mirar **ANEXO P Y ANEXO Q**

Una vez terminado los ensayos en el sistema convencional se procede a instalar el sistema de entrada distribuida y las placas así como se indica en la **figura 16**.

Debido a que un sistema de placas puede tratar mayor cantidad de agua que un convencional con la misma área superficial se toma como caudal de diseño el caudal máximo de la bomba. El modelo convencional se lo adapto a placas inclinadas como normalmente se hace cuando se quiere tratar más cantidad de agua.

Tabla 4 datos para desarenador de placas

$Q_d = 3.5 \text{ l/s}$
$\theta = 60^\circ$
$T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$
$e = 0,094 \text{ m}$
$e_p = 0,004 \text{ m}$
$\nu = 0,01112 \text{ cm}^2/\text{s}$
$L = 2,4 \text{ m}$
$B_p = 1,17 \text{ m}$
$B = 1,18 \text{ m}$
$L_p = 0,60 \text{ m}$

Se tiene: $Q_d (m^3/dia) = \frac{3.5l/s * 86400 \text{ seg} / \text{ dia}}{1000 \text{ lt} / m^3} = 302,4 m^3 / \text{ dia}$

Se determina **CS** y se calcula V_o

Se tiene que:

$$A_s = B * L$$

$$A_s = 2,832 m^2$$

La **CS** con la ecuación [3.1]:

$$CS = \frac{Q_d}{A_s}$$

$$CS = 106,780 m^3 / m^2 / dia = 0.00123 m/s A_s$$

Se calcula V_o con la ecuación [2.32] así:

$$V_o = \frac{CS}{\text{SEN}\theta} = 0,144 m^3 / m^2 / dia$$

$$V_o = 0,14 \text{ cm/s}$$

Por lo que cumple con la condición de que V_o debe estar entre 0,14 y 0,34 cm/s

Zona de placas

$$\text{Eficiencia} = \frac{e}{e + e_p} = 0,9591$$

$$\text{Numero de Reynolds (R)} = R = \frac{V_o * e}{\nu} = 121 < 250 \quad \text{ok}$$

$$\text{Longitud relativa} = \frac{L_p}{e} = 6,91$$

L_c = relación entre la longitud de placas en que existe régimen laminar y el espacio entre placas.

$$L_c = L_p/e - 0,013 * R = 5,34$$

Velocidad de las partículas suspendidas

$$V_{sc} = \frac{S_c * V_o}{\text{SEN}\theta + L_c \text{COS}\theta} \quad [3.5]$$

$$\frac{V_{sc}}{V_o} (\text{SEN}\theta + L_c \text{COS}\theta) = 1 \quad [3.6]$$

La ecuación [3.6] indica que la eficiencia de un sedimentador de alta tasa está caracterizada por un parámetro S :

$$\frac{V_{sc}}{V_o} (\text{SEN}\theta + L_c \text{COS}\theta) = S \quad [3.7]$$

El valor crítico de S , S_c , para sedimentadores de placas paralelas es 1 como lo indica la ecuación [3.6]. Por lo tanto, teóricamente, cualquier partícula suspendida, con un valor de S mayor o igual que 1, en un sedimentador de placas paralelas, será removida.

S_c = Factor de sedimentación que para placas paralelas es 1

Remplazando en la ecuación [3.5] se tiene:

$$V_{sc} = \frac{I * 0.14 \text{ cm/s}}{\text{SEN}60^\circ + 5.34 \text{ COS}60^\circ} = 0.0406658 = 35.14 \text{ m/da}$$

V_{sc} Es la velocidad crítica de asentamiento que indica que la eficiencia de un sedimentador de alta tasa es función de la longitud relativa del sedimentador y el ángulo de inclinación de las placas.

NÚMERO DE PLACAS

$$N_p = \frac{(L - L_p * \text{COS}60^\circ) * \text{SEN}60^\circ + e}{e_p + e} \quad [3.8]$$

L = Longitud del sedimentador

L_p = Longitud de placas.

e = Separación de placas.

e_p = Espesor placas.

Remplazando en [3.6] se tiene:

$$N_p = \frac{(2.4 - 0.6 * \text{COS}60) * \text{SEN}60 + 0.094}{0.094 + 0.004} = 19$$

Zona de entrada

La distribución interna del flujo se hará por tubería con sección variable

La velocidad del flujo deberá estar limitada a 0,2 m/s

$$V = 0,2 \text{ m/s}$$

$$Q_d = 3,5 \text{ l/s} = 0,0035 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo que se tomara dos tubos con sección variable.

Se divide el caudal de diseño para dos secciones, es decir:

$$\text{Caudal por c/tubo} = \frac{0.0035 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 0,00175 \text{ m}^3/\text{s}$$

Área de sección por tubo es:

$$\text{Área de sección inicial por tubo} = \frac{Q \text{ por tubo}}{V} = \frac{0.00175}{0.2} = 0,00875 \text{ m}^2$$

$$\text{COMO: } Q = V * A \quad ; \quad A_{TUBO} = \frac{\pi * D^2}{4} \quad ; \quad D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 0,1056 \text{ m}$$

Diámetro tubo = 4. Se toma tubo de 4"

A la mitad de la tubería se tiene:

$$Q = \frac{0.00175 \text{ m}^3 / \text{s}}{2} = 0,00088 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$V = 0,2 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{Q}{V} = 0,004375 \text{ m}^2$$

$$\text{Como: } Q = V * A \quad A_{TUBO} = \frac{\pi * D^2}{4} \quad D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 0,0746 \text{ m}$$

Diámetro tubo = 3 se toma tubo de 3"

Cálculo y distribución de orificios:

$$Q \text{ por tubo} = Q_{\text{diseño}}/2 = 0,00175 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Asumiendo una velocidad en los orificios de 0.15m/s

$$A_{ORIFICIOS} = \frac{Q_{\text{POR TUBO}}}{V} = \frac{0.00175 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.15 \text{ m/s}} = 0,012 \text{ m}^2$$

Si se los distribuye en las dos caras se tiene:

$$\text{Área de orificios por cara} = \frac{0.012 \text{ m}^2}{2} = 0,0058 \text{ m}^2$$

Haciendo orificios de 3/4" ó sea de $\phi = 0,01905 \text{ m}$

Numero de orificios (**N**)

$$A_c = \frac{N * \pi * D^2}{4} ; \quad N = \frac{A_c * 4}{\pi * D^2} \quad D = \text{diámetro del orificio}$$

$$N = \frac{0.0058 * 4}{\pi * 0.0195^2} = 20 \quad \text{Orificios por cara}$$

$$\text{Espaciamiento} = N(a_e + t_e) = 2m$$

Entonces se tiene:

$$a_e = \frac{L}{N} - t_e = \frac{2m}{20} - 0.0190m = 0,0787m$$

$$(a_e + t_e) = 0.0787m + 0.01905m = 0,0977m$$

Se tiene 20 orificios por cara de 3/4" espaciados 9,7 cm centro a centro.

Los dos tipos de entrada para el desarenador de placas se los puede observar en las **Figuras 17** y **18** respectivamente. Para el caso de la entrada tipo flauta (**Figura18**) se garantiza la velocidad de salida de 0.15m/seg

Figura 16 esquema desarenador de placas.

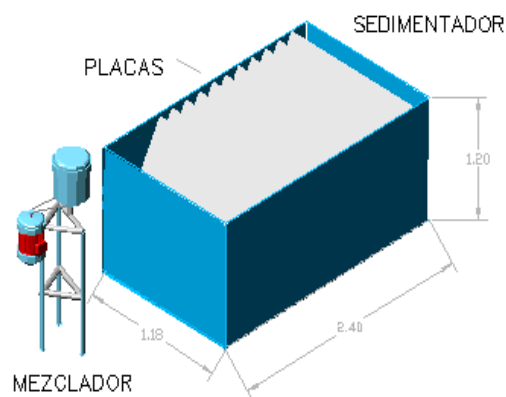
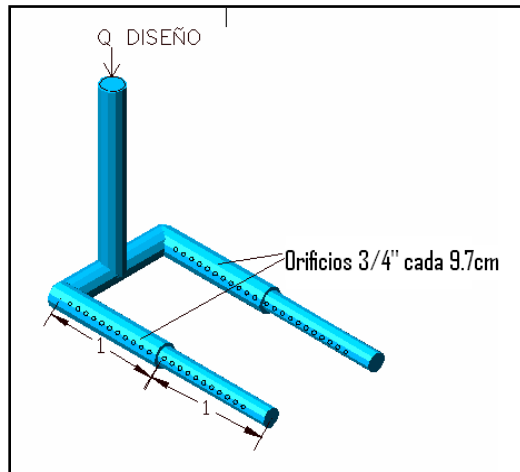
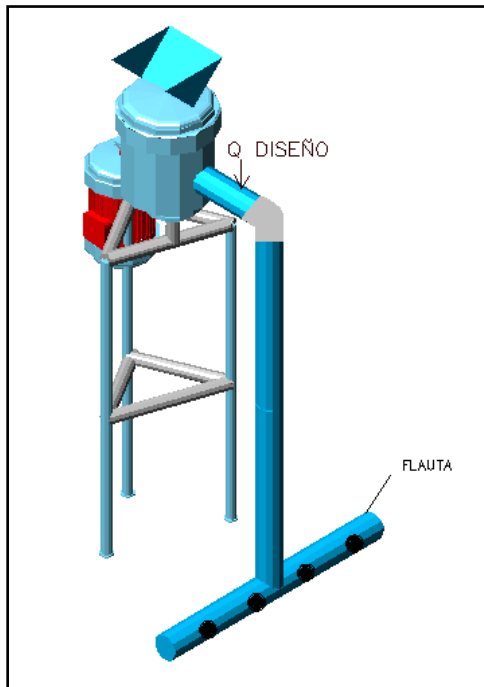


Figura 17. sistema de entrada distribuida con sección variable.



Entrada distribuida con sección variable ver fotografía **ANEXO F**

Figura 18 sistema de entrada tipo flauta



Entrada no distribuida ver fotografía **ANEXO G**

3. CONSTRUCCIÓN Y ARMADO DEL MONTAJE DE LABORATORIO

3.1 HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL MONTAJE DE LABORATORIO

Para la construcción y el montaje de la estructura se utiliza Numerosas herramientas

Figura 19 equipo de eléctrico

Equipos:

Pulidora
Taladro
Soldador



Figura 20 herramienta utilizada

Herramientas

Llaves de tuerca
Llaves reticulares
(Rachas)
Destornilladores
Llaves inglesas
Llaves de tubería
Niveles
Limas (Redondas
y Planas)
Pistola de silicona
Alicate
Brocas
Remachadora
Segueta
Marca puntos



Figura 21 equipo de protección

Dispositivos de protección

- Orejeras
- Guantes
- Gafas
- Tapabocas
- Delantales



3.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS

3.2.1 Impermeabilización, limpieza y pintura del tanque existente. Una vez sacado el tanque a un lugar donde se pueda trabajar se procedió a la aplicación del levanta óxido en la parte inferior del tanque, al día siguiente se procedió a pulir con un disco de alambre (carda) para retirar el oxido acumulado, ya terminado se aplico varias capas de anticorrosivo para su protección, después se lijo todo el tanque , se procede a la aplicación de anticorrosivo en el interior del tanque una vez secado se aplica varias capas de pintura para su terminación final como se indican en las **Figuras 23 y 24** .

Figura 22 limpieza e Impermeabilización Figura 23 orificios para de ensamble



3.2.2 Construcción canaleta de salida. En esta etapa de la construcción se procede a la elaboración de este importante elemento en el sistema que nos permite la recolección a la salida del vertedero. Para dicha construcción se utilizó una lámina de zinc la que fue cortada con la pulidora, luego se procedió a doblar con ayuda de la prensa y un alicate, una vez doblada se procedió a unir los bordes con remaches **figura 23 y 24**

Figura 24 ensamble canaleta



Figura 25 remachado de canaleta



3.2.3 Construcción de la ampliación del tanque. Para la ampliación del tanque fue necesaria la contratación de un maestro el cual corto, doblo y soldó las respectivas piezas, una vez terminado se procedió a limpiar, masillar y por último a pintar dicha ampliación (ver figuras 26, 27)

Figura 26 terminado bordes



Figura 27 masillado esquinas



Figura 28 aplicación de pintura



Figura 29 aplicación de anticorrosivo



Figura 30 ensamble del sistema en el laboratorio



La **figura 31** Muestra la función que cumple la canaleta que es la de recolectar el flujo. Proveniente del vertedero (**Figura 30**)

Figura 31 construcción vertedero



Figura 32 abertura salida de la canaleta



3.2.4 Construcción del mezclador y dosificador. Una parte importante para obtener buenos resultados es lograr un buen proceso de mezclado agua -sólido para simular al máximo las condiciones reales. Para la construcción del mezclador se utiliza una estructura metálica que soporta un motor eléctrico bifásico que tiene como fin girar una polea con una relación 9 a 1 por medio de una banda de caucho que a su vez mueve cinco paletas ubicadas en el interior de un tanque mezclador con capacidad de veinte litros, una vez terminado su adaptación se procedió a su terminación final pintándolo. Para el dosificador se formo una tolva con una lámina la cual se incorporo un motor eléctrico que hace girar una banda que transporta el material hacia mezclador.

Figura 33 soporte mezclador



Figura 34 adaptación motor



Figura 35 adaptaciones de banda



Figura 36 armado del mezclador



Figura 37 pintura



Figura 38 terminado mezclador dosificador



3.2.5 Instalaciones hidráulicas realizadas. Se instalación de tubería de 1 1/2” presión para bombeo desde el reservorio hasta desarenador. Para lo cual hubo la necesidad de cortar la tubería y instalar una te como se muestra en la **Figura 40**, se instalaron dos universales con el objetivo de poder desmontar dicha inhalación si es necesario en el futuro.

Figura 39 adaptación universal Figura 40 bomba que alimenta el Sistema



Figura 41 universal mezclador

Figura 42 ensamble de codo 90°



Antes de la llegada del mezclador se instaló una válvula de compuerta con el objetivo de regular el caudal que llega al tanque desarenador **figuras 42 y 44**.

Figura 43 codo de entrada al mezclador Y Válvulas de compuerta



3.3 ADECUACIÓN DESARENADOR DE PLACAS

Una vez terminado los ensayos del desarenador convencional se procede a la adaptación de desarenador placas. Primero se realizan los cortes correspondiente de la tubería, se hacen las perforaciones de los orificios uniformemente distribuidos con ayuda de un taladro **Figura 45** y por último se instala todo en conjunto en el tanque ver figura 45

Figura 44 distribución de orificios utilización taladro



Figura 45 ensamblé final



Terminado el acople de este tipo de entrada, se procede a medir, cortar, y a montar las respectivas placas ver figura

Figura 46 medir



Figura 47 cortar



Figura 48 ensamble



Terminado las pruebas con este tipo de entrada, se desmontan las placas y se acopla el segundo tipo de entrada (tipo flauta). Se instalan nuevamente las placas y se realizan nuevos ensayos..

Figura 49 entrada tipo flauta



4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO Y TOMA DE DATOS

4.1 OBTENCIÓN DEL SEDIMENTO.

Para la realización de los ensayos se obtuvo arena comprendida entre rangos de material fino y muy fino tal como lo muestra la granulometría en la **tabla 5**, y debido a la gran cantidad requerida hubo la necesidad de desplazarse hasta Pilcuán (Nariño); en busca de una mina que proporcionara dicho material y donde fue encontrado y luego transportado en bultos hasta el laboratorio.

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen Del Material Sólido:	Mina Pilcuán (Nariño)
Clase De Material Sólido (Clasificación):	Arena de mina (Rango: ver granulometría)
Caudal Sólido	Variable
Gravedad:	$g = 9,8066 \text{ m/s}^2$

4.2 ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA.

El análisis granulométrico tiene como objetivo la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.

Se hace el ensayo de granulometría para agregados según (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: 1998) I.N.V. E – 213 y otras referencias correspondientes:

- ASTM C-136
- AASHTO T-27
- NLT - 150
- Norma Icontec 77

Equipo

- Balanza de precisión, con sensibilidad de 0.1%
- Tamices de malla cuadrada seleccionados de acuerdo con las especificaciones del material que va a ser ensayado
- Bandejas
- Recipientes

Procedimiento

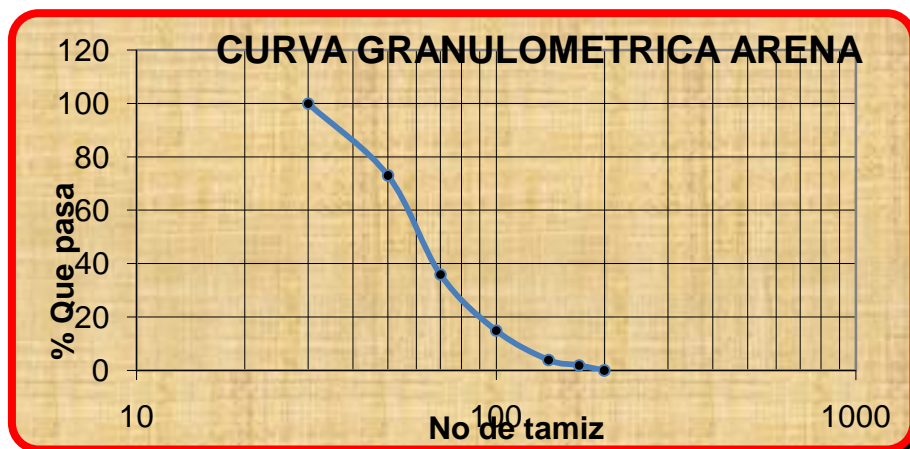
- Se seleccionó para cada material un muestra representativa para obtenerla se realizó un cuarteo de cada uno de los materiales, cada material se pone a secar al horno por 24 horas. Se deja enfriar y se pesa la cantidad requerida.
- Se selecciona un grupo de tamices de tamaños adecuados.
- El material retenido en cada tamiz es pesado en una balanza de precisión luego se suma todos los pesos y el valor total no debe diferir de la muestra inicial en más de 0.3%

Cálculo y resultados

Tabla 5 análisis granulométrico para una muestra de 1000gr.

No tamiz	peso retenido (gr)	peso que pasa (gr)	% retenido	% pasa
30	0	1000	0	100
50	270	730	27,00	73
70	370	360	37,00	36
100	210	150	21,00	15
140	110	40	11,00	4
170	20	20	2,00	2
200	20	0	2,00	0
TOTAL	1000		100,00	

Figura 50 curva granulométrica de la arena comprendida entre fina y muy fina.



4.3 ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO DEL MATERIAL

Se realiza el ensayo de peso específico o gravedad específica para la arena cuya granulometría se indica en la **tabla 5**.

Se hace el ensayo de peso específico de agregados finos según (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS: 1998) I.N.V. E – 222 y otras referencias correspondientes:

1. ASTM C 128
2. AASHTO T 84
3. NLT 154

Equipo

1. Picnómetros o balones volumétricos de 500 ml
2. Balanza de precisión de 0.1 gr
3. Bomba de vacío
4. Termómetro
5. Horno
6. Molde de cono (tronco de cono recto)
7. Varilla metálica para apisonar
8. Pipeta
9. Bandejas
10. Recipientes de secado

Procedimiento

1. Se toma una muestra de 1000 gr del material y se pone a saturar por 24 horas.
2. Se extiende la muestra en una superficie no absorbente y se expone a una corriente suave de aire caliente y se agita frecuentemente para conseguir un secado uniforme. La operación da por terminado cuando estén sueltos los agregados finos

Figura 51 material extendido para verificar su estado.

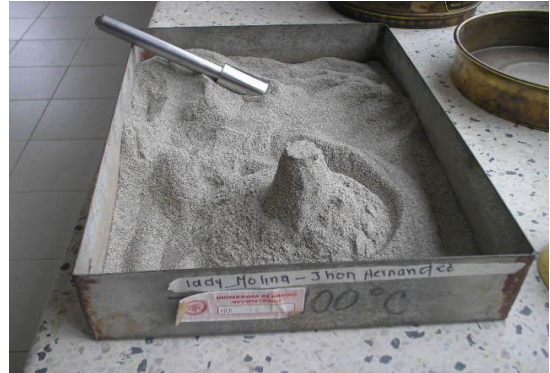


3. Se coloca la muestra en el molde cónico, se deja caer libremente el pistón sobre la superficie de esta altura de aproximadamente 1 cm durante 25 veces se alisa la superficie de la muestra y se alza el molde verticalmente. Si la muestra se derrumba parcialmente al sacar el molde. Esto indica que ha alcanzado una condición de saturado con superficie seca:

Figura 52 llenado material



Figura 53 verificación de estado



4. Se introduce 250 gr de la muestra en balón volumétrico y se llena con agua a 20 C⁰ hasta cerca de los 500 cm³; Luego se hace girar el balón para eliminar burbujas de aire. Se coloca en balón a baño maría a 20 C⁰ y se mantiene aproximadamente una hora; luego se llena con agua a la misma temperatura hasta 500 cm³. Se pesa en conjunto y se determina por diferencia el peso del agua añadida.

Figura 54 peso de la muestra



Figura 55 llenado material



Figura 56 extracción de aire



Figura 57 baño maría



5. se retira la muestra del balón y se deseca a 100 -110 C⁰ hasta que el peso sea constante; se enfría y se pesa.

6. cálculos

Método para determinar el peso específico

Se utilizan las siguientes convenciones:

G = peso de la muestra seca en gramos

Ga = Peso o volumen de agua añadida ala muestra para completar el volumen de la probeta, expresada en gr o en cm³

V_P = volumen de la probeta (cm³)

Datos obtenidos (matraz balón 1)

G = 247,1

Ga = 403,7

V_P = 500

Solución:

$$\rho_s = \frac{G}{(V_P - Ga - (250 - G))} \quad \rho_s = 2.65 \text{ gr/cm}^3 \quad [5.1]$$

Reemplazando en [5.1]

Datos obtenidos (matraz balón 1 2)

$$G = 247$$

$$Ga = 402.5$$

$$V_P = 500$$

Reemplazando en [5.1]

$$\rho_s = 2.61 \text{ gr/cm}^3$$

Datos obtenidos (matraz balón 1 3)

$$G = 248$$

$$Ga = 406.2$$

$$V_P = 500$$

Reemplazando en [5.1]

$$\rho_s = 2.69 \text{ gr/cm}^3$$

Promedio para los tres ensayos = 2.65 gr/cm^3

4.4 PROCESO ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO DEL MATERIAL

Con un sistema de aforo existente en laboratorio (ver **Figura 60**) para la determinación de la cantidad de caudal por volumen en un tiempo determinado y que se regula por una llave de 1 1/2" que se encuentra ubicada a la entrada del mezclador.

Tabla 6 tabla de aforo.

1	2	3	4	5
ÁREA m ²	ALTURA m	VOLUMEN m ³	TIEMPO seg	CAUDAL lps
0,158	0,120	0,019	7,6	2,50
0,158	0,120	0,019	9,5	2,00
0,158	0,120	0,019	11,2	1,70
0,158	0,120	0,019	12,6	1,50
0,158	0,120	0,019	19,0	1,00

Columna 1: Área superficial del aforador

Columna 2: altura comprendida entre línea y línea que se puede observar en la **Figura 54**

Columna 3: volumen que resulta al multiplicar el área superficial por la altura (12 cm.)

Columna 4: Tiempo necesario para cubrir dicho volumen

Columna 5: caudal que se desea obtener para realizar los respectivos ensayos

4.4.1 Proceso para medición de caudal

1. Se enciende la bomba
2. Se abre la válvula de regulación ubicada antes del mezclador
3. Se deja llenar el tanque hasta que rebose
4. Se regula el caudal con la válvula de entrada al mezclador y se mide con el sistema de aforo
5. para medir con el sistema de aforo se procede Cerrar la válvula del aforador
6. una vez el nivel del agua llegue al punto **A** se arranca el cronómetro y se detiene al llegar al punto **B**. (**Figura 59**)
7. se repite el proceso hasta obtener un tiempo aproximado para lograr el caudal que se requiere en cada caso

Figura 58 medición de caudal

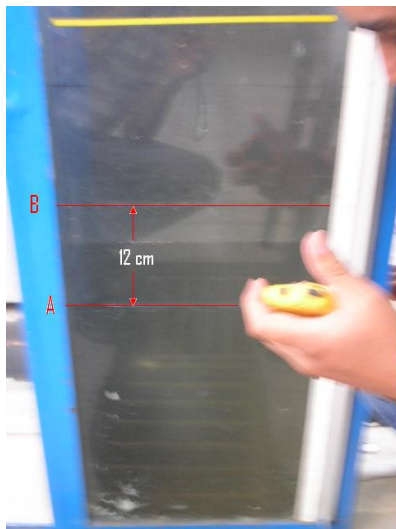
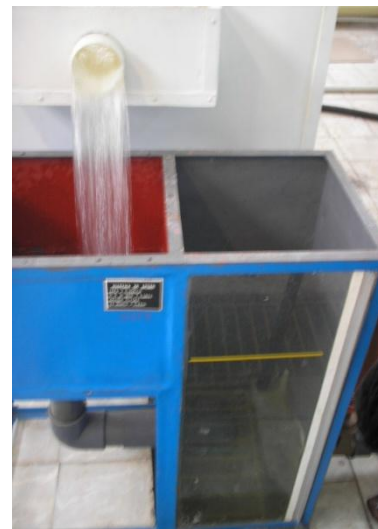


Figura 59 sistema de aforo



4.5 SELECCIÓN DE MATERIAL

El uso del material indicado para la realización de los ensayos es de gran importancia para la obtención de datos significativos y de buena credibilidad, por lo que se tomo la decisión de buscar un material que cumpla con las características de un material sedimentable. Para nuestros ensayos se propuso tomar inicialmente tres tipos de arena (gruesa, media y fina); pero con arena media y gruesa no se obtuvo resultados ya que sedimentaban en un 100%. Por lo que obligo a tomar rangos de arena entre fina y muy fina. Con el propósito de lograr resultados encaminados al objetivo de la investigación Debido a que la clasificaron de este material es muy dispendioso y su cantidad requerida es enorme se decide tomar una arena que se encuentre entre estos rangos. La arena que se tomo fue extraída de una mina de Pilcuán (Nariño) a 1 hora de la ciudad de Pasto vía al sur. Luego en el laboratorio de materiales de la Universidad de Nariño el material fue secado a la intemperie, y se tomo una muestra para determinar su granulometría y gravedad especifica.

4.6 CALIBRACIÓN DEL CAUDAL SÓLIDO.

Al tomar la concentración de sedimento como variable en la investigación, se determina a continuación la cantidad de arena suministrada por el dosificador de cono y válvula de compuerta de 1" y 1 ¼" Ver **Tablas 7.1 y 7.2**

En seguida se determinan la concentración de sólidos al caudal de entrada al sedimentador de acuerdo a la dosificación de sólidos que varían de acuerdo al número de vueltas de la válvula de compuerta como se indica en las **Figuras 62 y 63.**

Figura 60 dosificador de cono.



Para estos ensayos se utilizó un dosificador de cono; el cual arrojó los resultados siguientes al ser calibrado:

Tabla 7 caudal sólido suministrado por el dosificador con llave de compuerta de 1”.

1	2	
NO VUELTAS	CANTIDAD MATERIAL	
1	510,00	gr/min
2	1210,0	gr/min
3	2000,0	gr/min
4	2970,0	gr/min
5	4100,0	gr/min
6	5250,0	gr/min
7	6300,0	gr/min

Figura 61 curva de calibración caudal sólido para válvula de 1”.

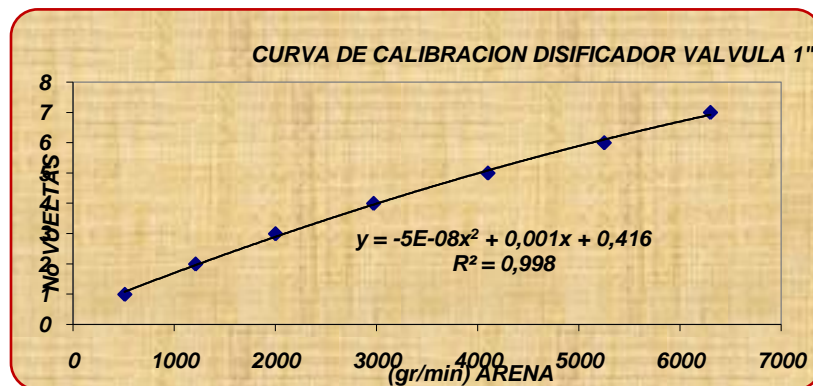
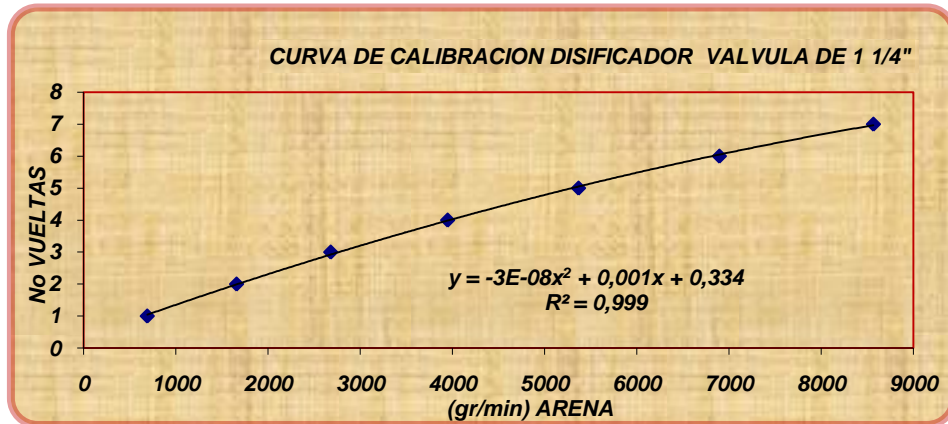


Tabla 8 caudal sólido suministrado por el dosificador con llave de compuerta de 1 ¼”.

1	2	
No VUEL	CANTIDAD MATERIAL	
1	689,65	gr/min
2	1658,50	gr/min
3	2680,00	gr/min
4	3948,50	gr/min
5	5368,50	gr/min
6	6896,50	gr/min
7	8567,65	gr/min

Figura 62 curva de calibración caudal sólido para válvula de 1 ¼”



DONDE:

Columna 1: se refiere a la cantidad de vueltas que se da a la válvula de compuerta para que arroje el material.

Columna 2: cantidad de material que arroja en gramos en minuto.

4.7 PROCEDIMIENTO PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

4.7.1 Número de ensayos. La realización de estos ensayos con lleva a un arduo trabajo en lo que se refiere a la obtención de la cantidad de material, de agua requerida, evacuación manual, secado y reutilización de material secado y toma de peso del material no removido. Lo difícil radica que para un sólo ensayo se utiliza enormes cantidades tanto de agua como de arena.

Para obtener dicho material entre rangos de arena fina a muy fina sobre lleva a un largo trabajo para su obtención.

Para dicho procedimiento se fija una concentración la cual se graduara por medio de un dosificador de sólidos: y cuyo valor se explica mediante la siguiente tabla.

Tabla 9 variación en los parámetros de ensayo.

1	2	2
DEFLECTOR COMPUERTA		
CAUDAL (LPS)	CONCENTRACIONES	ALTURA
2	0,40%, 0,67%, 1%, 1,27%, 1,63%, 2%	1m
1	1,83%	1m
1,5	1,23%	1m

1,7	1,09%	1m
2	0,93%	1m
2,5	0,74%	1m
2	1%	1m, 0,8m, 0,6m, 0,4m, 0,2m

DEFLECTOR DE COMPUERTA: Para el tipo de entrada utilizada

Para este caso la **Tabla 8** significa que se probaron seis concentraciones diferentes; para un mismo caudal y altura de compuerta. Como también se hizo variar caudal de 1 a 2.5 lps. Con concentración que varía de acuerdo al caudal y altura de deflector constante. Y por último se varía altura de compuerta 5 niveles. Con una concentración y caudal constante.

Columna 1: Caudal utilizado para cada ensayo.

Columna 2: Concentraciones para dicho caudal y para ese tipo de entrada.

Columna 3: Si es = 1m indica que se mantuvo una altura constante para ese ensayo Si es = 1m, 0.8m..., 0.2m. Indica que se hicieron variaciones de altura cuyo número aparece en la celda correspondiente ese caudal.

Tabla 10 variación en los parámetros de ensayo

1	2
DEFLECTOR ORIFICIOS	
CAUDAL (LPS)	CONCENTRACIONES
2	0,40%, 0,67%, 1%, 1,27%, 1,63%, 2%
1	1,83%
1,5	1,23%
1,7	1,09%
2	0,93%
2,5	0,74%

DEFLECTOR DE ORIFICIOS: Para el tipo de entrada utilizada

Para este caso la **Tabla 9** significa que se probaron seis concentraciones diferentes; para un mismo caudal y deflector orificios. Como también se hizo variar caudal de 1 a 2.5 lps. Con concentración que varía de acuerdo al caudal.

Columna 1: Caudal utilizado para cada ensayo.

Columna 2: Concentraciones para dicho caudal y para ese tipo de entrada.

De las **tablas 8 y 9** se puede deducir el número de ensayos es igual al número de variaciones de concentración, caudal y altura de compuerta según el caso.

4.8 EL PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE DATOS SE RESUME DE LA SIGUIENTE MANERA:

4.8.1 Procedimiento de toma de datos:

1. Se establecerá el caudal líquido requerido con el fin de garantizar el tiempo de retención apropiado y así mismo para que en desarenador de placas exista un régimen laminar como es necesario.
2. Se abre la válvula de paso del caudal.
3. Se mide el caudal líquido que pasa por el vertedero, dejando que el sistema entre en equilibrio.
4. Se enciende el mezclador de paleta eléctrico.
5. Se adiciona el material sólido preparado con anterioridad por medio de un dosificador tipo reloj de arena ubicado en la parte superior del mezclador de paleta.
6. Se vierte el material sólido hasta que la mezcla se estabilice.
7. A la salida del vertedero se retiene la cantidad de partículas que se escapan por medio del tamiz No 200
8. Se repite el proceso anterior con una nueva concentración.

4.8.2 Procedimiento para calcular la eficiencia:

VARIABLES A CUANTIFICAR:

1. Cantidad dosificada a la que se llamará, (**C_d**)
2. Cantidad no removida a la que se llamará, (**C_{n.r}**)

La eficiencia de remoción será:

$$EFICIENCIA(\%) = \left(1 - \frac{C_{n.r}}{C_d}\right) * 100 = \left(1 - \frac{\text{Cantidad no removida}}{\text{cantidad dosificada}}\right) * 100 \quad [5.2]$$

5. PRUEBAS, ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN LOS SISTEMAS

5.1 PRUEBAS EN DESARENADOR CONVENCIONAL (DEFLECTOR DE COMPUERTA)

5.1.1 Pruebas de variación de concentración. Para evaluar el efecto de la concentración sobre la eficiencia en desarenadores convencionales, se llevan a cabo las pruebas con variación de concentración usando una entrada al sistema tipo compuerta con una altura de la misma de 1m. Ósea $h = 1m$ que sería constante y variando la concentración de acuerdo al material dosificado. Los parámetros requeridos se ven en la **tabla 10**.

Tabla 11 variación de la concentración

VARIACION DE LA CONCENTRACION (C)					
1	2	3	4	5	6
DEFLECTOR	Q_L (l/s)	Q_S (gr/min)	Q_S (gr/min) p.c	C_{total}	$T_{dosificacion}$ (min)
Compuerta h1(1 mts)	2	1210,0	24,20	0,40%	20,00
Compuerta h1(1 mts)	2	2000,0	40,00	0,67%	20,00
Compuerta h1(1 mts)	2	2970,0	59,40	1,00%	20,00
Compuerta h1(1 mts)	2	4100,0	82,00	1,27%	20,00
Compuerta h1(1 mts)	2	5250,0	105,00	1,63%	20,00
Compuerta h1(1 mts)	2	6300,0	126,00	2,00%	20,00

DESCRIPCIÓN TABLA 11

Variación de concentración: en este espacio se coloca la descripción del parámetro.

Columna 1: Altura de compuerta a partir de la base del tanque: se simbolizará con la letra (h); necesario para obtener el parámetro adimensional $\frac{h}{H}$. Que para el caso en el tanque de pruebas $H = 1.1m$ y $h = variable$; $\frac{h}{H}$ es un parámetro que se varia como se indica en la **tabla12**

Columna 2: Caudal líquido: caudal utilizado para el ensayo en l.p.s. Que para el caso es $Q_L = 2l/s$

Columna 3: Caudal sólido: es la cantidad de material sólido (arena) utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min).

Ej: 1210 gr

Columna 4: Caudal sólido de la partícula crítica: es la cantidad de material sólido (arena) que de acuerdo a la granulometría es un 2% de Q_s utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min).

Ej: 126 gr/min

Columna 5: Concentración total: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la fórmula siguiente y expresado en %.

$$C_{total} = \frac{Q_s}{Q_L + Q_s} * 100 \quad [6.1]$$

Donde:

Q_s = caudal de sólidos m^3/s

Q_L = caudal de líquido m^3/s

$$EJ: C_{total} = \frac{0.0000076 m^3 / s}{0.0000076 m^3 / s + 0.002 m^3 / s} * 100 = 0.40\%$$

Columna 6: Tiempo de dosificación: tiempo en (min) que se adiciona el material sólido.

En el caso:

$$EJ: T_{dosificaci\acute{o}n} = 20min.$$

A continuación se presenta la **tabla 11** que corresponde al cálculo de los parámetros necesarios para el análisis, su variación y el resultado en la eficiencia de remoción para el desarenador convencional.

Tabla 12 cálculos (ver figura 64)

RESULTADOS OBTENIDOS								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
C_{total} (%)	PESO arena (gr) $Q_s * T_{dosif}$	PESO arena p.c (gr) $Q_s * T_{dosif} * 0,02$	$C_{p.c}$ (%)	$\frac{C_{p.c}}{C_{total}}$	PESO no removido (gr)	$\eta_{p.c}$ (%)	η_{total} (%)	$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$
0,38%	24200	484	0,008%	0,0201	25,14	94,806	99,896	0,949
0,67%	40000	800	0,013%	0,0188	143,14	82,108	99,642	0,824
1,00%	59400	1188	0,019%	0,0187	240,45	79,760	99,595	0,801
1,27%	82000	1640	0,026%	0,0203	425,4	74,061	99,481	0,744
1,63%	105000	2100	0,033%	0,0203	721,6	65,638	99,313	0,661
2,00%	126000	2520	0,040%	0,0198	870,5	65,456	99,309	0,659

DESCRIPCIÓN TABLA 12

“**Resultados obtenidos**”: En este espacio se coloca la descripción de la tabla.

Columna 1: Concentración total: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la ecuación [6.1] y expresado en %.

$$\text{EJ: } C_{total} = \frac{0.0000076 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.0000076 \text{ m}^3 / \text{s} + 0.002 \text{ m}^3 / \text{s}} * 100 = 0.40\%$$

Columna 2: Peso de arena dosificada en gramos: Se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación. O sea:

$$Qs * T_{dosificación} \quad [6.2]$$

$$\text{EJ: } 1210 \text{ gr} / \text{min} * 20 \text{ min} = 24200 \text{ gr}$$

Columna 3: Peso de arena dosificada en gramos de la partícula más crítica: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación y por su contenido porcentual en el material gradado. O sea:

$$0.02 * Qs * T_{dosificación} \quad [6.3]$$

$$\text{Ej: } 0.02 * 1210 \text{ gr} / \text{min} * 20 \text{ min} = 484 \text{ gr}$$

Columna 4: Concentración partícula crítica: es la cantidad de material en el líquido, obtenido por la fórmula siguiente y expresado en %.

$$C_{p.c} = 0.02 * C_{total} \quad [6.4]$$

Donde:

C_{total} = concentración total.

$C_{p.c}$ = concentración de la partícula crítica

$$\text{Ej: } C_{p.c} = 0.02 * 0.4\% = 0.008\%$$

Columna 5: Relación de concentraciones: resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total. Se hace esta relación para que cuando se analicen los resultados se tenga en cuenta las dos concentraciones así:

$$\frac{C_{p.c}}{C_{total}} \quad [6.5]$$

$$\text{EJ: } \frac{0.008\%}{0.04\%} = 0.02$$

Columna 6: Peso no removido: peso de arena no removida, o la que se escapa del sedimentador. En (gr).

EJ: 25.14gr.

Columna 7: Eficiencia de remoción de la partícula crítica: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría. Calculada con la ecuación siguiente y expresada en %

$$\eta_{p.c}(\%) = \left(1 - \frac{\text{Cantidad.no.removida.p.c.}(gr)}{\text{Cantidad.dosificada.p.c.}(gr)} \right) * 100 \quad [6.6]$$

$$\text{Ej: } \eta_{p.c}(\%) = \left(1 - \frac{25.14gr}{484gr} \right) * 100 = 94.806\%$$

Columna 8: Eficiencia de remoción total: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total. Calculada con la ecuación:

$$\eta_{total}(\%) = \left(1 - \frac{\text{Cantidad.total.no.removida}(gr)}{\text{Cantidad.total.dosificada}(gr)} \right) * 100 \quad [6.7]$$

$$\text{Ej: } \eta_{total}(\%) = \left(1 - \frac{25.14gr}{24200gr} \right) * 100 = 99.89\%$$

Columna 9: Relación de eficiencias: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula crítica y se la divide entre la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total.

$$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}} \quad [6.8]$$

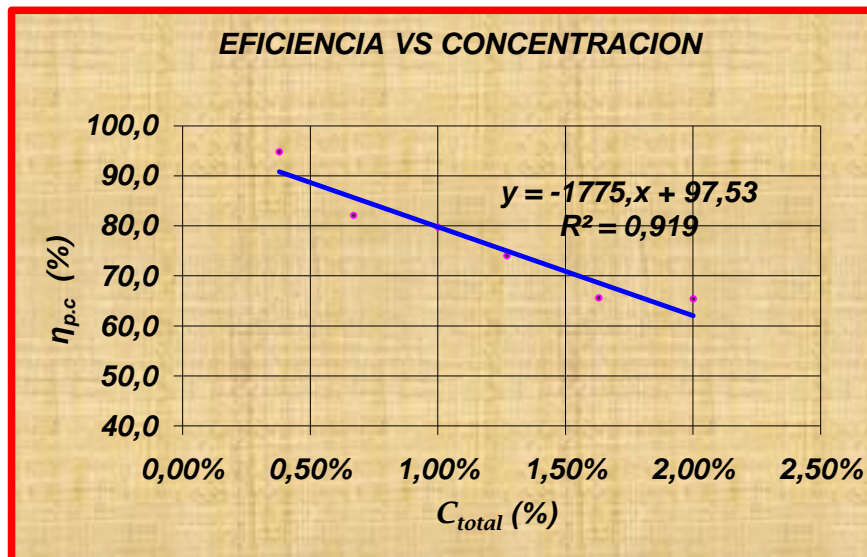
Donde:

$\eta_{p.c}$ = Eficiencia de la partícula más crítica

η_{total} = Eficiencia total

$$\text{EJ: } \frac{94.8\%}{99.89\%} = 0.949$$

Figura 63 eficiencia de remoción de la partícula crítica Vs concentración total en sedimentador convencional con deflector de compuerta.



Por Figura 62 se puede deducir que a > concentración < eficiencia

Por consiguiente: eficiencia de remoción de la partícula crítica en función de la concentración $\eta_{p.c} f(C_{total})$

Al escribir la ecuación de la gráfica se tiene:

$$\text{Si } Y = -1775,5X + 97,535 \quad [6.9]$$

Donde (Y) corresponde a la eficiencia $\eta_{p.c}$

Donde (X) corresponde a la concentración C_{total}

La expresión $\eta_{p.c} f(C_{total})$ queda así:

$$\eta_{p.c} = -1775,5C_{total} + 97,535 \quad [6.10]$$

5.1.2 Pruebas con variación de altura de deflector de compuerta. Para evaluar el efecto de la condición de entrada sobre la eficiencia en sedimentadores convencionales, se llevan a cabo las pruebas con una concentración constante usando una entrada al sistema tipo compuerta con una altura de la misma que varía de 0.2m a 1m. Los parámetros requeridos se ven en la **tabla 12**.

Los datos siguientes son obtenidos en las pruebas con una concentración constante de 1%

Tabla 13 variación de la altura del deflector.

VARIACION DE LA ALTURA DEFLECTOR				
1	2	3	4	5
$h = \text{ALTURA DE DEFLECTOR (m)}$	$Q_L \text{ (l/s)}$	$Q_s \text{ (gr/min)}$	$C_{total} \text{ (\%)}$	$T_{dosificacion} \text{ (min)}$
1	2	2970,0	1,00%	20
0,8	2	2970,0	1,00%	20
0,6	2	2970,0	1,00%	20
0,4	2	2970,0	1,00%	20
0,2	2	2970,0	1,00%	20

DESCRIPCIÓN TABLA 13

Variación de altura del deflector: en este espacio se coloca la descripción del parámetro

Columna 1: Altura del deflector: aquí se varia la altura del deflector de compuerta de 1m a 0.2m. $h = \text{variable}$.

Columna 2: Caudal líquido: caudal para el ensayo en l.p.s. Que para el caso es $Q_L = 2 \text{ l/s}$

Columna 3: Caudal sólido: es la cantidad de material sólido (arena) utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min)

Ej: 200 Kg

Columna 4: Concentración total: es la cantidad de material en el líquido obtenido por la ecuación[6.1] y expresado en %.

$$EJ: C_{total} = \frac{0.0000186m^3 / s}{0.0000186m^3 / s + 0.002m^3 / s} * 100 = 1.0\%$$

Columna 5: Tiempo de dosificación: tiempo en (min.) que se adiciona el material sólido. En el caso $T_{dosificacion} = 20 \text{ min}$.

Tabla 14 resultados (ver figura 65)

RESULTADOS OBTENIDOS								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$A = \text{ALTURA DE DEFLECTOR (m)}$	PESO arena (gr) $Q_s * T_{RET}$	$\text{PESO arena p.c (gr)}$ $Q_s * T_{dosif} * 0,02$	$C_{p.c} \text{ (\%)}$	$\frac{C_{p.c}}{C_{total}}$	$\text{PESO no removido (gr)}$	$\eta_{p.c} \text{ (\%)}$	$\eta_{total} \text{ (\%)}$	$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$
1	59400	1188	0,019%	0,0187	239,25	79,861	99,597	0,802
0.8	59400	1188	0,019%	0,0187	160,35	86,503	99,730	0,867
0.6	59400	1188	0,019%	0,0187	165,58	86,062	99,721	0,863
0.4	59400	1188	0,019%	0,0187	100,5	91,540	99,831	0,917
0.2	59400	1188	0,019%	0,0187	79,53	93,306	99,866	0,934

DESCRIPCIÓN TABLA 14

Resultados obtenidos: En este espacio se coloca la descripción de la tabla.

Columna 1: Altura del deflector: aquí se varia la altura del deflector de compuerta de 1m a 0.2m y se mide la eficiencia para cada altura.

Columna 2: Peso de arena dosificada en gramos: Se obtiene con la ecuación [6.2] multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación. Ósea:

$$\text{Ej: } 2970\text{gr} / \text{min} * 20\text{min} = 59400\text{gr}$$

Columna 3: Peso de arena dosificada en gramos de la partícula más crítica: Se obtiene con la ecuación [6.3] multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación y por su contenido porcentual en el material gradado. Ósea:

$$\text{Ej: } 0.02 * 2970\text{gr} / \text{min} * 20\text{min} = 1188\text{gr}$$

Columna 4: Concentración partícula crítica: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la ecuación [6.4] y expresado en %.

$$\text{Ej: } C_{p.c} = 0.02 * 1.0\% = 0.0199\%$$

Columna 5: Relación de concentraciones: resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total. Se hace esta relación para que cuando se analice los resultados se tenga en cuenta las dos concentraciones así: ecuación [6.5]

$$\text{Ej: } \frac{0.02\%}{1.0\%} = 0.0187$$

Columna 6: Peso no removido: peso de arena no removida, o la que se escapa del sedimentador. En (gr).

Columna 7: Eficiencia de remoción de la partícula crítica: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría. En % ecuación [6.6]

$$\text{Ej: } \eta_{p.c}(\%) = \left(1 - \frac{239.25\text{gr}}{1188\text{gr}} \right) * 100 = 79.86\%$$

Columna 8: Eficiencia de remoción total: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total. Se expresa en % ecuación [6.7]

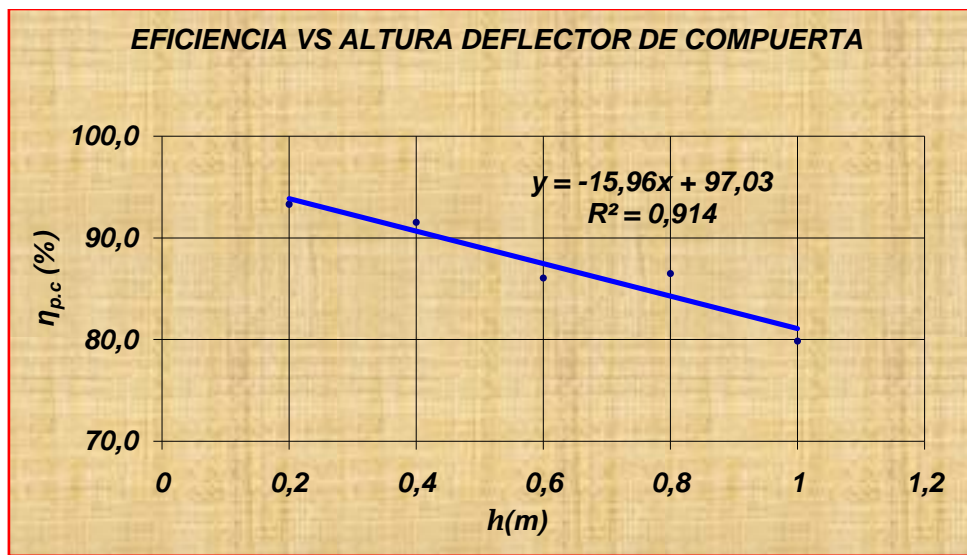
Ej:

$$\eta_{total}(\%) = \left(1 - \frac{239.25 \text{ gr}}{59400 \text{ gr}}\right) * 100 = 99.597\%$$

Columna 9: Relación de eficiencias: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría. En % y se la divide entre la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total, ecuación [6.8]

EJ: $\frac{79.86\%}{99.57} = 0.802$

Figura 65 eficiencias de remoción de la partícula crítica Vs altura de compuerta en desarenador convencional para deflector de compuerta.



Por la **figura 65** se puede deducir que a > altura del deflector < eficiencia

Por consiguiente: eficiencia de remoción de la partícula crítica en función de la altura del deflector $\eta_{p.c} f(h)$

En la ecuación de la gráfica se puede remplazar así:

SI:
$$Y = -15.963X + 97.032 \quad [6.11]$$

Donde (Y) corresponde a la eficiencia $\eta_{p.c}$

Donde (X) corresponde a la altura h de la compuerta a partir de la base.

Remplazando la expresión $\eta_{p.c} f(h)$ queda así:

$$\eta_{p.c} = -15.963h + 97.032 \quad [6.12]$$

5.1.3 Pruebas de variación de caudal. Para evaluar el efecto de la variación del caudal sobre la eficiencia en sedimentadores convencionales, se llevan a cabo las pruebas con variación de caudal usando una entrada al sistema tipo compuerta con una altura de la misma de 1m. Ósea $h = 1m$ que sería constante y la concentración que varía de acuerdo al caudal líquido. Los parámetros requeridos se ven en la **tabla 14**.

En estas pruebas se varía caudal por lo que varía el número de Froude.

Tabla 15 variación del caudal.

VARIACION DEL CAUDAL Q					
1	2	3	4	5	6
<i>h = ALTURA DE DEFLECTOR (m)</i>	<i>QL (l/s)</i>	<i>NF</i>	<i>Qs (gr/min)</i>	<i>C total (%)</i>	<i>T dosificacion (min)</i>
1	1	0,0002	2970,0	1,83%	20
1	1,5	0,0004	2970,0	1,23%	20
1	1,7	0,0004	2970,0	1,09%	20
1	2	0,0005	2970,0	0,93%	20
1	2,5	0,0006	2970,0	0,74%	20

DESCRIPCIÓN TABLA 15

Variación de caudal líquido: en este espacio se coloca la descripción del parámetro.

Columna 1: Altura del deflector: aquí se varia la altura del deflector de compuerta de $h = 1m$.

Columna 2: Caudal líquido: caudal para el ensayo que varia de 1 a 2.5 l.p.s.

Columna 3: Número de Froude: parámetro que relaciona velocidad del flujo, gravedad y altura de nivel del flujo que para canales abiertos.

$$NF = \frac{V}{\sqrt{g * H}} \quad [6.13]$$

DONDE:

V = velocidad (m/s)

g = gravedad (m^2/s)

H = altura nivel (m)
[6.14]

$$NF = \frac{Q}{A\sqrt{g*H}}$$

DONDE:

Q = caudal (m³/s)

A = área transversal (m²)

Ej:
$$NF = \frac{0.002m^3 / s}{1.29m^2 \sqrt{9.81m / s^2 * 1.10m}} = 0.0005$$

Columna 4: Caudal sólido: es la cantidad de material sólido (arena) utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min)

Columna 5: Concentración total: es la cantidad de material en el líquido obtenido por la fórmula [6.1] y expresado en %.

EJ:
$$C_{total} = \frac{0.0000186m^3 / s}{0.0000186m^3 / s + 0.001m^3 / s} * 100 = 1.83\%$$

Columna 6: Tiempo de dosificación: tiempo en (min.) que se adiciona el material sólido.

Tabla 16 cálculos (ver figura 66)

RESULTADOS OBTENIDOS								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
NF	PESO arena (gr) $Q_s * T_{dosif}$	PESO arena p.c (gr) $Q_s * T_{dosif} * 0,02$	$C_{p.c}$ (%)	$\frac{c_{p.c}}{c_{total}}$	PESO no removido (gr)	$\eta_{p.c}$ (%)	η_{total} (%)	$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$
0,0002	59400	1188	0,037%	0,0204	140,65	88,161	99,763	0,884
0,0004	59400	1188	0,025%	0,0202	154,25	87,016	99,740	0,872
0,0004	59400	1188	0,022%	0,0202	224,24	81,125	99,622	0,814
0,0005	59400	1188	0,019%	0,0202	248,54	79,079	99,582	0,794
0,0006	59400	1188	0,015%	0,0201	295,62	75,116	99,502	0,755

DESCRIPCIÓN TABLA 16

Resultados obtenidos: En este espacio se coloca la descripción de la tabla.

Columna 1: Número de Froude: parámetro que relaciona velocidad del flujo, gravedad y altura de nivel del flujo que para canales abiertos, ecuación [6.14]

Ej:

$$NF = \frac{0.002m^3 / s}{1.29m^2 \sqrt{9.81m / s^2 * 1.10m}} = 0.0002$$

Columna 2: Peso de arena dosificada en gramos: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación, ecuación [6.2]

$$\text{Ej: } 2970\text{gr} / \text{min} * 20\text{min} = 59400\text{gr}$$

Columna 3: Peso de arena dosificada en gramos de la partícula más crítica: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación y por su contenido porcentual en el material gradado, ecuación [6.3]

$$\text{Ej: } 0.02 * 2970\text{gr} / \text{min} * 20\text{min} = 1188\text{gr}$$

Columna 4: Concentración partícula crítica: es la cantidad de material más fino en el líquido. Es el 2% de la concentración total y se obtiene por la fórmula [6.4] y expresado en %.

$$\text{Ej: } C_{p.c} = 0.02 * 1.83\% = 0.037\%$$

Columna 5: Relación de concentraciones: Resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total, ecuación [6.5]

$$\text{Ej: } \frac{0.037\%}{1.83\%} = 0.0204$$

Columna 6: Peso no removido: Peso de arena no removida. O la que se escapa del sedimentador. En (gr).

Columna 7: Eficiencia de remoción de la partícula crítica: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría, ecuación [6.6]

$$\text{Ej: } \eta_{p.c}(\%) = \left(1 - \frac{140.65\text{gr}}{1188\text{gr}} \right) * 100 = 88.161\%$$

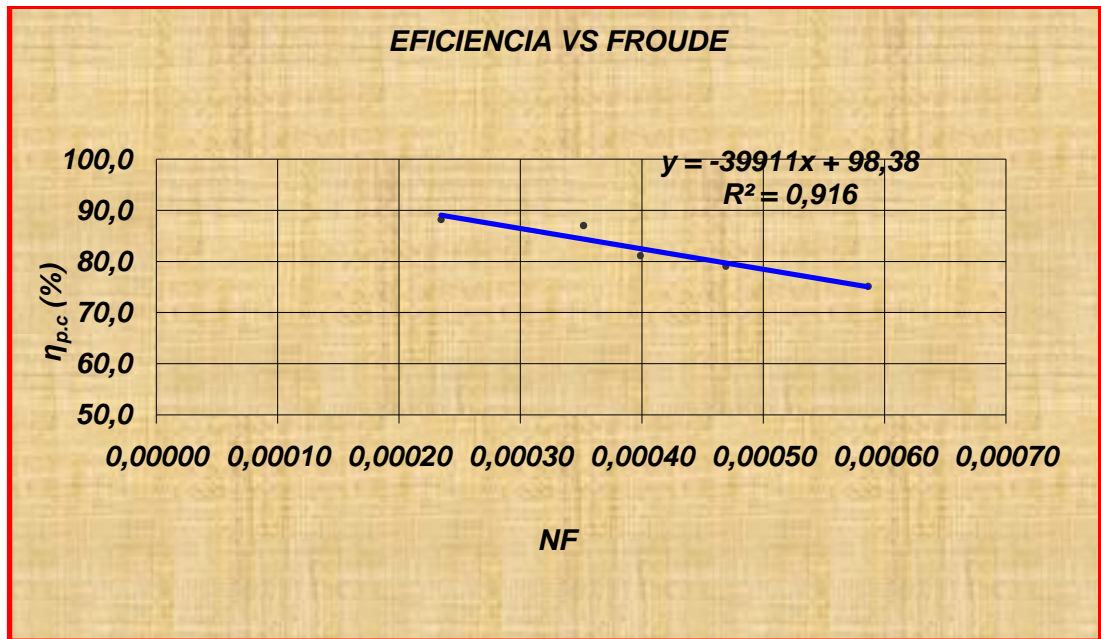
Columna 8: Eficiencia de remoción total: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total, ecuación [6.7]

$$\text{Ej: } \eta_{total}(\%) = \left(1 - \frac{140.65\text{gr}}{59400\text{gr}} \right) * 100 = 99.763\%$$

Columna 9: Relación de eficiencias: En esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría. En % y se la divide entre la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total. En %, ecuación [6.8]

EJ:
$$\frac{88.161\%}{99.763} = 0.884$$

Figura 64 eficiencia de remoción de la partícula crítica Vs variación de caudal. Variando así Froude en desarenador convencional y para deflector de compuerta.



Por la **Figura 63** se puede deducir que a > caudal < eficiencia

Por consiguiente: eficiencia de remoción de la partícula crítica en función de NF . $\eta_{p.c} f(NF)$

Si se escribe la ecuación de la gráfica se tiene:

$$Y = -39911X + 98.386 \quad [6.15]$$

Donde (Y) corresponde a la eficiencia $\eta_{p.c}$

Donde (X) corresponde a NF

La expresión $\eta_{p.c} f(NF)$ queda así:

$$\eta_{p.c} = -39911NF + 98.386 \quad [6.16]$$

5.2 PRUEBAS EN DESARENADOR CONVENCIONAL (DEFLECTOR DE ORIFICIOS)

5.2.1 Pruebas de variación de concentración. Para evaluar el efecto de la concentración sobre la eficiencia en sedimentadores convencionales, se llevan a cabo las pruebas con variación de concentración usando un deflector que para este caso es de orificios y variando la concentración de acuerdo al caudal sólido dosificado. Los parámetros requeridos se ven en la **tabla 16**.

Tabla 17 variación de la concentración

VARIACION DE LA CONCENTRACION C					
1	2	3	4	5	6
DEFLECTOR	Q_L l(l/s)	Q_S (gr/min)	Q_S (gr/min) p.c	C total (%)	T dosificacion (min)
Orificios	2	1210,0	24,20	0,40%	20,00
Orificios	2	2000,0	40,00	0,67%	20,00
Orificios	2	2970,0	59,40	1,00%	20,00
Orificios	2	4100,0	82,00	1,27%	20,00
Orificios	2	5250,0	105,00	1,63%	20,00
Orificios	2	6300,0	126,00	2,00%	20,00

DESCRIPCIÓN TABLA 17

Variación de concentración: en este espacio se coloca la descripción del parámetro.

Columna 1: Tipo deflector: necesario para saber al tipo de entrada.

Columna 2: Caudal líquido: caudal para el ensayo en l.p.s. Que para el caso es $Q_L = 2$ l/s

Columna 3: Caudal sólido: es la cantidad de material sólido (arena) utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min)

Columna 4: Caudal sólido de la partícula crítica: es la cantidad de material sólido (arena) de acuerdo a la granulometría es un porcentaje de Q_s utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min)

Ej: $Q_s(\text{gr} / \text{min})p.c = 0.02 * 1210\text{gr} / \text{min} = 24.20\text{gr}$

Columna 5: Concentración total: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la formula [6.1] y expresado en %.

EJ:
$$C_{total} = \frac{0.0000076 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.0000176 \text{ m}^3 / \text{s} + 0.002 \text{ m}^3 / \text{s}} * 100 = 0.40\%$$

Columna 6: Tiempo de dosificación: Tiempo en (min.) que se adiciona el material sólido.

Tabla 18 cálculos (ver figura 67)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
C_{total} (%)	PESO arena (gr) Q_s * T dosifi	PESO arena p.c (gr) $Q_s * T_{dosif} * 0,02$	$C_{p.c}$ (%)	$\frac{c_{p.c}}{c_{total}}$	PESO no removido (gr)	$\eta_{p.c}$ (%)	η_{total} (%)	$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$
0,38%	24200	484	0,008%	0,0201	18,52	96,174	99,923	0,962
0,67%	40000	800	0,013%	0,0188	120,54	84,933	99,699	0,852
1,00%	59400	1188	0,019%	0,0187	145,32	87,768	99,755	0,880
1,27%	82000	1640	0,026%	0,0203	354,52	78,383	99,568	0,787
1,63%	105000	2100	0,033%	0,0203	495,62	76,399	99,528	0,768
2,00%	126000	2520	0,040%	0,0198	632,50	74,901	99,498	0,753

DESCRIPCIÓN TABLA 18

Columna 1: Concentración total: es la cantidad de material sólido en el líquido. Obtenido por la ecuación [6.1] y expresado en %.

EJ:
$$C_{total} = \frac{0.0000076 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.0000176 \text{ m}^3 / \text{s} + 0.002 \text{ m}^3 / \text{s}} * 100 = 0.40\%$$

Columna 2: Peso de arena dosificada en gramos: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación, ecuación [6.2]

Ej: $1210 \text{ gr} / \text{min} * 20 \text{ min} = 24200 \text{ gr}$

Columna 3: Peso de arena dosificada en gramos de la partícula más crítica: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación y por su contenido porcentual en el material gradado, ecuación [6.3]

Ej: $0.02 * 1210 \text{ gr} / \text{min} * 20 \text{ min} = 484 \text{ gr}$

Columna 4: Concentración partícula crítica: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la fórmula siguiente y expresado en %, ecuación [6.4]

Ej: $C_{p.c} = 0.02 * 0.4\% = 0.008\%$

Columna 5: Relación de concentraciones: resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total. Se hace esta relación para que cuando se analice los resultados se tenga en cuenta las dos concentraciones, ecuación [6.5]

EJ:
$$\frac{0.008\%}{0.4\%} = 0.0201$$

Columna 6: Peso no removido: peso de arena no removida. O la que se escapa del sedimentador. En (gr).

Ej: 18.52 gr

Columna 7: Eficiencia de remoción de la partícula crítica: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría. En %, ecuación [6.6]

$$\text{Ej: } \eta_{p.c}(\%) = \left(1 - \frac{18.52 \text{ gr}}{484 \text{ gr}}\right) * 100 = 96.174\%$$

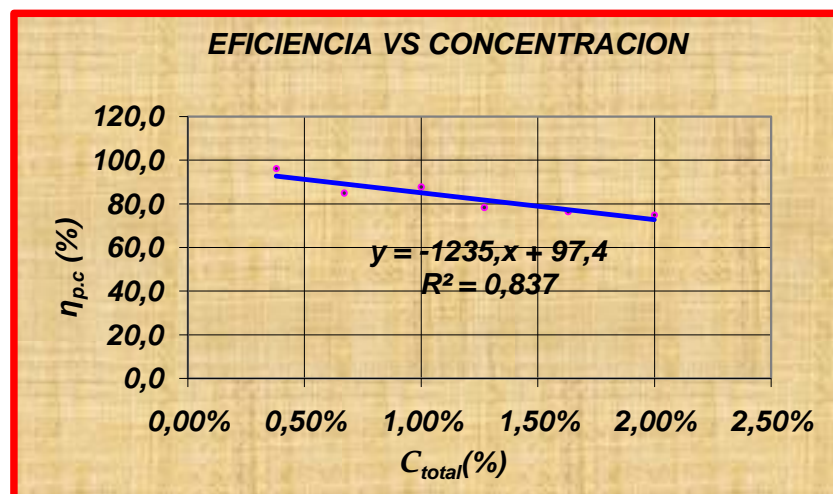
Columna 8: Eficiencia de remoción total: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total. Se expresa en %, ecuación [6.7]

$$\text{Ej: } \eta_{total}(\%) = \left(1 - \frac{18.52 \text{ gr}}{24200 \text{ gr}}\right) * 100 = 99.92\%$$

Columna 9: Relación de eficiencias: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría. En % y se la divide entre la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total, ecuación [6.8]

$$\text{Ej: } \frac{96.17\%}{99.92\%} = 0.962$$

Figura 65 eficiencia de remoción de la partícula crítica Vs concentración en sedimentador convencional con deflector de orificios



Por la figura 64 se puede deducir que a > concentración < eficiencia

Por consiguiente: eficiencia de remoción de la partícula crítica en función de la concentración total $\eta_{p.c} f(C_{total})$

En la ecuación de la gráfica se puede remplazar así:

$$Y = -1235.3X + 97,4 \quad [6.17]$$

Donde (Y) corresponde a la eficiencia $\eta_{p.c}$

Donde (X) corresponde a la concentración C_{total}

La expresión $\eta_{p.c} f(C_{total})$ queda así:

$$\eta_{p.c} = -1235.3C_{total} + 97.4 \quad [6.18]$$

5.2.2 Pruebas con variación de caudal. Para evaluar el efecto de la variación del caudal sobre la eficiencia en sedimentadores convencionales, se llevan a cabo las pruebas con variación de caudal usando una entrada al sistema como es un deflector de orificios y una concentración que varía de acuerdo al caudal líquido. Los parámetros requeridos se ven en la **tabla 18**.

Tabla 19 variación de la caudal

VARIACION DEL CAUDAL Q					
1	2	3	4	5	6
<i>DEFLECTOR</i>	<i>QL (l/s)</i>	<i>NF</i>	<i>Qs (gr/min)</i>	<i>C total (%)</i>	<i>T dosificacion (min)</i>
Orificios	1	0,0002	2970,0	1,83%	20
Orificios	1,5	0,0004	2970,0	1,23%	20
Orificios	1,7	0,0004	2970,0	1,09%	20
Orificios	2	0,0005	2970,0	0,93%	20
Orificios	2,5	0,0006	2970,0	0,74%	20

DESCRIPCIÓN TABLA 19

Variación de caudal líquido: En este espacio se coloca la descripción del parámetro.

Columna 1: Tipo de entrada: aquí se utiliza deflector de orificios.

Columna 2: Caudal líquido: caudal para el ensayo que varía de 1 a 2.5 l.p.s.

Columna 3: Número de Froude: parámetro que relaciona velocidad del flujo, gravedad y altura de nivel del flujo que para canales abiertos, ecuación [6.14]

$$\text{Ej: } NF = \frac{0.002m^3 / s}{1.29m^2 \sqrt{9.81m / s^2} * 1.10m} = 0.0002$$

Columna 4: Caudal sólido: es la cantidad de material sólido (arena) utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min)

Columna 5: Concentración total: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la ecuación [6.1] y expresado en %.

$$\text{EJ: } C_{total} = \frac{0.0000186m^3 / s}{0.0000186m^3 / s + 0.001m^3 / s} * 100 = 1.83\%$$

Columna 6: Tiempo de dosificación: tiempo en (min.) que se adiciona el material sólido

Tabla 20 resultados (ver figura 68)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
NF	PESO arena (gr) $Q_s * T_{dosif}$	PESO arena p.c (gr) $Q_s * T_{dosif} * 0,02$	$C_{p.c}$ (%)	$\frac{C_{p.c}}{C_{total}}$	PESO no removido (gr)	$\eta_{p.c}$ (%)	η_{total} (%)	$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$
0,0002	59400	1188	0,037%	0,0204	98,65	91,696	99,834	0,918
0,0004	59400	1188	0,025%	0,0202	116,52	90,192	99,804	0,904
0,0004	59400	1188	0,022%	0,0202	138,65	88,329	99,767	0,885
0,0005	59400	1188	0,019%	0,0202	212,25	82,134	99,643	0,824
0,0006	59400	1188	0,015%	0,0201	325,10	72,635	99,453	0,730

DESCRIPCIÓN TABLA 20

Columna 1: Número de Froude: parámetro que relaciona velocidad del flujo, gravedad y altura de nivel del flujo que para canales abiertos, ecuación [6.14]

$$\text{Ej: } NF = \frac{0.002m^3 / s}{1.29m^2 \sqrt{9.81m / s^2} * 1.10m} = 0.0002$$

Columna 2: Peso de arena dosificada en gramos: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación, ecuación [6.2]

$$\text{EJ: } 2970gr / min * 20min = 59400gr$$

Columna 3: Peso de arena dosificada en gramos de la partícula más crítica: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación y por su contenido porcentual en el material gradado, ecuación [6.3]

$$\text{Ej: } 0.02 * 2970 \text{ gr} / \text{min} * 20 \text{ min} = 1188 \text{ gr}$$

Columna 4: Concentración partícula crítica: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la formula [6.4] y expresado en %.

$$\text{Ej: } C_{p.c} = 0.02 * 1.83\% = 0.037\%$$

Columna 5: Relación de concentraciones: resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total, ecuación [6.5]

$$\text{EJ: } \frac{0.037\%}{1.83\%} = 0.0204$$

Columna 6: Peso no removido: peso de arena no removida. O la que se escapa del sedimentador. En (gr).

Columna 7: Eficiencia de remoción de la partícula crítica: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría, ecuación [6.6]

$$\text{Ej: } \eta_{p.c}(\%) = \left(1 - \frac{98.65 \text{ gr}}{1188 \text{ gr}} \right) * 100 = 91.696\%$$

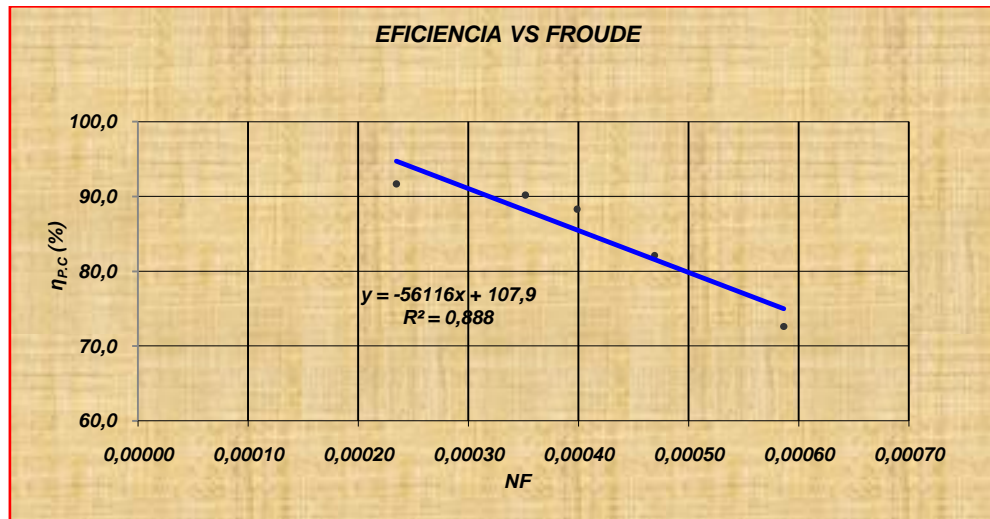
Columna 8: Eficiencia de remoción total: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total, ecuación [6.7]

$$\text{Ej: } \eta_{total}(\%) = \left(1 - \frac{98.65 \text{ gr}}{59400 \text{ gr}} \right) * 100 = 99.83\%$$

Columna 9: Relación de eficiencias: En esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría. En % y se la divide entre la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total, ecuación [6.8]

$$\text{EJ: } \frac{91.69\%}{99.83} = 0.918$$

Figura 66 eficiencia de remoción Vs variación de caudal. Por lo que varía así mismo Froude en sedimentador convencional y para deflector de orificios.



Por **figura 68** se deduce que a > caudal < eficiencia

Por consiguiente: eficiencia de remoción de la partícula crítica en función de NF
 $\eta_{p.c} f(NF)$

En la ecuación de la gráfica se puede remplazar así:

$$Y = -56116X + 107.9 \quad [6.19]$$

Donde (**Y**) corresponde a la eficiencia $\eta_{p.c}$

Donde (**X**) corresponde a NF

La expresión $\eta_{p.c} f(NF)$ queda así:

$$\eta_{p.c} = -56116NF + 107.9 \quad [6.20]$$

5.3 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE OBSTACULIZADO C'_D

5.3.1 Cálculo del coeficiente de arrastre de partículas afectadas por la mezcla para deflector de compuerta

Tabla 21 cálculo de las propiedades de los sedimentos con variación de la concentración.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
	d	C	T°	γ_w	ρ_w	ρ_s	ρ_m	Ss	Δ	v_w	v_m	d*	d**	Rs	Rm	n	Vs	Vm	C _D	C' _D	
	p.c							Sólidos		del agua	por C										
	(mm)	(%)	(°C)	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	(-)	(-)	(m ² /s)	(m ² /s)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(m/s)	(m/s)	(-)	(-)	
1	0,075	0,400	16,00	998,72	998,72	2650,00	1001,21	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,130E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,959	0,003	0,003	157,630	160,997	
2	0,075	0,670	16,00	998,72	998,72	2650,00	1002,90	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,134E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,955	0,003	0,003	157,630	163,317	
3	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
4	0,075	1,270	16,00	998,72	998,72	2650,00	1006,68	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,145E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,947	0,003	0,003	157,630	168,610	
5	0,075	1,630	16,00	998,72	998,72	2650,00	1008,96	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,151E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,942	0,003	0,003	157,630	171,880	
6	0,075	2,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1011,32	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,158E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,937	0,003	0,003	157,630	175,317	
7	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
8	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
9	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
10	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
11	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
12	0,075	3,601	16,00	998,72	998,72	2650,00	1021,64	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,187E-06	1,8	1,6	0,2	0,2	4,915	0,003	0,003	157,630	191,134	
13	0,075	1,834	16,00	998,72	998,72	2650,00	1010,26	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,155E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,938	0,003	0,003	157,630	173,762	
14	0,075	1,230	16,00	998,72	998,72	2650,00	1006,43	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,144E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,947	0,003	0,003	157,630	168,251	
15	0,075	1,087	16,00	998,72	998,72	2650,00	1005,53	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,142E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,949	0,003	0,003	157,630	168,974	
16	0,075	0,925	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,51	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,139E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,951	0,003	0,003	157,630	165,546	

5.3.2 cálculo del coeficiente de arrastre de partículas afectadas por la mezcla para deflector de orificios

Tabla 22 cálculo de las propiedades de los sedimentos con variación de la concentración

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
	d	C	T°	γ_w	ρ_w	ρ_s	ρ_m	Ss	Δ	v_w	v_m	d*	d**	Rs	Rm	n	Vs	Vm	C _D	C' _D	
	p.c							Sólidos		del agua	por C										
	(mm)	(%)	(°C)	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	(-)	(-)	(m ² /s)	(m ² /s)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(m/s)	(m/s)	(-)	(-)	
1	0,075	0,400	16,00	998,72	998,72	2650,00	1001,21	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,130E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,959	0,003	0,003	157,630	160,997	
2	0,075	0,670	16,00	998,72	998,72	2650,00	1002,90	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,134E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,955	0,003	0,003	157,630	163,317	
3	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
4	0,075	1,270	16,00	998,72	998,72	2650,00	1006,68	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,145E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,947	0,003	0,003	157,630	168,610	
5	0,075	1,630	16,00	998,72	998,72	2650,00	1008,96	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,151E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,942	0,003	0,003	157,630	171,880	
6	0,075	2,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1011,32	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,158E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,937	0,003	0,003	157,630	175,317	
7	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
8	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
9	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
10	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	
11	0,075	1,000	16,00	998,72	998,72	2650,00	1004,98	2,6500	1,6534	1,1230E-06	1,140E-06	1,8	1,7	0,2	0,2	4,950	0,003	0,003	157,630	166,204	

Los cálculos del coeficiente de arrastre obstaculizado C'_D para los dos tipos de entrada se indican en las tablas 20 y 21, la cual se describe a continuación:

DESCRIPCIÓN TABLAS 21 Y 22:

Columna 2: Diámetro partícula crítica: es la partícula de arena mas difícil a remover; lo que equivale a la partícula de menor diámetro.

Columna 3: Concentración total: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la ecuación [5.1] y expresado en %.

$$EJ: C_{total} = \frac{0.0000076 \text{ m}^3 / s}{0.0000076 \text{ m}^3 / s + 0.002 \text{ m}^3 / s} * 100 = 0.40\%$$

Columna 4: Temperatura: temperatura del agua al hacer el ensayo 16 °C

Columna 5: Peso Especifico Del Agua; calculada con la ecuación:

$$\gamma_w = 10^{-5}(T)^3 - 0.0055(T)^2 + 0.0002(T) + 1000.08 \quad [6.21]$$

$$EJ: \gamma_w = 10^{-5}(16)^3 - 0.0055(16)^2 + 0.0002(16) + 1000.08 = 998.72 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Columna 6: Densidad Del Agua: calculada con la ecuación:

$$\rho_w = 1000 - \frac{(T-4)^2}{180} \quad [6.22]$$

$$EJ: \rho_w = 1000 - \frac{((16)-4)^2}{180} = 998.7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Columna 7: Peso Especifico del la arena: calculada con la ecuación [5.1] para el cual se saco un promedio.

$$EJ: \rho_s = 2.65 \text{ gr} / \text{cm}^3$$

Columna 8: Densidad De La Mezcla: calculada con la ecuación:

$$\rho_m = \frac{\rho_w}{1 - (C_{total}) \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \right)} \quad [6.23]$$

$$EJ: \rho_m = \frac{998.7}{1 - (0.004) \left(\frac{2650 - 998.7}{2650} \right)} = 1001.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Columna 9: Ss sólidos: calculada con la ecuación:

$$\rho_w' = \frac{\rho_s}{1000} \quad [6.24]$$

$$\text{EJ: } \rho_w' = \frac{2650}{1000} = 2.65$$

Columna 10: Coeficiente de densidad de la Mezcla: calculada con la ecuación:

$$\Delta = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \quad [6.25]$$

$$\text{EJ: } \Delta = \left(\frac{2650 - 998.7}{998.7} \right) = 1.6532$$

Columna 11: Viscosidad del agua: calculada con la ecuación:

$$\nu_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 * T + 0.000221 * T^2} \quad [6.26]$$

$$\text{EJ: } \nu_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 * 16 + 0.000221 * 16^2} = 1.12 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Columna 12: Viscosidad de la mezcla: calculada con la ecuación 2.48]

$$\text{EJ: } \nu_m = \frac{2(1.112 * 10^{-6})}{2 - 3(0.004)} = 1.13 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Columna 13: Diámetro adimensional de la partícula individual: calculada con la ecuación [2.41]

$$\text{EJ: } d_* = \left(\frac{1.653 * 9.81}{(1.12 * 10^{-6})^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} 0.000075 = 1.8$$

Columna 14: Diámetro adimensional de la partícula con concentración: calculada con la ecuación [2.46] y el coeficiente de densidad de partículas (Δ') dentro de una mezcla, se calcula con la ecuación [2.47]

$$\text{EJ: } \Delta' = \left[\frac{(1 - 0.004)(2650 - 1)}{1 + 0.004(2650 - 1)} \right] = 0.99$$

$$d_*' = \left(\frac{0.99 * 9.81}{1.13 * 10^{-6} m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} 1.8 = 1.7$$

Columna 15: Reynolds de la partícula individual: calculada con la ecuación [2.40]

$$\text{EJ: } R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2(1.8)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 0.22$$

Columna 16: Reynolds de la partícula afectado por la mezcla: calculada con la ecuación [2.45]

$$\text{EJ: } R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(1.7_*)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 0.194$$

Columna 17: Exponente que cuantifica el efecto de la concentración: calculada con la ecuación [2.44]

$$\text{EJ: } n_c = \frac{\text{Ln}\left[\frac{(2 - 2(0.004))}{(2 - 3(0.004))}\right] + \text{Ln}\left[\frac{0.194}{0.22}\right]}{\text{Ln}[1 - (0.004)]} = 4.959$$

Columna 18: Velocidad de asentamiento de la partícula individual: calculada con la ecuación [2.38]

$$\text{EJ: } V_s = \frac{(0.22)(1.12 * 10^{-6})}{0.000075} = 0.003 \frac{m}{s}$$

Columna 19: Velocidad de asentamiento de la partícula afectado por la mezcla: calculada con la ecuación [2.43]

$$\text{EJ: } V_m = 0.003(1 - (0.004))^{4.959} = 0.003 \frac{m}{s}$$

Columna 20: C'_D : calculado con la ecuación [2.39]

$$\text{EJ: } C_D = \left[\left(\frac{32}{0.22} + 1 \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 157.63$$

Columna 21: Coeficiente de arrastre de la partícula afectado por la mezcla: calculado con la ecuación [2.49]

$$\text{EJ: } C'_D = \left[\left(\frac{32}{0.194} + 1 \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 160.99$$

5.4 ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN SISTEMA CONVENCIONAL (DEFLECTOR DE COMPUERTA)

Para analizar los datos se aplica regresión lineal múltiple con el fin de encontrar una ecuación de la $\eta_{p,c} f(h/H, NF, C'_D, C_{total})$. Pues cada variable independiente presenta una relación lineal con la variable dependiente.

Tabla 23 datos a analizar con regresión múltiple

ANÁLISIS DE DATOS										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
No	Q	H	h	B	L	$\frac{\eta_{p,c}}{\eta_{total}}$	$\frac{C_{p,c}}{C_{total}}$	NF	h/H	C' _D
	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0,0020	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,949	0,0201	0,0005	0,9091	161,00
2	0,0020	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,824	0,0188	0,0005	0,9091	163,32
3	0,0020	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,801	0,0187	0,0005	0,9091	166,20
4	0,0020	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,744	0,0203	0,0005	0,9091	168,61
5	0,0020	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,661	0,0203	0,0005	0,9091	171,88
6	0,0020	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,659	0,0198	0,0005	0,9091	175,32
7	0,0020	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,802	0,0187	0,0005	0,9091	166,20
8	0,0020	1,1	0,8000	1,18	2,00	0,867	0,0187	0,0005	0,7273	166,20
9	0,0020	1,1	0,6000	1,18	2,00	0,863	0,0187	0,0005	0,5455	166,20
10	0,0020	1,1	0,4000	1,18	2,00	0,917	0,0187	0,0005	0,3636	166,20
11	0,0020	1,1	0,2000	1,18	2,00	0,934	0,0187	0,0005	0,1818	166,20
12	0,0010	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,884	0,0204	0,0002	0,9091	191,13
13	0,0015	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,872	0,0202	0,0004	0,9091	173,76
14	0,0017	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,814	0,0202	0,0004	0,9091	168,25
15	0,0020	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,794	0,0202	0,0005	0,9091	166,97
16	0,0025	1,1	1,0000	1,18	2,00	0,755	0,0201	0,0006	0,9091	165,55

DESCRIPCIÓN TABLA 23

Análisis de datos: en este espacio se coloca la descripción de la tabla.

Columna 1: Número de datos: necesario para contabilizar los datos.

Columna 2: Caudal líquido: caudal para el ensayo en l.p.s.

Columna 3: Altura del nivel del agua: En este caso $H = 1.1\text{m}$

Columna 4: Altura del deflector: aquí se varia la altura h del deflector de compuerta de 1m a 0.2m

Columna 5: Ancho del sedimentador: en este caso es constante. Ósea: 1.18m

Columna 6: Longitud del sedimentador: está comprendida desde el deflector al vertedero.

Columna 7: Relación de eficiencias: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la

granulometría. En % y se la divide entre la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total, ecuación [6.8]

$$\text{EJ: } \frac{94.8\%}{99.89\%} = 0.949$$

Columna 8: Relación de concentraciones: resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total, ecuación [6.5]

$$\text{EJ: } \frac{0.008\%}{0.04\%} = 0.02$$

Columna 9: Número de Froude: parámetro que relaciona velocidad del flujo, gravedad y altura de nivel del flujo que para canales abiertos, ecuación [6.14]

$$\text{EJ: } NF = \frac{0.002m^3 / s}{1.29m^2 \sqrt{9.81m / s^2 * 1.10m}} = 0.0005$$

Columna 10: Relación (h/H): Parámetro adimensional que relaciona la altura de la compuerta y la altura del nivel del agua, y se escribe así:

$$\frac{h}{H} \quad [6.27]$$

Donde:

h = altura de la compuerta a partir de la base del tanque

H = altura del nivel del agua

$$\text{Ejemplo: } \frac{1}{1.1} = 0.909$$

Columna 11: Coeficiente de arrastre afectado por la mezcla: Este parámetro se calcula con base a la **tabla 20** columna 21.

Tabla 24 logaritmos de los datos de la tabla 22

LOGARITMOS DE LOS DATOS DATOS					
1	2	3	4	5	6
<i>No</i>	$\frac{C_{p.c}}{C_{total}}$	<i>NF</i>	h/H	C'_D	$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$
1	-1,697	-3,329	-0,041	2,207	-0,023
2	-1,726	-3,329	-0,041	2,213	-0,084
3	-1,729	-3,329	-0,041	2,221	-0,096
4	-1,693	-3,329	-0,041	2,227	-0,128
5	-1,694	-3,329	-0,041	2,235	-0,180
6	-1,703	-3,329	-0,041	2,244	-0,181
7	-1,729	-3,329	-0,041	2,221	-0,096
8	-1,729	-3,329	-0,138	2,221	-0,062
9	-1,729	-3,329	-0,263	2,221	-0,064
10	-1,729	-3,329	-0,439	2,221	-0,038
11	-1,729	-3,329	-0,740	2,221	-0,030
12	-1,691	-3,630	-0,041	2,281	-0,054
13	-1,694	-3,454	-0,041	2,240	-0,059
14	-1,694	-3,399	-0,041	2,226	-0,089
15	-1,695	-3,329	-0,041	2,223	-0,100
16	-1,696	-3,232	-0,041	2,219	-0,122

DESCRIPCIÓN TABLA 24

Logaritmo de datos: resultado de la extracción del Logaritmo a cada uno de los datos.

Columna 1: Número de datos: necesario para contabilizar los datos.

Columna 2: Log de Número de Froude

Columna 4: Log de la Relación $\frac{h}{H}$

Columna 5: Log del Coeficiente de arrastre afectado por la mezcla

Columna 6: Log de la Relación de eficiencias

Con las datos de la **tabla 23** y haciendo regresión múltiple variable en Excel se obtiene la **tabla 24**

Tabla 25. Regresión múltiple de los datos Tabla 23

-3.4298	-0.10457	-0.76753	-0.08172	4.824256
0.69069	0.03638	0.13047	0.45752	1.656141
0.82005	0.02346	#N/A	#N/A	#N/A
12.5317	11	#N/A	#N/A	#N/A
0.02759	0.00606	#N/A	#N/A	#N/A

La ilustración del **ANEXO O**. Indica el orden de las estadísticas de regresión adicionales de la **Tabla 24**

Se mira las estadísticas de regresión adicionales de la **tabla 24** y siguiendo el orden que muestra el **ANEXO O** se tiene que:

se₁, se₂, se₃, se₄.

Son los valores de error estándar para los coeficientes m_1, m_2, \dots, m_4 . Lo cual son muy bajos.

Se_b

El valor de error estándar para la constante b (**se_b = 1.65**)

r₂

El coeficiente de determinación. Compara los valores estimados y reales, y los rangos con valor de 0 a 1. Este es cercano a 1, por lo que hay una buena correlación en la muestra, es decir, no hay mucha diferencia entre el valor y estimado y el valor y real.

se_y

Es el error estándar para la estimación Y es muy pequeño debido a que **r₂** es cercano a 1

F

Se Utiliza la estadística **F** para determinar si la relación observada entre las variables dependientes e independientes se produce por azar.

Utilizando DISTR.F de Excel se puede calcular la probabilidad de que se produzca por azar un valor F superior. La distribución **F** apropiada tiene los grados de libertad **v₁** y **v₂**. Si **n_p** es el número de puntos de datos y const = VERDADERO o se omite, entonces:

$$v_1 = n_p - d_f - 1$$

$$v_2 = d_f.$$

DISTR.F (F ; v_1 ; v_2) de Excel nos devolverá la probabilidad de que se produzca al azar un valor F superior.

Para nuestro caso, $df = 11$ y $F = 12.532$.

$$v_1 = 16 - 11 - 1 = 4$$

$$v_2 = 11$$

$$\text{DISTR.F}(12.532; 4; 11) = 0,000441074$$

Una probabilidad extremadamente pequeña. Por lo que se puede decir que la ecuación de regresión es útil para predecir el valor de la relación de eficiencias, ecuación [6.8]

Con las estadísticas de regresión de la **tabla 24** se obtiene una ecuación de la siguiente forma:

$$Y = 10^b * x_1^{m_1} * x_2^{m_2} * x_3^{m_3} * \dots x_n^{m_n} \quad [6.28]$$

Donde:

Y = variable dependiente que para el caso es la relación de eficiencias $\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$

Variables independientes:

$$X_1 = \left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}} \right) \quad [6.29]$$

$$X_2 = NF \quad [6.30]$$

$$X_3 = \left(\frac{h}{H} \right) \quad [6.31]$$

$$X_4 = C'_D \quad [6.32]$$

Exponentes:

$$b = 4.82$$

$$m_1 = -0.0817$$

$$\begin{aligned}
m_2 &= -0.76 \\
m_3 &= -0.104 \\
m_4 &= -3.42
\end{aligned}$$

Remplazando en [6.28] La ecuación queda así:

$$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}} = \frac{10^{4.824}}{\left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}}\right)^{0.0817} NF^{0.767} \left(\frac{h}{H}\right)^{0.104} C'_D{}^{3.429}} \quad [6.33]$$

Donde:

$$NF = \frac{Q}{BH\sqrt{gH}} \quad [6.34]$$

Que remplazando en [6.33] queda:

$$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}} = \frac{10^{4.824}}{\left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}}\right)^{0.0817} \left(\frac{Q}{BH\sqrt{gH}}\right)^{0.767} \left(\frac{h}{H}\right)^{0.104} C'_D{}^{3.429}} \quad [6.35]$$

Despejando B de [6.35] se tiene:

$$B = \left(\frac{Q}{H\sqrt{gH}}\right) \left(10^{4.824} \left(\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}\right)^{-1} \left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}}\right)^{-0.0817} \left(\frac{h}{H}\right)^{-0.104} C'_D{}^{-3.429}\right)^{\frac{1}{-0.767}} \quad [6.36]$$

Además se tiene que:

$$A_s = B * L \quad [6.37]$$

Donde:

A_s = Área superficial del tanque.

L = Longitud del tanque

Entonces remplazando en [6.37] queda así:

$$A_s = \left(\frac{L * Q}{H * \sqrt{gH}}\right) \left(10^{4.824} \left(\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}\right)^{-1} \left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}}\right)^{-0.0817} \left(\frac{h}{H}\right)^{-0.104} C'_D{}^{-3.429}\right)^{\frac{1}{-0.767}} \quad [6.38]$$

Donde $\frac{L}{H}$ debido a que deben tener la misma unidad de medida se convierten en lo siguiente:

$\frac{L(m)}{H(m)}$ Donde $L=2m$ debido que es una constante en el tanque de pruebas y H variable; por lo que reemplazando se tiene: $\frac{2(m)}{H(m)} = \frac{2}{H_A}$

En esta expresión se cancelan unidades y H se convierte en H_A : por lo que lo se llamará así debido a que queda sin dimensión y que al reemplazarlo en ecuación [6.38] queda de la forma:

$$A_s = \left(\frac{2Q}{H_A * \sqrt{gH}} \right) \left(10^{4.824} \left(\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}} \right)^{-1} \left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}} \right)^{-0.0817} \left(\frac{h}{H} \right)^{-0.104} C'_D^{-3.429} \right)^{\frac{1}{-0.767}} \quad [6.39]$$

Donde:

A_s = Área superficial del tanque en m²

$\eta_{p.c}$ = Porcentaje de remoción partícula crítica en (%)

η_{total} = Porcentaje de remoción total (incluye la remoción de partículas con diámetros mayores e iguales a los de la partícula crítica) en (%)

$C_{p.c}$ = Concentración de la partícula crítica en (%)

C_{total} = Concentración total (incluye diámetros de partículas iguales y superiores a los de la partícula crítica) en (%)

h = Altura de la compuerta a partir de la base del tanque en (m)

H = Altura del nivel del agua en (m)

H_A = Valor adimensional de la altura del nivel del agua

C'_D = coeficiente de arrastre de partículas afectado por la mezcla.

De modo que el área A_s requerida para tratar dicho caudal con cierta concentración, diámetro de partícula, altura de compuerta y porcentaje de remoción se expresa en la ecuación[6.39]. Que en términos generales sirve para pre dimensionar el tanque.

Tabla 26 resultados al calcular la relación de eficiencias y B con las ecuaciones [6.35] y [6.36] y sus porcentajes de error.

CALCULOS			
1	2	3	4
$\frac{\eta_{p.c.} \text{ teorica}}{\eta_{total}}$	Error con eficiencia [%]	B teorico	Error con B [%]
0,898	5,368	1,269	7,6
0,860	4,341	1,118	5,3
0,810	1,141	1,164	1,4
0,766	2,864	1,139	3,5
0,717	8,501	1,062	10,0
0,671	1,841	1,153	2,3
0,810	1,015	1,166	1,2
0,829	4,411	1,253	6,2
0,854	0,997	1,197	1,5
0,891	2,784	1,226	3,9
0,958	2,584	1,144	3,1
0,848	4,065	1,247	5,7
0,862	1,250	1,201	1,8
0,874	7,353	1,077	8,7
0,792	0,240	1,185	0,4
0,688	8,922	1,334	13,1
ERROR PROMEDIO	2,216		4,7

DESCRIPCIÓN TABLA 26

Columna 1: Eficiencia calculada con la fórmula obtenida con la regresión lineal de variable múltiple: se obtiene a partir de los parámetros que aparecen en la ecuación 39 y con los datos de la **tabla 22**

Columna 2: Error con la eficiencia: se saca un porcentaje de error entre η teórica y la η de cada ensayo. Con la fórmula.

$$\frac{(\eta_{ensayo} - \eta_{teorica})}{\eta_{ensayo}} * 100 \quad [6.40]$$

Columna 3: B calculada con la fórmula obtenida con la regresión lineal de variable múltiple: se obtiene a partir de los parámetros que aparecen en la ecuación [6.36] y con los datos de la **tabla 22**

Columna 4: Error con B: se saca un porcentaje de error entre B teórica y la B de cada ensayo. Con la fórmula.

$$\frac{(B_{ensayo} - B_{teorica})}{B_{ensayo}} * 100 \quad [6.41]$$

En el **ANEXO M** se muestra una tabla en la que se obtiene el número de Hazen para la condición de compuerta y diferentes concentraciones.

5.5 ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN SISTEMA CONVENCIONAL (DEFLECTOR DE ORIFICIOS)

Para analizar los datos se aplica regresión lineal múltiple a los mismos con el fin de encontrar una ecuación de la $\eta_{p.c} f(Nf, C'_D, C)$. Ya que cada variable independiente presenta una relación lineal con la variable dependiente.

Tabla 27 datos a analizar con regresión múltiple

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No	Q	B	H	L	$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$	$\frac{C_{p.c}}{C_{total}}$	NF	C' _D
	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0,0020	1,18	1,10	2,00	0,962	0,0201	0,0005	161,00
2	0,0020	1,18	1,10	2,00	0,852	0,0188	0,0005	163,32
3	0,0020	1,18	1,10	2,00	0,880	0,0187	0,0005	166,20
4	0,0020	1,18	1,10	2,00	0,787	0,0203	0,0005	168,61
5	0,0020	1,18	1,10	2,00	0,768	0,0203	0,0005	171,88
6	0,0020	1,18	1,10	2,00	0,753	0,0198	0,0005	175,32
7	0,0010	1,18	1,10	2,00	0,918	0,0204	0,0002	166,20
8	0,0015	1,18	1,10	2,00	0,904	0,0202	0,0004	166,20
9	0,0017	1,18	1,10	2,00	0,885	0,0202	0,0004	166,20
10	0,0020	1,18	1,10	2,00	0,824	0,0202	0,0005	166,20
11	0,0025	1,18	1,10	2,00	0,730	0,0201	0,0006	166,20

DESCRIPCIÓN TABLA 27

Análisis de datos: en este espacio se coloca la descripción de la tabla.

Columna 1: Número de datos: necesario para contabilizar los datos.

Columna 2: Caudal líquido: caudal para el ensayo en l.p.s.

Columna 3: Ancho del sedimentador: en este caso es constante. Ósea: 1.18m

Columna 4: Altura del nivel del agua: en este caso 1.1m

Columna 5: Longitud del sedimentador: está comprendida desde el deflector al vertedero.

Columna 6: Relación de eficiencias: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría. En % y se la divide entre la eficiencia teniendo en cuenta la concentración total, ecuación [6.8]

$$\text{Ej: } \frac{94.8\%}{99.89\%} = 0.962$$

Columna 7: Relación de concentraciones: resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total, ecuación [6.5]

$$\text{Ej: } \frac{0.008\%}{0.04\%} = 0.0201$$

Columna 8: Número de Froude: parámetro que relaciona velocidad del flujo, gravedad y altura de nivel del flujo que para canales abiertos, ecuación 6.14

$$\text{Ej: } NF = \frac{0.002m^3 / s}{1.29m^2 \sqrt{9.81m / s^2} * 1.10m} = 0.0005$$

Columna 9: Coeficiente de arrastre afectado por la mezcla: Este parámetro se calcula con base a la tabla 21

Tabla 28 logaritmos de los datos tabla 26

LOGARITMOS DE DATOS				
1	2	3	4	5
No	$\frac{C_{p.c}}{C_{total}}$	NF	C'_D	$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$
1	-1,697	-3,329	2,207	-0,017
2	-1,726	-3,329	2,213	-0,070
3	-1,729	-3,329	2,221	-0,056
4	-1,693	-3,329	2,227	-0,104
5	-1,694	-3,329	2,235	-0,115
6	-1,703	-3,329	2,244	-0,123
7	-1,691	-3,630	2,221	-0,037
8	-1,694	-3,454	2,221	-0,044
9	-1,694	-3,399	2,221	-0,053
10	-1,695	-3,329	2,221	-0,084
11	-1,696	-3,232	2,221	-0,136

DESCRIPCIÓN TABLA 28

Logaritmo de datos tabla 26: Resultado de la extracción del Logaritmo a cada uno de los datos.

Columna 1: Número de datos: necesario para contabilizar los datos.

Columna 2: Log relación de concentraciones

Columna 3: Log de Número de fraude

Columna 4: Log de C'_D

Columna 5: Log de relación de eficiencias.

Con las datos de la **tabla 27** y haciendo regresión múltiple variable en Excel se obtiene la **tabla 28**

Tabla 29 regresión múltiple de los datos de la Tabla 27

-	-	-	
2,44380558	0,21584506	0,40348632	3,94295598
0,72697477	0,07189522	0,55677579	2,11930787
0,77364308	0,02225584	#N/A	#N/A
7,97487056	7	#N/A	#N/A
0,01185039	0,00346726	#N/A	#N/A

La ilustración del **ANEXO O**. Indica el orden de las estadísticas de regresión adicionales de la **Tabla 29**

Si miramos las estadísticas de regresión adicionales de la **tabla 28** en el orden que muestra el **ANEXO O** se tiene que:

se_1, se_2, se_3, se_4 .

Son los valores de error estándar para los coeficientes m_1, m_2, \dots, m_4 . Lo cual son muy bajos.

Se_b

El valor de error estándar para la constante b (**$se_b = 2.11$**)

r_2

El coeficiente de determinación. Compara los valores estimados y reales, y los rangos con valor de 0 a 1. Este es cercano a 1, por lo que hay una buena correlación en la muestra, es decir, no hay mucha diferencia entre el valor y estimado y el valor y real.

se_y

El error estándar para la estimación Y es muy pequeño debido a que **r_2** es cercano a 1

F

Se Utiliza la estadística **F** para determinar si la relación observada entre las variables dependientes e independientes se produce por azar.

Utilizando DISTR.F de Excel se puede calcular la probabilidad de que se produzca por azar un valor **F** superior. La distribución **F** apropiada tiene los grados de libertad v_1 y v_2 . Si n_p es el número de puntos de datos y const = VERDADERO o se omite, entonces:

$$v_1 = n - d_f - 1$$

$$v_2 = d_f$$

DISTR.F (F ; v_1 ; v_2) de Excel devolverá la probabilidad de que se produzca al azar un valor F superior.

Para nuestro caso, $df = 7$ y $F = 7.974$

$$v_1 = 11 - 7 - 1 = 3$$

$$v_2 = 7$$

$$\text{DISTR.F}(7.974; 3; 7) = 0,011661319$$

Una probabilidad extremadamente pequeña. Por lo que se puede decir que la ecuación de regresión es útil para predecir el valor de la relación de eficiencias.

Con las estadísticas de regresión de la **tabla 28** se puede obtener una ecuación de la siguiente forma:

$$Y = 10^b * x_1^{m_1} * x_2^{m_2} * x_3^{m_3} * \dots x_n^{m_n} \quad [6.42]$$

Donde:

Y = variable dependiente que para el caso es la relación de eficiencias $\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$

Variables independientes:

$$X_1 = \left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}} \right) \quad [6.43]$$

$$X_2 = NF \quad [6.44]$$

$$X_3 = C'_D \quad [6.45]$$

Exponentes:

$$\begin{aligned} b &= 3.94 \\ m_1 &= 0.403 \\ m_2 &= 0.215 \\ m_3 &= 2.443 \end{aligned}$$

Remplazando en [6.42] La ecuación queda así:

$$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}} = \frac{10^{3.94}}{\left(\frac{C_{P.C}}{C_{total}}\right)^{0.403} NF^{0.215} C'_D{}^{2.443}} \quad [6.46]$$

Donde usando la ecuación [6.34] de NF y remplazando en [6.46] se tiene:

$$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}} = \frac{10^{3.94}}{\left(\frac{C_{P.C}}{C_{total}}\right)^{0.403} \left(\frac{Q_d}{BH\sqrt{gH}}\right)^{0.215} C'_D{}^{2.443}} \quad [6.47]$$

Despejando B de [6.47] se tiene:

$$B = \left(\frac{Q_d}{H\sqrt{gH}}\right) \left(10^{3.94} \left(\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}\right)^{-1} \left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}}\right)^{-0.403} C'_D{}^{-2.443}\right)^{\frac{1}{-0.215}} \quad [6.48]$$

Además usando ecuación [6.37] y remplazando B se tiene que:

$$A_S = \left(\frac{L^* Q_d}{H\sqrt{gH}}\right) \left(10^{3.94} \left(\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}\right)^{-1} \left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}}\right)^{-0.403} C'_D{}^{-2.443}\right)^{\frac{1}{-0.215}} \quad [6.49]$$

Donde $\frac{L}{H}$ debido a que deben tener la misma unidad de medida se convierten en lo siguiente:

$\frac{L(m)}{H(m)}$ Donde $L=2m$ ya que es una constante en el tanque de pruebas y H

variable; por lo que remplazando se tiene: $\frac{2(m)}{H(m)} = \frac{2}{H_A}$

Se cancelan unidades y H se convierte en H_A : por lo que lo que se lo llama así debido a que queda sin dimensión y que al remplazarlo en ecuación [6.49] queda así:

$$A_s = \left(\frac{2Q_d}{H_A \sqrt{gH}} \right) \left(10^{3.94} \left(\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}} \right)^{-1} \left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}} \right)^{-0.403} C'_D^{-2.443} \right)^{\frac{1}{-0.215}} \quad [6.50]$$

Donde:

A_s = Área superficial del tanque en m^2

$\eta_{p.c}$ = Porcentaje de remoción partícula crítica en (%)

η_{total} = Porcentaje de remoción total (incluye la remoción de partículas con diámetros mayores e iguales a los de la partícula crítica) en (%)

$C_{p.c}$ = Concentración de la partícula crítica en (%)

C_{total} = Concentración total (incluye diámetros de partículas iguales y superiores a los de la partícula crítica) en (%)

H = Altura del nivel del agua en (m)

H_A = Valor adimensional de la altura del nivel del agua

C'_D = coeficiente de arrastre de partículas afectado por la mezcla.

De modo que el área A_s requerida para tratar dicho caudal con cierta concentración, diámetro de partícula, deflector con orificios de $\frac{1}{2}$ " distribuidos tal como se indica en la **figura 12** y porcentaje de remoción. Lo expresa la ecuación [6.50].

Tabla 30 resultados al calcularla relación de eficiencias y B con las ecuaciones [6.47] y [6.48] y sus porcentajes de error.

CALCULOS			
1	2	3	4
$\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}}$ teorica	Error con eficiencia [%]	B teorico	Error con B [%]
0,898	6,702	1,715	45,4
0,891	4,581	1,009	14,5
0,855	2,784	1,417	20,1
0,799	1,433	1,162	1,5
0,763	0,649	1,280	8,5
0,733	2,605	1,404	19,0
0,959	4,438	1,018	13,8
0,881	2,511	1,400	18,6
0,858	3,089	1,438	21,9
0,829	0,568	1,210	2,5
0,791	8,245	0,858	27,2
ERROR PROMEDIO	3,419		17,5

DESCRIPCIÓN TABLA 30

Columna 1: Eficiencia calculada con la fórmula obtenida con la regresión lineal de variable múltiple: se obtiene a partir de los parámetros que aparecen en la ecuaciones [6.41] y los datos de la **tabla 26**

Columna 8: Error con la eficiencia: se saca un porcentaje de error entre relación de eficiencias teórica y la relación de eficiencias de cada ensayo. Con la ecuación [6.40].

Columna 9: B calculada con la fórmula obtenida con la regresión lineal de variable múltiple: se obtiene a partir de los parámetros que aparecen en la ecuaciones [6.48] y los datos de la **tabla 26**

Columna 10: Error con B: se saca un porcentaje de error entre **B** teórica y la **B** de cada ensayo. Con la ecuación [6.41].

En el **ANEXO N** se muestra una tabla en la que se obtiene el número de Hazen para la condición de deflector de orificios y diferentes concentraciones.

5.6. PRUEBAS EN SISTEMA DESARENADOR DE PLACAS (ENTRADA DISTRIBUIDA).

5.6.1 Pruebas de variación de concentración. Para evaluar el efecto de la concentración sobre la eficiencia en desarenadores de placas inclinadas, se llevan a cabo las pruebas con variación de concentración usando una entrada al sistema en forma distribuida. Los parámetros necesarios se indican en la **tabla 30** y los datos obtenidos para esas concentraciones se ven en la **tabla 31**

Tabla 31 parámetros necesarios para el análisis

VARIACION DE LA CONCENTRACION C					
1	2	3	4	5	6
ENTRADA	Q_L (l/s)	Q_S (gr/min)	PESO arena p.c (gr) $Q_S * T_{dosif} * 0,02$	C_{total} (%)	$T_{dosificacion}$ (min)
Distribuida sumerg	3,5	1210,0	24,20	0,2%	20,00
Distribuida sumerg	3,5	2000,0	40,00	0,4%	20,00
Distribuida sumerg	3,5	2970,0	59,40	0,5%	20,00
Distribuida sumerg	3,5	4100,0	82,00	0,7%	20,00
Distribuida sumerg	3,5	5250,0	105,00	0,9%	20,00
Distribuida sumerg	3,5	6300,0	126,00	1,1%	20,00
Distribuida sumerg	3,5	6896,5	137,93	1,2%	20,00
Distribuida sumerg	3,5	8567,7	171,35	1,5%	20,00

DESCRIPCIÓN TABLA 31

Variación de concentración: en este espacio se coloca la descripción del parámetro a variar.

Columna 1: Indica el tipo de entrada

Columna 2: Caudal líquido: caudal utilizado para dicha prueba en l.p.s.

Ej: 3.5lps

Columna 3: Caudal sólido: es la cantidad de material sólido (arena) utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min)

Ej.: 1210 gr/min

Columna 4: Caudal sólido de la partícula crítica: es la cantidad de material sólido (arena) de acuerdo a la granulometría es un porcentaje de Q_s utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min)

Ej.: 24 gr/min

Columna 5: Concentración total: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la ecuación [6.1] y expresado en %.

Ej:
$$C_{total} = \frac{0.0000076 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.0000076 \text{ m}^3 / \text{s} + 0.0035 \text{ m}^3 / \text{s}} * 100 = 0.2\%$$

Columna 6: Tiempo de dosificación: tiempo en (min.) que se adiciona el material sólido.

Ej: 20min.

Tabla 32 datos arrojados en las pruebas (ver figura 69)

RESULTADOS OBTENIDOS						
1	2	3	4	5	6	7
C_{total} (%)	PESO arena (gr) $Q_s * T_{dosif}$	PESO arena p.c (gr) $Q_s * T_{dosif} * 0,02$	$C_{p.c}$ (%)	$\frac{C_{total}}{C_{p.c}}$	PESO no removido (gr)	η_{exper}
0,2%	24200	484,00	0,004%	49,894	14,65	96,973
0,4%	40000	800,00	0,007%	49,825	31,00	96,125
0,5%	59400	1188,00	0,011%	49,740	47,85	95,972
0,7%	82000	1640,00	0,015%	49,642	79,65	95,143
0,9%	105000	2100,00	0,019%	49,542	127,80	93,914
1,1%	126000	2520,00	0,023%	49,451	164,54	93,471
1,2%	137930	2758,60	0,025%	49,400	185,25	93,285
1,5%	171353	3427,06	0,031%	49,257	284,62	91,695

DESCRIPCIÓN TABLA 32

Resultados obtenidos: en este espacio se coloca la descripción de la tabla.

Columna 1: Concentración total: es la cantidad de sólidos en el líquido. Y se obtiene por la fórmula [6.1] y expresado en %.

$$Ej: C_{total} = \frac{0.0000076 \text{ m}^3 / s}{0.0000076 \text{ m}^3 / s + 0.0035 \text{ m}^3 / s} * 100 = 0.2\%$$

Columna 2: Peso de arena dosificada en gramos: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación ecuación [6.2].

EJ: 24200gr

Columna 3: Peso de arena dosificada en gramos de la partícula más crítica: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación y por su contenido porcentual en el material gradado, ecuación [6.3]

EJ: 484gr

Columna 4: Concentración partícula crítica: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la fórmula [6.4] y expresado en %.

$$Ej: C_{p.c} = 0.02 * 0.2\% = 0.004\%$$

Columna 5: Relación de concentraciones: resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total con ecuación:

$$\frac{C_{total}}{C_{P.C}} \quad [6.51]$$

$C_{p.c}$ = concentración de la partícula crítica

C_{total} = la concentración total

Columna 6: Peso no removido: peso de arena no removida. O la que se escapa del sedimentador. En (gr).

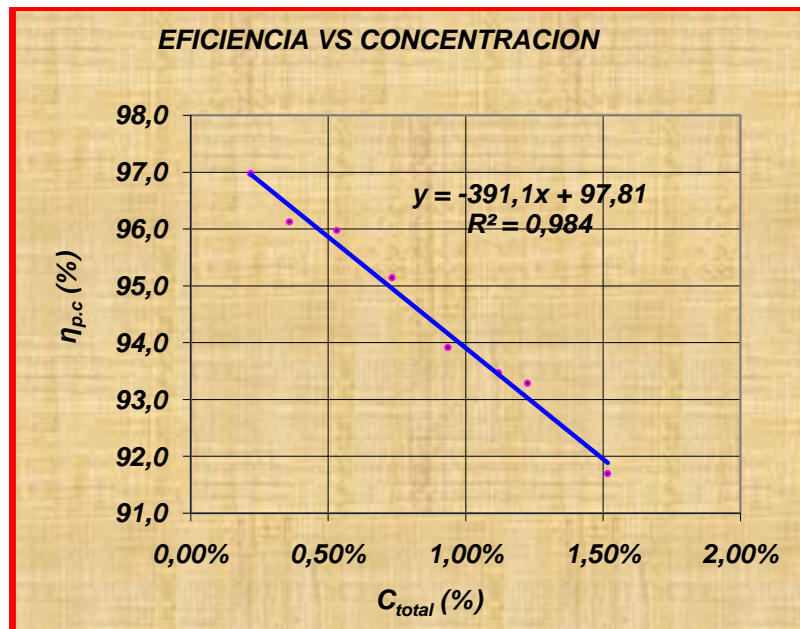
Columna 7: Eficiencia de remoción experimental: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría.

$$\eta_{exp}(\%) = \left(1 - \frac{\text{Cantidad.no.removida.p.c. (.gr)}}{\text{Cantidad.dosificada.p.c. (gr)}} \right) * 100 \quad [6.52]$$

Ej:

$$\eta_{exp}(\%) = \left(1 - \frac{14.65gr}{484gr} \right) * 100 = 96.973\%$$

Figura 67 eficiencia de remoción de la partícula crítica Vs concentración en desarenador de placas con entrada distribuida.



Por figura 66 se puede deducir que a > concentración < eficiencia

Por consiguiente: eficiencia de remoción de la partícula crítica en función de la concentración total

$$\eta_{p.c} f(C_{total})$$

En la ecuación de la gráfica se reemplaza así:

$$Y = -391.17X + 97,815 \quad [6.53]$$

Donde (Y) corresponde a la eficiencia $\eta_{p.c}$

Donde (X) corresponde a la concentración C

La expresión $\eta_{p.c} f(C_{total})$ queda así:

$$\eta_{p.c} = -391.17C_{total} + 97.815 \quad [6.54]$$

Los cálculos del coeficiente de arrastre obstaculizado C'_D se indican en la **tabla 32**, la cual se describe a continuación:

5.7 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE OBSTACULIZADO C'_D

Tabla 33 cálculo de las propiedades de los sedimentos con variación de la concentración

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	d _{p.c}	C	T°	γ_w	ρ_w	ρ_s	ρ_m	S _s	Δ	v _w	v _m	d*	d**	Rs	Rm	n	Vs	Vm	C _D	C' _D	
	(mm)	(%)	°C	[kp/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	Sólidos	(-)	del agua	por C	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(mps)	(mps)	(-)	(-)
1	0.075	0.2	16.00	998.72	998.72	2650.00	999.96	2.6500	1.6534	1.1230E-06	1.126E-06	1.8	1.8	0.2	0.2	4.962	0.0032	0.00317	157.630	159.303	
2	0.075	0.4	16.00	998.72	998.72	2650.00	1001.21	2.6500	1.6534	1.1230E-06	1.130E-06	1.8	1.7	0.2	0.2	4.959	0.0032	0.00314	157.630	160.997	
3	0.075	0.5	16.00	998.72	998.72	2650.00	1001.84	2.6500	1.6534	1.1230E-06	1.131E-06	1.8	1.7	0.2	0.2	4.958	0.0032	0.00312	157.630	161.852	
4	0.075	0.7	16.00	998.72	998.72	2650.00	1003.09	2.6500	1.6534	1.1230E-06	1.135E-06	1.8	1.7	0.2	0.2	4.955	0.0032	0.00309	157.630	163.577	
5	0.075	0.9	16.00	998.72	998.72	2650.00	1004.35	2.6500	1.6534	1.1230E-06	1.138E-06	1.8	1.7	0.2	0.2	4.952	0.0032	0.00306	157.630	165.323	
6	0.075	1.1	16.00	998.72	998.72	2650.00	1005.61	2.6500	1.6534	1.1230E-06	1.142E-06	1.8	1.7	0.2	0.2	4.949	0.0032	0.00303	157.630	167.091	
7	0.075	1.2	16.00	998.72	998.72	2650.00	1006.24	2.6500	1.6534	1.1230E-06	1.144E-06	1.8	1.7	0.2	0.2	4.948	0.0032	0.00302	157.630	167.983	
8	0.075	1.4	16.00	998.72	998.72	2650.00	1007.51	2.6500	1.6534	1.1230E-06	1.147E-06	1.8	1.7	0.2	0.2	4.945	0.0032	0.00299	157.630	169.783	

DESCRIPCIÓN TABLA 33

Columna1: Diámetro partícula crítica: es la partícula de arena más difícil a remover para el caso es 0.075mm

Columna 2: Concentración total: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la ecuación [6.1] y expresado en %.

Ej.
$$C_{total} = \frac{0.0000076 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.0000176 \text{ m}^3 / \text{s} + 0.002 \text{ m}^3 / \text{s}} * 100 = 0.40\%$$

Columna 3: Temperatura: temperatura del agua al hacer el ensayo

Columna 4: Peso específico del agua: calculada con la ecuación [6.21]

Ej: $\gamma_w = 10^{-5}(16)^3 - 0.0055(16)^2 + 0.0002(16) + 1000.08 = 998.72 \frac{Kg}{m^3}$

Columna 5: Densidad del agua: calculada con la ecuación [6.22]

Ej: $\rho_w = 1000 - \frac{((16)-4)^2}{180} = 998.7 \frac{Kg}{m^3}$

Columna 6: Peso Específico del la arena: calculada con la ecuación [5.1]

Ej: $\rho_s = 2.65 gr / cm^3$

Columna 7: Densidad de la mezcla: calculada con la ecuación [6.23]

Ej: $\rho_m = \frac{998.7}{1 - (0.004)\left(\frac{2650 - 998.7}{2650}\right)} = 1001.21 \frac{kg}{m^3}$

Columna 8: Ss sólidos: calculada con la ecuación [6.24]

Ej: $\rho_w' = \frac{2650}{1000} = 2.65$

Columna 9: Coeficiente de densidad de la mezcla: calculada con la ecuación [6.25]

Ej: $\Delta = \left(\frac{2650 - 998.7}{998.7}\right) = 1.6532$

Columna 10: Viscosidad del agua: calculada con la ecuación [6.26]

Ej: $\nu_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 * 16 + 0.000221 * 16^2} = 1.12 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

Columna 11: Viscosidad de la mezcla: calculada con la ecuación [2.48]

Ej: $\nu_m = \frac{2(1.112 * 10^{-6})}{2 - 3(0.004)} = 1.13 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

Columna 12: Diámetro adimensional de la partícula: calculada con la ecuación [2.40]

$$\text{Ej: } d_* = \left(\frac{1.653 * 9.81}{(1.12 * 10^{-6})^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} 0.000075 = 1.8$$

Columna 13: Diámetro adimensional de la partícula con concentración: calculada con la ecuación [2.46] y el coeficiente de densidad de partículas (Δ') dentro de una mezcla, se calcula a con la ecuación [2.47]

$$\text{Ej: } \Delta' = \left[\frac{(1 - 0.004)(2650 - 1)}{1 + 0.004(2650 - 1)} \right] = 0.99$$

$$\text{Ej: } d'_* = \left(\frac{0.99 * 9.81}{1.13 * 10^{-6} m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} 1.8 = 1.7$$

Columna 14: Reynolds de la partícula individual: calculada con la ecuación [2.40]

$$\text{Ej: } R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2(1.8)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 0.22$$

Columna 15: Reynolds de la partícula afectado por la mezcla: calculada con la ecuación [2.45]

$$\text{Ej: } R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(1.7_*)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 0.194$$

Columna 16: Exponente que cuantifica el efecto de la concentración: calculada con la ecuación [2.44]

$$\text{Ej: } n_c = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2 - 2(0.004))}{(2 - 3(0.004))} \right] + \text{Ln} \left[\frac{0.194}{0.22} \right]}{\text{Ln}[1 - (0.004)]} = 4.959$$

Columna 17: Velocidad de asentamiento de la partícula individual: calculada con la ecuación [2.38]

$$\text{Ej: } V_s = \frac{(0.22)(1.12 * 10^{-6})}{0.000075} = 0.003 \frac{m}{s}$$

Columna 18: Velocidad de asentamiento de la partícula afectado por la mezcla, (también denominada velocidad de asentamiento obstaculizada): calculada con la ecuación [2.43]

$$\text{Ej: } V_m = 0.003(1 - (0.004))^{4.959} = 0.003 \frac{m}{s}$$

Columna 19: Coeficiente de arrastre de la partícula individual: calculado con la ecuación [2.39]

$$\text{Ej: } C_D = \left[\left(\frac{32}{0.22} + 1 \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 157.63$$

Columna 20: Coeficiente de arrastre de la partícula afectado por la mezcla: calculado con la ecuación [2.49]

$$\text{Ej: } C'_D = \left[\left(\frac{32}{0.194} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 160.99$$

5.8 ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN SISTEMA DE PLACAS (ENTRADA DISTRIBUIDA)

Para analizar los datos se aplica regresión lineal múltiple a los mismos con el fin de encontrar una ecuación de la $\eta_{p.c} f(C'_D, C)$. Ya que cada variable independiente presenta una relación lineal con la variable dependiente.

En esta parte se ordenan los datos correspondientes a cada parámetro en la forma como se indica en la **tabla 33**.

Tabla 34 datos a analizar con regresión múltiple

1	2	3	4
No	$\frac{C_{total}}{C_{p.c}}$	C'_D	η_{exper}
	[-]	[-]	[-]
1	49,8937	159	96,973
2	49,8245	161	96,125
3	49,7399	162	95,972
4	49,6416	164	95,143
5	49,5421	165	93,914
6	49,4515	167	93,471
7	49,4002	168	93,285
8	49,2571	170	91,695

DESCRIPCIÓN TABLA 34

Columna 1: Número de datos: necesario para contabilizar los datos.

Columna 2: Relación de concentraciones: resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total, ecuación [6.51]

Ej: 49.89

Columna 3: Coeficiente de arrastre afectado por la mezcla: este parámetro se calcula con base a la **tabla 32** columna 20.

Columna 4: Eficiencia experimental: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría. En % ecuación [6.52]

$$\text{Ej: } \eta_{exp}(\%) = \left(1 - \frac{14.65gr}{484gr} \right) * 100 = 96.973\%$$

Tabla 35 logaritmos de los datos variación de concentración tabla 33

LOGARITMOS			
1	2	3	4
No	$\frac{C_{total}}{C_{p.c}}$	C'_D	η_{exper}
1	1,698	2,202	1,987
2	1,697	2,207	1,983
3	1,697	2,209	1,982
4	1,696	2,214	1,978
5	1,695	2,218	1,973
6	1,694	2,223	1,971
7	1,694	2,225	1,970
8	1,692	2,230	1,962

DESCRIPCIÓN TABLA 35

Logaritmo de datos: resultado de la extracción del Logaritmo a cada uno de los datos.

Columna 1: Número de datos: necesario para contabilizar los datos.

Columna 2: Log de la relación de concentraciones:

Ej: $\text{Log } 49.89 = 1.698$

Columna 3: Log del coeficiente de arrastre afectado por la mezcla: este parámetro se calcula con base a la **tabla 32**

Columna 4: Log de la eficiencia experimental:

Ej: $\text{Log } 96.97 = 1.987$

Haciendo regresión múltiple variable en Excel de la **tabla 34** obtiene los siguientes resultados tal como se muestra en la **tabla 35**.

Tabla 36 regresión múltiple de los datos de la tabla 34 en Excel

0,002	4,202	-5,152
0,652	3,276	6,997
0,984	0,001	#N/A
155,780	5,000	#N/A
0,000	0,000	#N/A

La ilustración del **ANEXO O**. Indica el orden de las estadísticas de regresión adicionales de la **Tabla 36**.

Si se mira las estadísticas de regresión adicionales de la **tabla 35** y siguiendo el orden que muestra el **ANEXO P** se tiene que:

se₁, se₂, se₃, se₄.

Son los valores de error estándar para los coeficientes m_1, m_2, \dots, m_4 . Lo cual son muy bajos.

Se_b

El valor de error estándar para la constante b (**se_b** = 6.99)

r₂

El coeficiente de determinación. Compara los valores estimados y reales, y los rangos con valor de 0 a 1. Pues es 0.98 este es cercano a 1, por lo que hay una buena correlación en la muestra, es decir, no hay mucha diferencia entre el valor y estimado y el valor y real.

se_y

Es el error estándar para la estimación Y es muy pequeño debido a que r_2 es cercano a 1

F

Se Utiliza la estadística **F** para determinar si la relación observada entre las variables dependientes e independientes se produce por azar.

Utilizando DISTR.F de Excel se puede calcular la probabilidad de que se produzca por azar un valor **F** superior. La distribución **F** apropiada tiene los grados de libertad v_1 y v_2 . Si n es el número de puntos de datos y const = VERDADERO o se omite, entonces:

$$v_1 = n - d_f - 1$$

$$v_2 = d_f$$

DISTR.F (**F**; v_1 ; v_2) de Excel nos devolverá la probabilidad de que se produzca al azar un valor F superior.

Para nuestro caso, $df = 5$ y $F = 155.78$

$$v_1 = 8 - 5 - 1 = 2$$

$$v_2 = 5$$

$$\text{DISTR.F}(155.78; 2; 5) = 3,13534\text{E-}05$$

Una probabilidad extremadamente pequeña. Por lo que se puede decir que la ecuación de regresión es útil para predecir el valor de la relación de eficiencias

Con los datos de la **tabla 35**. Se obtiene una ecuación de la forma:

$$Y = 10^b * x_1^{m_1} * x_2^{m_2} * x_3^{m_3} * \dots x_n^{m_n} \quad [6.55]$$

Donde:

Y = variable dependiente que para el caso es la eficiencia experimental η_{exp}

Variables independientes:

$$X_1 = \left(\frac{C_{total}}{C_{P.C}} \right) \quad [6.56]$$

$$X_2 = C'_D \quad [6.57]$$

Exponentes:

$$b = -5.152$$

$$m_1 = 4.202$$

$$m_2 = 0.002$$

Remplazando en [6.55] se obtiene:

$$\eta_{exp} = \frac{\left(\frac{C_{total}}{C_{p.c}} \right)^{4.202} C'_D{}^{0.002}}{10^{5.152}} \quad [6.58]$$

En la ecuación [6.58] se tiene la eficiencia experimental en función de la concentración y del diámetro de partícula incluido en C'_D . Para una entrada distribuida.

5.9 PRUEBAS EN SISTEMA DESARENADOR DE PLACAS (ENTRADA NO DISTRIBUIDA).

5.9.1 Pruebas de variación de concentración. Para evaluar el efecto de la concentración sobre la eficiencia en desarenadores de placas inclinadas, se llevan a cabo las pruebas con variación de concentración usando una entrada al sistema en forma no uniforme utilizando una flauta con cuatro orificios de 3" cada uno; para garantizar así una velocidad de salida menor a 0.2m/s en los orificios. Los parámetros necesarios se indican en la **tabla 36** y los datos obtenidos para esas concentraciones se ven en la **tabla 37**.

Tabla 37 corresponde a los parámetros necesarios para el análisis

VARIACION DE LA CONCENTRACION C					
ENTRADA	Q_L l(l/s)	Q_S (gr/min)	PESO arena p.c (gr) $Q_S \cdot T_{dosif} \cdot 0,02$	C_{total} (%)	$T_{dosificacion}$ (min)
Tipo flauta	3,5	1210,0	24,20	0,2%	20,00
Tipo flauta	3,5	2000,0	40,00	0,4%	20,00
Tipo flauta	3,5	2970,0	59,40	0,5%	20,00
Tipo flauta	3,5	4100,0	82,00	0,7%	20,00
Tipo flauta	3,5	5250,0	105,00	0,9%	20,00
Tipo flauta	3,5	6300,0	126,00	1,1%	20,00
Tipo flauta	3,5	6896,5	137,93	1,2%	20,00
Tipo flauta	3,5	8567,7	171,35	1,5%	20,00

DESCRIPCIÓN TABLA 37

Variación de concentración: en este espacio se coloca la descripción del parámetro.

Columna 1: Indica el tipo de entrada

Columna 2: Caudal líquido: caudal utilizado para dicha prueba en l.p.s.

Ej: 3.5lps

Columna 3: Caudal sólido: es la cantidad de material sólido (arena) utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min)

Ej.: 1210 gr/min

Columna 4: Caudal sólido de la partícula crítica: es la cantidad de material sólido (arena) de acuerdo a la granulometría es un porcentaje de Q_s utilizado para llegar a la concentración deseada. En (gr/min)

Ej.: 24 gr/min

Columna 5: Concentración total: es la cantidad de material en el líquido en contenido porcentual. Obtenido por la fórmula [6.1] y expresado en %.

$$Ej: C_{total} = \frac{0.0000076 \text{ m}^3 / s}{0.0000076 \text{ m}^3 / s + 0.0035 \text{ m}^3 / s} * 100 = 0.2\%$$

Columna 6: Tiempo de dosificación: tiempo en (min.) que se adiciona el material sólido.

Ej: 20min

Tabla 38 datos arrojados en las pruebas (ver figura 70)

RESULTADOS OBTENIDOS						
1	2	3	4	5	6	7
C_{total} (%)	PESO arena (gr) $Q_s * T_{dosif}$	PESO arena p.c (gr) $Q_s * T_{dosif} * 0,02$	$C_{p.c}$ (%)	$\frac{C_{total}}{C_{p.c}}$	PESO no removido (gr)	η_{exper}
0,2%	24200	484,00	0,004%	49,89369	18,65	96,147
0,4%	40000	800,00	0,007%	49,82453	34,84	95,645
0,5%	59400	1188,00	0,011%	49,73988	46,85	96,056
0,7%	82000	1640,00	0,015%	49,64163	110,54	93,260
0,9%	105000	2100,00	0,019%	49,54206	185,32	91,175
1,1%	126000	2520,00	0,023%	49,45149	214,52	91,487
1,2%	137930	2758,60	0,025%	49,40019	261,54	90,519
1,5%	171353	3427,06	0,031%	49,25705	390,54	88,604

DESCRIPCIÓN TABLA 38

Resultados obtenidos: en este espacio se coloca la descripción de la tabla.

Columna 1: Concentración total: es la cantidad de sólidos en el líquido. Obtenido por la fórmula [6.1] y expresado en %.

Ej:

$$C_{total} = \frac{0.0000076 \text{ m}^3 / s}{0.0000076 \text{ m}^3 / s + 0.0035 \text{ m}^3 / s} * 100 = 0.2\%$$

Columna 2: Peso de arena dosificada en gramos: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación, ecuación [6.2]

EJ: 24200gr

Columna 3: Peso de arena dosificada en gramos de la partícula más crítica: se obtiene multiplicando caudal de sólidos por el tiempo de dosificación y por su contenido porcentual en el material gradado, ecuación [6.3]

Ej: 484gr

Columna 4: Concentración partícula crítica: es la cantidad de material en el líquido. Obtenido por la ecuación [6.4] y expresado en %.

Ej: $C_{p.c} = 0.02 * 0.4\% = 0.007\%$

Columna 5: Relación de concentraciones: resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total, ecuación [6.51]

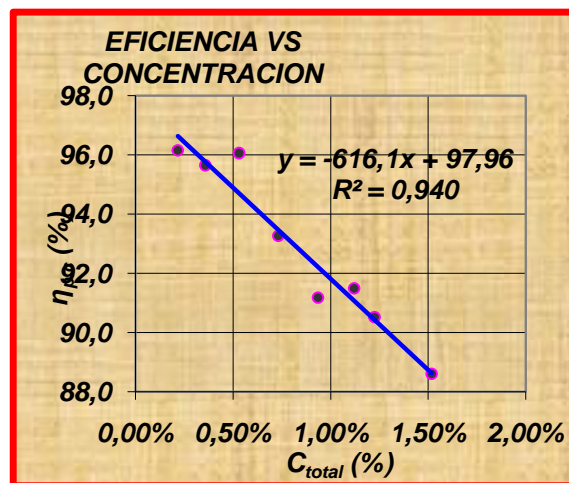
Ej: $\frac{0.4}{0.007} = 49.82$

Columna 6: Peso no removido: peso de arena no removida. O la que se escapa del sedimentador. En (gr).

Columna 7: Eficiencia de remoción experimental: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría ecuación [6.52]

$$\eta_{exp}(\%) = \left(1 - \frac{18.65gr}{484gr} \right) * 100 = 96.147\%$$

Figura 68 eficiencia de remoción de la partícula crítica Vs concentración total



Por figura 67 se puede deducir que a > concentración < eficiencia

Por consiguiente: la eficiencia de remoción de la partícula crítica en función de la concentración total

$$\eta_{p.c} f(C_{total})$$

En la ecuación de la gráfica se puede remplazar así:

$$Y = -616.17X + 97,969 \quad [6.59]$$

Donde (Y) corresponde a la eficiencia $\eta_{p.c}$

Donde (X) corresponde a la concentración C

La expresión $\eta_{p.c} f(C_{total})$ queda así:

$$\eta_{p.c} = -616.17C_{total} + 97.969 \quad [6.70]$$

5.10 ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN SISTEMA DE PLACAS (ENTRADA NO DISTRIBUIDA)

Para analizar los datos se aplica regresión lineal múltiple a los mismos con el fin de encontrar una ecuación de la $\eta_{p.c} f(C'_D, C)$. Ya que cada variable independiente presenta una relación lineal con la variable dependiente.

En esta parte se ordenan los datos correspondientes a cada parámetro en la forma como se indica en la **tabla 38**.

Tabla 39 datos a analizar con regresión múltiple

1	2	3	4
No	$\frac{C_{total}}{C_{p.c}}$	C'_D	η_{exper}
	[-]	[-]	[-]
1	49,8937	159	96,147
2	49,8245	161	95,645
3	49,7399	162	96,056
4	49,6416	164	93,260
5	49,5421	165	91,175
6	49,4515	167	91,487
7	49,4002	168	90,519
8	49,2571	170	88,604

DESCRIPCIÓN TABLA 39

Columna 1: Número de datos: necesario para contabilizar los datos.

Columna 2: Relación de concentraciones: resultado de la división de la concentración de la partícula crítica y la concentración total, ecuación [6.51]

Ej: 49.89

Columna 3: Coeficiente de arrastre afectado por la mezcla: este parámetro se calcula con base a la **tabla 32**.

Columna 4: Eficiencia experimental: en esta columna se obtiene la eficiencia teniendo en cuenta la concentración de la partícula más crítica de la granulometría. En %, ecuación [6.52]

$$\text{Ej: } \eta_{exp}(\%) = \left(1 - \frac{18.65gr}{484gr} \right) * 100 = 96.147\%$$

Sacando Log a cada dato de la **tabla 38** se obtiene la **tabla 39**.

Tabla 40 logaritmos de los datos

LOGARITMOS			
1	2	3	4
No	$\frac{C_{total}}{C_{p.e}}$	C_D	η_{exper}
1	1,698	2,202	1,983
2	1,697	2,207	1,981
3	1,697	2,209	1,983
4	1,696	2,214	1,970
5	1,695	2,218	1,960
6	1,694	2,223	1,961
7	1,694	2,225	1,957
8	1,692	2,230	1,947

DESCRIPCIÓN TABLA 40

Logaritmo de datos: resultado de la extracción del Logaritmo a cada uno de los datos.

Columna 1: Número de datos: necesario para contabilizar los datos.

Columna 2: Log de la relación de concentraciones

Columna 3: Log del coeficiente de arrastre afectado por la mezcla: este parámetro se calcula con base a la **tabla 32**

Columna 4: Log de la eficiencia experimental

Haciendo regresión múltiple variable en Excel se obtiene los resultados de la **tabla 41**

Tabla 41 regresión múltiple de los datos de la tabla 39 en Excel

-0,008	6,684	-9,347
2,051	10,303	22,004
0,942	0,004	#N/A
40,552	5,000	#N/A
0,001	0,000	#N/A

La ilustración del **ANEXO O**. Indica el orden de las estadísticas de regresión adicionales de la **Tabla 41**. Se tiene:

se_1, se_2, se_3, se_4 .

Son los valores de error estándar para los coeficientes m_1, m_2, \dots, m_4 . Lo cual son muy bajos.

Se_b

El valor de error estándar para la constante b (**$se_b = 22.004$**)

r_2

El coeficiente de determinación. Compara los valores estimados y reales, y los rangos con valor de 0 a 1. Pues es 0.942 este es cercano a 1, por lo que hay una buena correlación en la muestra, es decir, no hay mucha diferencia entre el valor y estimado y el valor y real.

se_y

Es el error estándar para la estimación Y es muy pequeño debido a que r_2 es cercano a 1

F

Se Utiliza la estadística **F** para determinar si la relación observada entre las variables dependientes e independientes se produce por azar.

Utilizando DISTR.F de Excel se puede calcular la probabilidad de que se produzca por azar un valor **F** superior. La distribución **F** apropiada tiene los grados de libertad v_1 y v_2 . Si n es el número de puntos de datos y const = VERDADERO o se omite, entonces:

$$v_1 = n - d_f - 1$$

$$v_2 = d_f.$$

DISTR.F (**F**; **v1**; **v2**) de Excel devolverá la probabilidad de que se produzca al azar un valor F superior.

Para nuestro caso, **df** = 5 y **F** = 40.55

$$v_1 = 8 - 5 - 1 = 2$$

$$v_2 = 5$$

$$\text{DISTR.F}(40.55; 2; 5) = 0,001899798$$

Una probabilidad extremadamente pequeña. Por lo que se puede decir que la ecuación de regresión es útil para predecir el valor de la r eficiencia experimental

η_{exp}

Con los datos de la **tabla 40** se obtiene una ecuación de la forma:

$$Y = 10^b * x_1^{m_1} * x_2^{m_2} * x_3^{m_3} * \dots x_n^{m_n} \quad [6.71]$$

Donde:

Y = variable dependiente que para el caso es la eficiencia experimental η_{exp}

Variables independientes:

$$X1 = \left(\frac{C_{total}}{C_{p.c}} \right) \quad [6.72]$$

$$X2 = C'_D \quad [6.73]$$

Exponentes:

$$b = -9.347$$

$$m_1 = 6.68$$

$$m_2 = -0.008$$

Remplazando en [6.71] la ecuación queda así:

$$\eta_{exp} = \frac{\left(\frac{C_{total}}{C_{p.c}} \right)^{6.684}}{C'_D{}^{0.008} 10^{9.347}} \quad [6.74]$$

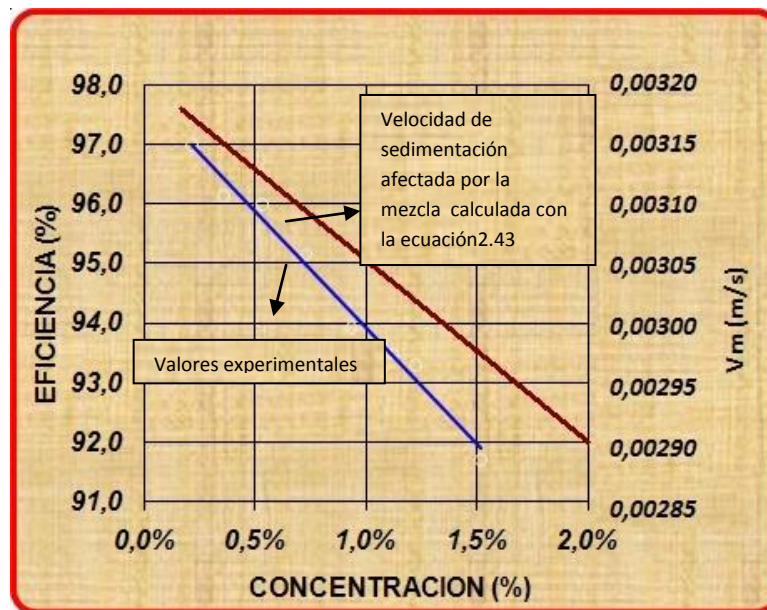
En la ecuación [6.74] se tiene la eficiencia experimental en función de la concentración y del diámetro de partícula incluido en C'_D para una entrada no distribuida.

5.11 RELACION CONCENTRACION - EFICIENCIA (SISTEMA DE PLACAS)

Si se desarrolla matemáticamente la ecuación [2.43] se puede observar que para una velocidad de sedimentación V_s calculada con la ecuación [2.38] para una partícula de 0.075mm de diámetro y que al afectarla por la concentración en una mezcla se observa que las velocidades de sedimentación se reducen gradualmente a medida que aumenta la concentración. Esto quiere decir que aunque se tenga el mismo flujo caudal entrando al sistema y el mismo tamaño del

tanque, con solo variar la concentración de partículas que entran al sistema la eficiencia del desarenador cambia, cosa que se puede comprobar al comparar los valores obtenidos al graficar la velocidad de sedimentación afectada por la mezcla V_s concentración y los valores prácticos obtenidos por el grupo de investigación, como se observa en la **figura 71**.

Figura 69 comparación entre la velocidad de sedimentación calculada con la ecuación [2.43] y la eficiencia de remoción (valores experimentales obtenidos en laboratorio).



Esquemáticamente este fenómeno puede ser explicado con facilidad como se muestra en las **figuras 69 y 70**. Donde se sabe que las condiciones teóricas en la práctica no casi siempre se cumplen debido a una cantidad de variables que no se tienen en cuenta en teoría, de manera que entonces tendrá una trayectoria por donde viajara la partícula crítica teóricamente hablando y que en la práctica se vería como se muestra en las **figuras 71 y 72**, al considerar el caso de dos mezclas (agua + arena gradada) con dos diferentes concentraciones que sedimentan en un decantador que tiene la misma profundidad y longitud. Es evidente que a medida que se aumenta la concentración de la partícula crítica se puede retener en dicha unidad menor cuantía de la misma, aunque el flujo entre placas permanece constante en los casos.

Figura 70 sedimentación de una mezcla de arena y agua entre dos placas planas inclinadas. En la práctica a < concentración.

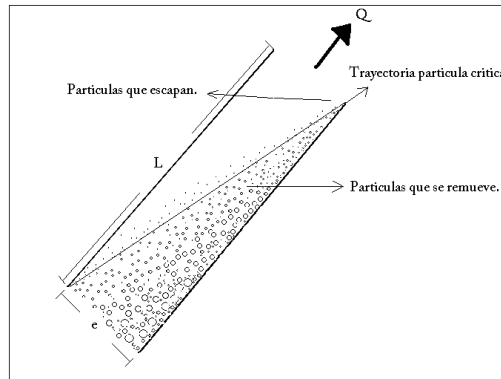
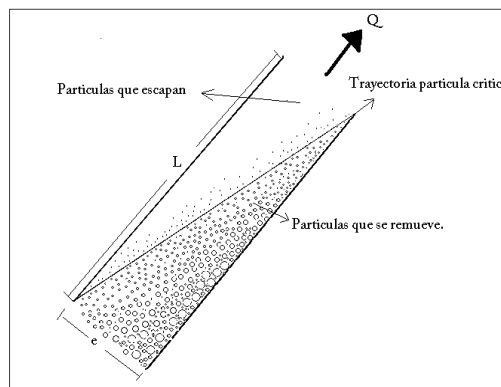


Figura 71 sedimentación de una mezcla de arena y agua entre dos placas planas inclinadas. En la práctica a > concentración.

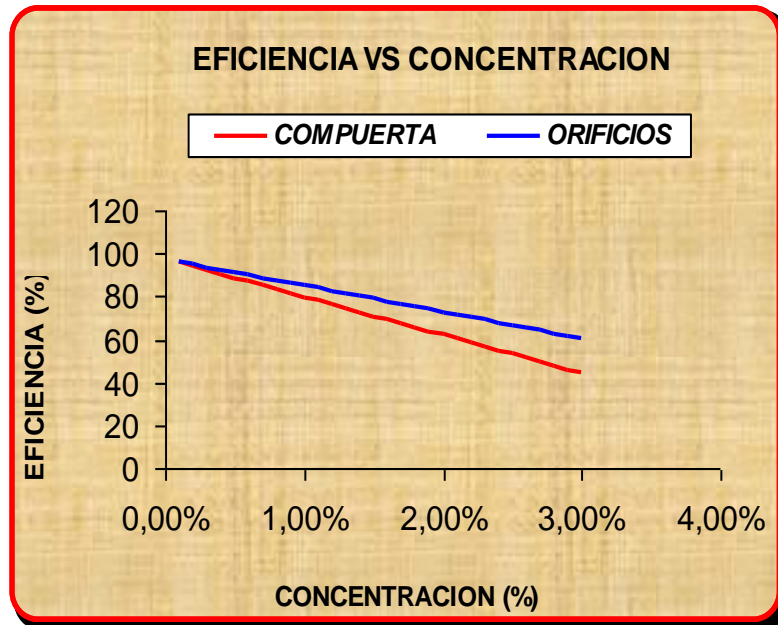


5.12 ANALISIS GRAFICO DE RESULTADOS

5.12.1 Análisis de gráficas para el efecto de la concentración de partículas y condiciones de entrada en desarenador convencional: Las gráficas nos muestran las líneas de tendencia de los datos obtenidos experimentalmente en laboratorio por el grupo de trabajo con el fin de hacer una comparación esquemática del comportamiento de dicho fenómeno para las condiciones a las que se sometió el sistema.

De manera que se procede a comparar las líneas de tendencia de eficiencia de remoción Vs concentración de partículas; obtenidas con los dos tipos de deflectores usados y para las mismas concentraciones como lo indica la **Figura 71**.

Figura 72 comparación entre los dos tipos de deflectores en desarenador convencional

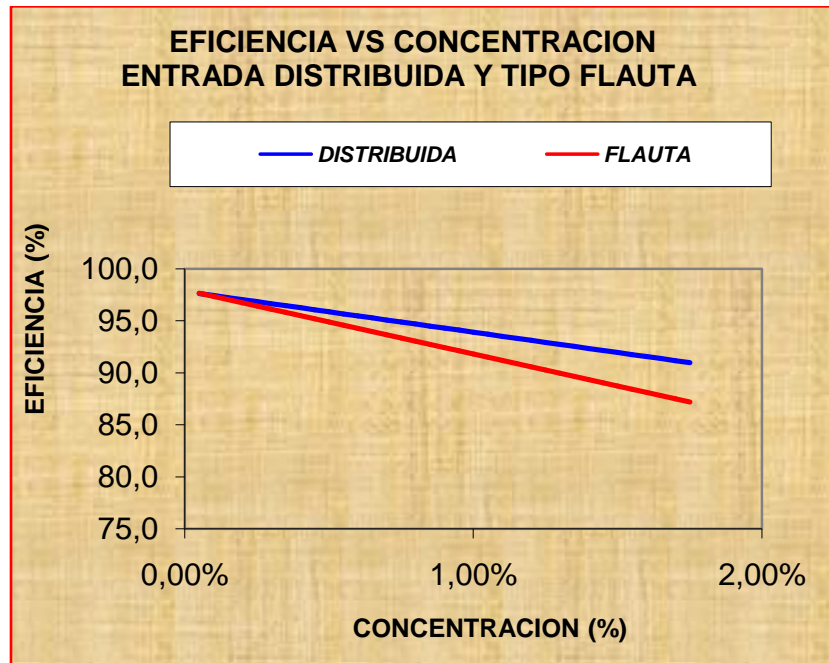


Donde puede observar que a medida que se aumenta la concentración para los dos tipos de deflectores las eficiencias se reducen. Lo que quiere decir que aunque se tenga un mismo flujo Q entrando al sistema y el mismo tamaño de tanque con solo variar la concentración de las partículas que entran al sistema y el tipo de entrada o deflector; va a cambiar su eficiencia gradualmente. Cosa que se puede observar claramente en el gráfico; del que además se puede destacar que el deflector de orificios presenta una línea de tendencia con menor pendiente lo que significa que suministra mayor eficiencia para esas condiciones.

5.11.2 Análisis de gráficas para el efecto de la concentración de partículas y condiciones de entrada en desarenador de placas: Las gráficas muestran las líneas de tendencia de los datos obtenidos experimentalmente en laboratorio por el grupo de trabajo con el fin de hacer una comparación esquemática del comportamiento de dicho fenómeno para las condiciones a las que se sometió el sistema.

De manera que se procede a comparar las líneas de tendencia de eficiencia de remoción vs concentración de partículas; obtenidas con los dos tipos de entrada usados y para las mismas concentraciones como lo indica la **Figura 75**.

Figura 73 comparación entre los dos tipos de entrada en sedimentador de placas.

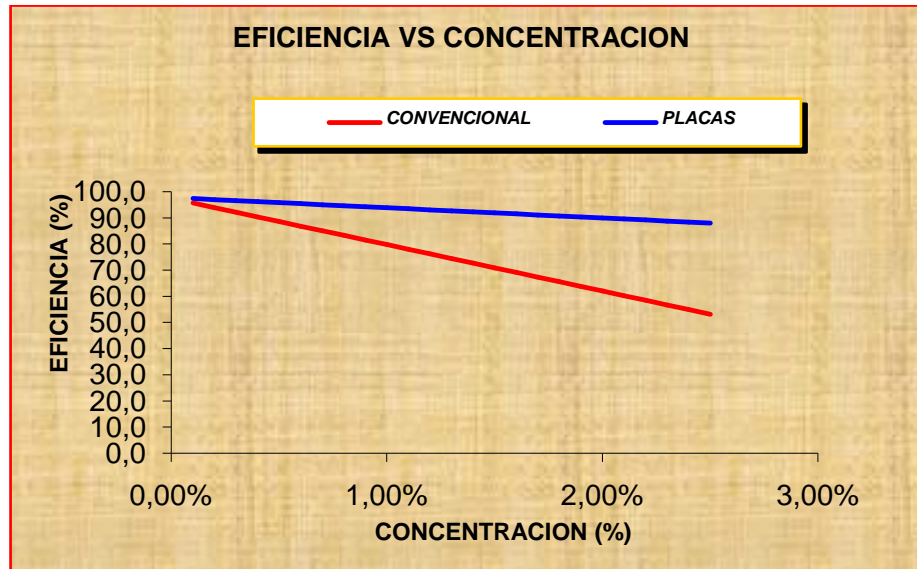


Al detallar el gráfico se ve que a medida que se aumenta la concentración y para los dos tipos de entrada en el desarenador de placas; las eficiencias se reducen. Lo que quiere decir que aunque se tenga el mismo caudal entrando al sistema, el mismo tamaño de tanque y mismo número de placas; con solo variar la concentración de los sólidos que entran al sistema y el tipo de entrada al mismo variará su eficiencia de forma gradual. Cosa que se puede observar claramente en el gráfico y con el que se puede afirmar con seguridad que la clave para lograr una buena eficiencia en un desarenador de placas es lograr una distribución del flujo lo más uniforme posible en todas las placas.

5.12.3 Análisis de gráficas para la eficiencia de remoción para los dos sistemas desarenadores: Las gráficas muestran las líneas de tendencia de los datos obtenidos experimentalmente en laboratorio por el grupo de trabajo con el fin de hacer una comparación esquemática del comportamiento de dicho fenómeno para las condiciones de entrada que brindaron mayor eficiencia de remoción.

De manera que se procede a comparar las líneas de tendencia de eficiencia de remoción vs concentración de partículas; obtenidas para los dos sistemas como lo indica la **Figura 73**.

Figura 74 comparación entre los dos sistemas desarenadores.



Se observa que a medida que se aumenta la concentración y para los dos sistemas sedimentadores tanto el convencional como de placas las eficiencias se reducen. Esto aunque se tenga el mismo caudal entrando al sistema, el mismo tamaño de tanque y mismo número de placas; con variar la concentración de los sedimentos que entran al sistema y el tipo de entrada; esto va a variar su eficiencia. Cosa que se puede observar claramente en el gráfico donde la eficiencia en el sistema de placas es superior que la del sistema convencional en esas condiciones de funcionamiento.

6. METODOLOGIA DE DISEÑO PARA DESARENADOR CONVENCIONAL

6.1 USANDO DEFLECTOR DE COMPUERTA

En el desarrollo del presente, se muestran los pasos para el diseño de un sistema desarenador usando ecuaciones tales como las que se obtuvo en la investigación, en las que se incluyen variables muy importantes que influyen en el funcionamiento; por lo que se a planteado el proceso siguiente:

1. Datos de entrada

- Caudal de diseño del desarenador
- Diámetro de la partícula por remover
- Gravedad específica del material
- Concentración volumétrica de partículas criticas
- Concentración volumétrica total de partículas (incluye diámetro de partículas mayores e iguales a la critica)
- Porcentaje de remoción de partículas criticas
- Porcentaje de remoción total (incluye diámetro de partículas mayores e iguales a la critica)
- Tipo de deflector a usar
- Temperatura del agua

2. Se calcula la velocidad de sedimentación de la mezcla V_m teniendo en cuenta la concentración de dichas partículas. ecuación[2.41], velocidad de sedimentación de la partícula individual V_s , ecuación[2.36], el número de Reynolds de la partícula para sedimentos naturales R_s , ecuación[2.38], exponente que cuantifica el efecto de la concentración, ecuación[2.42], El número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla R_m , ecuación[2.43], diámetro adimensional de partícula individual d_* , ecuación[2.39], diámetro adimensional de partícula con concentración d'_* , ecuación[2.44], el coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla agua-sólido Δ' , ecuación[2.45], viscosidad de la mezcla ν_m , ecuación[2.46], El valor del coeficiente de arrastre afectado por la mezcla C'_D , ecuación[2.47]

3. Adoptar una profundidad efectiva (H) según normas este valor puede oscilar entre 0.75 y 1.5m
4. Con el valor de profundidad efectiva adoptado y los datos de diseño; se calcula el área superficial del tanque con ecuación[6.39]
5. Se compara el valor de A_s con el de A_{Smin}

$$A_{Smin} = \frac{Q}{V_m} \quad [7.1]$$

6. Se calcula el ancho B y largo L con el valor de A_s que según recomendaciones la relación longitud-ancho debe estar entre 3 y 6 de modo que:

$$\frac{L}{B} \text{ Debe estar entre 3 y 6}$$

Por otro lado según recomendaciones $\frac{L}{H} = \frac{10}{1}$

7. Con las dimensiones B , H y L se calcula el volumen del tanque y se obtiene el tiempo de retención que según recomendaciones deberá ser mayor a 20 min.

$$a = \frac{Vol}{Q_d} > 20min \quad [7.2]$$

Donde:

a = Tiempo de retención

Vol = Volumen tanque

Q_d = Caudal de diseño

8. Se chequea la máxima velocidad horizontal que para un sistema sin tratamiento de agua posterior es $\leq 0.17m/s$ y deben removerse partículas con $d \geq 0.1mm$ y para un sistema con tratamiento de agua posterior es $\leq 0.25m/s$ y deben removerse partículas con $d \geq 0.2mm$.

$$V_h = \frac{Q}{A_t} \quad [7.3]$$

Donde:

Q = Caudal de diseño

A_t = Área transversal del tanque

9. Se chequea que la relación entre velocidad horizontal y velocidad de sedimentación sea inferior a 20 es decir:

$$\frac{V_h}{V_m} < 20 \quad [7.4]$$

10. Se chequea que la carga superficial con respecto a la carga superficial máxima la cual debe ser menor de $1000 \text{ m}^3/\text{m}^2/$ es decir:

$$CS = \frac{Q_d}{A_s} \quad [7.5]$$

6.2 USANDO DEFLECTOR DE ORIFICIOS

En el desarrollo del presente, se muestran los pasos para el diseño de un sistema desarenador usando ecuaciones tales como las que se obtuvo en la investigación, en las que se incluyen variables muy importantes que influyen en el funcionamiento de estos sistemas; por lo que se planteó el proceso siguiente:

1. Datos de entrada
 - Caudal de diseño del desarenador
 - Diámetro de la partícula por remover
 - Gravedad específica del material
 - Concentración volumétrica de partículas críticas
 - Concentración volumétrica total de partículas (incluye diámetro de partículas mayores e iguales a la critica)
 - Porcentaje de remoción de partículas críticas
 - Porcentaje de remoción total (incluye diámetro de partículas mayores e iguales a la critica)
 - Tipo de deflector a usar
 - Temperatura del agua
2. Se calcula la velocidad de sedimentación de la mezcla V_m teniendo en cuenta la concentración de dichas partículas, ecuación[2.41], velocidad de sedimentación de la partícula individual V_s , ecuación[2.36], el número de Reynolds de la partícula para sedimentos naturales, ecuación[2.38], exponente que cuantifica el efecto de la concentración, ecuación[2.42], El número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla R_m , ecuación[2.43], diámetro adimensional de partícula individual d_* , ecuación[2.39], diámetro adimensional de partícula con concentración d'_* , ecuación[2.44], el coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla de agua-sólido Δ' , ecuación[2.45], viscosidad de la mezcla ν_m , ecuación[2.46], El valor del coeficiente de arrastre afectado por la mezcla C'_D , ecuación[2.47].
3. Adoptar una profundidad efectiva (H) según normas cuyo valor puede oscilar entre 0.75 y 1.5m

4. Con el valor de profundidad efectiva adoptado y los datos de diseño; Se calcula el área superficial del tanque con la ecuación [6.50].

5. Se compara usando ecuación [7.1] el valor de A_s con el de A_{smin}

$$A_{smin} = \frac{Q_d}{V_m}$$

11. Se calcula el ancho B y largo L con el valor de A_s que según recomendaciones la relación longitud-ancho debe estar entre 3 y 6 de modo que:

$\frac{L}{B}$ Debe estar entre 3 y 6

Por otro lado según recomendaciones $\frac{L}{H} = \frac{10}{1}$

6. Con las dimensiones B , H y L se calcula el volumen del tanque y con la ecuación [7.2] y se obtiene el tiempo de retención el cual según recomendaciones deberá ser mayor a 20 min.

$$a = \frac{Vol}{Q_d} > 20 \text{ min}$$

Donde:

a = Tiempo de retención

Vol = Volumen tanque

Q_d = Caudal de diseño

7. Se chequea la máxima velocidad horizontal que para un sistema sin tratamiento de agua posterior es $\leq 0.17\text{m/s}$ y deben removerse partículas con $d \geq 0.1\text{mm}$ y para un sistema con tratamiento de agua posterior es $\leq 0.25\text{m/s}$ y deben removerse partículas con $d \geq 0.2\text{mm}$. Con la ecuación [7.3]

8. Se chequea que la relación entre velocidad horizontal y velocidad de sedimentación sea inferior a 20 usando la ecuación [7.4].

9. Se chequea que la carga superficial con respecto a la carga superficial máxima la cual debe ser menor de $1000 \text{ m}^3/\text{m}^2/$ usando la ecuación [7.5].

EJEMPLO 6.1

1. Datos de entrada

- Caudal de diseño del desarenador = 50 l/s
- Diámetro de la partícula por remover = 0.075mm
- Gravedad específica del material = 2.65 gr/cm³
- Concentración volumétrica de partículas críticas 0.04%
- Concentración volumétrica total de partículas (incluye diámetro de partículas mayores e iguales a la crítica) = 2%
- Porcentaje de remoción de partículas críticas = 65.5%
- Porcentaje de remoción total (incluye diámetro de partículas mayores e iguales a la crítica) = 99.3%
- Tipo de deflector = Compuerta con $h = 1$ m
- Temperatura del agua = 16 °C

2. Se calcula:

- Diámetro adimensional de partícula individual d_* , ecuación [2.39]

$$d_* = \left(\frac{(1.65 \text{ gr/cm}^3) 981 \text{ cm/s}^2}{(0.01112 \text{ cm}^2/\text{s})^2} \right)^{\frac{1}{3}} 0.0075 \text{ cm} = 1.8$$

- Calculo el número de Reynolds de la partícula para sedimentos naturales, ecuación [2.38]

$$R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2 * 1.8^2)} - 5 \right)^{1.5} = 0.2$$

- Se calcula velocidad de sedimentación de la partícula individual V_s , ecuación [2.36],

$$V_s = \frac{0.2 * 0.01112 \text{ cm}^2/\text{s}}{0.0075 \text{ cm}} = 0.003 \text{ m/s}$$

- Exponente que cuantifica el efecto de la concentración n , ecuación [2.42]

$$n = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2 - 2(0.002))}{(2 - 3(0.002))} \right] + \text{Ln} \left[\frac{22.57}{22.99} \right]}{\text{Ln}[1 - (0.002)]} = 4.93$$

- Se calcula la velocidad de sedimentación de la mezcla V_m teniendo en cuenta la concentración de dichas partículas, ecuación [2.41]

$$V_m = 0.003 \text{ m/s} * (1 - 0.4)^{4.93} = 0.00239 \text{ m/s}$$

- El coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla de agua-sólido Δ' , ecuación [2.45]

$$\Delta' = \frac{(1-0.02)1.65}{(1+0.02*1.65)} = 1.56$$

- Viscosidad de la mezcla ν_m , ecuación[2.46]

$$\nu_m = \frac{2*0.01112\text{cm}^2 / \text{s}}{2-3*0.02} = 0.01158\text{cm}^2 / \text{s}$$

- Diámetro adimensional de partícula con concentración d'_* , ecuación[2.44]

$$d'_* = \left(\frac{1.56*981\text{cm} / \text{s}^2}{0.01158\text{cm}^2 / \text{s}} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} 1.8 = 1.7$$

- El número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla R_m , ecuación [2.43]

$$R_m = \left(\sqrt{(25+1.2*1.7^2)} - 5 \right)^{1.5} = 0.2$$

- El valor del coeficiente de arrastre afectado por la mezcla C'_D , ecuación [2.47].

$$C'_D = \left[\left(\frac{32}{0.2} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 175.317$$

3. Se adopta una profundidad efectiva (H) según normas cuyo valor puede oscilar entre 0.75 y 1.5m, se toma 1.3m
4. Se calcula el área superficial con ecuación [6.39] del tanque con los datos de diseño.

Se reemplaza en la ecuación [6.39] se tiene:

$$A_s = \left(\frac{2Q}{H_A * \sqrt{gH}} \right) \left(10^{4.824} \left(\frac{\eta_{p.c}}{\eta_{total}} \right)^{-1} \left(\frac{C_{p.c}}{C_{total}} \right)^{-0.0817} \left(\frac{h}{H} \right)^{-0.104} C'_D^{-3.429} \right)^{\frac{1}{-0.767}}$$

Donde:

A_s = Área superficial del tanque (m^2)

$\eta_{p.c}$ = Porcentaje de remoción partícula crítica = 65.5%

η_{total} = Porcentaje de remoción total (incluye la remoción de partículas con diámetros mayores e iguales a los de la partícula crítica) = 99.3%

$C_{p.c}$ = Concentración de la partícula crítica = 0.04%

C_{total} = Concentración total (incluye diámetros de partículas iguales y superiores a los de la partícula crítica) = 2%

h = Altura de la compuerta a partir de la base del tanque = 1m

H = Altura del nivel del agua = 1.3m

H_A = Valor adimensional de la altura del nivel del agua = 1.3

C'_D = coeficiente de arrastre de partículas afectado por la mezcla = 175.317

Reemplazando en ecuación [6.39] se tiene:

$$A_s = \left(\frac{2 * 0.05 m^3 / s}{1.3 \sqrt{9.81 m / s^2} * 1.3 m} \right) \left(10^{4.824} \left(\frac{65.5\%}{99.3\%} \right)^{-1} \left(\frac{0.04\%}{2\%} \right)^{-0.0817} \left(\frac{1m}{1.3m} \right)^{-0.104} 175.317^{-3.429} \right)^{\frac{1}{-0.767}}$$

$$A_s = 43.86 m^2$$

5. Se compara el valor de A_s con el de A_{smin}

$$A_{smin} = \frac{Q}{V_m}$$

$$A_{smin} = \frac{0.05 m^3 / s}{0.003 m / s} = 16.6 m^2$$

$$A_s > A_{smin} \quad \text{OK}$$

6. Se calcula el ancho B y largo L con el valor de A_s que según recomendaciones la relación longitud-ancho debe estar entre 3 y 6 de modo que:

$$\frac{L}{B} \text{ Debe estar entre 3 y 6}$$

Por lo que se puede calcular usando ecuación [7.3]:

$$B = \frac{A_s}{L}$$

$$\text{Por otro lado según recomendaciones } \frac{L}{H} = \frac{10}{1}$$

Donde: $L = 10H$

Pero como se asume un valor de (H) se tiene:

$$L = 10 * 1.3m = 13m$$

Reemplazando en [7.3] se tiene:

$$B = \frac{43.8 m^2}{13m} = 3.36m$$

Chequeo

$\frac{L}{B}$ Debe estar entre 3 y 6

$$\frac{L}{B} = \frac{13m}{3.36m} = 3.86$$

Por lo que cumple ya que 3.36 está entre 3 y 6

7. Con las dimensiones:

$B=3.36m$, $H=1.3m$ y $L=13m$; se calcula el volumen del tanque y se obtiene el tiempo de retención que según recomendaciones deberá ser mayor a 20 min.

$$a = \frac{Vol}{Q_d} > 20min$$

Donde:

a = Tiempo de retención

Vol = Volumen tanque

Q_d = Caudal de diseño

$$a = \frac{L * H * B}{Q_d} > 20min$$

$$a = \frac{13m * 1.3m * 3.86m}{0.05m^3 / s} = 21.74min > 20min$$

Por lo que cumple tiempo de retención.

8. Se chequea la máxima velocidad horizontal donde en un sistema sin tratamiento de agua posterior es $\leq 0.17m/s$ y deben removerse partículas con $d \geq 0.1mm$ y para un sistema con tratamiento de agua posterior es $\leq 0.25m/s$ y deben removerse partículas con $d \geq 0.2mm$.

$$V_h = \frac{Q_d}{A_t}$$

Donde:

Q_d = Caudal de diseño

A_t = Área transversal del tanque

$A_t = H * B$

$$V_h = \frac{0.050m^3 / s}{H * B} = \frac{0.050m^3 / s}{3.86m * 1.3m} = 0.00996m / s$$

$V_h < 0.17m/s$ OK

9. Chequear que la relación entre velocidad horizontal y velocidad de sedimentación sea inferior a 20 es decir:

$$\frac{V_h}{V_m} < 20$$

$$\frac{0.00996m / s}{0.003m / s} = 3.32 < 20$$

10. Chequear que la carga superficial con respecto a la carga superficial máxima la cual debe ser menor de 1000 m³/m²/día es decir:

$$CS = \frac{Q_d}{A_s}$$

$$CS = \frac{0.05m^3 / s * 86400s / dia}{43.8m^2} = 98.63m^3 / m^2 / dia$$

Por lo que cumple $CS < 1000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$.

8. CONCLUSIONES

1. Para obtener un conocimiento general sobre este tipo de fenómenos, en lo que se refiere al efecto de la concentración y condiciones de entrada en las eficiencias de remoción se identifico y estudio los diferentes procesos existentes hasta ahora. Para un sistema convencional se logro involucrar variables adicionales tales como, concentración, eficiencia, número Froude, coeficiente de arrastre afectado por la mezcla y tipo de entrada junto con las variables clásicas de diseño como el ancho del desarenador, caudal y tamaño de partícula; con las cuales se logró formular expresiones matemáticas para uso práctico en la ingeniería.
2. Se pudo identificar el efecto producido por la concentraciones en mezclas sedimentables en sistemas desarenadores convencionales y de alta tasa, esto gracias a la realización de ensayos experimentales en el laboratorio que incluyen esta variable. Además se incluye en esta investigación expresiones donde se puede ver la variación de la eficiencia a medida que varía la concentración.
3. Una vez hecho los respectivos ensayos en el desarenador convencional con el deflector tipo compuerta variando la altura de 100 a 20 cm. se observa que al ir reduciendo la altura de la pantalla, la eficiencia de remoción de las partículas se ve afectada, aumentando gradualmente, esto se debe principalmente a que a medida que la compuerta baja; así mismo obliga a que las partículas bajen hasta ese punto, haciendo que su distancia hasta el fondo del tanque sea cada vez menor, de modo que se retendrán mayor cantidad de partículas; en este caso se produjo una acumulación de lodos mayor bajo esta a medida que se la bajaba. Además se sabe que a medida que se baja la compuerta la velocidad del flujo se aumenta, de manera que para una altura de compuerta de 100cm, un caudal de 2 LPS y un ancho de tanque de 118cm, se obtiene una velocidad del flujo de 0.2cm/s y para una altura de compuerta de 20cm se obtiene una velocidad del flujo de 0.8cm/s, miramos que resultan velocidades bajas; y con base en los resultados obtenidos se pude decir que el incremento de la velocidad del flujo al bajar la compuerta no hace que de alguna manera las partículas asciendan y escapen.
4. Al variar la concentración en los dos sistemas desarenadores se observa una disminución de la eficiencia a medida que se aumenta la concentración. Esto debido a que al aumentar la concentración la velocidad de sedimentación disminuye dado que las partículas no se

5. comportan como partículas individuales en caída libre sino como una mezcla en la que existe interferencia por turbulencias producidas por la precipitación entre partículas que se encuentran cercanas entre si.
6. Al comparar el efecto producido por las condiciones de entrada para el sistema de desarenador convencional. Se logra establecer que hay similitud entre el deflector de compuerta (con $h = 60$ cm) y el de orificios uniformemente repartidos, con este último se logra una depositación de lodos mas uniforme en todo el tanque, esto por medio ensayos experimentales.
7. Al establecer el efecto producido por las condiciones de entrada para el sistema de desarenador placas. Se destaca que el tipo flauta no distribuye uniformemente el flujo en todas las placas de manera que solo entran en funcionamiento las primeras y lo que hace que la depositación de los lodos se haga en mayor cantidad bajo estas, esto hace que la eficiencia disminuya. Mientras que con la entrada distribuida de sección variable se obtiene una mejor repartición del flujo, trabajando así todas las placas y haciendo que la depositación de los lodos se haga a lo largo del tanque.
8. Puedo decir que para una carga superficial aparente por ejemplo $106 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ para el sistema de placas; determinada como $\frac{Q}{A_0}$ donde A_0 es el área perpendicular neta; las velocidades de sedimentación disminuyen al incrementar la concentración. Esto quiere decir que aunque se tiene el mismo caudal entrando al sistema con solo variar la concentración de partículas sólidas la eficiencia del desarenador varía; cosa que se debe a que al incrementar la concentración la velocidad de sedimentación se reduce.
9. Con las expresiones obtenidas mediante el análisis dimensional y regresión lineal múltiple, se logro obtener para un sistema desarenador convencional una metodología práctica de diseño en la ingeniería, la cual incluye el efecto de la concentración y las condiciones de entrada, con bajos errores en la predicción.
10. Para desarenadores de placas inclinadas, se realizó un análisis descriptivo, similar al que presenta Arboleda (2001). En este análisis se encontró que la concentración ejerce gran influencia en la eficiencia del desarenador, obteniéndose gráficas explicativas que demuestran tal efecto. Aunque no fue posible establecer ecuaciones que relacionen la eficiencia con la concentración, para efectos prácticos de diseño, este hallazgo sirve como base para futuras investigaciones.

11. Se demostró experimentalmente que a pesar de que el desarenador de placas fue diseñado para máxima eficiencia, en la práctica la eficiencia fue inferior al 100%. Lo que indica que en la práctica aun existen factores desconocidos o difíciles de evaluar, que afectan el proceso de sedimentación.

9. RECOMENDACIONES

1. Recomendar para este tipo de investigaciones I utilizar los sistemas de extracción de lodos ya que la acumulación de lodos es bastante significativa y además para el montaje de placas es todo un trabajo ya que hay que desmontar todo el sistema para la evacuación manual.
2. Ampliar el conocimiento sobre el tema, se recomienda investigar sobre las consecuencias de la gravedad específica de los materiales sobre los fenómenos de los cuales trata esta investigación.
3. Recomendar la utilización de modelos a escala más pequeños a la utilizada en nuestro caso ya que reduciría la cantidad de lodos; nos permitiría hacer mas ensayos para obtener mejores promedios y así obtener mejores datos.
4. Ampliar la aplicabilidad de los resultados encontrados en la presente investigación, es necesario profundizar el tema, usando diseño experimental, asignando valores a los factores que afectan la eficiencia de remoción de sedimentos, en rangos que se utilicen en la práctica.

BIBLIOGRAFÍA

Arboleda valencia Jorge (2001). Teoría y practica de la purificación del agua volumen 1

----- . "Manual de suministros de agua comunitaria quinta edición". American water Works asociation (2002) calidad y tratamiento del agua quinta edición

Bond, A.w;(sep1960)."An Upflowsolids Contacto Basin",The institution of Eengineers,Australia; Vol. CE 2, No.2

Camp, T.R. (1946)." Sedimentation and the Design of Settling Tanks" Trans. ASCE Vol.III pag. 895

Hazen A. (1904) " On Sedimentation" Trans. ASCE Vol.53p. 45

Roberto Salazar Cano (2006) Acueductos segunda edición.

----- . "Estudio de desarenadores convencionales y de placas inclinadas , teoría de sedimentación "

Gómez, Z. Hernán. J., (2004) Efecto de la Concentración de Partículas de Sedimentos Naturales en la Velocidad Mínima de Transporte en Canales Abiertos . *XXI Congreso Latino americano de Hidráulica*". São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil, octubre 18 al 22 de 2004.

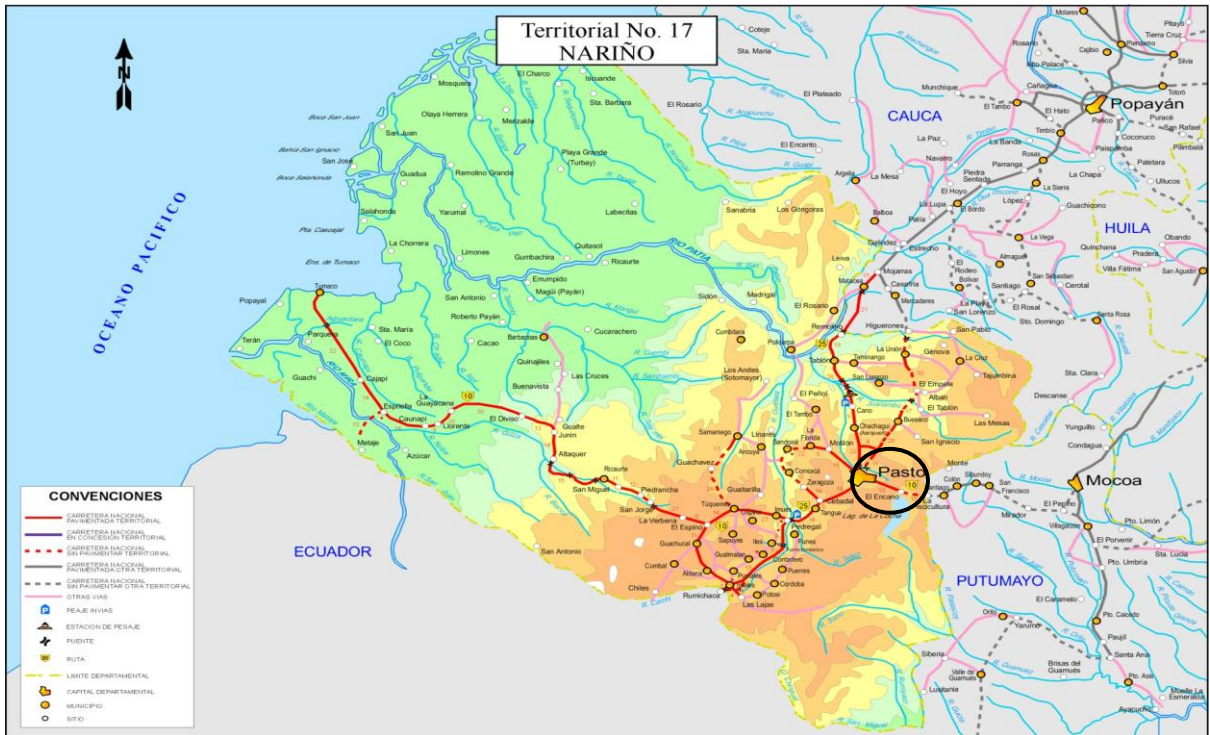
Cheng, N. S. (1997) " Effect of Concentration on Settling Velocity of Sediment Particles," Journal of Hydraulic Engineering. Vol 123. No 8. 1997b.

Cheng, N.-S.(1997) "Simplified settling velocity formula for sediment particle". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 123. No 2. February. 1997a. ASCE. Tech. note No 10734

Cheng, N.-S.(1997) "Effect of concentration on settling velocity of sediment particles". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 123. No 8. August. 1997b. ASCE. Technical note No 11124. (Loc. B. U.N.C. Ingeniería. Sede Bogotá

ANEXOS

ANEXO A aquí pondremos la ubicación de la mina



Fuente: www.invias.gov.co

ANEXO B arena extraída de la mina



ANEXO C realización del ensayo de granulometría



ANEXO D fotografía entrada de compuerta.



ANEXO E fotografía deflector de orificios.



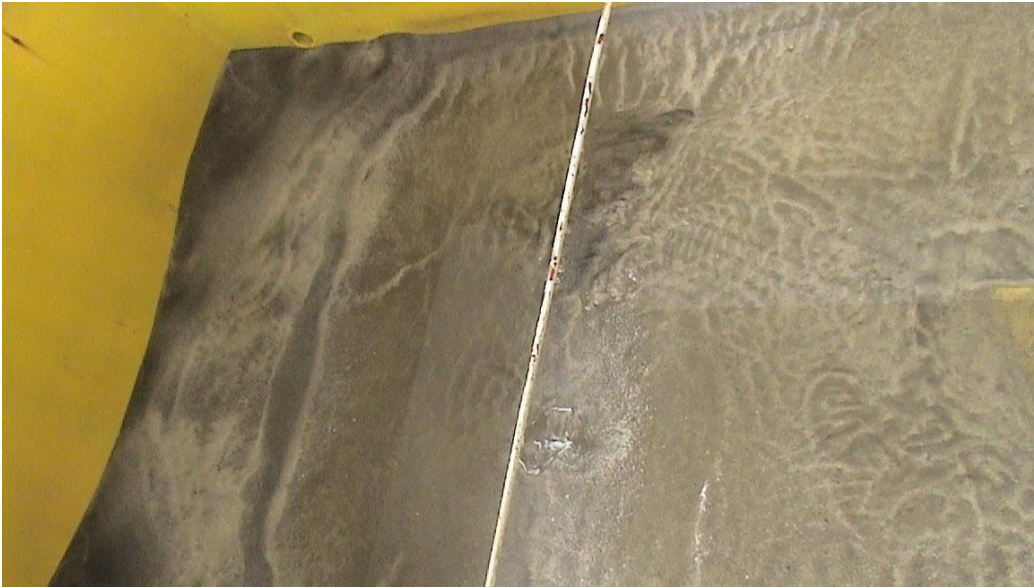
ANEXO F fotografía entrada distribuida.



ANEXO G fotografía entrada tipo flauta



ANEXO H fotografía material sedimentado después de un ensayo.



ANEXO I foto arena no removida



ANEXO J fotografía filtros de recolección.



ANEXO K fotografía evacuación manual de lodos



ANEXO L fotografía de secado de la arena para ser reutilizada



ANEXO M número de Hazen para entrada de compuerta.

1	2	3	4	5
DEFLECTOR	CONDICION (h/H)	C	EFICIENCIA (%)	N HEZEN
Compuerta	0,909	0,38%	94,806	3,705
Compuerta	0,909	0,67%	82,108	3,656
Compuerta	0,909	1,00%	79,760	3,596
Compuerta	0,909	1,27%	74,061	3,548
Compuerta	0,909	1,63%	65,638	3,485
Compuerta	0,909	2,00%	65,456	3,421
Compuerta	0,909	1,00%	79,861	3,596
Compuerta	0,727	1,00%	86,503	3,596
Compuerta	0,545	1,00%	86,062	3,596
Compuerta	0,364	1,00%	91,540	3,596
Compuerta	0,182	1,00%	93,306	3,596
Compuerta	0,909	1,83%	88,161	6,312
Compuerta	0,909	1,23%	87,016	4,599
Compuerta	0,909	1,09%	81,125	4,182
Compuerta	0,909	0,93%	79,079	3,580
Compuerta	0,909	0,74%	75,116	2,887

DESCRIPCIÓN ANEXO M.

Columna 1: Condición de entrada de la mezcla: para el caso es de compuerta.

Columna 2: Relación de altura de compuerta a altura del nivel del agua: h varía de 0.2m a 1m.

Columna 3: Concentración volumétrica de partículas: es la cantidad de material sólido (arena) en el agua.

Columna 4: Eficiencia de remoción

Columna 5: Es el número de Hezen

ANEXO N número de Hazen para deflector de orificios.

1	2	3	4
<i>DEFLECTOR</i>	<i>C</i>	<i>EFICIENCIA (%)</i>	<i>N HAZEN</i>
orificios	0,40%	96,17	3,705
orificios	0,67%	84,93	3,656
orificios	1,00%	87,77	3,596
orificios	1,27%	78,38	3,548
orificios	1,63%	76,40	3,485
orificios	2,00%	74,90	3,421
orificios	1,83%	91,70	7,192
orificios	1,23%	90,19	4,795
orificios	1,09%	88,33	4,230
orificios	0,93%	82,13	3,596
orificios	0,74%	72,63	2,877

DESCRIPCIÓN ANEXO N.

Columna 1: Condición de entrada de la mezcla: para el caso es un deflector de orificios.

Columna 2: Concentración volumétrica de partículas: es la cantidad de material sólido (arena) contenido en el agua.

Columna 3: Eficiencia de remoción

Columna 4: Es el número de Hazen

ANEXO O estadísticas de regresión

La ilustración siguiente Indica el orden de las estadísticas de regresión adicionales de las **Tablas. 24, 28, 35 Y 40**

Tabla 28. Orden de las estadísticas de regresión en Excel.

	A	B	C	D	E	F
1	m_n	m_{n-1}	...	m_2	m_1	b
2	se_n	se_{n-1}	...	se_2	se_1	se_b
3	r^2	se_y				
4	F	d_f				
5	ss_{reg}	ss_{resid}				

Las estadísticas de regresión adicional son las que se indican a continuación:

se_1, se_2, \dots, se_n

Los valores de error estándar para los coeficientes m_1, m_2, \dots, m_n .

se_b

El valor de error estándar para la constante b ($se_b = \#N/A$ cuando constante es FALSO).

r^2

El coeficiente de determinación. Compara los valores y estimados y reales, y los rangos con valor de 0 a 1. Si es 1, hay una correlación perfecta en la muestra, es decir, no hay diferencia entre el valor y estimado y el valor y real. En el otro extremo, si el coeficiente de determinación es 0, la ecuación de regresión no es útil para predecir un valor.

se_y

El error estándar para la estimación Y.

F

La estadística F o valor F observado. Utilice la estadística F para determinar si la relación observada entre las variables dependientes e independientes se produce por azar.

d_f

Grados de libertad. Utilice los grados de libertad para encontrar valores F críticos en una tabla estadística. Compare los valores que encuentre en la tabla con la estadística F devuelta por ESTIMACION.LINEAL para determinar un nivel de confianza para el modelo.

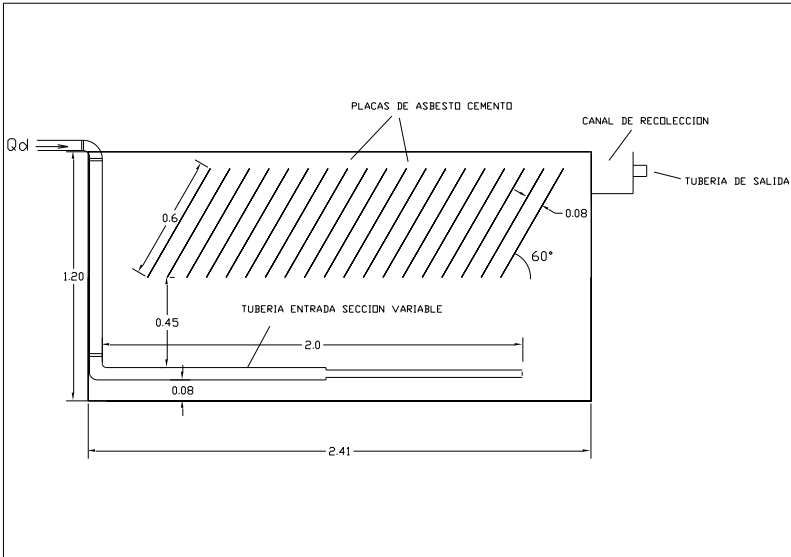
ss_{reg}

La suma de regresión de los cuadrados.

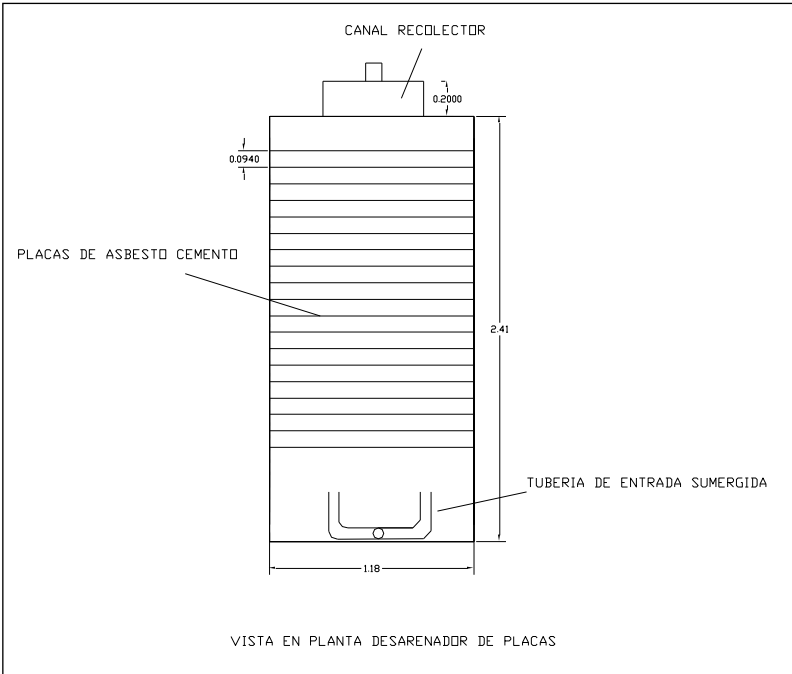
ss_{resid}

La suma residual de los cuadrados.

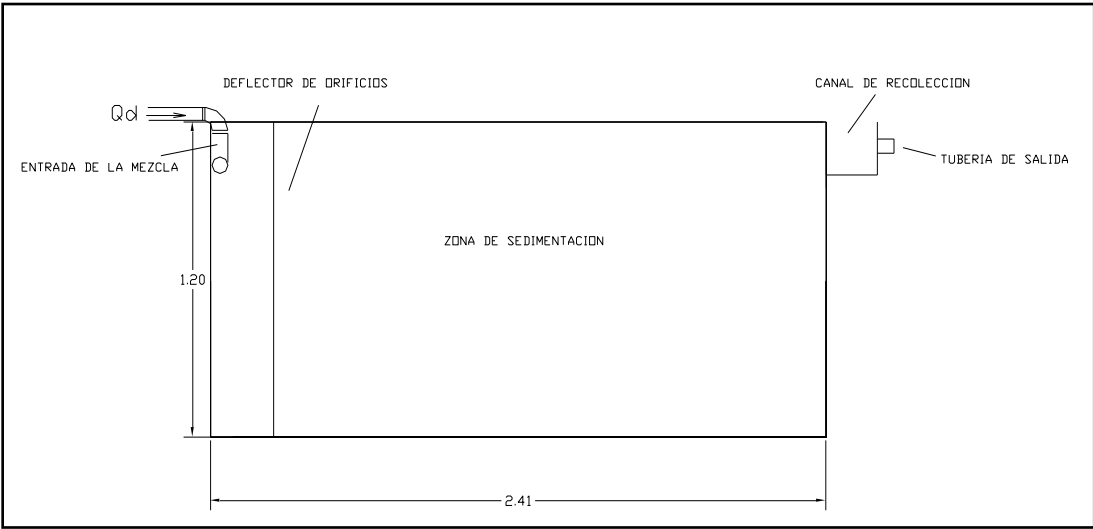
ANEXO P vista perfil desarenador de placas inclinadas.



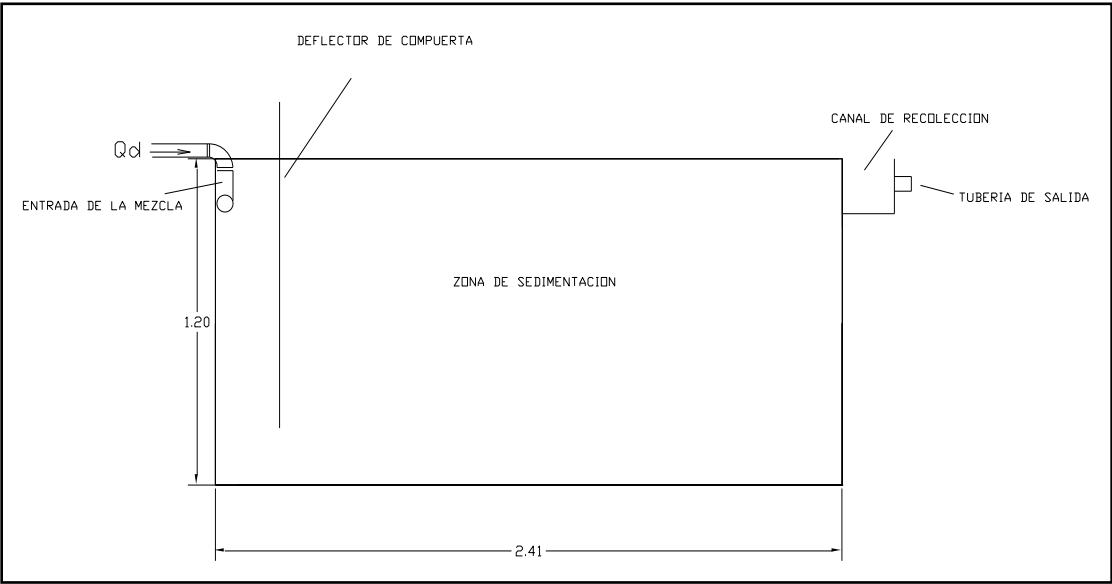
ANEXO Q vista en planta desarenador de placas inclinadas.



ANEXO R vista perfil desarenador convencional con deflector de orificios.



ANEXO S vista perfil desarenador convencional con deflector de compuerta.



ANEXO T vista en planta desarenador convencional.

