



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SOBRE EL ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO: RESULTADOS Y APLICACIONES A ÁRIDOS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

P R E S E N T A:

JAIR DEL VALLE MORALES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

CIUDAD UNIVERSITARIA
MÉXICO D. F., OCTUBRE DE 2012



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Escalante Sandoval Carlos Agustín

Secretario: Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo

Vocal: Dr. Silva Casarín Rodolfo

1^{er} Suplente: Dr. Pedrozo Acuña Adrián

2^{do} Suplente: Dra. Reyes Chávez Lilia

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería de la UNAM

TUTOR DE TESIS

Dr. Rodolfo Silva Casarín

FIRMA

*A Dios,
esa fuerza infinita e invisible,
por brindarme salud*

Agradecimientos

A mi madre, por ser siempre mi apoyo en los momentos difíciles y brindarme su cariño y confianza.

A mis hermanos, Jorge y Eduardo, por los acuerdos y desacuerdos que siempre hemos tenido.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín, por su apoyo una vez más; además de la confianza y ánimo en las tareas que me ha encomendado en estos dos años de estudio en la maestría.

Al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, por hacerme ver y recordar valores como la tolerancia, el respeto, el trabajo individual y en equipo, además del compañerismo mostrado dentro y fuera del instituto.

Al Dr. Adrián Pedrozo Acuña, por haberme mostrado valores como el trabajo honesto y puntual, el respeto, la disciplina dentro y fuera del aula, y la buena crítica hacia mis compañeros y conmigo mismo.

A la Dra. Lilia Reyes Chávez, por sus valiosas correcciones y recomendaciones hechas a este trabajo.

A mis profesores, por sus enseñanzas durante mis estudios en la maestría: Dr. Rodolfo Silva, Dr. Edgar Mendoza, Dr. Adrián Pedrozo, Dr. Jesús Gracia, Dr. Óscar Fuentes, Ing. Héctor López y M.I. Víctor Franco.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), ya que sin su valiosa e importante ayuda económica me habría sido muy difícil poder realizar mis estudios de posgrado.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, porque, una vez más, me ha permitido usar sus instalaciones para poder realizar este trabajo.

Al Dr. Gabriel Ruíz Martínez y a todas las personas que participaron en las diferentes campañas de campo realizadas en la Península de Yucatán.

A mis compañeros del cubículo 406: Sébastien de BRYE (mi primo), Germán Daniel Rivillas Ospina, Miguel Ángel Delgadillo Calzadilla, Cuauhtémoc Franco Ochoa (El patrón), Gibrán H. Manjarrez (el depredador), Dalila Ruiz Cavazos, Abril Ichel Pérez Peña (mamacita), Angélica Félix Delgado, Mireille Del Carmen Escudero Castillo (mirellita), Valeria Chávez Cerón, por las centenas de horas de risas debido ya sea a los chismes o al bullying que le aplicamos a mi primo Sébastien, y que trataré de no hacerlo más, aunque no prometo nada.

También a mis compañeros que estuvieron en el cubículo y que en estos momentos se encuentran en tierras extranjeras realizando sus estudios doctorales: a Juan Carlos Alcérreca Huerta, Sergio Maldonado Villanueva y Jaime Alonso Arriaga.

A mis compañeros que terminaron sus estudios de maestría y se encuentran ya trabajando: César Edwin Gutiérrez Valencia, Ariadna Cecilia Cruz Quiroga y Brayan Betancourt Quiroga.

Claro, y no se me olvida, a mis compañeros Alejandro Bustos Lira (oso polar), Jesús Abraham Pinedo G, Jesús Eduardo Monroy B, Gerardo Durán Valdez, Juan Pablo Rodríguez Rincón, Raúl Martell Dubois, Miguel Ángel Laverde Barajas, Pedro Noé Paredes Victoria, José Antonio Hoil Baeza, José Antonio González Vázquez, Xavier Chávez Cárdenas, Iván Arturo García M, Alejandra Amaro Loza, Diana Edith Reséndiz, Diana Carolina Fernández, Cesia Jaqueline Cruz Ramírez, Candelaria Corona Flores, Laura Nely Sánchez Morales, Alejandro Ruíz Cruz y Carlos A. Armenta Aguilar, por las innumerables conversaciones que siempre han terminado en risas y carcajadas.

A mis amigos de la infancia, Jesús Acatitlán Mireles (jamón), Roberto Francisco Mireles (samo), a mi amigo y ahijado Ricardo Mireles. También a mi amigo Arturo Cigarroa Mireles por hacerme ver que la violencia siempre genera más violencia.

A todos ustedes, les agradezco de todo corazón. Con esto hoy termino de caminar un tramo más de esta larga carretera llamada vida, y que estoy dispuesto a recorrer hasta el final, con entusiasmo, si dios me lo permite...

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis sedimentológico de 140 muestras de arenas distribuidas en 67 perfiles ubicados en tres segmentos de playa pertenecientes a la Península de Yucatán. Dentro de las propiedades mecánicas de los sedimentos se obtuvo de cada una de las muestras el diámetro característico D_{50} y la densidad relativa S_s . Con base en estas propiedades fundamentales, se determinaron una serie de parámetros de cada una de las 140 muestras, evaluando dos variables principales y que son el objetivo principal de este trabajo: la velocidad de caída W_f y la velocidad de inicio de movimiento u^* (velocidad de fricción o velocidad de fondo). Al final, estas dos variables contienen gran parte de la información sedimentológica de las muestras, por lo cual se elaboraron gráficas que relacionan estas velocidades con el factor de forma CSF . Los resultados obtenidos en laboratorio indican que el factor de forma condiciona de forma significativa el transporte de sedimentos de las partículas. Durante el desarrollo del trabajo experimental se detectaron varias deficiencias en la metodología utilizada, es por ello que, como un aspecto complementario muy importante del presente trabajo de investigación, se incluyen algunas sugerencias para mejorar la determinación de los parámetros mecánicos del sedimento con el equipo disponible en el Laboratorio de Costas del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

ABSTRACT

This work presents a sedimentological analysis of 140 sand samples distributed in 67 profiles located in three segments of beach from the Yucatan Peninsula. Regarding the mechanical properties of the sediments, a characteristic diameter D_{50} and the relative density S_s were obtained from each sample. Based on these fundamental properties, a number of parameters for each of the 140 samples were identified, that evaluate two main variables, such as the fall velocity W_f and the initiation of motion velocity u^* (i.e. the friction velocity or bottom velocity), which is the main objective of this work. At the end, these two variables contain much of the information sedimentological samples, which were prepared by graphics that relate these velocities with the form factor CSF . The results obtained in laboratory indicate that the form factor significantly influences the sediment transport particles. During the development of experimental work was found several deficiencies in the methodology used, is therefore a very important complementary aspect of this research work at the end of this document contains some suggestions for improving the determination of the mechanical parameters of the sediment with the equipment in the Coastal Laboratory of Engineering Institute, UNAM.

SOBRE EL ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO: RESULTADOS Y APLICACIONES A ÁRIDOS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

INTRODUCCIÓN	13
IMPORTANCIA DEL TRABAJO	13
<i>¿Para qué o por qué es importante calcular la velocidad de caída?</i>	14
OBJETIVO GENERAL	15
METAS PARTICULARES	15
METODOLOGIA	15
ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	16
1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SEDIMENTOS.....	19
1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SEDIMENTOS	19
1.1.1. <i>Tamaño del sedimento</i>	19
1.1.2. <i>Análisis Granulométrico</i>	29
1.2. PROPIEDADES DE VOLUMEN	30
1.2.1. <i>Propiedades físicas del sedimento</i>	31
1.2.1.1. Densidad relativa S_s [1]	31
1.2.1.2. Densidad relativa sumergida, Δ [1]	34
1.2.1.3. Densidad del material, ρ_s [kg/m ³]	34
1.2.2. <i>Relaciones Fundamentales de un Suelo</i>	35
1.2.2.1. Relación de vacíos, e [1]	35
1.2.2.2. Porosidad, P_{or} [1]	35
1.2.3. <i>Propiedades del mezclado agua – sedimento</i>	35
1.2.3.1. Masa de concentración, ρ_{cas} [kg/m ³].....	35
1.2.3.2. Volumen de Concentración, C [1].....	36
1.2.3.3. Densidad de suspensión, ρ_{sus} [kg/m ³]	36
1.2.3.4. Permeabilidad específica, k_p [m ²]	36
1.2.3.5. Coeficiente de permeabilidad, c_p [m/s]	36
1.2.3.6. Gradiente de presión, GP [N/m ³]	37
1.2.3.7. Velocidad mínima de licuefacción, W_{mf} [m/s]	37
1.2.4. <i>Propiedades de forma</i>	37
1.2.4.1. Ángulo natural de reposo del material sedimentario, φ [°].....	37
1.2.4.2. Factor de forma del material sedimentario, CSF [1].....	38
1.3. VELOCIDAD DE CAÍDA	38
1.3.1. <i>Velocidad de caída de una partícula esférica: ecuación de Stokes</i>	38
1.3.2. <i>Velocidad de caída de sedimentos naturales</i>	42
1.3.2.1. Características físicas de las partículas naturales sedimentarias	42
1.3.2.1.1. Forma.....	42
1.3.2.1.2. Razones, Diagramas y Factores de Forma	43

1.3.2.1.3.	Redondez	45
1.3.2.2.	Otras características físicas de las partículas naturales.....	49
1.4.	INICIO DE MOVIMIENTO	50
1.4.1.	<i>Parámetro de Shields, ψ, parámetro de Shields crítico y parámetro modificado de Shields</i>	52
1.4.2.	<i>Principios Básicos del Transporte de Sedimentos</i>	55
1.4.2.1.	Características del flujo unidireccional.....	55
1.4.2.1.1.	Clasificación científica	56
1.4.2.1.2.	Clasificación ingenieril.....	56
1.4.2.1.3.	Distribución de velocidad en la capa turbulenta.....	57
1.4.2.1.4.	Modos de transporte	58
1.4.2.1.5.	Formas de fondo y rugosidad de fondo	60
1.4.2.1.6.	Esfuerzo cortante efectivo	61
2.	ASPECTOS GENERALES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN	65
2.1.	LOCALIZACIÓN Y LÍMITES.....	65
2.2.	GEOLOGÍA.....	65
2.2.1.	<i>Rocas calcáreas: la caliza</i>	68
2.3.	FISIOGRAFÍA	69
2.4.	HIDROLOGIA	71
2.5.	VIENTOS.....	73
2.6.	CLIMA MARÍTIMO	76
3.	TRABAJO DE CAMPO, EXPERIMENTAL Y DE GABINETE	81
3.1.	TRABAJO DE CAMPO.....	81
3.1.1.	<i>Recolección de muestras</i>	81
3.2.	TRABAJO DE LABORATORIO.....	84
3.2.1.	<i>Análisis granulométrico</i>	84
3.2.2.	<i>Forma natural del material sedimentario</i>	85
3.2.3.	<i>Densidad relativa del material sedimentario, (S_s)</i>	86
3.2.4.	<i>Velocidad de caída, (W_f)</i>	89
3.2.4.1.	Instrumentación y aparatos empleados.....	89
3.2.4.2.	Medición de la velocidad de caída	89
3.2.4.2.1.	Análisis fotográfico.....	90
3.2.4.2.2.	Registro de la velocidad de caída	90
3.2.4.2.3.	Análisis de videos	92
3.2.4.3.	Medición de la velocidad de caída con la cámara de alta velocidad	93
3.3.	TRABAJO DE GABINETE	94
3.3.1.	<i>Factor de forma, CSF [1]</i>	95
3.3.2.	<i>Velocidad de caída teórica y velocidad de caída experimental</i>	95
3.3.3.	<i>Comparación con formulaciones de velocidad de caída</i>	95
3.3.4.	<i>Umbral e inicio de movimiento</i>	97
4.	RESULTADOS	103
4.1.	EXPLICACIÓN CON RESPECTO A LA VELOCIDAD DE CAÍDA (W_f)	103
4.1.1.	<i>Quintana Roo</i>	103
4.1.2.	<i>Yucatán</i>	108
4.1.3.	<i>Campeche</i>	113
4.2.	DISCUSIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE CAÍDA.....	120
4.3.	EXPLICACIÓN CON RESPECTO A LA VELOCIDAD DE INICIO DE MOVIMIENTO (u_*)	121
4.4.	VELOCIDAD DE CAÍDA EXPERIMENTAL [W_f] Y DE INICIO DE MOVIMIENTO [u_{*c}] CONTRA EL FACTOR DE FORMA [CSF].	129
5.	CONCLUSIONES	137
5.1.	FUTURAS LÍNEA DE INVESTIGACIÓN Y RECOMENDACIONES ADICIONALES	138
6.	REFERENCIAS	141

7. ANEXOS.....	151
7.1. ANEXO 1: VELOCIDAD DE CAÍDA [W_f]	151
7.1.1. <i>Resumen de las ecuaciones de velocidad de caída</i>	151
7.1.2. <i>Información utilizada</i>	158
7.1.3. <i>Registro en tablas de la velocidad de caída de algunas de las muestras de material sedimentario</i> 170	
7.1.3.1. Estado de Quintana Roo.....	170
7.1.3.2. Estado de Yucatán	175
7.1.3.3. Estado de Campeche	177
7.1.4. <i>Resultados de las “Propiedades de Volumen” de las muestras de arena</i>	178
7.2. ANEXO 2: VELOCIDAD DE INICIO DE MOVIMIENTO	197
7.2.1. <i>Inicio de movimiento de las muestras de arena del estado de Quintana Roo, México</i>	197
7.2.2. <i>Inicio de movimiento de las muestras de arena del estado de Yucatán, México</i>	204
7.2.3. <i>Inicio de movimiento de las muestras de arena del estado de Campeche, México</i>	207

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Fórmulas estadísticas utilizadas en el cálculo del tamaño de partículas sedimentarias y la terminología descriptiva sugerida, modificada de Krumbein & Pettijohn (1938) y Folk & Ward (1957) (f es la frecuencia en porcentaje; m es el punto medio de cada intervalo de clase en unidades métricas (m_m) o unidades phi (m_ϕ); P_x y ϕ_x son el diámetro de partícula, en unidades métricas y phi, respectivamente, donde el subíndice x representa el percentil acumulativo)	21
Tabla 1.2 Clasificación de la distribución de tamaños de material sedimentario del CEM (2002, Coastal Sediment Properties), como función de la escala Phi propuesta por Krumbein en su trabajo de 1934, [citada también en Ruíz (2007a; 2009)].....	25
Tabla 1.3 Clasificación del tamaño del sedimento de acuerdo con la ASTM y Wentworth, tomando en cuenta los límites numéricos de los dos criterios internacionales y estándar: ISO – Ginebra, Suiza y la ASTM [Esta tabla se elaboró consultando las siguientes referencias: Pettijohn & Potter & Siever (1973, pág. 71), CEM (2002, Coastal Sediment Properties), Ruíz (2007a), Del Valle (2010, pág. 65), Alcérreca (2011, pág. 22), USA Standard Testing Sieves ASTM Specifications E 11 – 04].....	26
Tabla 1.4 Clasificación para el caso en que el material sedimentario es arena, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS por sus siglas en español; USCS por sus siglas en inglés).....	29
Tabla 1.5 Ecuaciones para medir la forma de una partícula natural: Factores de Forma [Aschenbrenner (1956); Briggs & McCulloch & Moser (1962, pág. 647); Barrett (1980, pág. 294); Blott & Pye (2008, pág. 37)]	46
Tabla 1.6 Fórmulas que comúnmente son utilizadas para determinar la redondez de partículas naturales [Barrett (1980, pág. 300); Blott & Pye (2008, pág. 53)].....	47
Tabla 1.7 Clasificación del valor de redondez para partículas naturales, acorde con diferentes investigaciones [Powers (1953, pág. 117); Blott & Pye (2008, pág. 54)].....	48
Tabla 1.8 Fórmulas para calcular la circularidad de una partícula natural [Blott & Pye (2008, pág. 57)].....	51
Tabla 1.9 Ecuaciones empíricas que permiten el cálculo directo del parámetro de Shields crítico [Beheshti & Ashtiani (2008, pág. 424); Soulsby (1997, pág. 106)].....	54
Tabla 2.1 Escala de tiempo geológico.....	66
Tabla 2.2 Tormentas tropicales (TORM TROP) y huracanes que tocaron e ingresaron a la Península de Yucatán. Dicha tabla fue realizada con base en la información proporcionada en la página web http://weather.unisys.com/hurricane/ a partir del año 1996 a la fecha (julio de 2012). 75	75
Tabla 3.1 Ubicación de los sitios de las muestras recolectadas en tres segmentos de playa de la Península de Yucatán, México.	83
Tabla 3.2 Intervalos de diámetros de partículas y su correspondiente distancia recorrida	91
Tabla 3.3 Configuración del fondo como función del número de Reynolds, Re [CEM – Coastal Sediment Properties; citado en Ruíz (2007; 2009) y Del Valle (2010)].....	98
Tabla 3.4 Clasificación del flujo a partir del Índice de flotación de Arquímedes, A [Ahrens (2003; pág. 146)]	98
Tabla 3.5 Modo de transporte del material o sedimento a partir del número de Rouse [Ruíz (2007; 2009)]	99
Tabla 4.1 Errores representativos de los resultados al aplicar las 30 ecuaciones de velocidad de caída. En esta tabla, la columna con la etiqueta ERMEDIAN es el error mediano, la columna con el nombre ERPROM se refiere al error medio o promedio y MEDCUAD representa el error cuadrático medio	119
Tabla 4.2 Velocidades de inicio de movimiento críticas de las muestras de arena del Estado de Quintana Roo, México	122
Tabla 4.3 Velocidades de inicio de movimiento críticas de las muestras de arena del Estado de Yucatán, México	125
Tabla 4.4 Velocidades de inicio de movimiento críticas de las muestras de arena del Estado de Campeche, México	126
Tabla 4.5 Muestras seleccionadas y a las cuales se les determinó su velocidad de inicio de movimiento experimental	126

Tabla 4.6 Errores de las 9 muestras dispuestas en la Tabla 4.5	127
Tabla 4.7 Desviación Cuadrática Media Normalizada (<i>DCMN</i> ó <i>NRMSD</i> por sus siglas en inglés), en porcentaje.	128
Tabla 4.8 Errores cuadráticos medios para el caso de fondo plano.....	129
Tabla 7.1 Ecuaciones empíricas de velocidad de caída de partículas individuales.....	152
Tabla 7.2 Información utilizada para determinar la velocidad de caída en el estado de Quintana Roo, México. Los valores que se presentan aquí son los resultados por muestra de arena.....	158
Tabla 7.3 Información utilizada para determinar la velocidad de caída en el estado de Yucatán, México. Los valores que se presentan aquí son los resultados por partícula de arena.	161
Tabla 7.4 Información utilizada para determinar la velocidad de caída en el estado de Campeche, México. Los valores que se presentan aquí son los resultados por partícula de arena.	168

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Curva granulométrica del sitio Bahía de Tortugas (coordenadas geográficas 19.096° N, -91.036°O), en el Estado de Campeche, México.	30
Figura 1.2 Representación esquemática de un suelo de acuerdo con Juárez & Rico (2005)	31
Figura 1.3 Definición de variables auxiliares para el cálculo de la densidad relativa.....	33
Figura 1.4 Diagrama de cuerpo libre de una partícula esférica desplazándose a través de un fluido estático	39
Figura 1.5 Ejes largo, intermedio y corto de una partícula natural	43
Figura 1.6 Definición de redondez de acuerdo con la definición de Wentworth (1919).....	47
Figura 1.7 Definición de angularidad de acuerdo a Lees (1964): en verde, el radio de la circunferencia máxima inscrita en la partícula natural; en rojo, el contorno de la partícula natural; en azul cielo, la circunferencia máxima inscrita; y en azul fuerte, la distancia del centro de la circunferencia máxima inscrita a las esquinas que forman las rectas tangentes a los lados de la partícula natural.	50
Figura 1.8 Fuerzas actuantes en una partícula en reposo sobre un fondo plano	52
Figura 1.9 Curva de Shields modificada.	55
Figura 1.10 Clasificación científica por capas del flujo unidireccional (las capas no están a escala; la capa exterior turbulenta abarca del 80 al 90% de la región mostrada en la figura)	57
Figura 1.11 Clasificación ingenieril por capas y rugosidad de fondo. El espesor de la subcapa laminar no está a escala	60
Figura 1.12 Dirección del flujo de agua sobre las formas de fondo, y el movimiento e estos últimos.....	61
Figura 2.1 Mapa de la Península de Yucatán y la plataforma sumergida adyacente (imagen modificada del INEGI)	68
Figura 2.2 Las 4 regiones fisiográficas en que se divide la Península de Yucatán en México (Imagen realizada a partir de la figura dada por Ward et al. (1985; pág. 3)	70
Figura 2.3-Corrientes de agua superficiales de México (Imagen elaborada con base en información dada por el INEGI; fecha de consulta 13 de julio de 2012).....	72
Figura 2.4 Variación de la temperatura del planeta. Imagen modificada del sitio web http://weather.unisys.com/archive/sst/sst-000102.gif , fechado el 13/marzo/2000, hora 10:52 am.....	74
Figura 2.5 A: Huracán Bret, 18-23 agosto 1999; B: Tormenta Tropical One, 07-08 junio 2000; C: Tormenta Tropical Larry 02-06 octubre 2003; D: Tormenta Tropical Gert 23-25 julio 2005; E: Tormenta Tropical Arlene 29 junio – 01 julio 2011; y F: Tormenta Tropical Nate 07-11 septiembre 2011 (Información del sitio web http://weather.unisys.com/hurricane/ ; fecha de consulta 25/julio/2012)	77
Figura 3.1 Localización de los puntos muestreados dentro de la región de interés.	82
Figura 3.2 Representación esquemática de las zonas de un perfil de playa	84
Figura 3.3 En el panel A, la máquina Ro –Top con algunas de las mallas cuya aberturas van desde la malla #230 (0.063 mm) hasta #25 (0.71 mm). En el panel B, las mallas con aberturas mayores, a partir de la malla # 4 (4.76 mm).....	85
Figura 3.4 Tamaños y formas diversas del material sedimentario de algunas playas de la Península de Yucatán. La distancia entre las marcas de las líneas negras corresponde a 1 mm.	86
Figura 3.5 Matraces de aforo de 100 y 50 ml	87
Figura 3.6 Báscula electrónica (izquierda) y calentador eléctrico junto con vaso de precipitado (derecha).....	88

Figura 3.7 Material sometido a “Baño María”. En las imágenes central e izquierda superiores, después del baño maría. En las mismas imágenes, además de las dos fotos inferiores, se ilustra la dilatación del agua destilada al estar el nivel del agua por encima de la marca de enrase	88
Figura 3.8 Selección de partículas sobre una retícula con aberturas de 1 mm ² . En el panel (A) se muestra la selección de partículas a través de una rutina con Matlab; en el panel (B) se ve el modo manual de selección de los granos.....	91
Figura 3.9 Disposición de las cámaras y demás herramientas para la grabación de la caída de las partículas de arena ensayadas	92
Figura 3.10 Cámara marca Fastec, modelo Hispec con la que se cuenta en el laboratorio	94
Figura 3.11 Lentes de 17 mm, 25 mm y 50 mm, de izquierda a derecha	94
Figura 4.1 Número de Reynolds (<i>Re</i>) contra el parámetro fluido – sedimento (S_s). Estos gráficos corresponden a la información de las 111 muestras de arena del estado de Quintana Roo, México.....	105
Figura 4.2 Relación entre la velocidad de caída calculada (EQ. I-ésima) y la velocidad de caída medida en el laboratorio [m.f. & f = muy fina y fina; m. = media; g. = gruesa; m.g. = muy gruesa]; resultados del Estado de Quintana Roo, México.....	108
Figura 4.3 Número de Reynolds (<i>Re</i>) contra el parámetro fluido – sedimento de las muestras de arena del estado de Yucatán, México	110
Figura 4.4 Relación W_{fcal}/W_{fmed} contra el diámetro característico (D_{50} ó d_N) de las muestras de arena del estado de Yucatán, México	113
Figura 4.5 Número de Reynolds (<i>Re</i>) contra el parámetro fluido – sedimento (S_s) para las muestras de arena del estado de Campeche, México	115
Figura 4.6 Relación W_{fcal}/W_{fmed} contra el diámetro característico (D_{50} ó d_N) de las muestras de arena del estado de Campeche, México	118
Figura 4.7 Diferencias en la morfología de los sedimentos de la Península de Yucatán. La foto de la izquierda corresponde a una muestra de Punta Sam y la de la derecha de Cancún, ambas en Quintana Roo.....	118
Figura 4.8 Parámetro de Yalin [d^*] contra la velocidad de inicio de movimiento experimental [u_{*c}]. A su vez, se han dibujado las 8 ecuaciones de la Tabla 1.9	128
Figura 4.9 Coeficiente de correlación [r], de las muestras del Estado de Quintana Roo	129
Figura 4.10 Coeficiente de correlación [r], de las muestras del Estado de Yucatán.....	130
Figura 4.11 Coeficiente de correlación [r], de las muestras del Estado de Campeche	130
Figura 4.12 Velocidad de inicio de movimiento (u_{*c}) contra el factor de forma (<i>CSF</i>) del estado de Quintana Roo	131
Figura 4.13 Velocidad de inicio de movimiento (u_{*c}) contra el factor de forma (<i>CSF</i>) del estado de Yucatán.....	132
Figura 4.14 Velocidad de inicio de movimiento (u_{*c}) contra el factor de forma (<i>CSF</i>) del estado de Campeche	133

LISTA DE SÍMBOLOS

W_f	velocidad de caída de partículas naturales de arena, en m/s
H	altura de ola propagada, en m
T	Periodo de ola, en m/s
g	aceleración de la gravedad (constante igual a 9.81 m/s ²)
H_0	altura de ola en aguas profundas, en m
D_{50}	diámetro característico de una muestra de material sedimentario que corresponde al percentil 50 dentro de la curva granulométrica, en m
d_N ó D_N	diámetro nominal el cual se define como el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen de una partícula que posee una forma irregular (o regular pero distinta de la mencionada forma), en m
a, b, c	ejes largo, intermedio y corto representativos de una partícula natural de arena, en m
ϕ	unidad phi propuesta por Krumbein (1934), adimensional
D ó d	diámetro de una partícula regular o irregular, natural (arena) o artificial (vidrio)
d_{medio}	diámetro medio o promedio de acuerdo a Folk & Ward (1957), adimensional
σ	desviación estándar de acuerdo a Folk & Ward (1957), adimensional
a_{se}	sesgo de acuerdo a Folk & Ward (1957), adimensional
k	curtosis de acuerdo a Folk & Ward (1957), adimensional
$\bar{x}_a, \sigma_a, Sk_a, K_a$	diámetro medio (m), desviación estándar (m), sesgo (1) y curtosis (1) respectivamente [método de los momentos; aritmético]
$\bar{x}_g, \sigma_g, Sk_g, K_g$	diámetro medio (m), desviación estándar (m), sesgo (1) y curtosis (1) respectivamente [método de los momentos; geométrico]
$\bar{x}_\phi, \sigma_\phi, Sk_\phi, K_\phi$	diámetro medio (1), desviación estándar (1), sesgo (1) y curtosis (1) respectivamente [método de los momentos; logarítmico]
M_G, σ_G, Sk_G, K_G	diámetro medio (1), desviación estándar (1), sesgo (1) y curtosis (1) respectivamente [mediciones gráficas; método geométrico modificado de Folk & Ward (1957)]
C_C	coeficiente de curvatura de acuerdo al SUCS, adimensional
C_U	coeficiente de uniformidad de acuerdo al SUCS, adimensional
SW	arena bien graduada, arenas con grava, con poco o nada de finos, de acuerdo al SUCS
SP	arena mal graduada, arenas con grava, con poco o nada de finos, de acuerdo al SUCS
SM	arena limosa, mezcla arena – limo, de acuerdo al SUCS
SC	arena arcillosa, mezcla arena – arcilla, de acuerdo al SUCS
S_s	densidad relativa de los sólidos de la muestra de suelo, adimensional
Δ	densidad relativa sumergida, adimensional
ρ_s	densidad del material, en kg/m ³
e	relación de vacíos, adimensional
P_{or}	porosidad, adimensional
ρ_{cas}	masa de concentración, en kg/m ³
C	volumen de concentración, adimensional
ρ_{sus}	densidad de suspensión, en kg/m ³
k_p	permeabilidad específica, en m ²
c_p	coeficiente de permeabilidad, en m/s
GP	gradiente de presión, en N/m ³
W_{mf}	velocidad mínima de licuefacción, en m/s
φ	ángulo natural de reposo del material sedimentario, en grados [°]
CSF	factor de forma del material sedimentario de acuerdo con la formula propuesta por Corey (1949)
W_m	peso total de la muestra del suelo, generalmente medida en gramos en el laboratorio

W_s	peso de los sólidos en la muestra del suelo, en gramos
W_w	peso del líquido en la muestra del suelo, en gramos
W_a	peso de los gases en la muestra del suelo, en gramos
V_m	volumen total de la muestra de suelo, en cm^3
V_s	volumen de los sólidos en la muestra del suelo, en cm^3
V_v	volumen de vacíos en la muestra del suelo, en cm^3
V_w	volumen del líquido en la muestra del suelo, en cm^3
V_a	volumen de los gases, en cm^3
γ_0	peso específico del agua destilada a 4°C y sometida a una presión atmosférica correspondiente a la del nivel medio del mar, en kg/m^3 (kilogramos fuerza)
γ_w	peso específico del agua bajo condiciones reales (local) de trabajo, en kg/m^3
γ_m	peso específico de la masa de suelo, en kg/m^3
γ_s	peso específico de los sólidos, en kg/m^3
S_m	densidad relativa de la muestra de suelo, adimensional
W_{fw}	peso del matraz con agua, en gramos
W_{fsw}	peso del matraz con agua y con el material seco (muestra de suelo)
ρ_0 ó ρ_w	densidad del agua destilada, con un valor usual de 1000 kg/m^3
ν_w	viscosidad cinemática del agua, con valor constante igual a 1×10^{-6} que corresponde a una temperatura de 20°C , en m^2/s
d_*	diámetro adimensional ó parámetro de Yalin
F_a ó F_D	fuerza de arrastre que se genera por una partícula esférica moviéndose en un fluido estacionario, en N
E	empuje de Arquímedes, en N
A	índice de flotación de Arquímedes, adimensional
C_D	coeficiente de arrastre, adimensional
Re	número de Reynolds, adimensional
P	índice de redondez de Powers (1953), adimensional
A_i	grado de angularidad de cualquier esquina de una partícula natural, adimensional
u_*	velocidad de fricción o velocidad del flujo cerca del fondo o velocidad del esfuerzo cortante en el fondo, en m/s
u_{*c}	velocidad de fricción crítica, en m/s
C_L	coeficiente de sustentación, adimensional
ψ	parámetro de Shields (1936), adimensional
ψ_{cri}	parámetro de Shields crítico, adimensional
τ_b y τ_{bc}	esfuerzo cortante en el fondo y esfuerzo cortante en el fondo crítico, respectivamente, en N/m^2
κ	constante de Von Karman igual a 0.4
k_s	rugosidad de fondo o rugosidad de Nikuradse, en m
τ	esfuerzo cortante en la capa turbulenta, en N/m^2
$u(z)$	velocidad de flujo como función de la profundidad z , en m/s
q	es el transporte de sedimentos, en $\text{m}^3/(\text{m}^*\text{s})$
H_r y L_r	altura y longitud usuales de un rizo, ambas en m
τ_b'	esfuerzo cortante efectivo
U	velocidad promedio de la corriente de flujo, en m/s
Rouse	número de Rouse, adimensional
S_*	parámetro fluido – sedimento; concepto propuesto por Madsen & Grant (1976), adimensional

INTRODUCCIÓN

"Una tonelada de ciencia no vale más que una gota de sabiduría."

Pitágoras de Samos (580 A.C. – 495 A.C.)

INTRODUCCIÓN

IMPORTANCIA DEL TRABAJO

En la ingeniería de costas y ríos los modelos de transporte de sedimentos son cada vez más utilizados para estimar cambios morfológicos bajo condiciones reinantes como extremas. En las últimas tres décadas ha cobrado una importancia fundamental para muchos países la solución de problemas de erosión de sus litorales, en buena medida por una deficiente planeación y construcción de su infraestructura así como del aumento del nivel del mar.

A este respecto, recientemente en México se realizaron dos programas de alimentación artificial de arenas:

- El primero de ellos a consecuencia de la pérdida casi total de los arenales en Cancún, Quintana Roo, después del paso del huracán Wilma en octubre de 2005 motivó el bombeo y traslado, de enero a mayo de 2006, de casi tres millones de metros cúbicos de arena, con un costo de más de trescientos millones de pesos.
- Entre otros, en virtud que el material seleccionado no poseía las características mecánicas y físicas deseables, en 2010 se tuvieron que verter otros 5 millones de metros cúbicos de arena ya que las pérdidas de playa seca de nuevo volvieron a poner en peligro a la infraestructura hotelera y por ende la actividad turística.
- No obstante que en la literatura especializada es posible encontrar reportes sobre las características mecánicas de sedimentos, la existencia de trabajos orientados a partículas de tipo biogénico es muy limitado, las cuales son muy comunes en zonas tropicales como es el caso de la Península de Yucatán.

Conceptualmente las técnicas para la caracterización de los sedimentos han sido muy estudiadas y existe una gran diversidad de manuales y procedimientos para su realización, sin embargo con los cambios de tecnología, como la aparición de cámaras de video de alta resolución y/o alta velocidad, estas técnicas se han tenido que ir adaptando.

En este trabajo se realiza una recapitulación sobre la caracterización mecánica y física de áridos, tal como la caracterización granulométrica, evaluación de la densidad de una muestra de material y la determinación de la velocidad de caída de las partículas y su interrelación con otros parámetros.

Para el presente trabajo de investigación se utilizaron arenas biogénicas, no muy estudiadas en la literatura especializada, quizás por ser solo comunes en zonas tropicales, y que para México tienen una importancia primordial por su valor económico y ecológico. En particular, el material utilizado proviene de varias playas ubicadas a lo largo de la Península de Yucatán.

Es conveniente mencionar que la principal diferencia del material estudiado es la mezcla entre el material de roca caliza y el material biogénico que proviene de los arrecifes de coral y conchuelas, teniendo su mayor presencia de estos últimos frente a las playas del estado de Quintana Roo, esto en relación al conocimiento que se tiene de arenas de origen terrígeno.

La recolección del material inició a partir del año 2006 y continúa hasta la fecha (2012) y ha sido realizada por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En su mayoría

se ha aprovechado la oportunidad en las diferentes campañas de campo efectuadas en la península, para extraer muestras del material que conforma las playas de esa zona del país y que ha tenido como objetivo generar una base de datos sobre las características físicas y mecánicas del material sedimentario, y que esta información pueda utilizarse en estudios más específicos sobre la problemática que existe, por ejemplo, en la erosión de las playas que están sufriendo algunas playas de los estados de Yucatán y Quintana Roo.

La principal motivación del presente trabajo es que sería poco acertado elaborar estudios más especializados tratando de resolver la problemática de erosión que actualmente persiste en la zona de estudio sin antes calcular o evaluar variables físicas importantes como son la velocidad de caída y la velocidad de inicio de movimiento, aún con las hipótesis y restricciones que algunas ecuaciones tienen para valorar estas dos variables. Precisamente el comprender las bases con las cuales han sido elaboradas dichas expresiones y visualizar el alcance que tiene una u otra ecuación puede llevar a una mejor comprensión y abordar de mejor manera el problema que se tenga enfrente.

Con este trabajo se pretende dar respuesta a las preguntas más fundamentales sobre el análisis físico y mecánico de sedimento, así como ofrecer una caracterización de los sedimentos de la Península de Yucatán. Algunas de esas preguntas serían: ¿Por qué y para qué realizar un análisis sedimentológico? ¿Es posible aplicar, con las nuevas tecnologías una mejora a las técnicas realizadas con anterioridad? ¿Para qué o por qué es importante calcular la velocidad de caída del sedimento y/o de inicio de movimiento? A partir de estas cuestiones simples y algunas otras precisiones que se irán comentando a lo largo de este trabajo, a continuación se presenta una respuesta a una de estas preguntas, para poseer una base y formular el objetivo general y las metas particulares de esta tesis.

¿Para qué o por qué es importante calcular la velocidad de caída?

Esta variable física, en el contexto de transporte de sedimentos, ya sea en ríos o en playas de arena es muy importante [Cheng (1997; pág. 149); Camenen (2007; pág. 229); Cheng (2008; pág. 1136)] y que como lo mencionan Jiménez & Madsen (2003, pág.- 70): “un error en la estimación de la velocidad de caída puede significar en un factor de tres o más en el cálculo del transporte de sedimentos por suspensión. A pesar de su importancia, actualmente es muy difícil obtener su valor en sitio, y en su mayoría estos valores se obtienen en el laboratorio con algunas condiciones controladas, y a veces, se obtiene con fórmulas empíricas”.

Ahrens (2000), presenta una excelente revisión de la importancia de este parámetro y señala cuándo es relevante su aplicación. Aquí se ha tomado ese fragmento del autor para introducir todavía más al lector en temas de investigación donde se ve involucrada la velocidad de caída W_f :

“Dean (1973) determinó que la velocidad de caída participa en el siguiente parámetro (adimensional) $H / W_f T$ el cual es utilizado para determinar las características de un perfil de playa sometidas a un oleaje monocromático escalado en ensayos de laboratorio (*también puede verse a Wright & Short, 1984; pág. 108*); que el parámetro (adimensional) $\pi W_f / gT$ es utilizado para realizar una distinción entre la condición de acumulación y la condición de erosión de material, en donde H es la altura de ola, T es el periodo de ola y g es la aceleración de la gravedad. Dalrymple & Thompson (1976) encontraron que este parámetro puede ser usado para predecir la pendiente de la cara expuesta de la playa. Wright & Short (1984) desarrollaron un amplio sistema de clasificación morfológico de playa el cual utiliza el parámetro de velocidad de caída. Kriebel et al. (1986) dirigió en un tanque de oleaje un estudio extendiendo la, entonces, reciente investigación realizada por Dean (1973). Este estudio mostró que la velocidad de caída proporciona una relación de escala útil para la evolución de un perfil de playa bajo condiciones erosivas pero no para condiciones de acumulación. Dean (1987) mostró que el parámetro de

escala en el perfil de equilibrio podría ser calculado como una función de la velocidad de caída [*sobre esto, véase por ejemplo Ahrens (2003, pág. 146)*]. Kraus et al. (1991) dio a conocer cómo un número simple de parámetros, alguno de ellos conteniendo a la velocidad de caída, puede ser utilizado tanto en campo como en laboratorio a gran escala para hacer la distinción entre perfiles erosivo/acumulativo de playa. Dalrymple (1992) siguiendo esta línea, mostró cómo un parámetro simple puede distinguir entre las condiciones de acumulación y erosión para escalas grandes en playas en laboratorio. El parámetro de discriminación del perfil de Dalrymple está definido

como: $P = \frac{gH_0^2}{W_f^3T}$, el cual muestra la fuerte influencia de la velocidad de caída en perfiles de playa, en donde H_0

es la altura de ola en aguas profundas [*Nota: no confundir la letra P de esta ecuación con el concepto de redondez que más adelante en esta tesis se explica, aquí se ha puesto de esta forma por el hecho de respetar la nomenclatura que ha usado el investigador Ahrens*]. Ahrens & Seelig (1996) desarrollaron un modelo que utiliza el parámetro velocidad de caída como un sustituto del parámetro de escala – rotura de Battjes (1974)”.

OBJETIVO GENERAL

Presentar, con base en evidencias experimentales, la relevancia que tienen las características físicas de los granos de arena en la determinación de la velocidad de caída y del inicio de movimiento. Comparar los resultados de laboratorio con expresiones disponibles en la literatura y emitir recomendaciones respecto de su aplicación en materiales similares a los de la Península de Yucatán.

METAS PARTICULARES

Como metas u objetivos particulares, se tienen los siguientes:

- I. Comprender la importancia que tiene el medir en laboratorio la velocidad de caída con una precisión adecuada.
- II. Realizar un análisis para determinar la relación del comportamiento mecánico y físico de las partículas naturales con las velocidades de caída y de inicio de movimiento. En la primera utilizando los valores obtenidos en laboratorio.
- III. Consolidar, como una aportación más técnica que científica, una metodología compuesta por una serie de operaciones sencillas, pero no por ellos pierdan el carácter de delicadas, para realizar un buen análisis sedimentológico.
- IV. Determinar las ecuaciones que mejor representen los valores de velocidad de caída, variable que participa de manera importante en otros estudios.

METODOLOGIA

Las operaciones o pasos que se llevaron acabo en el laboratorio, fueron las siguientes:

- I. Cálculo de la densidad relativa de las muestras de material de acuerdo con Juárez & Rico (2005), mencionando algunos detalles muy importantes dados por Ruíz (2010) y que se precisan a lo largo del presente trabajo.

- II. Realización del análisis granulométrico a través del método tradicional (con ayuda de la máquina Ro – Tap).

Los pasos I y II se realizaron en la mayoría de los casos de forma simultánea. Los principales valores fueron (la densidad relativa S_s del primero y el diámetro característico de la muestra D_{50} son variables fundamentales para cualquier análisis de velocidad de caída y de inicio de movimiento.

- III. Se obtuvo el ángulo natural de reposo de las muestras.
IV. Se calculó la velocidad de caída de varias partículas por muestra.
V. Se midió la velocidad de inicio de movimiento de 10 muestras de las 140 que se utilizaron para determinar la velocidad de caída.

Complementariamente se realizó la aplicación de una serie de ecuaciones básicas, algunas de ellas provenientes de mecánica de suelos, otras no tan comunes, y más una serie de tablas que permiten realizar una clasificación sedimentológica a partir de los resultados de este conjunto de expresiones, el resultado de este proceso fue la generación de una base de datos que incluye los resultados de cada una de las 140 muestras.

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El presente trabajo está constituido principalmente por 5 partes, comenzando en el capítulo 1 por una revisión de las ecuaciones existentes para determinar las características físicas y mecánicas de las muestras de arena, además de una explicación breve de cada una de ellas.

Por otra parte, se describe los rasgos importantes sobre la geología, morfología, vientos, hidrología y clima marítimo de la península para abordar y comprender mejor el esfuerzo realizado en este trabajo. Esta información está reunida en el capítulo 2.

Con base en los dos capítulos anteriores, se incluye una explicación de los pasos llevados a cabo en las diferentes etapas de cálculo, desde la extracción de las muestras de arena realizadas en las diferentes campañas de campo. Después se detallan las operaciones en laboratorio para medir algunas de las propiedades físicas del material sedimentario, información que resulta fundamental para calcular el resto de las características de las muestras de arena. Y finalmente, la forma en cómo se realizó el cálculo matemático de las dos velocidades: de caída y de inicio de movimiento. Esto es el capítulo 3.

En un capítulo 4, se ha reunido parcialmente los resultados en gráficas, además de explicar con mayor amplitud dichos resultados. La otra parte de información dispuesta en figuras, se decidió llevarla a los anexos para facilitar la lectura de este trabajo.

Finalmente, se tiene como última parte, las conclusiones sobre este análisis, acompañado de algunas reflexiones y de algunas propuestas que pueden ser tratadas como futuras líneas de investigación sobre este tema.

CAPÍTULO I

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SEDIMENTOS

“Los pescadores saben que el mar es peligroso y la tormenta, terrible. Pero este conocimiento no les impide hacerse a la mar.”

Vincent Willem Van Gogh (1853 – 1890)

1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SEDIMENTOS

1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SEDIMENTOS

En la ingeniería de costas y ríos, como en la geología, la sedimentología es la rama que se encarga entre otros del análisis y caracterización de las propiedades físicas del material sedimentario.

En el caso específico de la Península de Yucatán, se ha hecho una revisión en la literatura sobre las ecuaciones que potencialmente pueden permitir el cálculo de las propiedades físicas del material que conforman a las playas de dicha región geográfica. En particular, el material en cuestión es arena calcárea, ya que las fuentes de suministro son los arrecifes de coral (Sistema Arrecifal Mesoamericano, presente en Quintana Roo) y la propia península, ya que ésta constituye una única gran roca caliza.

Sobre las ecuaciones que a continuación se hace mención, ya fueron citados en algunos trabajos realizados previos del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, principalmente por Ruíz (2009), Alcérreca (2009), Del Valle (2010), Ruíz (2010), Alcérreca (2011) y Chávez (2011).

1.1.1. Tamaño del sedimento

El tamaño representativo de una muestra de sedimento ha sido por demás documentado. Prácticamente en cualquier fuente de información sobre temas de sedimentología casi siempre hay un apartado dedicado al estudio y cálculo del tamaño de sedimento según sea el fin de cada estudio. Por citar algunas referencias sobre este tema, están Folk & Ward (1957); Inter-Agency Committee(1957, report No. 12); Pettijohn & Potter & Siever (1973, pág.68); Folk (1974, pág. 3); McLaren & Bowles (1985); Gao & Collins (1992); Gao et al. (1994); Gao (1996); Soulsby (1997, pág. 28); Blott & Pye (2001); CEM (2002, Coastal Sediment Properties); Le Roux (2005); Poizot & Méar & Garnaud (2006); Plomaritis & Paphitis & Collins (2008); Poizot & Méar & Biscara (2008), entre muchos otros.

Lo que finalmente se requiere es cuantificar de alguna manera el tamaño del sedimento que se esté tratando, para lo cual se han elaborado diferentes definiciones y técnicas para realizar la medición. Como definiciones más comunes, se tienen lo que se conoce como diámetro nominal, diámetro de malla o tamiz y diámetro de caída estándar. Algunas otras que no son muy usuales, al menos cuando se esté abordando una medición simple y rápida sobre el tamaño de sedimento, se tienen definiciones como el diámetro de superficie, diámetro de arrastre, diámetro de Stokes y diámetro de superficie específica. Para estas últimas definiciones, se sugiere revisar la tabla 3.1, pág. 69 de Pettijohn & Potter & Siever (1973).

En este caso particular, el cálculo del tamaño de sedimento de las muestras extraídas en las campañas de campo realizadas a algunas de las playas de la Península de Yucatán se obtuvo a través del diámetro de tamiz D_{50} , y también se determinó con la definición de diámetro nominal d_N (o D_N). El primer diámetro se calculó después de realizado el cribado del material en una máquina Ro – Top y obtenida la curva granulométrica a partir de una interpolación realizada con polinomios de Hermite (Ruíz, 2007a; 2009). El segundo diámetro se obtuvo a partir de haber realizado la medición de los tres ejes principales de algunas partículas individuales de arena. En promedio fueron 10 partículas por muestra de material.

Como una tercera forma de cuantificar el tamaño del sedimento, cuando se realizaron las pruebas de velocidad de caída, se midió el diámetro intermedio de cada partícula ensayada. Para ello, se tomó como base el

diámetro cincuenta como dato de partida, y a través del programa Matlab®, se midió esta dimensión considerándola como su diámetro representativo o característico. La razón de esto fue considerar aquel diámetro máximo que apenas pueda pasar la abertura de cada uno de los tamices dispuestos en la máquina Ro – Top. Con base en lo anterior, es evidente que el eje menor de cada partícula individual pasaría a través de las aberturas de los tamices, lo cual se reduce a considerar la máxima proyección en planta de cada partícula, definida a partir de los otros dos ejes, el largo e intermedio. Como se explica más adelante en el capítulo de velocidad de caída, el eje intermedio (eje *b*), sería la máxima longitud que apenas pudiera pasar las aberturas de las mallas o tamices, descartando como diámetro característico o representativo de cada partícula el eje largo (eje *a*) del grano de arena. Aunque existen las definiciones sobre el cálculo del tamaño del sedimento ya mencionadas en el párrafos anteriores, el hecho de considerar al diámetro intermedio de las partículas como el diámetro característico de un conjunto de partículas (y en todo caso, de una muestra de material), no es la primera vez que se realiza. En la revisión que se realizó en la literatura, Baba & Komar (1981b, pág. 633) se menciona a este diámetro intermedio como el diámetro representativo de los granos estudiados en aquel trabajo. Con base en sus experimentos, los investigadores antes mencionados determinaron que el diámetro nominal era prácticamente igual al diámetro intermedio de cada partícula individual ensayada.

Con base en la experiencia adquirida en los experimentos realizados con las muestras de arena antes descritas, para medir o cuantificar el tamaño de sedimento, es conveniente considerar alguna de las tres medidas (o si es posible las tres mediciones) sobre el diámetro característico del material sedimentario, es decir, el diámetro de tamiz (D_{50}), el diámetro nominal (d_N), y/o el diámetro intermedio de un conjunto de partículas que promediadas sus mediciones pudiera considerarse como el diámetro representativo de la muestra de material.

A partir de los diferentes estimadores del tamaño del sedimento, es posible clasificarlo de acuerdo a algunas escalas que existen: la escala de la ASTM (American Society for Testing and Methods), la escala Udden – Wentworth, y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS por sus siglas en inglés).

Como lo mencionan Pettijohn & Potter & Siever (1973), el tamaño del sedimento es una variable continua, lo cual hace necesario contar con una escala bastante buena. Udden en 1898 cercanamente reconoció la necesidad con una escala basado en potencias de 2. La escala ideal para ello fue una escala logarítmica, ya que resuelve el problema de la distribución de los tamaños del material sedimentario. Wentworth (1922) modificó la escala de Udden, la cual terminó de consolidarse con la creación de la escala phi desarrollada por Krumbein (1934). La escala de Krumbein está definida algebraicamente como

$$\phi = -\log_2(d) = -3.322\log_{10}(d) \quad [1.1]$$

En donde *d* es el diámetro en cuestión, en milímetros y ϕ simplemente se denomina como unidades phi, adimensional.

A partir de esta escala, Folk & Ward (1957), es posible proponer expresiones como función de esta variable phi, las cuales determinan los parámetros estadísticos de la distribución del tamaño del sedimento (media, mediana, desviación estándar, sesgo y curtosis). Estas ecuaciones que a continuación se presentan, son las que originalmente propusieron Folk & Ward (1957), y además pueden consultarse en Pettijohn & Potter & Siever (1973), Folk (1974), Stevens & Hubbell (1986), CEM (2002, Coastal Sediment Properties), y citados en Ruíz (2007a; 2009), Del Valle (2010) y Ruíz (2010).

$$d_{medio} = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad [1.2]$$

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4.0} - \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad [1.3]$$

$$a_{se} = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad [1.4]$$

$$k = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad [1.5]$$

En donde d_{medio} es el diámetro medio o promedio, σ es la desviación estándar, a_{se} es el sesgo y k la curtosis.

En Blott & Pye (2001) se presenta una tabla que en dado momento pudiera adoptarse. Aquí se cita dicha tabla debido a las diferentes opciones que se dan para poder clasificar al sedimento (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Fórmulas estadísticas utilizadas en el cálculo del tamaño de partículas sedimentarias y la terminología descriptiva sugerida, modificada de Krumbein & Pettijohn (1938) y Folk & Ward (1957) (f es la frecuencia en porcentaje; m es el punto medio de cada intervalo de clase en unidades métricas (m_m) o unidades phi (m_ϕ); P_x y ϕ_x son el diámetro de partícula, en unidades métricas y phi, respectivamente, donde el subíndice x representa el percentil acumulativo)

(a) Aritmético, método de los momentos

Media	Desviación Estándar	Sesgo	Curtosis
$\bar{x}_a = \frac{\sum f m_m}{100}$	$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum f (m_m - \bar{x}_a)^2}{100}}$	$Sk_a = \frac{\sum f (m_m - \bar{x}_a)^3}{100\sigma_a^3}$	$K_a = \frac{\sum f (m_m - \bar{x}_a)^4}{100\sigma_a^4}$

(b) Geométrico, método de los momentos

Media	Desviación Estándar	Sesgo	Curtosis
$\bar{x}_g = \exp\left(\frac{\sum f \ln(m_m)}{100}\right)$	$\sigma_g = \exp\left(\sqrt{\frac{\sum f (\ln(m_m) - \ln(\bar{x}_g))^2}{100}}\right)$	$Sk_g = \frac{\sum f (\ln(m_m) - \ln(\bar{x}_g))^3}{100 \ln(\sigma_g^3)}$	$K_g = \frac{\sum f (\ln(m_m) - \ln(\bar{x}_g))^4}{100 \ln(\sigma_g^4)}$

Tabla 1.1 Continuación

Desviación estándar		Sesgo		Curtosis	
Muy bien clasificado	<1.27				
Bien clasificado	1.27 – 1.41	Sesgo muy fino	< -1.30	Muy platicúrtico	< 1.70
Moderadamente bien clasificado	1.41 – 1.62	Sesgo fino	-1.30 a -0.43	Platicúrtico	1.70 – 2.55
Moderadamente clasificado	1.62 – 2.00	Sesgo simétrico	-0.43 a 0.43	Mesocúrtico	2.55 – 3.70
Mal clasificado	2.00 – 4.00	Sesgo grueso	0.43 a 1.30	Leptocúrtico	3.70 – 7.40
Muy mal clasificado	4.00 – 16.00	Sesgo muy grueso	> 1.30	Muy leptocúrtico	> 7.40
Extremadamente mal clasificado	> 16.00				

(c) Logarítmico, método de los momentos

Media	Desviación Estándar	Sesgo	Curtosis
$\bar{x}_\phi = \frac{\sum f m_\phi}{100}$	$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^2}{100}}$	$Sk_\phi = \frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^3}{100\sigma_\phi^3}$	$K_\phi = \frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^4}{100\sigma_\phi^4}$

Desviación estándar		Sesgo		Curtosis	
Muy bien clasificado	<0.35				
Bien clasificado	0.35 – 0.50	Sesgo muy fino	> 1.30	Muy platicúrtico	< 1.70
Moderadamente bien clasificado	0.50 – 0.70	Sesgo fino	0.43 a 1.30	Platicúrtico	1.70 – 2.55
Moderadamente clasificado	0.70 – 1.00	Sesgo simétrico	-0.43 a 0.43	Mesocúrtico	2.55 – 3.70
Mal clasificado	1.00 – 2.00	Sesgo grueso	-0.43 a -1.30	Leptocúrtico	3.70 – 7.40
Muy mal clasificado	2.00 – 4.00	Sesgo muy grueso	< 1.30	Muy leptocúrtico	> 7.40
Extremadamente mal clasificado	> 4.00				

Tabla 1.1 Continuación

(d) Logarítmico, original de Folk & Ward (1957), mediciones gráficas

Media	Desviación Estándar	Sesgo	Curtosis
$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$	$\sigma_l = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4.0} - \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$	$Sk_l = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$	$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$

	Desviación estándar	Sesgo	Curtosis
Muy bien clasificado	<0.35		Muy platicúrtico < 0.67
Bien clasificado	0.35 – 0.50	Sesgo muy fino 0.3 a 1.0	Platicúrtico 0.67 – 0.90
Moderadamente bien clasificado	0.50 – 0.70	Sesgo fino 0.1 a 0.3	Mesocúrtico 0.90 – 1.11
Moderadamente clasificado	0.70 – 1.00	Sesgo simétrico 0.1 a -0.1	Leptocúrtico 1.11 – 1.50
Mal clasificado	1.00 – 2.00	Sesgo grueso -0.1 a -0.3	Muy leptocúrtico 1.50 – 3.00
Muy mal clasificado	2.00 – 4.00	Sesgo muy grueso -0.3 a -0.1	Extremadamente leptocúrtico > 3.00
Extremadamente mal clasificado	> 4.00		

(e) Geométrico, modificado, Folk & Ward (1957), mediciones gráficas

Media	Desviación Estándar	Sesgo	Curtosis
$M_G = \exp\left(\frac{\ln P_{16} + \ln P_{50} + \ln P_{84}}{3}\right)$	$\sigma_G = \exp\left(\frac{\ln P_{16} - \ln P_{84}}{4.0} - \frac{\ln P_5 - \ln P_{95}}{6.6}\right)$	$Sk_G = \frac{\ln P_{16} + \ln P_{84} - 2(\ln P_{50})}{2(\ln P_{84} - \ln P_{16})} + \frac{\ln P_5 + \ln P_{95} - 2(\ln P_{50})}{2(\ln P_{95} - \ln P_5)}$	$K_G = \frac{\ln P_5 - \ln P_{95}}{2.44(\ln P_{25} - \ln P_{75})}$

Tabla 1.1 Continuación

Desviación estándar		Sesgo		Curtosis	
Muy bien clasificado	<1.27			Muy platocúrtico	< 0.67
Bien clasificado	1.27 – 1.41	Sesgo muy fino	-0.3 a -1.0	Platocúrtico	0.67 – 0.90
Moderadamente bien clasificado	1.41 – 1.62	Sesgo fino	-0.1 a -0.3	Mesocúrtico	0.90 – 1.11
Moderadamente clasificado	1.62 – 2.00	Sesgo simétrico	-0.1 a 0.1	Leptocúrtico	1.11 – 1.50
Mal clasificado	2.00 – 4.00	Sesgo grueso	0.1 a 0.3	Muy leptocúrtico	1.50 – 3.00
Muy mal clasificado	4.00 – 16.00	Sesgo muy grueso	0.3 a 1.0	Extremadamente leptocúrtico	> 3.00
Extremadamente mal clasificado	> 16.00				

El CEM (Coastal Engineering Manual) también presenta una clasificación de la distribución de los tamaños del material sedimentario en base a las ecuaciones originales de Folk & Ward (1957). Al final esta clasificación fue la adoptada para su aplicación en los áridos de la Península de Yucatán (ver Tabla 1.2)

Adicionalmente, se calcularon los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c), de acuerdo con el SUCS, ambos coeficientes adimensionales:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad [1.6]$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [1.7]$$

Estos últimos coeficientes se determinaron con el propósito de dar la clasificación correspondiente de acuerdo con el SUCS, tal como lo realizó Ruíz (2009). En la Tabla 1.3 y Tabla 1.4 se presentan las diferentes clasificaciones acerca del tamaño de material sedimentario que se han utilizado en trabajos previos a éste.

Tabla 1.2 Clasificación de la distribución de tamaños de material sedimentario del CEM (2002, Coastal Sediment Properties), como función de la escala Phi propuesta por Krumbein en su trabajo de 1934, [citada también en Ruíz (2007a; 2009)].

Rango en la escala Phi (ϕ)	Desviación estándar (σ)
	Descripción
<0.35	Muy buena clasificación
0.35 – 0.50	Buena clasificación
0.50 – 0.71	Moderadamente bien clasificada
0.71 – 1.00	Clasificación moderada
1.00 – 2.00	Clasificación pobre
2.00 – 4.00	Clasificación muy pobre
> 4.00	Clasificación extremadamente pobre
	Sesgo (a_{se})
< -0.3	Sesgo muy grueso
-0.3 – -0.1	Sesgo grueso
-0.1 – 0.1	Cercanamente simétrico
0.1 – 0.3	Sesgo fino
> 0.3	Sesgo muy fino
	Curtosis (k)
< 0.65	Muy platicúrtico (sinónimo de plano)
0.65 – 0.90	Platicúrtico
0.90 – 1.11	Mesocúrtico
1.11 – 1.50	Leptocúrtico
1.50 – 3.00	Muy leptocúrtico
> 3.00	Extremadamente leptocúrtico

Tabla 1.3 Clasificación del tamaño del sedimento de acuerdo con la ASTM y Wentworth, tomando en cuenta los límites numéricos de los dos criterios internacionales y estándar: ISO – Ginebra, Suiza y la ASTM [Esta tabla se elaboró consultando las siguientes referencias: Pettijohn & Potter & Siever (1973, pág. 71), CEM (2002, Coastal Sediment Properties), Ruíz (2007a), Del Valle (2010, pág. 65), Alcérrecá (2011, pág. 22), USA Standard Testing Sieves ASTM Specifications E 11 – 04]

Clasificación ASTM Standard D 2487 - 92	Designación de tamiz				Clasificación Udden – Wentworth
	ISO Ginebra, Suiza (mm) ^a	Alternativa (ASTM)	ASTM (mm) ^b	Phi (φ)	
Bloque (Boulder)	---	---	4096	-12.00	Bloque
	---	---	1024	-10.00	
	300	12"	256	-8.00	
Cantos (Cobble)	125	5"	128	-7.00	Canto grande
	106	4.24"	107.64	-6.75	Canto pequeño
	100 #	4"	101.6	-6.67	
	90	3.5"	90.51	-6.50	
	75	3"	76.11	-6.25	
Grava gruesa	63	2.5"	64	-6.00	Guijarro muy grande
	53	2.12"	53.82	-5.75	
	50 #	2"	50.8	-5.67	
	45	1.75"	45.26	-5.50	
	37.5	1.5"	38.05	-5.25	
	31.5	1.25"	32	-5.00	Guijarro grande
	26.5	1.06"	26.91	-4.75	
	25 #	1.00"	25.4	-4.67	
	22.4	7/8"	22.63	-4.50	
	19	3/4"	19.03	-4.25	
Grava fina	16	5/8"	16	-4.00	Guijarro medio
	13.2	.530"	13.45	-3.75	

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SEDIMENTOS

	12.5 #	1/2"	12.7	-3.67	
	11.2	7/16"	11.31	-3.50	
	9.5	3/8"	9.51	-3.25	
	8	5/16"	8	-3.00	
	6.7	.265"	6.73	-2.75	
	6.3 #	1/4"	6.35	-2.67	
	5.6	No 3 ½	5.66	-2.50	
	4.75	No 4	4.76	-2.25	
Arena gruesa	4	No 5	4	-2.00	Guijarro pequeño
	3.35	No 6	3.36	-1.75	
	2.8	No 7	2.83	-1.50	
	2.36	No 8	2.38	-1.25	
	2	No 10	2	-1.00	
Arena media	1.7	No 12	1.68	-0.75	Arena muy gruesa
	1.4	No 14	1.41	-0.50	
	1.18	No 16	1.19	-0.25	
	1	No 18	1	0.00	
	0.85	No 20	0.84	0.25	Arena gruesa
	0.71	No 25	0.71	0.49	
	0.6	No 30	0.59	0.76	
	0.5	No 35	0.5	1.00	
Arena fina	0.425	No 40	0.42	1.25	Arena media
	0.355	No 45	0.354	1.50	
	0.3	No 50	0.297	1.75	

	0.25	No 60	0.25	2.00	Arena fina
	0.212	No 70	0.21	2.25	
	0.18	No 80	0.177	2.50	
	0.15	No 100	0.149	2.75	
	0.125	No 120	0.125	3.00	
	0.106	No 140	0.105	3.25	
	0.09	No 170	0.088	3.51	
	0.075	No 200	0.074	3.76	
Finos	0.063	No 230	0.0625	4.00	Limo grueso
	0.053	No 270	0.0526	4.25	
	0.045	No 325	0.0442	4.50	
	0.038	No 400	0.0372	4.75	
	0.032	No 450	0.0312	5.00	
	0.025 #	No 500	---	5.32	
	0.02 #	No 635	---	5.64	
	---	---	0.0156	6.0	Coloides
	---	---	0.0078	7.0	
	---	---	0.0039	8.0	
	---	---	0.00195	9.0	
	---	---	0.00098	10.0	
	---	---	0.00049	11.0	
	---	---	0.00024	12.0	
	---	---	0.00012	13.0	
	---	---	0.000061	14.0	

Notas de la Tabla 1.3:

^a Se observa que el objetivo de estos números es tener valores más prácticos en la abertura de las mallas.

^b Abertura de las mallas obtenidas a partir de tomar al milímetro como punto de partida y establecer subdivisiones utilizando la razón 2 o ½ (la primera en orden creciente y la segunda en orden decreciente). Al hacerlo aparecen los números irracionales que se aprecian en la Tabla 1.3 la cual obedece a una progresión geométrica y no aritmética (raíz cuadrada del producto de los extremos).

#estos tamices no están incluidos en las series estándar, pero los mismos se han incluido debido a su uso frecuente (USA Standard Testing Sieves ASTM Specifications E 11 – 04). En azul se ha calculado su valor en milímetros que le correspondería en la escala de la ASTM, así como en la escala Phi para estos tamices en particular.

Tabla 1.4 Clasificación para el caso en que el material sedimentario es arena, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS por sus siglas en español; USCS por sus siglas en inglés)

Arenas limpias (menos del 5% de finos)

W	Arena bien graduada, arenas con grava, con poco o nada de finos	Cuando $C_u > 6$ y $1 < C_c < 3$
P	Arenas mal graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos	Cuando no satisface las condiciones de SW

Arenas con finos (con más del 12% de finos)

M	Arena limosa, mezcla arena – limo	^q Es necesario que los límites de Attenberg se localicen por debajo de la línea A en la carta de plasticidad, o que el Índice de Plasticidad sea menor a 4
C	Arena arcillosa, mezcla arena – arcilla	^q Se requiere que los límites de Attenberg estén por arriba de la línea A y además el Índice de Plasticidad sea mayor a 7

^q Esta valoración sobre estos límites en ningún momento se calcularon en el material extraído de las playas de la Península de Yucatán. En todo momento, los coeficientes de uniformidad y de curvatura clasificaron a las muestras como arenas limpias. Esta tabla se elaboró con ayuda de las especificaciones del SUCS y de Juárez & Rico (2005, tomo I)

1.1.2. Análisis Granulométrico

La curva granulométrica suele dibujarse de tal manera que en el eje de las ordenadas (eje vertical) se coloquen porcentajes, mientras que en el eje de las abscisas (eje horizontal) se dispongan los valores de los tamaños del material sedimentario. Las ordenadas se refieren al porcentaje en peso de las partículas menores que el tamaño correspondiente (Juárez & Rico, 2005). Generalmente el eje horizontal suele dibujarse en escala logarítmica pues ésta permite una mejor visualización de la distribución de los tamaños del material, que si se dibujara dicho eje con una escala natural (aritmética). De esta manera, se logra elaborar una gráfica en lo que se le conoce como papel semi-logarítmico, porque el eje vertical está con una escala aritmética, mientras que, como ya se dijo, el eje horizontal está dispuesto con una escala logarítmica.

Así, la curva granulométrica facilita la determinación visual del o los tamaños de partículas que conforman la muestra, en este caso, de las playas; por ejemplo, una playa constituida por partículas de un solo tamaño resultará en curvas más inclinadas, teniendo como frontera superior una línea recta, comparado con playas que estén conformadas por partículas de muchos tamaños, resultando en curvas menos inclinadas. El análisis granulométrico es importante porque los criterios de aceptación de materiales para ser utilizados en diversas aplicaciones de ingeniería (diques en mar, presas en tierra, capas y subcapas en carreteras, etc) dependen de este análisis.

El proceso mecánico llevado a cabo sobre los áridos de la Península de Yucatán fue a través del uso de la máquina Ro – Top. Sobre su uso es un aparato eléctrico el cual posee unas varillas a la cual se sujetan los tamices ya dispuestos en escalada y simplemente la máquina vibra para que el material pueda moverse a través de las mallas, quedando atrapado parte del material en cada una de éstas. En la Figura 1.1 se aprecia una de las 140 curvas que se han elaborado de las muestras de arena de playa. En el apéndice B de Ruíz (2009) puede consultarse las curvas granulométricas del Estado de Quintana Roo.

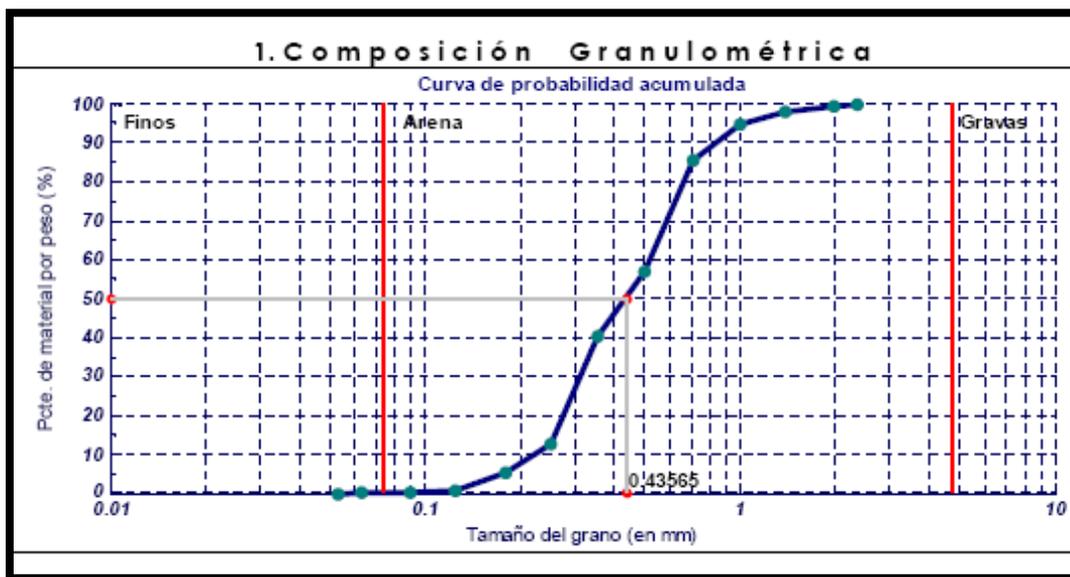


Figura 1.1 Curva granulométrica del sitio Bahía de Tortugas (coordenadas geográficas 19.096° N, -91.036°O), en el Estado de Campeche, México.

1.2. PROPIEDADES DE VOLUMEN

El estudio de las propiedades volumétricas de los sedimentos es de gran utilidad en las aplicaciones de ingeniería costera. La selección de los medios de dragado, disposición y diseño de rellenos de playa depende en buena medida de propiedades, como porosidad, densidad, permeabilidad y ángulo de reposo de los sedimentos. Igualmente las propiedades volumétricas de los sedimentos son consideradas esenciales en otras ramas de la ingeniería, como en la geotecnia.

En este caso en particular, se han calculado las siguientes propiedades:

1. Densidad relativa, S_s [1]
2. Densidad relativa sumergida, Δ [1]
3. Densidad del material, ρ_s [kg/m³]
4. Relación de vacíos, e [1]

5. Porosidad, P_{or} [1]
6. Masa de concentración, ρ_{cas} [kg/m³]
7. Volumen de concentración, C [1]
8. Densidad de suspensión, ρ_{sus} [kg/m³]
9. Permeabilidad específica, k_p [m²]
10. Coeficiente de permeabilidad, c_p [m/s]
11. Gradiente de presión, GP [N/m³]
12. Velocidad mínima de licuefacción, W_{mf} [m/s]
13. Ángulo natural de reposo del material sedimentario, φ [°]
14. Factor de forma del material sedimentario, CSF [1]

De las 14 propiedades enumeradas antes, es posible clasificarlas en 4 grupos: Propiedades Físicas del Sedimento, Relaciones Fundamentales de un Suelo, Propiedades del Mezclado Agua – Sedimento y Propiedades de Forma. En el primer grupo están las propiedades del 1 al 3 de la lista anterior; en el segundo grupo están las características 4 y 5; en el grupo tres corresponden del 6 al 12; y finalmente en el cuarto grupo se clasifican las de número 13 y 14.

1.2.1. Propiedades físicas del sedimento

1.2.1.1. Densidad relativa S_s [1]

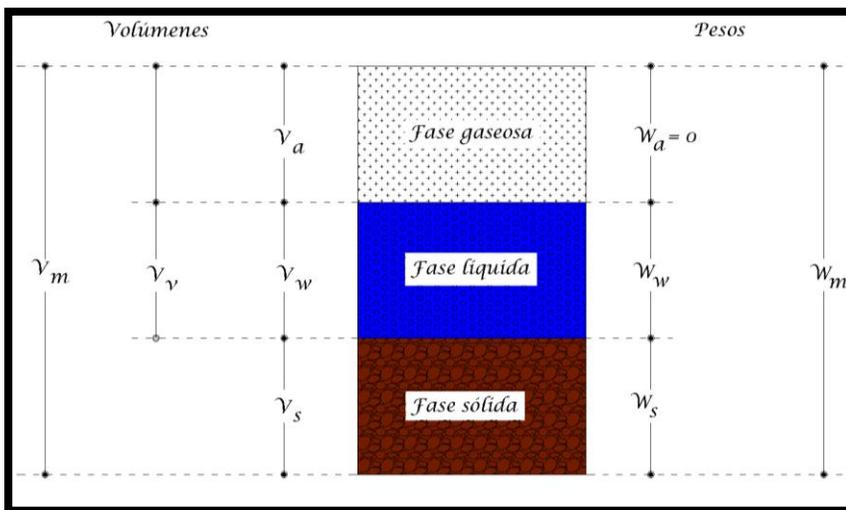


Figura 1.2 Representación esquemática de un suelo de acuerdo con Juárez & Rico (2005)

La densidad relativa del sedimento (S_s) fue la primera propiedad del sedimento determinada en el laboratorio. Aquí solo se mencionará la teoría de cómo se obtiene la ecuación que permite su cálculo. El siguiente procedimiento ha sido tomado de Juárez & Rico (2005), por lo cual se sugiere al lector consultar esta referencia en dado caso que se quisiera profundizar más sobre el desarrollo.

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes: la fase sólida, líquida y gaseosa. La primera

hace referencia a las partículas minerales del suelo, la segunda propiamente se refiere al contenido de agua atrapado en el suelo, y la tercera fase se refiere principalmente al aire.

Las fases, tanto líquida como gaseosa, generalmente se les nombran como *Volumen de vacíos*, mientras que la fase sólida se refiere al *Volumen de sólidos*.

Aquí se ha adoptado la nomenclatura utilizada por Juárez & Rico (2005) para etiquetar las variables de tipo volumétrico y gravimétrico. La Figura 1.2 se muestra a manera de esquema la representación de las fases constituyentes de un suelo.

En donde:

W_m = peso total de la muestra del suelo

W_s = peso de los sólidos

W_w = peso del líquido (generalmente agua)

W_a = peso de los gases (considerada nula en Mecánica de Suelos)

V_m = volumen total de la muestra de suelo

V_s = volumen de los sólidos

V_v = volumen de vacíos

V_w = volumen del líquido (agua)

V_a = volumen de los gases (aire)

El tratamiento para derivar la ecuación de densidad relativa se hará manejando pesos y no masas, por lo cual deberá tener especial cuidado en el manejo de las unidades, pues el primer concepto se mide en kilogramos fuerza y el segundo en kilogramos masa. En ingeniería, generalmente se utilizan las unidades del primer concepto.

Para relacionar los pesos y volúmenes enlistados y mostrados en la Figura 1.2, se realiza con el concepto de peso específico. Por lo cual, se distinguen cuatro pesos específicos:

Peso específico del agua destilada a 4°C y sometida a una presión atmosférica correspondiente a la del nivel medio del mar, γ_0 .

Peso específico del agua bajo condiciones reales (local) de trabajo, γ_w .

Peso específico de la masa de suelo. Por definición, está determinada como (y con ayuda de la Figura 1.2):

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_m} \quad [1.8]$$

En la ecuación anterior no aparece el peso del aire, ya que se ha considerado nulo su peso

Finalmente, el peso específico de los sólidos, el cual es:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad [1.9]$$

El peso específico relativo (que en el SI es la densidad relativa y que es como se ha manejado en los cálculos de este trabajo) de cualquier sustancia está determinada como el cociente del peso específico del material entre el peso específico del agua a 4°C sometida a 1 atmósfera de presión, es decir, γ_0 . A partir de esta definición, se pueden obtener dos pesos específicos relativos (o densidades relativas):

$$S_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_0} = \frac{W_m}{V_m \gamma_0} \quad [1.10]$$

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} = \frac{W_s}{V_s \gamma_0} \quad [1.11]$$

En donde S_m y S_s son los pesos específicos relativos de la muestra y de los sólidos, respectivamente. La última expresión es la fórmula que se requiere para el cálculo de la densidad relativa o peso específico relativo del material sedimentario proveniente de las playas de la Península de Yucatán. La cuestión aquí es cómo determinar el peso y volumen de los sólidos. Para resolver este problema, se debe recurrir al método de medición llevado a cabo en laboratorio. Juárez & Rico (2005) nuevamente proponen unos esquemas muy simples para atacar el problema, y que nuevamente se citarán tales esquemas como se hizo con la Figura 1.2. Se está realizando esto porque Ruíz (2007; 2009) respetó la nomenclatura dada por Juárez & Rico (2005) para determinar esta característica física (ver Figura 1.3).

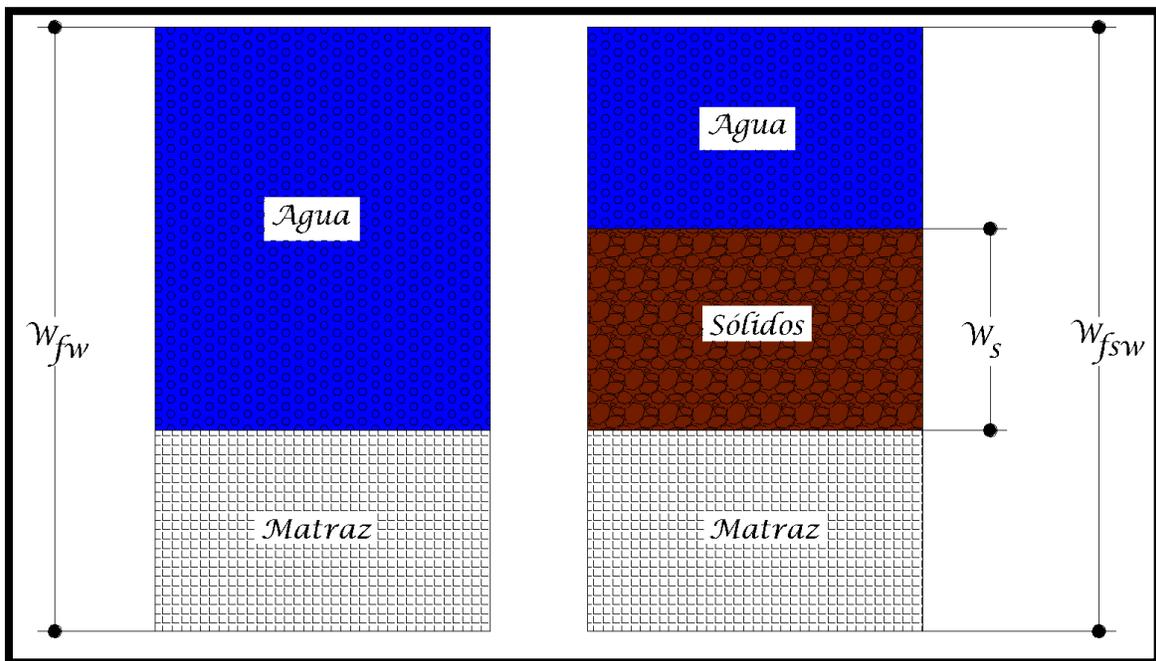


Figura 1.3 Definición de variables auxiliares para el cálculo de la densidad relativa

En donde W_{fw} es el peso del matraz con agua y W_{fsw} es el peso del matraz con agua y con el material seco. La igualdad en pesos, con palabras, está dada de la siguiente forma:

Peso del agua + peso del matraz (esquema izquierdo) = Peso del agua + peso del material seco + peso del matraz + peso del agua desplazada por el peso de los sólidos – peso de los sólidos. Expresando esto con las variables presentadas en la Figura 1.3, la ecuación queda como:

$$W_{fw} = W_{fsw} + W_w - W_s \quad [1.12]$$

Por otra parte, el volumen de los sólidos es igual al volumen de agua desplazado, por lo cual

$$\gamma_0 = \frac{W_w}{V_w} = \frac{W_w}{V_s} \quad [1.13]$$

Reacomodando variables

$$W_w = V_s \gamma_0 \quad [1.14]$$

Pero

$$V_s \gamma_0 = \frac{W_s}{S_s} \quad [1.15]$$

Sustituyendo el valor del peso del agua en la ecuación 1.12 y realizando el álgebra correspondiente, se llega a

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{fw} - W_{fsw}} \quad [1.16]$$

La ecuación 1.16 [dada por Juárez & Rico (2005, pág. 78); y citada en Ruíz (2007a; 2009, pág. 47); Del Valle (2010, pág. 23), Ruíz (2010, pág. 65); Chávez (2011, pág. 52) viene a resolver el problema que se tenía anteriormente, ya que las variables involucradas dentro de ésta son perfectamente medibles en el laboratorio. Sobre el método de medición se presenta en el capítulo 3 de esta tesis.

1.2.1.2. Densidad relativa sumergida, Δ [1]

Juárez & Rico (2005, pág. 58) mencionan que “Atención especial debe darse al cálculo de pesos específicos de suelos situados bajo el nivel freático. En tal caso, el empuje hidrostático ejerce influencia en los pesos, tanto específicos como específicos relativos”. En el caso de playas de arena, como es el caso, este material se encuentra en contacto con el agua del mar, principalmente en las zonas de lavado y sumergida en términos del perfil de playa. La diferencia que hay de esta característica con respecto a la densidad relativa es que su valor numérico es menor (disminuido en una unidad), y simplemente es resultado de que cualquier cuerpo sumergido en agua “pesa menos” que estando éste último fuera del agua. Así, la densidad relativa sumergida, o peso específico relativo de la materia sólida sumergida como lo nombra Juárez y Rico, está determinada por:

$$\Delta = S_s - 1 \quad [1.17]$$

1.2.1.3. Densidad del material, ρ_s [kg/m³]

La densidad del material sedimentario, o como en Mecánica de Suelos se dice “la densidad de los sólidos de un suelo”, simplemente se obtiene a partir de la definición de la densidad relativa, es decir:

$$\rho_s = S_s \rho_0 \quad [1.18]$$

1.2.2. Relaciones Fundamentales de un Suelo

1.2.2.1. Relación de vacíos, e [1]

Se denomina *Relación de vacíos*, *Oquedad* o *Índice de poros* al cociente entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos [Juárez & Rico (2005)], es decir

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad [1.19]$$

Su determinación en el laboratorio se reduce a poder calcular el volumen de vacíos. Tomando en cuenta que

$V_s = \frac{W_s}{S_s \gamma_0}$ y $V_v = V_m - V_s$, simplemente sustituir ambas expresiones en la ecuación 1.19, se obtiene

$$e = \frac{V_m S_s \gamma_0}{W_s} - 1 \quad [1.20]$$

En donde el volumen de la muestra (V_m) se determinó a través de un cristalizador para las estas pruebas en particular (ver capítulo 3).

1.2.2.2. Porosidad, P_{or} [1]

Al igual que la relación de vacíos, la porosidad se define a través de un cociente entre el volumen de vacíos y el volumen de la masa de la muestra. Suele expresarse en porcentaje. Entonces

$$P_{or} (\%) = \frac{V_v}{V_m} \times 100 \quad [1.21]$$

Nuevamente, se ha buscado la manera de que su cálculo pueda ser más sencillo. La porosidad puede determinarse como función de la relación de vacíos, esto es

$$P_{or} = \frac{e}{1+e} \quad [1.22]$$

1.2.3. Propiedades del mezclado agua – sedimento

Las siguientes propiedades que se enumeran en seguida, fueron tomadas de Soulsby (1997), que posteriormente fueron usadas y citadas por Ruíz (2009) y Del Valle (2010).

1.2.3.1. Masa de concentración, ρ_{cas} [kg/m^3]

Esta característica es utilizada en estudios de suspensión de material experimentales. La ecuación utilizada para determinar esta variable es

$$\rho_{cas} = \frac{\rho_s}{1+e} \quad [1.23]$$

1.2.3.2. **Volumen de Concentración, C [1]**

Su uso es similar al que tiene la masa de concentración, pero más aplicado teóricamente que experimentalmente. Está determinada como

$$C = \frac{1}{1+e} \quad [1.24]$$

1.2.3.3. **Densidad de suspensión, ρ_{sus} [kg/m³]**

Es utilizada, como su nombre lo indica, en fenómenos donde el material sedimentario está en suspensión, atendiendo las causas hidrodinámicas de esto. Se calcula como

$$\rho_{sus} = \frac{\rho_w e + \rho_s}{1+e} \quad [1.25]$$

1.2.3.4. **Permeabilidad específica, kp [m²]**

La permeabilidad es un concepto de flujo. En un medio poroso, como es el caso de las arenas que constituyen a las playas, la permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un líquido que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Como lo indica Soulsby (1997), si el flujo es laminar, generalmente asociado a partículas de arena con tamaños menores o iguales a 1 mm, la relación de la velocidad de flujo y el gradiente de presión (gradiente hidráulico, en mecánica de suelos) está gobernada por la Ley de Darcy.

El concepto de permeabilidad específica es sugerido porque es una variable que solo depende de las propiedades del medio poroso (en este caso las partículas de arena que conforman a las playas). La ecuación que se ha adoptado para determinar esta característica de los áridos de la Península de Yucatán es

$$kp = 0.0011D^2 \quad [1.26]$$

En donde D es el diámetro característico de las muestras de material sedimentario, que en este caso corresponden al D_{50} . Las unidades del diámetro deben ser en metros, y la permeabilidad específica está en m². La ecuación 2.26, de acuerdo a Soulsby (1997, pág. 39), se recomienda para diámetros de partícula de arena menores o iguales a 1.2 mm. En este estudio en particular, solo existen dos muestras de material que superan esta recomendación, y que se resolvió aplicar la expresión 1.26 al ser casos de tamaños de arena excepcionales, comparados con el resto de los tamaños de las demás muestras de arena (138 muestras que cumplen la recomendación).

1.2.3.5. **Coficiente de permeabilidad, cp [m/s]**

La relación algebraica que proporciona Soulsby para determinar el coeficiente de permeabilidad del medio poroso es la siguiente

$$cp = \frac{g}{\nu} kp \quad [1.27]$$

En donde g es la aceleración de la gravedad [m/s²] y ν es la viscosidad cinemática del agua [m²/s].

Como lo indican Juárez & Rico (2005), el valor numérico del coeficiente de permeabilidad refleja las propiedades físicas del medio poroso y en cierta medida ese valor indica la mayor o menor facilidad para que el flujo de agua allí presente se desplace, estando sujeta a un gradiente hidráulico. La facilidad que el medio poroso le otorga al flujo para desplazarse a través de éste, es función, además de las propiedades físicas del suelo, de la temperatura.

1.2.3.6. **Gradiente de presión, GP [N/m^3]**

Si un material granular, o como se ha optado por llamar, un medio poroso se somete a un flujo ascendente a través de él, se ejercerá una fuerza de arrastre en las partículas en la misma dirección del flujo. Si esta fuerza es tal que dado momento supere a la fuerza debida al peso sumergido de los granos, el material constituyente de la playa de arena empezará a comportarse como un líquido (licuefacción).

El gradiente de presión mínimo vertical necesario para alcanzar la licuefacción es

$$GP = g(\rho_s - \rho_w)(1 - P_{or}) \quad [1.28]$$

1.2.3.7. **Velocidad mínima de licuefacción, W_{mf} [m/s]**

En correspondencia con el gradiente de presión, la velocidad mínima para lograr la licuefacción es

$$W_{mf} = \left(\frac{v}{D}\right) \left[\left(10.36^2 + 1.049 P_{or}^{4.7} d_*^3\right)^{0.5} - 10.36 \right] \quad [1.29]$$

En donde d_* se le conoce como “diámetro adimensional del parámetro de Yalin”, mismo que será mencionada más adelante.

1.2.4. **Propiedades de forma**

1.2.4.1. **Ángulo natural de reposo del material sedimentario, φ [$^\circ$]**

Cuando una determinada cantidad de sedimentos se coloca sobre una superficie plana inclinada se produce una avalancha cónica hacia los lados; la pendiente de la superficie de dicho cono se conoce como ángulo de reposo. El concepto de ángulo de reposo es muy importante en la ingeniería costera para el cálculo de la estabilidad de rompeolas de escollera y en la modelación del transporte de sedimentos.

El ángulo de reposo es función de la forma de los granos; se incrementa cuando aumenta la irregularidad de éstos. Dicho de otra forma, la aspereza de la superficie de las partículas permite la trabazón entre ellas, así que mientras más “lisa” sea la superficie el ángulo natural de reposo de la pendiente de una playa (de grava, de arena o ambas) será menor. Por ejemplo un apilamiento de tetrápodos forma una pendiente mayor que un apilamiento de cantos rodados.

(Bagnold, 1966) utilizó la relación entre los esfuerzos cortantes, normales y el ángulo de reposo para desarrollar un modelo de transporte sedimentario de base energética. Su razonamiento se basa en que una cantidad de sedimentos ubicada en la parte alta del fondo marino se mantendrá en ese estado mientras que el tensor del fluido cortante a la superficie se mantenga en un ángulo inferior al de reposo del material, en cuanto lo iguale o supere, el sedimento comenzará a desplazarse. Los conceptos de Bagnold se emplean en la mayoría de los modelos de transporte de sedimentos que se aplican actualmente en ingeniería costera.

1.2.4.2. Factor de forma del material sedimentario, CSF [1]

En base a la experiencia obtenida en los experimentos realizados a los áridos de la Península, la forma del material sedimentario es una variable que, para medir en el laboratorio, consume mucho tiempo. Además, aun cuando en la literatura existan diferentes métodos para calcularla, unos más sofisticados que otros, la incertidumbre que hay en ellos en lo que se refiere a su planteamiento, no está eliminada del todo. A pesar de ello, la forma del sedimento es una variable por demás indispensable porque ella pasa a involucrarse con otros parámetros (por ejemplo en la velocidad de caída) que tratarán de dar solución a problemas de transporte de sedimentos, básicamente unos de los problemas fundamentales de la ingeniería costera. Sobre las ecuaciones que existen para poder calcular la forma de una partícula individual y que, un conjunto de ellas representarán la forma de una muestra de material sedimentario, se presentan en el siguiente apartado.

1.3. VELOCIDAD DE CAÍDA

Esta sección está dedicada, en primer lugar, al entendimiento de las hipótesis fundamentales para determinar ecuaciones que permitan calcular la velocidad de caída, después comprender la naturaleza de las características físicas de las partículas naturales y como éstas pueden involucrarse en la evaluación de dicho valor. Finalmente se han aplicado 30 ecuaciones empíricas alimentadas por la información sedimentológica que se ha obtenido al realizar el análisis a muestras de material de arena de origen calcáreo provenientes de playas de la Península de Yucatán desde 2006 a la fecha (2012).

1.3.1. Velocidad de caída de una partícula esférica: ecuación de Stokes

Para estimar la velocidad de caída de partículas sedimentarias, hay dos posibles vías: la primera es idealizar a la partícula como una esfera; y la segunda es considerarla tal como es, es decir, tomar en cuenta la forma de la partícula. En general, la primera manera de calcular este parámetro es como se ha implementado en muchos estudios, ya que en ellos el diámetro característico de la partícula es el diámetro obtenido con la técnica del “Tubo de sedimentación” (sobre esta técnica, puede consultarse, por ejemplo, a Poole, 1957). En muchas otras investigaciones (Hallermeier, 1981; Dietrich, 1982; Ahrens, 2000; Jiménez & Madsen, 2003; Camenen, 2007; entre otros), la segunda manera de abordar el problema es considerando, entre algunos aspectos adicionales que se mencionarán más adelante, la forma de la partícula (Cheng, 1997; Jiménez & Madsen, 2003).

En 1851, Stokes obtuvo la solución para la fuerza de arrastre que se genera por una partícula esférica moviéndose en un fluido estacionario expresando la ecuación simplificada de Navier – Stokes (Almedeij, 2008) junto con la ecuación de continuidad en coordenadas polares (Cheng, 1997). Esta solución, utilizando las variables empleadas en este trabajo, se expresa como (Briggs & McCulloch & Moser, 1962; Dietrich, 1982)

$$F_a = 3\pi\rho_w\nu_wDW_f \quad [1.30]$$

En donde F_a es la fuerza de arrastre, en N; ρ_w y ν_w son la densidad y la viscosidad cinemática del fluido, en este caso agua, en kg/m^3 y m^2/s , respectivamente; D_{50} es el diámetro de la partícula esférica, en m y W_f es la velocidad de caída de la partícula, en m/s.

Para poder despejar la velocidad de caída de la ecuación 1.30, es necesario involucrar otras dos fuerzas que están presentes dentro del movimiento de la partícula. Para ello, en la Figura 1.4 se muestra el diagrama de cuerpo libre de la partícula esférica. Tales fuerzas son el peso de la partícula (P) y el empuje de Arquímedes (E).

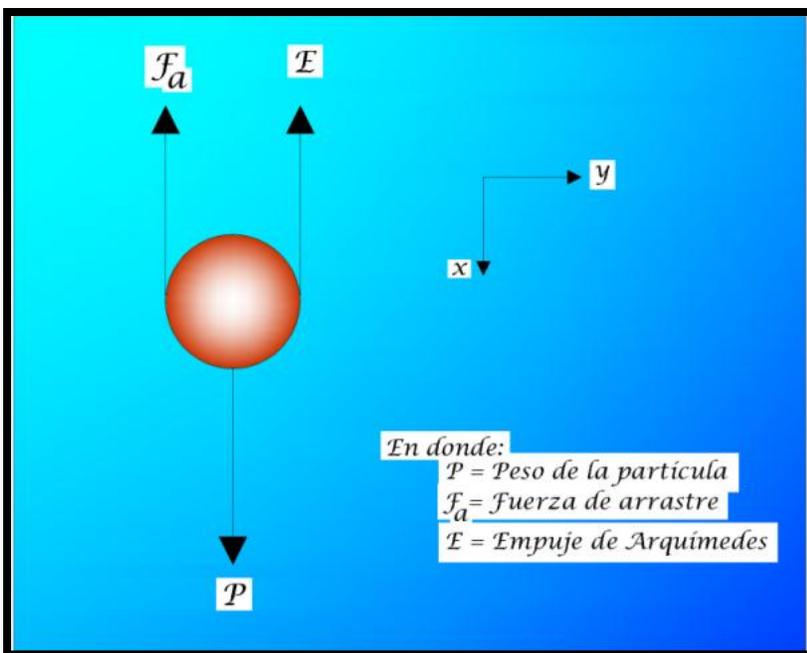
Como se dijo anteriormente, la velocidad de caída de partículas individuales también se le conoce como velocidad terminal. Esto último lleva a concluir que las fuerzas que están involucradas en el movimiento de la partícula llegarán a un estado de equilibrio dinámico, implicando que no haya cabida para alguna aceleración. Con esto, la Segunda Ley de Newton resulta perfecta para resolver el problema. A partir del sistema de referencia mostrado en la Figura 1.4, se tiene que

$$\Sigma F_x = ma_x$$

$$P - (F_a + E) = ma_x$$

Pero $a_x = 0$, además tomando en cuenta la simbología empleada aquí, luego entonces

$$mg - (3\pi\rho_w v_w D W_f + E) = 0 \quad [1.31]$$



Por otra parte, E se expresa como

$$E = \frac{\rho_w g \pi D^3}{6}$$

Adicionalmente

$$m = \rho_m \times \nabla_{esfera}$$

$$\nabla_{esfera} = \frac{\pi D^3}{6}$$

Entonces

$$mg = \frac{\pi \rho_m g D^3}{6}$$

Sustituyendo E y mg en 1.31, resulta que

$$W_f = \frac{D^2 g \Delta}{18 v_w} \quad [1.32]$$

En donde g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2 ; ρ_m es la densidad del material, en kg/m^3 ; y Δ es la densidad relativa sumergida del material, adimensional, la cual está determinada como

$$\Delta = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_w}$$

En algunas publicaciones, es común expresar la ecuación 1.32 como función del índice de flotación de Arquímedes (A). Para ello, tómesese en cuenta el diámetro adimensional o factor de Yalin de la partícula (Yalin, 1977), expresada de la siguiente forma

$$d_* = \left[\frac{g\Delta}{v_w^2} \right]^{1/3} D$$

El índice de flotación de Arquímedes se determina como

$$A = d_*^3$$

Al sustituir d_* en A :

$$A = \frac{g\Delta D^3}{v_w^2}$$

$$g\Delta D^2 = \frac{Av_w^2}{D}$$

Al llevar esta última igualdad a 1.32:

$$W_f = \frac{Av_w^2 / D}{18v_w}$$

$$W_f = \frac{Av_w}{18D} \quad [1.33]$$

La ecuación 2.33 puede consultarse en Hallermeier (1981), en la parte que corresponde a flujo laminar (con $A < 39$); en Van Rijn (1993), en lo que corresponde a flujo laminar ($A < 16.187$); Chang & Liou (2001), de igual manera que en los casos anteriores; Sha (1954) (en Cheng, 1997) cuando $D < 0.01$ cm; y Concharov (1962) (en Cheng, 1997) cuando $D < 0.015$ cm. En estos últimos dos casos, solo cambia coeficiente 18 por el número 24 en el denominador en 1.33, ya que en esta ecuación puede obtenerse a través del coeficiente de arrastre (C_D), el cual se expresa como

$$C_D = \frac{A}{\text{Re}} \quad [1.34]$$

Donde Re es el número de Reynolds, adimensional. Por otra parte, 1.34 es igual a

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{\Delta g D}{W_f^2} \quad [1.35]$$

Igualando 1.34, 1.35 y realizando el álgebra correspondiente, se llega a

$$W_f = \frac{4 \Delta g D^2}{3 A v_w} \quad [1.36]$$

En Cheng (1997), indica que para valores bajos del número de Reynolds, varios investigadores sugieren el valor de A igual a 32 (Sha, 1956; Concharov, 1962 [en Ibad-zade, 1992]; Raudkivi, 1990; Zhu & Cheng, 1993). Entonces, 1.36 se puede expresar como

$$W_f = \frac{\Delta g D^2}{24 v_w} \quad [1.37]$$

Pero de la relación entre el factor de Yalin y el índice de flotación de Arquímedes, la parte del denominador de 1.37 es función de A , entonces:

$$W_f = \frac{A v_w}{24 D}$$

Que es en esencia la misma forma que la ecuación 1.33. Sin embargo, si nuevamente se sustituye el valor de $A = 32$ en esta última igualdad, entonces se llega más a una ecuación todavía más simplificada,

$$W_f = \frac{4 v_w}{3 D} \quad [1.38]$$

A pesar de que 1.38 resulte de lo más simple, esta expresión es para partículas naturales que permitan su aplicación, en otras palabras, para números de Reynolds muy bajos. Para partículas esféricas, la ecuación 1.33 es la que deberá utilizarse (Guo, 2002).

La ecuación de velocidad de caída para una partícula esférica está determinada, por lo tanto, por la ecuación 1.32 (Hawley, 1982). Esta ecuación es aplicable tomando en cuenta que la superficie de la esfera es lisa. Pero como se ha demostrado en diversos estudios citados en los párrafos anteriores, también es aplicable la ecuación 1.32 para aquellas partículas que aun presentando una superficie rugosa, y todavía más, su forma difiera de una esfera, su tamaño es tal que combinado con los dos aspectos mencionados antes, generen valores del número de Reynolds por debajo de la unidad (Cheng, 1997; Ferguson & Church, 2004; Camenen, 2007), que es el límite superior hasta donde se puede aplicar esta ecuación.

Sin embargo, es posible utilizar la ecuación 1.32, o ecuación de Stokes, de forma tal que se pueda aplicar a partículas irregulares, es decir, que no sean esferas, haciendo alguna modificación en ella, como dan cuenta Baba & Komar (1981a). Resumiendo su trabajo de ellos, lo que hicieron fue ensayar partículas de vidrio y medir su movimiento de caída libre a través de un tubo con glicerina, obteniendo números de Reynolds equivalentes que van desde tamaños de limos a arenas muy finas de cuarzo sedimentándose en agua. La modificación que ellos reportan hecha a la ecuación de Stokes es la siguiente:

$$W_f = \frac{\Delta g D_n^2}{18 v_w} (0.672 + 0.318 E) \quad [1.39]$$

En donde 1.39 es aplicable a números de Reynolds menores o iguales a 0.5, D_n es el diámetro nominal de la partícula y E es el factor de forma de la partícula. Más adelante se explicará a que se le conoce como factor de forma de la partícula, así como las diferentes expresiones que existen para calcular ese parámetro.

También, dentro del mismo estudio, Baba & Komar (1981a) reportan otra expresión, dentro del contexto de la ecuación de Stokes, de velocidad de caída, extendiéndose el límite superior del número de Reynolds hasta 2. Esto porque fue el límite máximo que lograron calcular con su conjunto de datos. La ecuación es:

$$W_f = \frac{\Delta g D_n^2}{18 \nu_w} (0.672 + 0.318E)(1.057 - 0.111Re) \quad [1.40]$$

Como ellos mencionan, la igualdad 1.40 es inconveniente, pues hay que realizar cálculos iterativos ya que el parámetro de velocidad de caída está en ambos lados de la igualdad. Por ello, los investigadores resolvieron este inconveniente, presentando la ecuación 1.41, la cual se expresa como

$$W_f = \frac{1.057 W_{f10}}{1.0 + \frac{0.111 D_n W_{f10}}{\nu_w}} \quad [1.41]$$

En donde W_{f10} se calcula con la ecuación 1.40.

Con este pequeño repaso, se ha logrado explicar el comportamiento del parámetro “Velocidad de Caída” de aquellas partículas que posean una forma esférica, y más aún, para aquellas que no lo sean, pero que reúnan las condiciones necesarias y que combinadas resulte en la aplicación de la ecuación de Stokes

1.3.2. Velocidad de caída de sedimentos naturales

Cuando se consideran a los sedimentos tal y como son en realidad, se están tomando en cuenta diversas variables, entre ellos están las variables físicas vistas en el apartado anterior, es decir, la densidad del material y su diámetro característico del sedimento. Pero además, en esta ocasión se puede involucrar variables como la forma de la partícula, la redondez, la esfericidad y algunas otras características como la textura y el color del material. En este trabajo se explicará con mayor detenimiento los conceptos de forma y redondez de una partícula natural, y solo se mencionará de manera rápida algunas características adicionales que poseen tales partículas.

1.3.2.1. Características físicas de las partículas naturales sedimentarias

1.3.2.1.1. Forma

Siguiendo la definición de Blott & Pye (2008), el término “forma” es usado para describir la característica tridimensional de una partícula definida por las razones de sus tres ejes lineales, largo, ancho y espesor. Estos ejes también se les conocen como eje largo, que en este trabajo será representado con la letra a minúscula, eje intermedio, representado con la letra b , y eje corto, denotado con la letra c .

Estos ejes, largo, intermedio y corto, son los ejes máximos o longitudes máximas de cada una de las dimensiones, es decir, que para el lado largo de la partícula natural, el eje largo deberá corresponder a la máxima longitud que posea la partícula en ese eje. De igual manera se debe proceder para medir los otros dos ejes. En la Figura 1.5 se muestra un esquema para ejemplificar esto.

Esta operación de medir los ejes es un procedimiento subjetivo, en virtud que depende de la apreciación de la persona que realiza la observación. El problema de la subjetividad es mayor cuando las partículas naturales son muy pequeñas, por debajo del 0.1 de mm, lo cual puede llevar a cometer errores grandes, y posiblemente con la ayuda de un buen microscopio y/o con ayuda de la computadora. La experiencia

que ha dejado los experimentos realizados por Del Valle (2010) es que para este tamaño de sedimento, se tomen valores propuestos en la literatura que hayan ya sido utilizados con bastante frecuencia, porque además del tema de la subjetividad, la cantidad de tiempo que lleva realizar esta operación de medir los ejes para calcular la forma de una partícula, es elevado (esto está confirmado por Poole, 1957; y comprobado en los experimentos hechos por Del Valle, 2010).

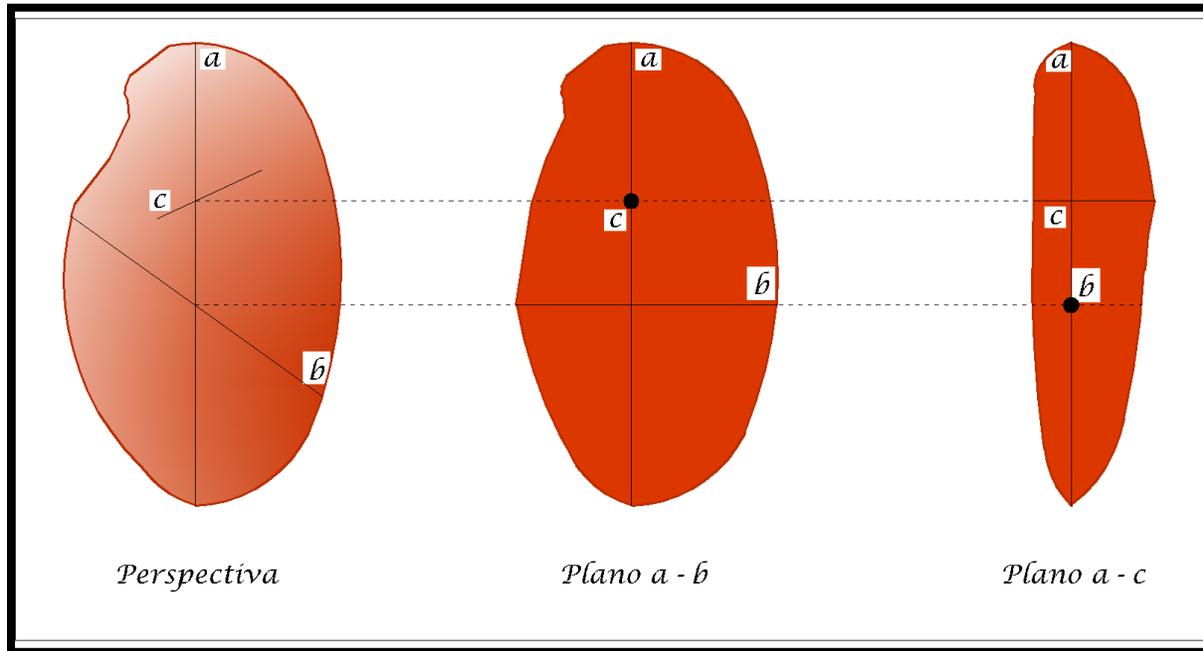


Figura 1.5 Ejes largo, intermedio y corto de una partícula natural

1.3.2.1.2. Razones, Diagramas y Factores de Forma

Wentworth (1922) realizó el primer intento para determinar la forma de una partícula, usando la combinación de los tres ejes mencionados anteriormente (Blott & Pye, 2008). Él ideó y llamó "Índice de Aplastamiento" a la razón siguiente

$$\frac{a+b}{2c} \quad [1.42]$$

La ecuación 1.42 la adoptó posteriormente un investigador de apellido Cailleux (1945), que por error en muchas ocasiones se le nombró con el nombre de "Índice de Aplastamiento de Cailleux".

Posteriormente a Wenworth, Zingg (1935) fue el primero en dibujar las razones ancho/largo (b/a) y espesor/ancho (c/b) en un diagrama, que con el tiempo adquirió el nombre del mismo investigador, es decir, "Diagrama de Zingg". En este diagrama, en su traducción del alemán al inglés (y aquí en español), posee cuatro clases de formas: plana, esférica, plana y en columna, y columna. Posteriormente estas clases fueron renombradas por Krumbein & Pettijohn (1938) y Kumbrein (1941) como discos, esferas, láminas y rollos (o cilindros, en español). En fin, otros autores han utilizado otros términos para llamar a estas cuatro clases de partículas en otros trabajos posteriores (ver Blott & Pye, 2008).

Más adelante, Sneed & Folk (1958) consideraron inadecuado el diagrama de Zingg, modificándolo, de tal manera que ahora, en lugar de cuatro clases, existen tres a saber: esferoide alargado, en donde los ejes

intermedio y corto son iguales, es decir, $a > b = c$; esferoide alargado, con el eje $a = b > c$; y una esfera, con los tres ejes iguales. Sneed & Folk no admiten una cuarta posibilidad, la cual sería que los ejes tuvieran la siguiente relación: $a > b > c$. Al final, esta clasificación puede dibujarse en diagrama en forma de triángulo, para lo cual puede llamarse a este dibujo como el “Diagrama de Sneed & Folk”.

Con esto, se cuenta con dos diagramas en los cuales se pueden clasificar la forma que posean las partículas. Bajo este contexto, Hockey (1970) puntualizó 6 posibles razones o proporciones los cuales pueden ser perfectamente calculados y dibujados en ambos diagramas. Tales razones son las siguientes:

$$\frac{c}{a}, \frac{b}{a}, \frac{b-c}{a}, \frac{c}{b}, \frac{a-b}{a-c}, \frac{c}{a+c-b}$$

Estas 6 razones están perfectamente representadas en los diagramas de Zingg y Sneed & Folk, (consultarse en la página 36 de Blott & Pye, 2008). El objetivo de estos párrafos no es saber cómo dibujar estos diagramas, sino más bien tener en mente cómo poder calcular la forma de una partícula con la mejor precisión posible, cuenta de ello es mostrar estas razones o proporciones.

La relación c/a ha sido utilizada como una medida del grado de aplastamiento que posee la partícula por diversos autores (Barrett, 1980; Ballantyne, 1982, entre otros; referencias dadas por Blott & Pye, 2008). La relación b/a se ha usado como una medida de la elongación o alargamiento de la partícula. El parámetro $(b-c)/a$ es considerado como un índice de aplastamiento, aunque un nombre más apropiado sería el de índice laminar, pues para valores muy pequeños de c , a y b son prácticamente iguales, lo cual sugiere una forma de lámina, o en otras palabras, un plano. Así que la palabra aplastamiento será más adecuada para la razón c/b . La proporción $(a-b)/(a-c)$ diferencia las partículas que son iguales en sus dimensiones en el plano $b-a$ de aquellas que son iguales en sus dimensiones en el plano $c-b$. Este parámetro está comparando las partículas que posean una forma de disco contra aquellas que tengan una forma de barra. Sin embargo, esta característica será válida para aquellas partículas que posean un eje c bastante pequeño (discos o planos) o aquellas que posean un eje a muy grande (barras o rodillos alargados). Estas posibilidades extremas, fueron caracterizadas visualmente en los experimentos realizados por Del Valle (2010). Por último, la relación $c/(a+c-b)$ hace la diferenciación de aquellas partículas aplanadas y de aquellas que son iguales sus dimensiones en el plano $b-a$.

Con este breve resumen se sintetiza parte del extenso material publicado en torno a este tema. Complementariamente, en la Tabla 1.5 se presentan algunas ecuaciones para medir el comportamiento hidráulico de partículas sedimentarias. Sin duda, las ecuaciones mostradas en la Tabla 1.5, arrojarán resultados, en algunos casos muy alejados unos de otros, lo cual hace preguntarse qué expresión utilizar para medir la forma de las partículas. Esto dependerá de para qué se requiera el dato de la forma de la partícula, lo cual obligará a escoger una o varias expresiones contenidas en la Tabla 1.5. Para medir la forma de la partícula se sugiere la expresión propuesta por Corey (1949) (Alger & Simons, 1968; Dietrich, 1982; Goossens, 1987; Chang, 1998; Cheng, 1998; García & Maza, 1998; Le Roux, 2002; Jiménez & Madsen, 2003; Smith & Cheung, 2003; Camenen, 2007), la cual en este trabajo se denomina con las letras CSF y está determinada como:

$$CSF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \tag{1.43}$$

La ecuación 1.43 surge de hacer la suposición de que las partículas naturales sedimentarias posean la forma de un elipsoide. A partir de esta suposición, es que se evalúa el grado de desviación de la partícula natural

con respecto al elipsoide. El rango de valores que arroja la ecuación está entre $0.0 \leq CSF \leq 1.0$. En todo caso, como menciona Goossens (1987), este factor es finalmente una medida de la magnitud de aplastamiento que posea la partícula, en otras palabras, para valores muy bajos del *CSF* (cerca de cero), la forma de la partícula será muy plana, llámese un plano o lámina; en cambio, para valores cercanos al valor de 1, la partícula tendrá la forma de una esfera.

Como se ha explicado, para estimar el valor de la forma de la partícula, resulta bastante laborioso medir los ejes de la partícula natural en el laboratorio, ello acompañado de un cierto error al realizar la medición. Por otra parte, al tener la información de los valores de los ejes, el empleo de alguna de las fórmulas propuestas por los diversos investigadores, lleva a tomar en cuenta una serie de hipótesis que los autores hicieron para poder determinar dichas ecuaciones. Algunos autores sugieren un valor “usual” del factor de forma, aclarando que dicho valor es aplicable tomando en cuenta la ecuación propuesta por Corey, tales son los estudios de (Dietrich, 1982; Cheng, 1997; Chang, 1998; Jiménez & Madsen, 2003; Ferguson & Church, 2004; Camenen, 2007), donde el valor del factor de forma que se propone para partículas naturales sedimentarias, es $CSF = 0.7$. Este valor está comprobado experimentalmente en las mediciones realizadas por Baba & Komar (1981b, pág. 637).

1.3.2.1.3. Redondez

La redondez es una característica física que poseen las partículas naturales y es independiente de la forma que tengan las mismas (Powers, 1953). Este concepto hace referencia al grado de agudeza que poseen las esquinas y bordes de una partícula natural. Además, la redondez ofrece una idea de la distancia recorrida por la partícula, llegando así al concepto denominado como abrasión, que es la erosión o desgaste que sufren las partículas en su superficie. Entonces, redondez y abrasión están íntimamente ligadas, esto es, cuando una partícula natural se le catalogue con un alto grado de abrasión, será lo mismo decir que posee una redondez elevada. Además, se puede afirmar que la redondez es una propiedad de la partícula independiente de la forma que esta posea, esto por el hecho de que si a un cilindro se le coloca en cada uno de sus extremos una semiesfera este poseerá la misma redondez que una esfera (Flemming, 1965), en otras palabras, para dos diferentes formas, existe una misma redondez, lo que confirma la independencia de este concepto respecto de la forma de la partícula natural.

En muchos estudios se han dado a la tarea de medir la redondez que poseen las partículas naturales, pero en ellos hay una diferencia, la cual radica en el dilema de solo tomar el radio de curvatura de la esquina más angular, o si hay que elegir el radio de curvatura de varias esquinas y considerar, por ejemplo, el promedio de esas mediciones (Blott & Pye, 2008). Como una revisión muy rápida, Wentworth (1919) sugirió una proporción entre el diámetro de curvatura de la esquina más aguda y el diámetro de la partícula que atraviesa esa esquina, que no necesariamente tiene que coincidir con el eje mayor de la partícula natural (ver Figura 1.6). Sin embargo, esta manera de medir la redondez no es muy apropiada para aquellas partículas que, por ejemplo, posean una elongación considerable, ya que pueden llegar a tener valores de redondez muy bajos, contra aquellas partículas cúbicas que posean la misma esquina aguda. Más adelante, el mismo investigador hizo una modificación, la cual consistió en el hecho que en lugar de tomar la mitad del diámetro de la esquina más aguda, consideró un promedio de radios de la partícula natural. Muchas variantes sobre este método de medición fueron adoptadas en otras investigaciones, con lo cual en la Tabla 1.6 se muestran algunas de las expresiones que en un momento dado podrían usarse para medir la redondez de una partícula natural.

Tabla 1.5 Ecuaciones para medir la forma de una partícula natural: Factores de Forma [Aschenbrenner (1956); Briggs & McCulloch & Moser (1962, pág. 647); Barrett (1980, pág. 294); Blott & Pye (2008, pág. 37)]

Autor	Ecuación	Rango
Wentworth (IA)	$\frac{a+b}{2c}$	1 a ∞
Krumbein (Ψ)	$\sqrt[3]{\frac{bc}{a^2}}$	0 a 1
Corey (CSF)	$\frac{c}{\sqrt{ab}}$	0 a 1
Sneed & Folk (Ψ_F)	$\sqrt[3]{\frac{c^2}{ab}}$	0 a 1
Aschenbrenner (ψ')	$\frac{(12.8) \left(\sqrt[3]{\left(\frac{c}{b}\right)^2 \frac{b}{a}} \right)}{1 + \frac{c}{b} \left(1 + \frac{b}{a}\right) + 6 \sqrt{1 + \left(\frac{c}{b}\right)^2 \left(1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2\right)}}$	0 a 1
Aschenbrenner (F)	$\frac{ac}{b^2}$	0 a ∞
William (Wi)	$1 - \frac{ac}{b^2} \rightarrow si b^2 > ac$ $\frac{b^2}{ac} - 1 \rightarrow si b^2 \leq ac$	-1 a +1
Janke (E)	$\frac{\sqrt{3c}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$	0 a 1
Dobkins & Folk (OPI)	$\frac{10 \left(\frac{a-b}{a-c} - \frac{1}{2} \right)}{\frac{c}{a}}$	$-\infty$ a $+\infty$

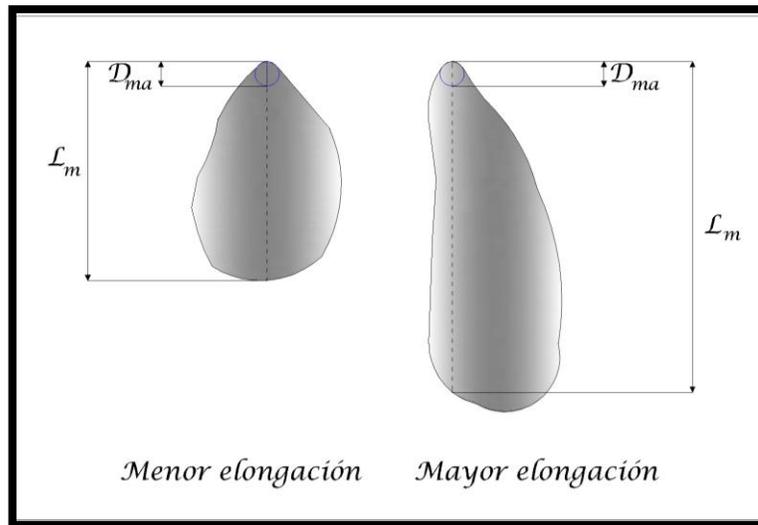


Figura 1.6 Definición de redondez de acuerdo con la definición de Wentworth (1919).

Tabla 1.6 Fórmulas que comúnmente son utilizadas para determinar la redondez de partículas naturales [Barrett (1980, pág. 300); Blott & Pye (2008, pág. 53)]

Autor	Fórmula	Rango
Wentworth 1919	$\frac{D_{ma}}{L_m}$	0 a 1
Wentworth 1922b	$\frac{2D_{ma}}{L_{pp} + l_{pp}}$	0 a 1
Wadell 1932 (primera fórmula)	$\frac{\sum \frac{D_{ie}}{D_{mci}}}{n}$	0 a 1
Wadell 1932 (segunda fórmula)	$\frac{n}{\sum \frac{D_{mci}}{D_{ie}}}$	0 a 1
Kuenen 1956	$\frac{D_{ma}}{l_{pp}}$	0 a 1
Dobkins & Folk 1970	$\frac{D_{ma}}{D_{mci}}$	0 a 1

En la Tabla 1.6, D_{ie} es el diámetro i – ésimo de las esquinas de la partícula natural; D_{ma} es el diámetro de curvatura de la esquina más aguda; D_{mci} es el diámetro del mayor círculo inscrito; n es el número de esquinas, incluyendo todas aquellas cuyos diámetros sean cero; L_m es el diámetro de longitud máxima medida a través de la esquina más aguda; L_{pp} es la longitud de la partícula natural, proyectada a un plano de referencia; y l_{pp} es el ancho de la partícula natural, proyectada en el mismo plano de referencia.

Posteriormente Wadell (1932) definió a una esquina como una parte del contorno de un área la cual posee un radio de curvatura igual a o menor que el radio de curvatura del máximo círculo inscrito de la misma área. Con esta definición, se concluye que el máximo grado de redondez ha sido obtenido cuando el radio de curvatura de las esquinas es igual al radio del máximo círculo inscrito. Es por ello que, una esfera, posee el máximo grado de redondez, pero que, un cilindro que en sus extremos se encuentra rematado por dos semiesferas, posee la misma redondez que una esfera. A pesar de todo esto, el método de Wadell consume una increíble cantidad de tiempo en poder determinar este parámetro físico, por lo cual algunos investigadores han optado por realizar una comparación visual de los perfiles de las partículas naturales a través de un comparador visual. Los primeros en usar ello fueron Russel & Taylor (1937), los cuales tomaron muestras del valle del Mississippi y las clasificaron en 6 clases de tamaños. En cada clase, se les determinó la redondez a 50 partículas naturales utilizando el método de Wadell, determinando el grado de redondez para cada clase. En la Tabla 1.7 están los resultados publicados por los investigadores. Aunque este trabajo es empírico, la escala que se maneja es aproximadamente geométrica (Blott & Pye, 2008). Con esto, Pettijohn (1949) modificó este esquema cambiando las clases a una escala geométrica exacta, aunque tales valores fueron redondeados para una mejor memorización de los mismos.

Sin embargo, quizá el método más usado es el comparador visual desarrollado por Powers (1953). Powers modificó la clasificación de Pettijohn (1949) utilizando una escala logarítmica base 0.7, además de introducir una clase adicional la cual nombró como “muy angular”, incrementando la resolución para valores muy bajos de redondez. Con ello el investigador Powers generó un comparador visual que puede consultarse en Powers (1953, pág. 118), en Pettijohn & Potter & Siever (1973, pág. 586), o en Folk (1974, pág. 184). Este comparador visual está clasificado en 6 clases, y que las mismas están agrupadas a su vez en dos conjuntos, denominadas como partículas de baja y alta esfericidad. Este concepto de esfericidad se explicará más adelante.

Tabla 1.7 Clasificación del valor de redondez para partículas naturales, acorde con diferentes investigaciones [Powers (1953, pág. 117); Blott & Pye (2008, pág. 54)]

Clasificación verbal	Russel & Taylor (1937)		Pettijohn (1949)		Powers (1953)	
	Límites de clase	Marca de clase	Límites de clase	Marca de clase	Límites de clase	Marca de clase
		Aritmética		Geométrica		Geométrica
Muy angular	---	---	---	---	0.12 - 0.17	0.14
Angular	0.00 - 0.15	0.075	0.00 - 0.15	0.125	0.17 - 0.25	0.21
Subangular	0.15 - 0.30	0.225	0.15 - 0.25	0.200	0.25 - 0.35	0.3
Subredondeada	0.30 - 0.50	0.400	0.25 - 0.40	0.315	0.35 - 0.49	0.41
Redondead	0.50 - 0.70	0.600	0.40 - 0.60	0.500	0.49 - 0.70	0.59
Bien Redondeada	0.70 - 1.00	0.850	0.60 - 1.00	0.800	0.70 - 1.00	0.84

A pesar de que la escala visual de Powers viene a resolver el problema de los tiempos extraordinarios que le puede llevar a una persona en el laboratorio medir la redondez de una partícula natural, los intervalos en los cuales están clasificadas las partículas resultan poco prácticos para su uso. Entonces, Folk (1955) modificó una vez más la escala que se viene trabajando con los investigadores Russell & Taylor (1937). Folk usó el análisis que desarrolló Krumbein (1934) en torno a manejar una escala phi para clasificar los intervalos de tamaños de partículas naturales, solo que en lugar de llamar phi a esta escala, para el caso de la redondez Folk la nombró como "rho" (ρ). Esta escala fue adoptada de la manera más adecuada con cada clase a través de un número entero (con ello logrando la facilidad de memorizar los intervalos). Los límites de la escala de Powers con la escala logarítmica rho, han quedado como: 0.0 – 1.0 para la clase muy angular; 1.0 – 2.0 para la clase angular; 2.0 – 3.0 para la clase sub-angular; 3.0 – 4.0 para la clase sub-redeada; 4.0 – 5.0 para la clase redondeada y 5.0 – 6.0 para la clase muy redondeada.

Dentro de las 30 ecuaciones de velocidad de caída analizadas en este trabajo, dos de ellas tienen como variable independiente a esta característica (Dietrich, 1982; Camenen, 2007). A esta variable se le ha identificado con la letra P , tomando el nombre de "Índice de Redondez de Powers". Este comparador visual se ha utilizado particularmente para granos de arena por más de 50 años (Blott & Pye, 2008), lo que da cuenta de lo práctico y útil que ha llegado a ser, a pesar de tener la desventaja de la subjetividad cuando se asigna el valor de redondez a una partícula natural. Esta última modificación hecha a la escala de Powers, es como se ha utilizado en la determinación de la redondez de las muestras de arena que se han recolectado de los segmentos de playa estudiados de la Península de Yucatán, México.

1.3.2.2. Otras características físicas de las partículas naturales

Existen otros parámetros que permiten caracterizar a las partículas naturales. Uno de ellos es la esfericidad que posee una partícula natural. Como lo indican Blott & Pye (2008), este concepto usualmente ha sido considerado como sinónimo de los conceptos de redondez y de forma. Para poder hacer una distinción, los investigadores dan una definición de ello, basados en lo que también ya había mencionado Krumbein (1941), la cual en palabras propias de este trabajo, se enuncia de la siguiente manera: "la esfericidad es un aspecto de la forma de una partícula natural, la cual está relacionada con los tres ejes que la caracterizan (eje largo, intermedio y corto)". Mientras una partícula se parezca más a una esfera, entonces se afirmará que la misma poseerá una esfericidad alta y viceversa, cuando una partícula natural se aleje más de la forma de una esfera, poseerá una baja esfericidad. Así, comparando a un cubo y un dodecaedro, el dodecaedro es más esférico que el cubo. Pero a pesar de ello, el dodecaedro posee una redondez muy baja debido al número de esquinas agudas, que es mayor al número que tiene un cubo. El grado de esfericidad estará determinado al comparar el área superficial de una partícula natural contra la de una esfera. Esta medición de esfericidad tiene los valores de 1.00 para esferas perfectas, 0.91 para un dodecaedro regular y 0.81 para un cubo (Blott & Pye, 2008). Sin embargo, es poco práctico medir el área de la superficie de una partícula natural, además de que para aquellas partículas que sean muy pequeñas, la determinación de su volumen se vuelve un reto. A raíz de ello, existen métodos alternativos para poder calcular la esfericidad; uno de ellos es simplificar el problema al pasar de tres dimensiones a solo dos dimensiones. Entonces, un lugar de hablar de una esfericidad, se referirá a la circularidad de la partícula. En la Tabla 1.8 se presentan algunas ecuaciones para calcular la circularidad de las partículas naturales, en donde A es el área de la partícula; P_e es el perímetro de la misma; D_{in} es el diámetro de la mayor circunferencia inscrita; y D_{cs} es el diámetro de la menor circunferencia circunscrita (como se ha definido antes, a es el eje largo de la partícula natural).

Otro concepto es la angularidad que posee una partícula natural. Blott & Pye (2008) toman el concepto de Lees (1964), el cual relaciona la distancia que va de cualquier esquina al centro del máximo círculo inscrito en la partícula, y el radio del mismo círculo. Lees define entonces al Grado de Angularidad, A_i , de cualquier esquina como

$$A_i = (180^\circ - a) \frac{x}{r} \quad [1.44]$$

En donde a es el ángulo formado por las líneas tangentes en el extremo o esquina, x es la distancia desde la punta formada por la intersección de las líneas al centro del máximo círculo inscrito y r es el radio de tal círculo. El grado total de la angularidad de la partícula natural será la suma de las i -ésimas esquinas que posea la partícula. La ecuación 1.44 puede consultarse en Lees (1964, pág. 10), en Blott & Pye (2008, pág. 55), o en Barrett (1980, pág. 299). En la Figura 1.7 trata de aclarar se puede apreciar la definición de angularidad propuesta por Lees.

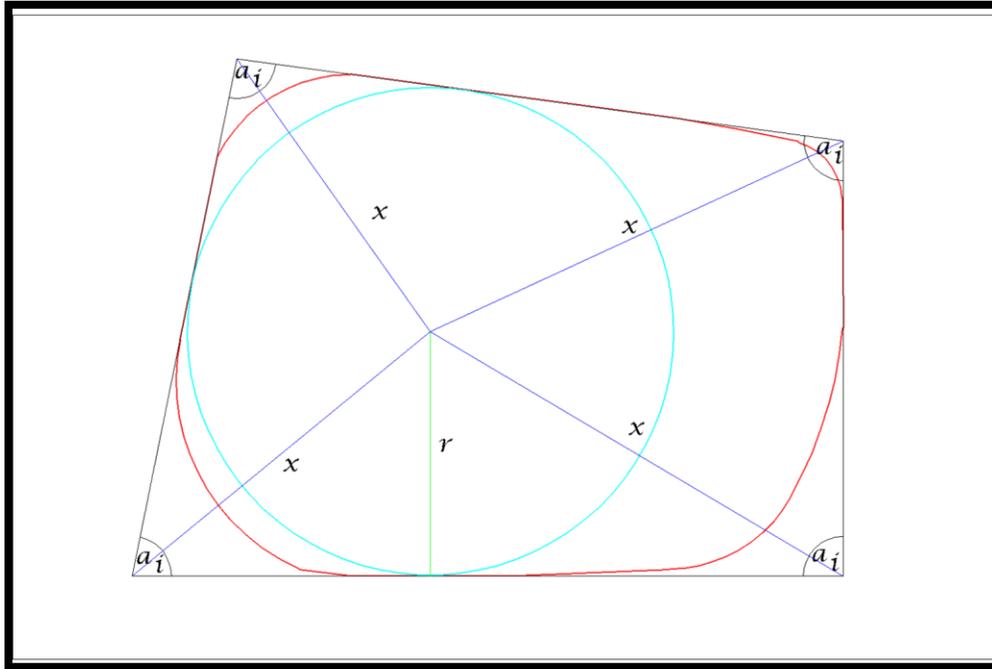


Figura 1.7 Definición de angularidad de acuerdo a Lees (1964): en verde, el radio de la circunferencia máxima inscrita en la partícula natural; en rojo, el contorno de la partícula natural; en azul cielo, la circunferencia máxima inscrita; y en azul fuerte, la distancia del centro de la circunferencia máxima inscrita a las esquinas que forman las rectas tangentes a los lados de la partícula natural.

1.4. INICIO DE MOVIMIENTO

Tal como lo indica Shibayama (2009, pág. 143), existen dos grandes problemas dentro de los procesos costeros. El primero es la erosión y el segundo es la deposición o acumulación de material. En las playas de arena, la erosión ocurre cuando grandes olas atacan la parte más alta del perfil de playa (las dunas) durante una tormenta. La acumulación, por otra parte, es un problema presente a interior de los puertos y en desembocaduras de ríos que dan al océano. En el caso de los puertos, el problema de acumulación de material sedimentario se traduce en las operaciones de dragado que se deben llevar a cabo a lo largo de la vida operativa del puerto para cumplir con los calados que se requieren para los barcos que arriben a ellos.

El entendimiento de estos dos procesos costeros es necesario para enfrentar los problemas. Aunque es posible abordar el transporte de sedimentos para el caso de material fino (limos y arcillas), en este apartado solo se mencionará la teoría (ecuaciones que representan ambos procesos) referente al material grueso (arenas, principalmente).

Tabla 1.8 Fórmulas para calcular la circularidad de una partícula natural [Blott & Pye (2008, pág. 57)]

Autor	Fórmula	Rango
Pentland 1927	$\frac{4A}{\pi a^2}$	0 a 1
Cox 1927	$\frac{4\pi A}{Pe^2}$	0 a 1
Tickell 1931	$\frac{4A}{\pi (D_{cs})^2}$	0 a 1
Wadell 1933	$\sqrt{\frac{4\pi A}{Pe^2}}$	0 a 1
Wadell 1935	$\sqrt{\frac{4A}{\pi (D_{cs})^2}}$	0 a 1
Riley 1941	$\sqrt{\frac{D_{in}}{D_{cs}}}$	0 a 1
Janoo 1998	$\frac{Pe^2}{A}$	4π a ∞

Para poder predecir el transporte de sedimentos, es de suma importancia comprender los cambios en la variación en la línea de costa. Los cambios en el perfil de playa, se cuantifican a través del empleo de la ecuación de la conservación. Al darle un tratamiento matemático a dicha ecuación, se tiene la posibilidad de calcular lo que se conoce como tasa de transporte de sedimento (ver Shibayama, 2009 pág. 144). Además, la ecuación de momento de partículas individuales sedimentarias puede ser utilizada. A partir de esto, Shibayama cita la forma de las ecuaciones de momento para el caso de flujo laminar y flujo turbulento (ver Shibayama, 2009, págs. 144, 145, 146). A decir sobre estas ecuaciones, resulta impráctico aplicarlas. Además, con propósito ingenieril, las ecuaciones, en la medida de lo posible, deberán ser lo más sencillas posibles. Para lograr esto último, hay que recurrir a la experimentación. La aportación más importante en torno a esta temática ha sido el trabajo realizado por Shields (1936). Lo que hoy se conoce como parámetro de Shields es la variable utilizada en esta tesis para determinar los umbrales de movimiento de la arena de las playas estudiadas de la Península de Yucatán.

1.4.1. Parámetro de Shields, ψ , parámetro de Shields crítico y parámetro modificado de Shields

Considérese flujo constante sobre un fondo conformado por partículas no cohesivas. El diagrama de cuerpo libre de una partícula individual es la que se muestra en la Figura 1.8.

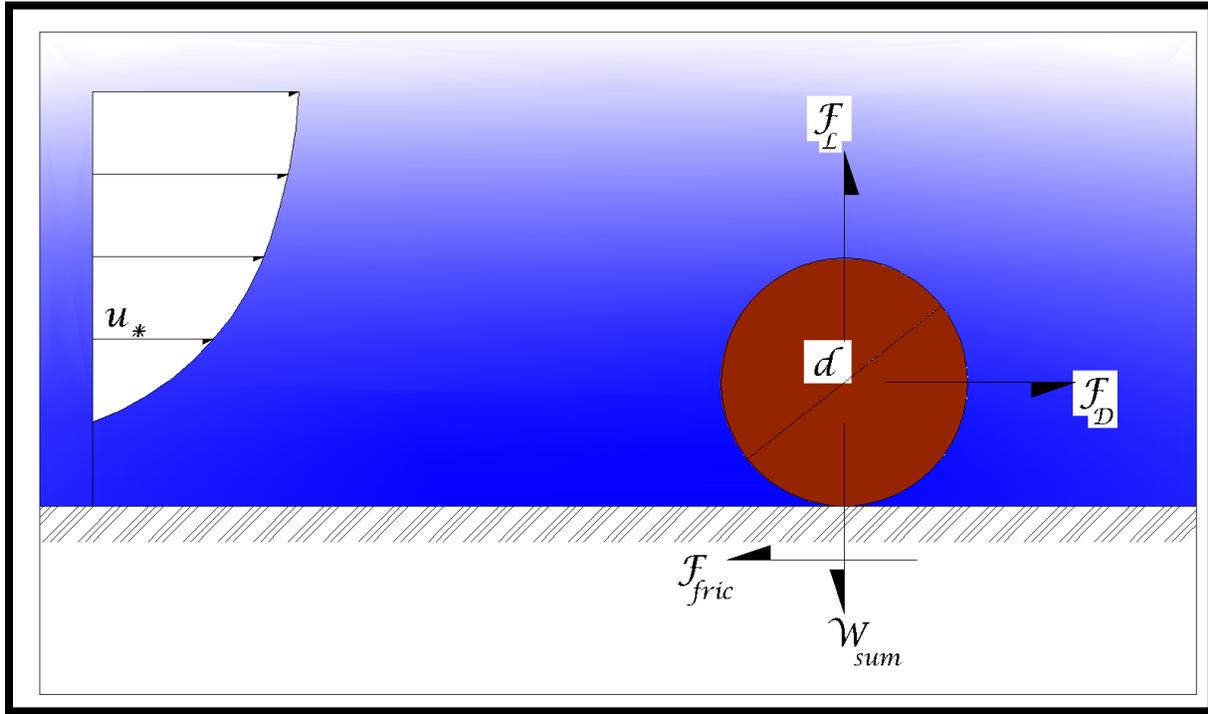


Figura 1.8 Fuerzas actuantes en una partícula en reposo sobre un fondo plano

La fuerza que pone en desbalance a la partícula es la fuerza de arrastre, F_D , la cual es

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D \frac{\pi d^2}{4} (\alpha u_*)^2 \quad [1.45]$$

Donde u_* se denomina como velocidad de fricción, y que es la velocidad del flujo cerca del fondo, α es un coeficiente utilizado para modificar la velocidad de fricción, así que αu_* es la velocidad del flujo después de sobrepasar a la partícula. Como a toda acción, corresponde una reacción de igual magnitud, pero de sentido opuesto, la fuerza de fricción, F_{fric} , es la que trata de estabilizar a la partícula. Sin embargo, se llega a un punto "crítico" en el balance de fuerzas, de tal suerte que la variable u_{*c} se le ha llamado con el nombre de "velocidad de fricción crítica", y que es la velocidad máxima de flujo que puede resistir la partícula. Con ello, se logra el movimiento de la partícula, y que si el dato del diámetro de partícula es el diámetro representativo de una muestra, será la velocidad de inicio de movimiento de ese material. La relación matemática que se establece en este punto crítico, es que la fuerza de arrastre es igual a la fuerza de fricción, en lenguaje algebraico esto es

$$\frac{1}{2} \rho_w C_D \frac{\pi d^2}{4} (\alpha u_{*c})^2 = f \left[(\rho_s - \rho) g \frac{\pi d^3}{6} - \frac{1}{2} \rho_w C_L \frac{\pi d^2}{4} (\alpha u_{*c})^2 \right] \quad [1.46]$$

En donde C_D y C_L son los coeficientes de arrastre y de sustentación que dependen de la forma y redondez del material sedimentario, y que usualmente se determinan experimentalmente en el laboratorio; y f es el coeficiente de fricción. Al realizar un poco de álgebra, se llega a

$$\frac{u_{*c}^2}{\Delta g d} = \frac{4f}{3\alpha^2(C_D + C_L f)} \quad [1.47]$$

El lado izquierdo de la ecuación 1.47 es a lo que se le llama parámetro de Shields denotado con la letra griega psi (ψ), entonces

$$\psi = \frac{u_*^2}{\Delta g d} \quad [1.48]$$

El inicio del movimiento del material sedimentario se dará si se rebasa cualquiera de los siguientes límites

$$u_* > u_{*c}, \quad \tau_b > \tau_{bc}, \quad \psi > \psi_c$$

Donde τ_b es el esfuerzo cortante en el fondo, y el subíndice c representa la situación “crítica” de inicio de movimiento del material sedimentario.

Tradicionalmente, el parámetro de Shields es representado en una curva que lleva el mismo nombre, en donde el eje horizontal se coloca los valores del número de Reynolds, mientras que en el eje vertical quedan los valores del parámetro de Shields. Sin embargo, esta forma de graficar resulta inconveniente debido a que en ambos números adimensionales (Reynolds y Shields) llevan la velocidad de fricción, la cual hasta el momento su valor es desconocido. Madsen & Grant (1976) hicieron un cambio, el cual fue que, en lugar de colocar el número de Reynolds en el eje horizontal en la gráfica de Shields, colocaron otra variable adimensional, llamada “parámetro fluido - sedimento”, S_s , sin que ello representara alguna modificación en la curva de Shields. Por otra parte, Soulsby (1997) propone una transformación matemática al pasar del número de Reynolds al parámetro de Yalin o diámetro adimensional del material, d_* , donde tal variable adimensional también se puede colocar en el eje horizontal de la gráfica de Shields (Van Rijn, 1984b; pág. 1615). En la Figura 1.9 puede apreciarse el diagrama de Shields.

Con base a lo anterior, es posible establecer que al parámetro de Shields se le puede considerar como el primer paso hacia la caracterización y evaluación del transporte de sedimentos. La meta para tener cuantificada de manera total y segura este fenómeno es alta, y aún con todo lo que se ha realizado, investigado, publicado, etc., el fenómeno en si es muy complejo.

Es importante mencionar que el problema de transporte de sedimentos puede dividirse y tratarse como ortogonal y longitudinalmente a la línea de costa, y que cada parte tendrán sus ecuaciones propias para atacar el problema. En la Tabla 1.9 se muestran algunas ecuaciones empíricas que permiten calcular el parámetro de Shields crítico de una manera directa sin recurrir al método tradicional (iterativo).

Tabla 1.9 Ecuaciones empíricas que permiten el cálculo directo del parámetro de Shields crítico [Beheshti & Ashtiani (2008, pág. 424); Soulsby (1997, pág. 106)]

Investigador (año)	Fórmula
Bonnefille (1963)	$\psi_{cri} = \begin{cases} 0.118d_*^{-0.468} & d_* < 2.33 \\ 0.137d_*^{-0.648} & 2.33 \leq d_* < 9.15 \\ 0.063d_*^{-0.298} & 9.15 \leq d_* < 15.28 \\ 0.9d_*^{0.424} & 15.28 \leq d_* < 58.3 \end{cases}$
Chien & Wan (1983)	$\psi_{cri} = \begin{cases} 0.126d_*^{-0.44} & d_* < 1.5 \\ 0.131d_*^{-0.55} & 1.5 \leq d_* < 10 \\ 0.0685d_*^{-0.27} & 10 \leq d_* < 20 \\ 0.0173d_*^{0.19} & 20 \leq d_* < 40 \\ 0.0115d_*^{0.30} & 40 \leq d_* < 150 \\ 0.052 & d_* \geq 150 \end{cases}$
Soulsby (1997)	$\psi_{cri} = \frac{0.30}{1.0 + 1.2d_*} + 0.055 \left[1.0 - e^{-0.02d_*} \right]$
Paphitis (2001)	$\psi_{cri} = \frac{0.273}{1.0 + 1.2d_*} + 0.046 \left[1.0 - 0.576e^{-0.02d_*} \right]$ <p>Si $0.01 < Re_* < 10000$</p>
Hager & Oliveto (2002)	$\psi_{cri} = \begin{cases} 0.12d_*^{-0.5} & d_* \leq 10 \\ 0.026d_*^{0.167} & 10 < d_* < 150 \\ 0.06 & d_* \geq 150 \end{cases}$
Cheng (2004)	$\psi_{cri} = 0.147d_*^{-0.29}$ <p>Si $0.114 \leq d_* \leq 35.4$ y $0.02 \leq Re_* \leq 48.8$</p>
Sheppard & Renna (2005)	$\psi_{cri} = \begin{cases} 0.25 + 0.1d_*^{0.5} & 0.1 < d_* < 3 \\ 0.0023d_* - 0.000378d_* \left[\ln(d_*) \right] + \frac{0.23}{d_*} - 0.005 & 3 < d_* < 150 \\ 0.0575 & d_* > 150 \end{cases}$
Cao et al. (2006)	$R_d = d \sqrt{\frac{\Delta g d}{\nu}}$ $\psi_{cri} = \begin{cases} 0.1414R_d^{-0.2306} & R_d < 6.61 \\ \frac{\left[1.0 + (0.0223R_d)^{2.8358} \right]^{-0.3542}}{3.0946R_d^{0.6769}} & 6.61 \leq R_d \leq 282.84 \\ 0.045 & R_d > 282.84 \end{cases}$

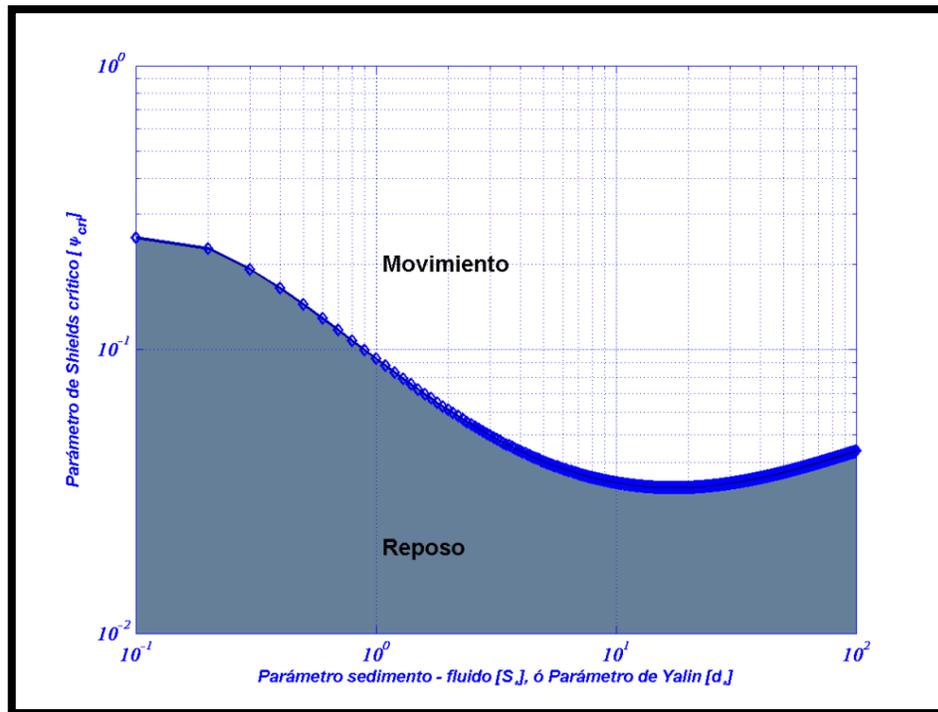


Figura 1.9 Curva de Shields modificada.

1.4.2. Principios Básicos del Transporte de Sedimentos

En este apartado se presentan las bases para explicar el fenómeno del transporte de sedimentos, particularmente el transporte de sedimentos presente en cualquier línea costera conformada por materiales granulares (arenas y gravas).

1.4.2.1. Características del flujo unidireccional

A continuación se enuncian las definiciones principales para este tipo de flujos.

Esfuerzo cortante en el fondo está definido como la fuerza actuante por unidad de área, esta área conformada por la superficie del sedimento presente en el fondo. Este esfuerzo se representa generalmente con la letra griega tau (τ_b).

La **velocidad del esfuerzo cortante** es un parámetro que se utiliza como una representación alternativa del esfuerzo cortante, y se simboliza como u_* . Tanto τ_b como u_* tienen unidades, en el SI, de $N\ m^{-2}$ y $m\ s^{-1}$, respectivamente. Su definición algebraica está dada como

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_w}} \quad [1.49]$$

Se define como flujo laminar cuando la mezcla ocurre a una escala molecular, mientras que el flujo turbulento ocurre cuando hay un intercambio de “paquetes” de agua (Hardisty, 1990).

Es posible establecer una clasificación de “capas” que se presentan en un flujo unidireccional. Situando al sistema de referencia cartesiano plano xz en el fondo se puede establecer esta clasificación.

1.4.2.1.1. Clasificación científica

En la Figura 1.10 se puede ver las capas que conforman al flujo unidireccional. Comenzando del fondo hacia arriba, se tiene (Liu, 2001)

1. Subcapa viscosa: una delgada capa justo por encima del fondo. En esta capa casi no hay turbulencia. Mediciones muestran que el esfuerzo cortante en el fondo en esta delgada capa es constante. El flujo es laminar, mientras que por encima de esta capa el flujo es turbulento.
2. Capa de transición: también llamada capa reguladora o amortiguadora. La viscosidad y la turbulencia son igualmente importantes.
3. Capa logarítmica turbulenta: el esfuerzo cortante viscoso puede ser despreciado en esta capa. Basado en mediciones, en esta capa es supuesto que el esfuerzo cortante turbulento es constante e igual al esfuerzo cortante en el fondo. Es en esta capa donde Prandtl introdujo el concepto de “longitud de mezclado” y derivado el perfil logarítmico de velocidad.
4. Capa exterior turbulenta: las velocidades que se desarrollan en esta capa son prácticamente iguales porque la presencia de grandes remolinos propician el fuerte mezclado del flujo.

1.4.2.1.2. Clasificación ingenieril

En la capa logarítmica turbulenta las mediciones muestran que el esfuerzo cortante turbulento es constante e igual al esfuerzo cortante del fondo. Considerando que la longitud de mezclado es proporcional a la distancia del fondo, $l = \kappa z$, Prandtl obtuvo el perfil de velocidades logarítmico.

Varias expresiones han sido propuestas para la distribución de velocidades en la capa de transición y la capa externa turbulenta. A pesar de ello, ninguna de ellas ha sido aceptada completamente. Realizando una modificación al concepto de longitud de mezclado, el perfil logarítmico de velocidades aplica también a la capa de transición y a la capa exterior turbulenta. Mediciones y velocidades calculadas muestran una compatibilidad adecuada.

Desde el punto de vista ingenieril, una capa turbulenta con el perfil logarítmico de velocidades abarca la capa de transición, la capa logarítmica turbulenta y la capa externa turbulenta (ver Figura 1.11).

La subcapa viscosa, el efecto de la rugosidad del fondo en la distribución de la velocidad fue investigada por primera vez por Nikuradse. Él introdujo el concepto de rugosidad equivalente de la partícula, k_s (conocida, por tanto, como rugosidad de Nikuradse o rugosidad de fondo). Basado en datos experimentales, él determinó que (Liu, 2001)

1. El flujo es hidráulicamente suave para $\frac{u_* k_s}{\nu_w} \leq 5$. Esto es, la rugosidad de fondo es mucho menor que el grosor de la subcapa viscosa. Además, la rugosidad de fondo no afectará la distribución de velocidades.
2. Flujo hidráulicamente rugoso cuando $\frac{u_* k_s}{\nu_w} \geq 70$. Esto significa que la rugosidad de fondo es tan grande que produce remolinos cerca del fondo. No existe una subcapa viscosa y la velocidad de flujo no depende de la viscosidad.

3. Flujo hidráulicamente en transición cuando se cumple $5 \leq \frac{u_* k_s}{\nu_w} \leq 70$. La distribución de velocidad se ve afectada por la rugosidad de fondo y la viscosidad.

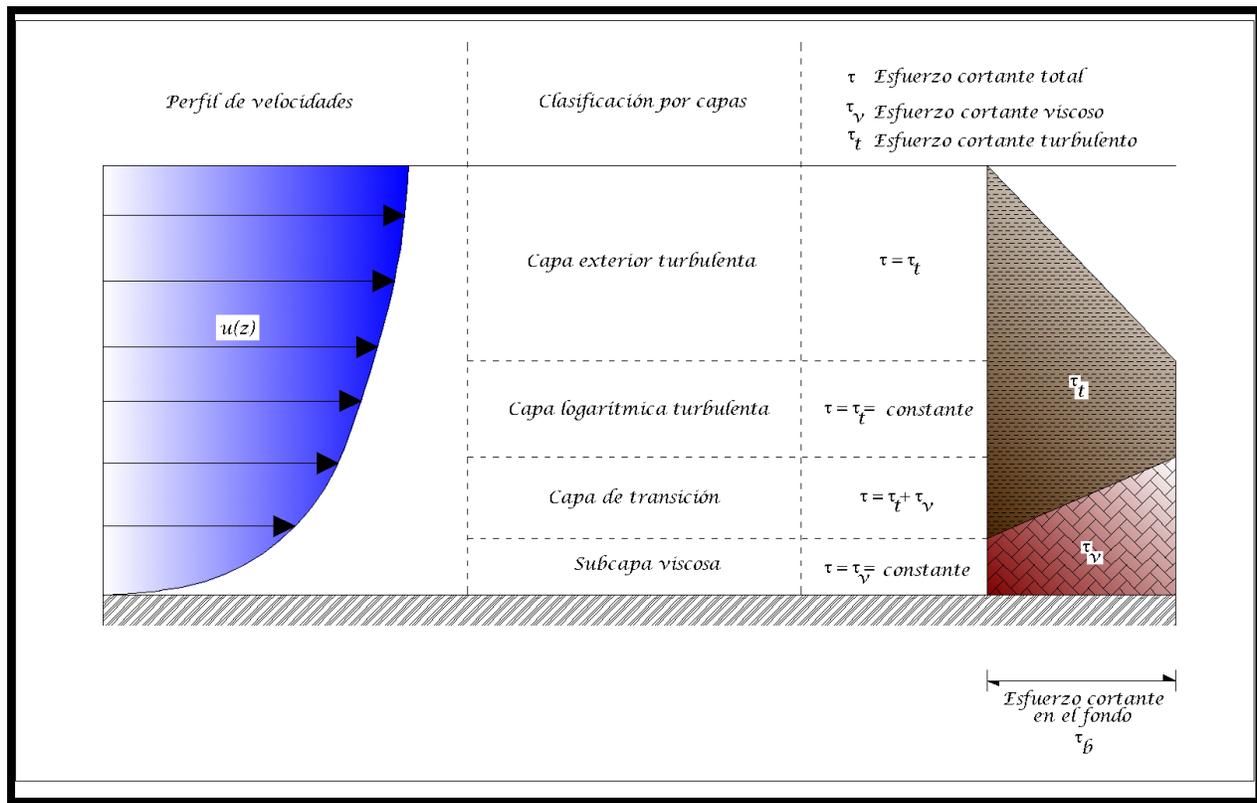


Figura 1.10 Clasificación científica por capas del flujo unidireccional (las capas no están a escala; la capa exterior turbulenta abarca del 80 al 90% de la región mostrada en la figura)

1.4.2.1.3. Distribución de velocidad en la capa turbulenta

Existen dos ecuaciones fundamentales de uso común para determinar el esfuerzo cortante dentro de la capa límite. La primera utiliza la observación que, para una buena aproximación, el esfuerzo cortante es proporcional al cuadrado de la velocidad, es decir

$$\tau = \rho_w C_{Dz} u_z^2 \quad [1.50]$$

A la ecuación 1.50 se le conoce como “Ley del esfuerzo cuadrático”, (Hardisty, 1990), en donde se requiere el conocimiento previo del coeficiente de arrastre C_{Dz} , el cual su valor depende tanto de la forma del sedimento como de la configuración de fondo, perdiendo con ello versatilidad la ecuación 1.50. La segunda ecuación fundamental se le conoce como “Ley semilogarítmica de Von Karman” (ecuación 1.55), donde las expresiones para conformar tal ley, así como el procedimiento algebraico se enuncia enseguida.

En la capa turbulenta el esfuerzo cortante total contiene solo al esfuerzo cortante turbulento. El esfuerzo cortante turbulento aumenta linealmente con la profundidad (de la superficie libre del agua hacia el fondo), esto es (Liu, 2001)

$$\tau_t(z) = \tau_b \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad [1.51]$$

Por el concepto de la longitud de mezclado de Prandtl, se tiene que

$$\tau_t = \rho_w l^2 \left(\frac{du}{dz}\right)^2 \quad [1.52]$$

Y suponiendo que la longitud de mezcla es

$$l = \kappa z \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{1/2} \quad [1.53]$$

Donde la constante de Von Karman vale $\kappa = 0.4$; al combinar las ecuaciones 1.51 a la 1.53, se obtiene

$$\frac{du}{dz} = \frac{\sqrt{\tau_b / \rho_w}}{\kappa z} = \frac{u_*}{\kappa z} \quad [1.54]$$

Al realizar la integral definida entre z_0 y z de la ecuación 1.53, se obtiene la expresión del perfil de velocidades logarítmico [ver a Van Rijn (1984a; pág. 1436); Jerolmack et al. (2006; pág. 3)]

$$u(z) = \int_{z_0}^z \frac{u_*}{\kappa} \frac{dz}{z} = \frac{u_*}{\kappa} [\ln(z) - \ln(z_0)]$$

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad [1.55]$$

1.4.2.1.4. Modos de transporte

El agua fluyendo sobre la cama conformada por el material sedimentario ejerce fuerzas distribuidas a lo largo del fondo las cuales tienden a mover a partículas individuales. Para velocidades bajas del flujo de agua la fuerza gravitacional, la cual se opone al movimiento, es mucho más grande que la fuerza total que ejerce el flujo debido a su movimiento, por lo cual el movimiento del material sedimentario no ocurre. Si el flujo se va incrementando gradualmente las partículas más expuestas se ven sometidas a un vibrado en sus posiciones actuales hasta el punto que no sean capaces de mantener sus posiciones comenzando el movimiento de, primero partículas individuales, seguidas de una agitación más grande de partículas para terminar con el desplazamiento de la capa superior del material sedimentario hacia aguas abajo [Hardisty (1990, pág. 115)]. Los parámetros de flujo los cuales prevalecen bajo estas condiciones representan un importante estado en la problemática del transporte de sedimentos, llegando a la siguiente idea: “La condición crítica de flujo se define como la que, si se excede, resulta en el desplazamiento del material sedimentario más expuesto del fondo”. En algunos textos, por ejemplo Hardisty (1990) y Soulsby (1997), mencionan dos modos de transporte de sedimentos. En Liu (2001) se mencionan tres modos de transporte y no solo dos. Aquí se mencionará a Liu, aunque finalmente el tercer modo de transporte puede omitirse al realizar el cálculo de las tasas de transporte de sedimentos y con ellos el transporte en sí.

1. **Transporte por fondo (Bedload transport):** (Liu, 2001).- la parte correspondiente al transporte total donde el material que se está moviendo tiene un contacto físico con la cama de sedimentos casi continuo. De esta manera, la carga de material por fondo deber ser determinada en relación al esfuerzo cortante efectivo (τ_b') el cual actúa de manera directa en la superficie de las partículas.

También, como lo define Hardisty (1990), “se define como el movimiento de partículas, cuyo peso es totalmente apoyado por fuerzas de transmisión sólidas”. Esta descripción bastante idealizada es suficiente para los fines que se buscan en esta tesis, pero como se mencionó ya antes, este proceso en realidad es bastante complejo. En la práctica, refiriéndose al trabajo que se lleva a cabo en los laboratorios, la turbulencia del flujo sumado a la heterogeneidad de los tamaños del sedimento que conforman la capa superior de la cama de sedimentos resulta en una dispersión en las observaciones que se realicen bajo las condiciones críticas. Si además se incrementa la velocidad del flujo entonces el escenario buscado se transforma debido a que las partículas son puestas en suspensión y trasladadas a lo largo del “cuerpo” del flujo de agua, llegando a definir el segundo modo de transporte.

2. **Transporte por suspensión (Suspended load transport):** (Liu, 2001).- la parte del total del transporte total de sedimentos que se mueve sin tener contacto con el fondo como resultado de la agitación del fluido debido a la turbulencia. La aparición de rizos (ripples) incrementará el esfuerzo cortante del fondo (mayor oposición al flujo). Por otra parte, más partículas se pondrán en suspensión debido a la separación del flujo en el sotavento de los rizos.

A su vez, Hardisty (1990) indica que “el transporte de sedimentos por suspensión está dado por el movimiento de partículas cuyo peso está totalmente apoyado por fuerzas de transmisión líquida”.

Estas dos definiciones son sin duda opuestas y con ellas se ha simplificado el problema del transporte de sedimentos, pero en la realidad las dos definiciones fungen como los límites inferior y superior de un rango en el cual están muchas combinaciones de ambos modos de transporte. Con estas dos definiciones serán suficientes para establecer la forma fundamental de resolver el problema del transporte de sedimentos.

Pero como se mencionó antes, Liu (2001) da un tercer modo de transporte y que solo se mencionará para complementar un poco más el tema de transporte de sedimentos.

3. **Transporte diluido (Wash load transport):** partículas muy finas son transportadas por el agua, pero éstas no pertenecen a la cama de sedimentos. Por eso el conocimiento de la composición de la cama de material sedimentario no permite predicción alguna del transporte por dilución.

En el SI, las unidades para el transporte de sedimentos, representado generalmente por la letra minúscula q , es $\frac{m^3}{m * s}$, y que se lee como *metros cúbicos de sedimento por cada segundo en un metro de ancho*.

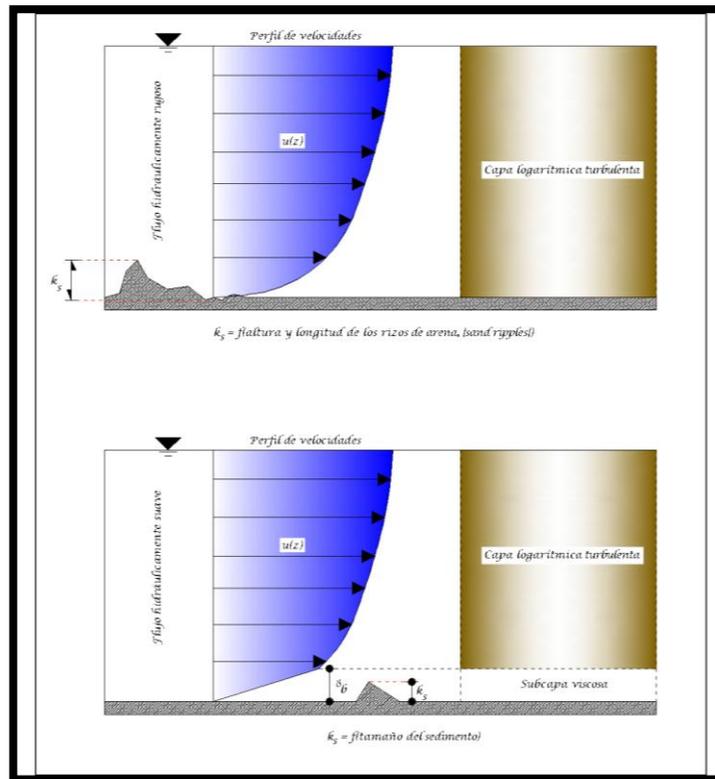


Figura 1.11 Clasificación ingenieril por capas y rugosidad de fondo. El espesor de la subcapa laminar no está a escala

1.4.2.1.5. Formas de fondo y rugosidad de fondo

Una vez iniciado el movimiento del material sedimentario, pueden darse lugar distintas formas de fondo. En experimentos en el laboratorio, las formas de fondo ocurren de la siguiente manera conforme se aumenta la velocidad del flujo (Liu, 2001):

Fondo o cama plana → Rizos (ripples) → Dunas → Antidunas

Rizos: esta forma de fondo se lleva a cabo en flujos relativamente débiles en cuanto a su intensidad, y están vinculados con materiales finos, con diámetros característicos D_{50} menores a los 0.7 mm (referentes a materiales granulares, de arenas medias a finas). El tamaño de los rizos es controlado principalmente por el tamaño del sedimento. De acuerdo a observaciones, la altura y longitud usuales de los rizos se determinan como

$$H_r = 100D_{50}; \text{ y } L_r = 1000D_{50}$$

En flujos de baja intensidad los rizos son bastante regulares con una pendiente aguas arriba de 6° y una pendiente aguas debajo de 32° .

Dunas: El aspecto (shape en inglés) de las dunas es muy similar al de los rizos, pero son mucho más largos. El tamaño de las dunas está controlado principalmente por el flujo del fondo. A las dunas se les asocia con tamaño de partículas gruesas, con D_{50} mayores a los 0.6 mm.

Con el incremento de la intensidad del flujo las dunas crecen, y la profundidad del agua en la cresta de las dunas es menor. Esto último significa en un aumento en la velocidad bastante considerable en la cresta de las dunas. Con ello las dunas son alisadas y se forma una cama de sedimentos plana en una nueva etapa.

Antidunas: cuando el número de Froude excede la unidad, se puede hablar de formaciones de fondo constituidas por antidunas. La altura de ola en la superficie libre del agua es del mismo orden que la altura de la antiduna. La superficie la ola es inestable y puede aumentar y romper en dirección aguas arriba, de acuerdo a como las antidunas se mueven en esa misma dirección. En la Figura 1.12 se ilustran estas principales formas de fondo.

1.4.2.1.6. *Esfuerzo cortante efectivo*

En presencia de rizados, la resistencia que se opone al flujo consta de dos partes, la primera se origina debido al contacto de éste último con la superficie de las partículas, y la segunda se debe a una distribución de presiones que provocan los mismos rizados (Liu, 2001). Esta segunda componente del esfuerzo cortante se calcula como un cociente entre la fuerza de arrastre y el área en planta del rizo.

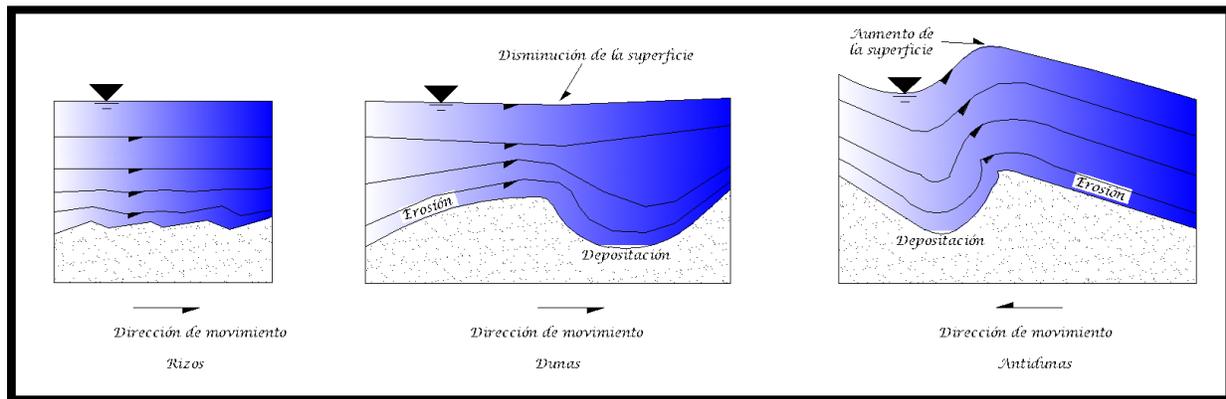


Figura 1.12 Dirección del flujo de agua sobre las formas de fondo, y el movimiento e estos últimos

El esfuerzo que se genera por el roce del flujo con el material sedimentario es lo que Liu (2001) le llama “esfuerzo cortante efectivo”. En el caso de fondo horizontal (flat bed), la rugosidad de fondo usualmente se toma como $2.5D_{50}$, y el esfuerzo cortante efectivo es igual al esfuerzo cortante total, es decir

$$\tau'_b = \tau_b = 0.5 \rho_w \left[\frac{0.06}{\left(\log_{10} \left(\frac{12h}{k_s} \right) \right)^2} \right] U^2 \tag{1.56}$$

En donde h es la profundidad del agua y U es la velocidad promedio de la corriente. En el caso de fondo con rizados, el esfuerzo cortante efectivo, (τ'_b) , se calcula como está en la ecuación 1.56, pero el esfuerzo cortante total es más grande debido a la distribución de presión ya mencionada antes. Entonces, el esfuerzo cortante total vale

$$\tau_b = 0.5 \rho_w \left[\frac{0.06}{\left(\log_{10} \left(\frac{12h}{H_r} \right) \right)^2} \right] U^2 \tag{1.57}$$

En donde la rugosidad de fondo se asume como la altura de los rizados, (H_r) .

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

“He sido un niño pequeño que, jugando en la playa, encontraba de tarde en tarde un guijarro más fino o una concha más bonita de lo normal. El océano de la verdad se extendía, inexplorado, delante de mi.”

Isaac Newton (1642 – 1727)

2. ASPECTOS GENERALES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Tomando como base los trabajos de López (1973); Weidie (1975); Virgen & Baca (1988); Ward et al. (1985), Ruíz (2009), Ruíz (2010) y Alcérreca (2009; 2011), en primera instancia y a modo de resumen, se presentan los aspectos más relevantes asociados al medio físico, tales como la geología, hidrología, entre otros, de la zona de estudio. A partir de este resumen se aborda el análisis de los sedimentos.

2.1. LOCALIZACIÓN Y LÍMITES

El área de estudio está comprendida entre los paralelos 16° a 22° latitud Norte y aproximadamente entre los 86°41' y 91°03' longitud Oeste (W) con respecto al meridiano de Greenwich. Los límites geomorfológicos de la Península de Yucatán, incluyendo el Banco de Campeche, son los siguientes:

1. Al Norte (N) y parte Noroeste (NW): el Talud Continental del Banco de Campeche
2. Al Sur (S) por el relieve positivo del Arco del libertad, que incluye el Petén de Guatemala y las montañas Maya de Belice
3. Al Oriente (E) por el Talud Continental del Mar Caribe, ya que la plataforma continental es muy angosta
4. Al Oeste (W) la Planicie Costera del Golfo de México, al SE del Estado de Campeche y Oriente del Estado de Tabasco. De hecho no hay cambio fisiográfico apreciable a no ser la presencia del Río Candelaria.

2.2. GEOLOGÍA

En los siguientes párrafos se presenta un resumen del trabajo realizado por Virgen & Baca (1988), en el cual se aborda sobre la geología de la unidad fisiográfica denominada "Península de Yucatán".

"En la mayor parte de la Península de Yucatán aflora una secuencia cenozoica, principalmente calcárea, que no presenta deformaciones significativas y está formada por capas que conservan una actitud horizontal.

Tanto la secuencia Cretácica que se encuentra en el subsuelo, como la secuencia Cenozoica, no presenta mayores perturbaciones estructurales ya que sobreyacen a una masa cristalina que ha permanecido estable desde el Paleozoico. La secuencia Cretácica está constituida principalmente por anhidritas, calizas, dolomías e intercalaciones de bentonitas y algunos materiales piroclásticos, sobre todo hacia la base que se encuentra formada por las Evaporitas Yucatán (López Ramos, 1979).

Los depósitos Cenozoicos están representados principalmente por secuencias calcáreas y dolomíticas con intercalaciones de evaporitas. Butterlin y Bonet (1963), han reconocido una columna que varía desde el Paleoceno hasta el Cuaternario. Esta columna incluye, en orden ascendente, las Formaciones Chichén Itzá e Icaiche del Paleoceno – Eoceno; las Formaciones Bacalar, Estero Franco y Carrillo Puerto del Mioceno Superior – Plioceno y las calizas con moluscos del Pleistoceno – Holoceno." En la Tabla 2.1 se presenta la escala de tiempo geológico para una mejor comprensión.

Tabla 2.1 Escala de tiempo geológico.

EÓN	ERA	PERIODO		ÉPOCA		Comienza hace (en millones de años)
FANEROZOICO	Cenozoico	Cuaternario		Holoceno		0.01
				Pleistoceno	Superior	1.00
					Inferior	1.60
		Terciario	Neógeno	Plioceno	Superior	3.40
					Inferior	5.30
				Mioceno	Superior	11.20
			Medio		16.60	
			Inferior		23.70	
			Paleógeno	Oligoceno	Superior	30.00
		Inferior			36.60	
		Eoceno		Superior	40.00	
				Medio	52.00	
				Inferior	57.80	
		Paleoceno		Superior	63.60	
	Inferior			66.40		
	Mesozoico (Secundario)	Cretácico		Superior	Senonense	88.50
						97.50
				Inferior		124.00
					Neocomiense	144.00
		Jurásico		Superior	Malm	163.00
				Medio	Dogger	187.00
				Inferior	Lias	208.00
		Triásico		Superior		230.00
				Medio		240.00
				Inferior		245.00
	Paleozoico (Primario)	Pérmico		Superior		258.00
				Inferior		290.00
		Carbonífero	Pensilvaniense	Superior		320.00
			Misisipiense	Inferior		360.00
		Devónico		Superior		374.00
				Medio		387.00
				Inferior		408.00
		Silúrico		Superior		421.00
				Inferior		438.00
		Ordovícico		Superior		458.00
				Medio		478.00
				Inferior		505.00
		Cámbrico		Superior		523.00
				Medio		540.00
Inferior				590.00		
PRECÁMBRICO	Proterozoico	Superior		900.00		
		Medio		1600.00		
		Inferior		2500.00		
	Azoico Arcaico	Superior		3000.00		
		Medio		3400.00		
		Inferior		3800.00		
	Hadelco				4600.00	

En palabras de López (1973), la composición geológica de la Península de Yucatán consiste en carbonatos autigénicos y anhidritas (roca de mayor densidad y dureza que el yeso, formada por un sulfato de cal anhidro, de acuerdo con la definición dada por la Real Academia Española), precipitados desde el Cretácico Medio – Aptiano hasta el Mioceno (si se refiere el autor al fin del Mioceno, sería hace 5.3 millones de años, fin de

esa época y comienzo del Plioceno). Los espesores de los sedimentos cretácicos de la península varían de 1300 a más de 3150 m, de acuerdo con la información del Pozo Ticul No. 1, lo cual, según López (1973), indica el hundimiento continuo del piso marino del Cretácico, hasta parte de la época del Eoceno (antes del Mioceno) en el que también prevalecieron condiciones evaporíticas y de hundimientos. Tanto las épocas del Oligoceno como el Mioceno – Plioceno son discordantes sobre las rocas del Eoceno y más antiguas. De acuerdo con la gran secuencia evaporítica reconocida por López, particularmente del Cretácico Medio, carece de nombre formacional y dada su amplia extensión geográfica desde el Norte de Guatemala, Sureste de Chiapas y seguramente el Norte de la península, López se propuso nombrar como “Evaporitas Yucatán” para la secuencia de anhidritas, yesos, dolomías y calizas del Cretácico Medio.

Considerando lo mencionado en el párrafo anterior, la Península de Yucatán se encuentra cubierta casi en su totalidad de sedimentos marinos del periodo Terciario de esta última era (Cenozoico).

Por otra parte, en lo que Virgen & Baca (1988) han denominado “Geología Estructural”, la Península de Yucatán se considera como una plataforma que empezó a emerger a principios del Terciario, con un movimiento rotacional de izquierda a derecha por el efecto de la subplaca del Pacífico, no presenta rasgos estructurales relevantes, prevaleciendo echados muy suaves, prácticamente horizontales.

Aunque la litología casi no presenta deformaciones causadas por fenómenos tectónicos, existen en la porción sur del estado de Quintana Roo fallamientos y fracturamientos con orientación general NE – SW y caída de bloque al SE que dieron origen a la formación del Río Hondo, la Laguna Bacalar y la zona pantanosa baja de Chetumal y Corozal, dentro del territorio Beliceño. Como una derivación de este efecto tectónico, junto al Río Hondo, las rocas se presentan fracturadas prevaleciendo la orientación general y dando lugar a lomeríos bajos.

Algunos mapas y figuras que dan cuenta del material que hoy en día existe en la plataforma de la península dadas por Weidie (1975) y Ward et al. (1985) fueron adaptadas y modificadas en estos trabajos, pero en todo caso fueron proporcionadas por López (1973) y que simplemente ello fue producto del intenso trabajo realizado por el ingeniero. Dado que el objetivo del presente capítulo es describir el origen del material sedimentario existente actualmente en las playas estudiadas en este análisis, además de facilitar la lectura de este trabajo, por tal motivo aquí no se presentan dichos mapas, pero pueden consultarse en : Weidie (1975, págs. 12, 14, 16, 19, 21); Ward (1985, págs. 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10); López (1973, págs. 35, 37, 39 – 42); y mencionado en Ruíz (2009, págs. 24 y 26) y Ruíz (2010, pág. 29), siendo que las dos primeras fuentes están en papel, pero que las siguientes tres fuentes pueden consultarse de manera electrónica sin mayor problema. Sin embargo, en la Figura 2.1 se puede notar en color azul claro (imagen de la izquierda) la parte de la plataforma adyacente a la península y que se encuentra sumergida, comparando con una de las figuras dadas a conocer en su momento por López (1973) – imagen de la derecha.

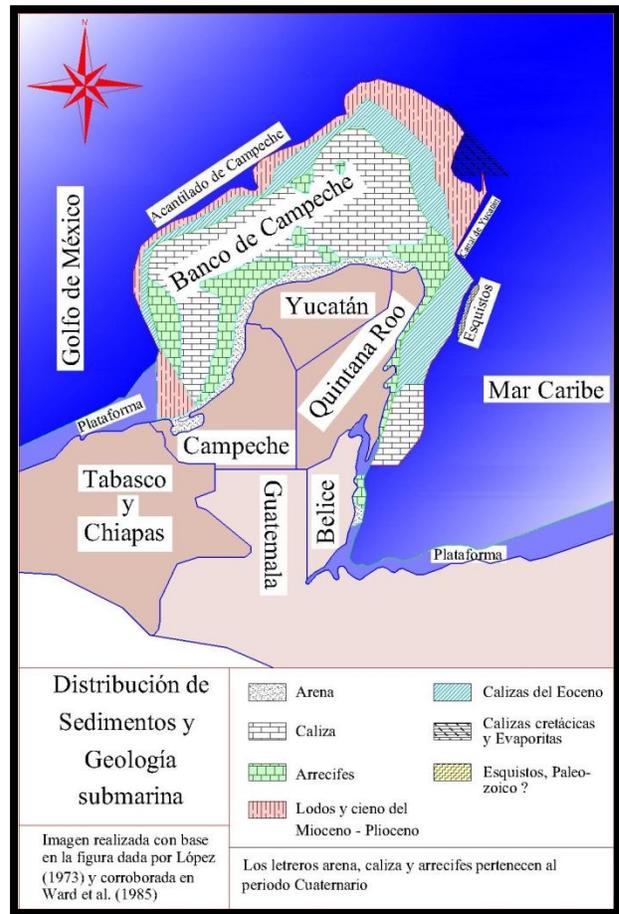
En síntesis, la Península de Yucatán es una plataforma calcárea de origen marino, que empezó a emerger aproximadamente desde hace 26 millones de años (INEGI, 1997), entre las épocas del Oligoceno y Mioceno. Esto quiere decir que, de acuerdo con el ingeniero López (1973) hubo un periodo de hundimiento del piso marino de la península desde el Cretácico hasta el Eoceno, habiendo unos cuantos millones de años que corresponden a la época del Oligoceno (los primeros de la época) para que dicho hundimiento cesara, y así comenzara la emersión de la plataforma a partir de este último periodo. Así, la parte norte de la península es la más reciente; es de terreno plano con una delgada cadena de lomas bajas que al norte de la misma se le conoce como Sierrita de Ticul.



Figura 2.1 Mapa de la Península de Yucatán y la plataforma sumergida adyacente (imagen modificada del INEGI)

2.2.1. Rocas calcáreas: la caliza

Las rocas calcáreas, formadas por ácido carbónico y cal combinados (carbonato de calcio), son duras y de aspecto granuloso; entre ellas se pueden mencionar el mármol, la piedra caliza, la calcita, la creta, etc. Por lo común son blancas, pero presentan también coloraciones muy variadas. De ellas se extraen la cal, la tiza, el yeso y el cemento, que se emplean en la construcción.



La caliza es una roca sedimentaria evaporítica constituida por carbonato de calcio (calcita) aunque en su composición pueden aparecer pequeñas cantidades de otros minerales e impurezas. Su formación, en muchos casos, está asociada a la acumulación de restos de seres vivos (fundamentalmente conchas de moluscos, ricas en carbonato de calcio), como es el caso de algunos segmentos de playa del estado de Quintana Roo, debido a la presencia de los arrecifes de coral. En otros casos, se debe a la precipitación del carbonato disuelto en agua, en ambientes propicios, como sucede en las cuevas, donde el carbonato precipita en forma de caliza y origina las estalactitas y las estalagmitas. En el caso particular de la Península de Yucatán, la capa superficial del manto está constituida por una coraza calcárea, mientras que la porción interna es más blanda y menos consolidada, formada de calizas blandas. Esta estructura favorece la aparición de cavidades subterráneas cuando se disuelve por el ácido carbónico del agua. Es muy frecuente la presencia de resquebrajamiento y la fragmentación debido a variaciones de temperatura y de la acción mecánica de las raíces de los árboles.

La caliza es una roca muy abundante: constituye más del 10% del conjunto de rocas sedimentarias de nuestro planeta. Se presenta en numerosas variedades, que se distinguen por su textura, su contenido en fósiles, su grano (que puede ser fino o basto) y su color. La caliza pura es blanca, pero su contenido en impurezas, como arcilla, óxido de hierro, etc., hace que pueda tener colores crema, rojizo o gris.

Además, la caliza es una roca sedimentaria muy importante, tiene numerosos usos, especialmente en la industria de la construcción. Esta roca, por lo general, es dura, compacta, pero con frecuencia causa problemas a los ingenieros civiles por las siguientes razones (Harvey, 1987):

La caliza está compuesta principalmente por CaCO_3 y una cantidad menor de otros minerales como: arcilla, cuarzo, dolomita, óxidos de hierro, carbón y, con mucha frecuencia, conchas de animales como caracoles, almejas, etc. Muchos restos de organismos son tan pequeños que para observarlos se requieren potentes microscopios; a dichos restos de organismos se les utiliza para determinar la edad de algunas calizas. Debido a los muy diversos minerales que pueden estar presentes en las calizas, existen muchas variedades de estas rocas como por ejemplo la caliza argílica (calcilutita) tiene un alto contenido de arcilla; la caliza arenácea (calcarenita) contiene detritus de cuarzo; la caliza de conchas (fossilífera) contiene abundantes conchas de animales marinos; la caliza dolomítica tiene cristales de dolomita encajados en la calcita; y la caliza oolítica u oolita, que tiene una consistencia parecida a la de la huevera de pescado. Además, este último tipo de caliza (oolita) están en un rango de tamaño entre 0.1 y 1.0 mm de diámetro, son de forma esférica con estructuras radiales y concéntricas, que se desarrollan alrededor de núcleos de fragmentos de conchas, granos de arena de cuarzo o un fragmento de fósil (Alcérreca, 2011). Su formación es química bajo la influencia de corrientes u oleaje de gran energía y en aguas poco profundas (por ejemplo, algunas costas del estado de Yucatán son playas con pendientes muy tendidas o suaves).

2.3. FISIOGRAFÍA

La fisiografía es la descripción y clasificación sistemática de las geoformas (un cuerpo tridimensional que tiene forma, tamaño, volumen y topografía, elementos que generan un relieve) que puede realizarse con apoyo de la interpretación de fotografías aéreas y otras imágenes de sensores remotos (por ejemplo las imágenes satelitales), y que se asocian con los fundamentos de la geomorfología, pero enmarcándolas dentro de un contexto climático específico y caracterizándolas por la naturaleza de su material litológico¹ más superficial y/o su edad relativa, además de atributos secundarios como la pendiente, erosión y drenaje.

Con base en la definición anterior, López (1973) y Ward et al. (1985) dan cuenta de la fisiografía de la Península de Yucatán. El primero dice que la península está dividida en tres regiones, mientras que el segundo comenta que la península está integrada por 4 regiones. Al parecer del autor de esta tesis, la diferencia entre ambas clasificaciones está en que Ward incluye a la Sierrita de Ticul como una unidad fisiográfica, mientras que López la menciona de manera integrada en su clasificación. A raíz de esto, se decidió exponer en los siguientes párrafos la clasificación dada por Ward et al. (1985).

Todas las rocas superficiales de la península son de carbonato, lo cual se ve reflejado en la amplia variedad de formas de carst (carst o karst: mesetas de piedra caliza). El grado de carstificación y el relieve local está estrechamente ligado a la elevación de la región y la profundidad del nivel freático. Con esto, las 4 regiones en que se divide la península son: 1) Llanura del Norte Septentrional de Karst (Northern Pitted Karst Plain), 2) Sierrita de Ticul, 3) Llanuras Sureñas de Karst (Southern Hilly Karst Plain), y 4) Falla de Bloque en el Distrito Oriental (Eastern Block Fault District). En adelante las cuatro regiones se denotaran por las iniciales de sus nombres en inglés, así la uno con NPKP, la dos con ST, la tres con SHKP y la cuatro EBF. De esta forma la región NPKP está hacia el norte y noreste de la Sierrita de Ticul extendiéndose hacia las costas tanto del Golfo de México como del Mar Caribe. La región SHKP se encuentra al sur de la Sierrita de Ticul y continúa en esa misma

¹ La litología es la parte de la geología que trata del estudio de las rocas, especialmente sobre su tamaño, pero además sobre sus características físicas y químicas, textura, tipo de transporte y otros aspectos relacionados. Así, el adjetivo "litológico" se aplica al ciclo geológico que incluye el proceso de formación, destrucción y transformación de una roca en otra.

dirección hasta el pie de la Sierra Madre en los estados de Chiapas y Tabasco, también hasta el Arco de La Libertad en el norte de Guatemala, y hacia las Montañas Maya en Belice. La región EBFD (Isphording, 1975; citado por Ward et al.) es una zona paralela a las costas caribeñas extendiéndose desde el norte de Belice (específicamente el norte de las Montañas Maya) hasta las inmediaciones de Tulum, Quintana Roo (ver Figura 2.2)

Llanura del Norte Septentrional de Karst (Northern Pitted Karst Plain). Esta llanura está bordeada a lo largo del Golfo de México por playas tipo barrera y cordones de dunas los cuales se extienden de manera intermitente a lo largo de la costa. Las lagunas poco profundas y los pantanos costeros frecuentemente se encuentran detrás de los complejos de cordones de dunas. El ancho máximo de la llanura es aproximadamente de 275 km (desde la vecindad del sitio Peto hasta el Cabo Catoche, esto en dirección noreste); el ancho mínimo es de 50 km (desde el sitio llamado Maxcanu hasta Celestun, esto en dirección noroeste). Las elevaciones aumentan lentamente hacia el interior desde la costa hasta un intervalo de 35 – 40 m cerca de la base de la Sierrita de Ticul. Las máximas elevaciones están en la parte central – sur del estado de Yucatán. El relieve local raramente excede los 10 m y el relieve disminuye conforme se dirige a las elevaciones bajas cerca de la costa.

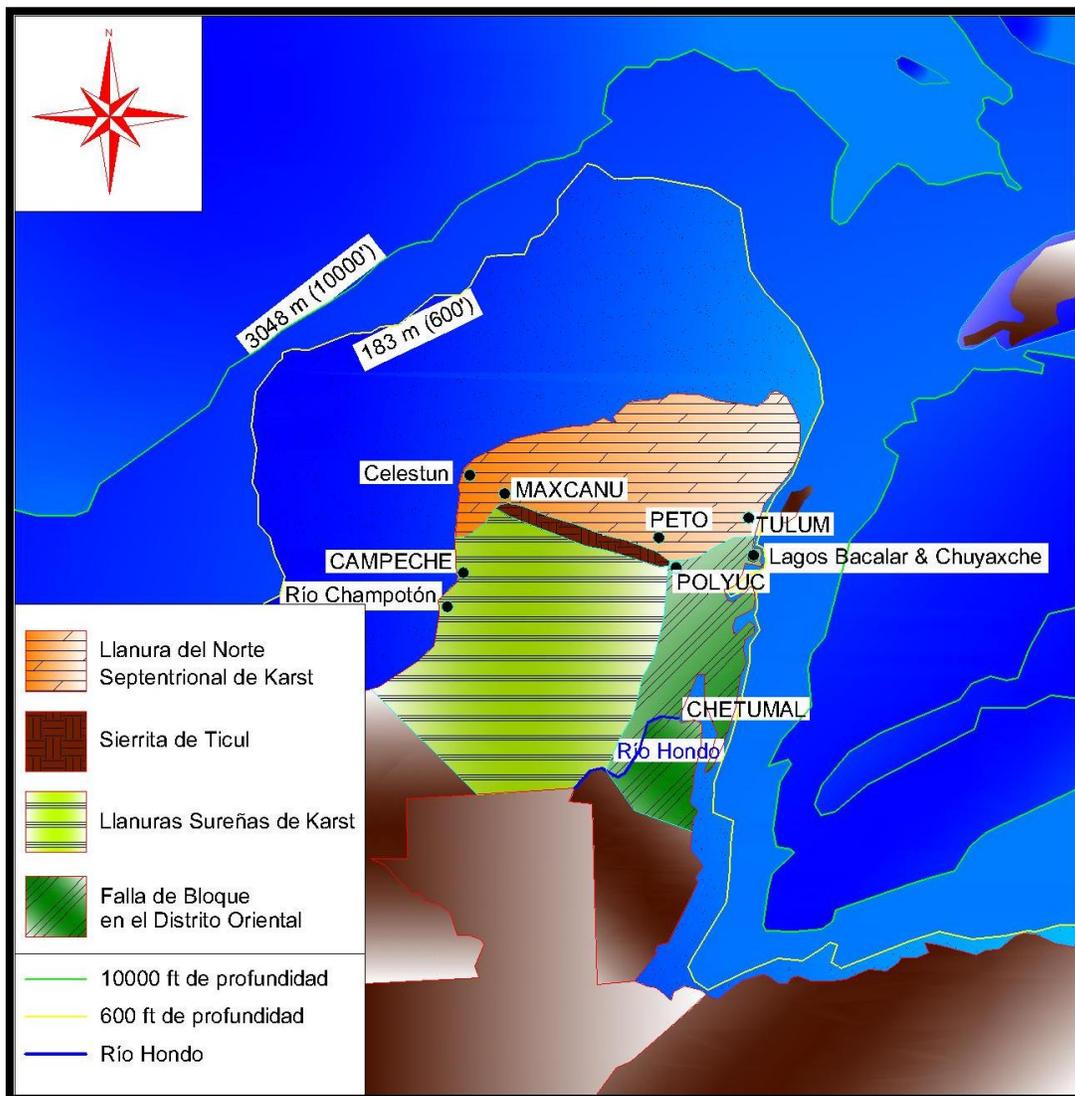


Figura 2.2 Las 4 regiones fisiográficas en que se divide la Península de Yucatán en México (Imagen realizada a partir de la figura dada por Ward et al. (1985; pág. 3)

Sierrita de Ticul.- La Sierrita de Ticul posee una dirección N55W con una longitud aproximada de 160 km. Su extensión parte de Maxcanu hasta la vecindad del lugar llamado Polyuc. Una característica que tiene la Sierrita de ticul es su prominente paramento con dirección noreste y que se extiende a todo lo largo de la sierra. Las elevaciones máximas de la Sierrita de Ticul oscilan en un rango de 100 – 150 m. Hacia el sureste de Polyuc la sierra disminuye su elevación hasta ser prácticamente plano, una característica bien marcada hacia esa zona. Es probable que el desplazamiento a lo largo de la falla de Ticul disminuyera en dirección sureste. La topografía en esta área fue modificada posteriormente por el fracturamiento a lo largo de la Zona de Falla de Río Hondo.

Llanuras Sureñas de Karst (Southern Hilly Karst Plain). - Esta característica fisiográfica se extiende hacia el sur a partir de la Sierrita de Ticul hasta el límite sur de la Península de Yucatán. Las elevaciones máximas rondan el valor de los 300 m y principalmente se hacen ver en la parte central de esta planicie, específicamente en el Este del estado de Campeche. Esto último mencionado está limitado por la zona de falla de Río Hondo. Al Oeste los suaves plegamientos de carbonatos causan ondulaciones topográficas las cuales se extienden desde el Este de Campeche en el Golfo de México cerca de las ciudades de Champotón y Campeche. Los caídos estructurales de 10 – 15° han sido documentados gracias a la información obtenida de los núcleos taladrados a poca profundidad dentro del área. Los caídos de 40° o más han sido reportados (Isphording, 1975), pero es posible que algunos de estos caídos de más de 40° hayan sido causados por movimientos descendentes en zonas topográficamente bajas de disolución de calizas.

Falla de Bloque en el Distrito Oriental (Eastern Block Fault District). - Esta área se extiende a lo largo de la costa caribeña de la península. La topografía, con rumbo Norte – Noreste, se caracteriza por una serie de cimas y depresiones las cuales reflejan la aparición de bloques *horst* (bloque cortical² que queda levantado frente a otros de su entorno) y bloques *graben* (o fosa, depresión originada por el hundimiento mediante fallas de un bloque cortical) en la zona de falla de Río Hondo. Isphording (1975) notó la alineación de las corrientes, lagos y swales (espacios bajos, sobre todo una depresión pantanosa entre los cerros) en esta región; por ejemplo, Río Hondo y los Lagos de Bacalar y Chunyaxche. Localmente, las elevaciones pueden exceder los 200 metros, pero la mayor parte del distrito posee elevaciones entre 50 y 100 metros. El relieve general es de 25 metros pero puede ser más grande en áreas locales adyacentes a fallas de mayor desplazamiento.

2.4. HIDROLOGIA

Existen varias definiciones de hidrología, aquí se mencionará la siguiente (Aparicio, 2008): “Hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos”

Así, tomando como base la definición anterior, habrá que precisar que si bien la hidrología se encarga de la circulación y distribución del agua en la superficie de la tierra, esto hace mención al agua que se encuentra tanto por encima de la superficie como la que circula a través de ella. En este caso, la mayor parte del agua disponible en la Península de Yucatán se localiza y se mueve a través y/o por debajo de la superficie, debido a los rasgos fisiográficos ya mencionados.

Aproximadamente del paralelo 19° N y más hacia al Norte no hay corrientes superficiales (Ward et al. 1985), tal y como puede verse en la Figura 2.3; toda la parte norte de la península es una superficie cárstica. El

² Cortical: *adj.* De la corteza o relativo a ella

agua de lluvia rápidamente se infiltra en la roca de carbonato porosa produciendo con ello una gran variedad de características (o formas) cársticas.

Se cuenta con tres ríos de importancia: Candelaria y Champotón en Campeche y el río Hondo en Quintana Roo, donde este último sirve de frontera internacional con la República de Belice. El conjunto del escurrimiento regional es del orden del 1% respecto al nacional.

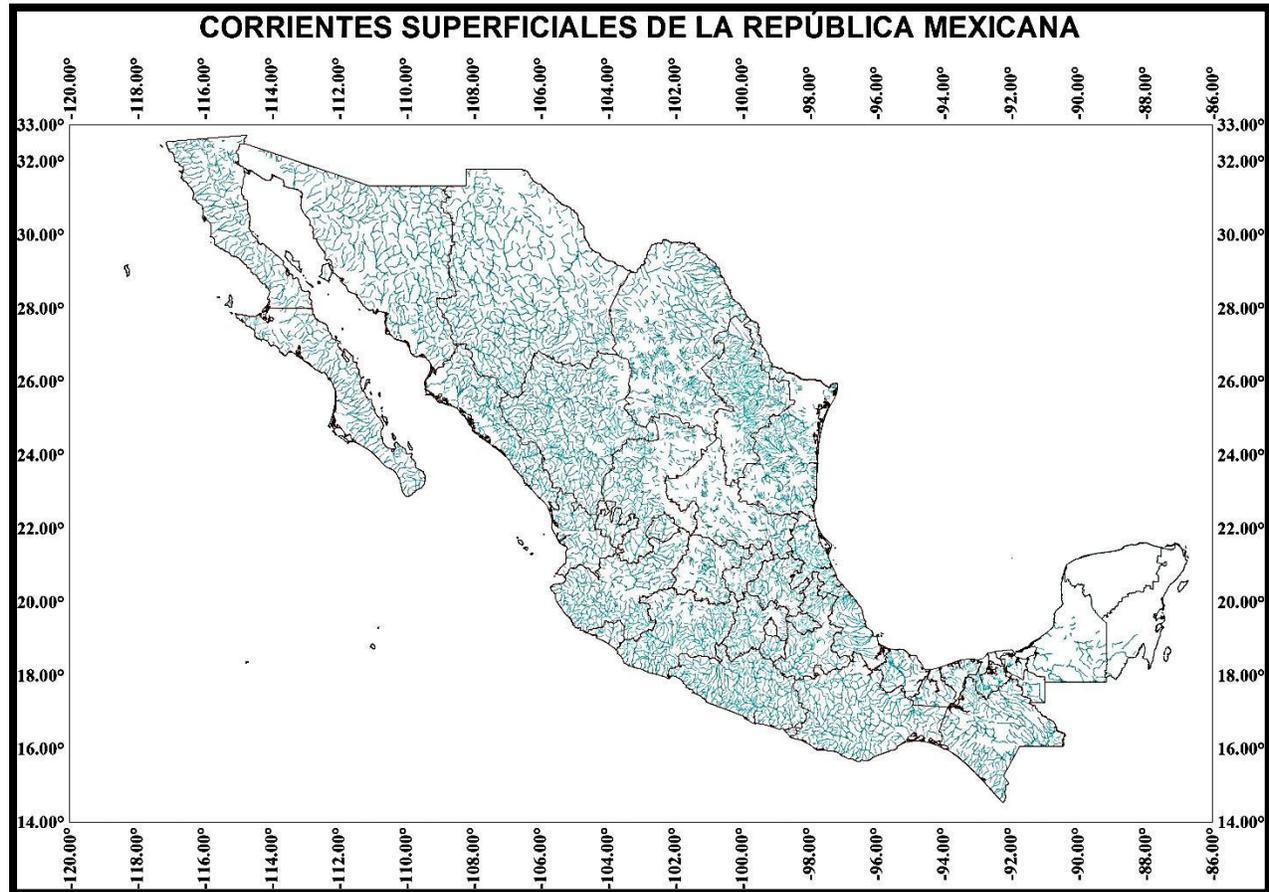


Figura 2.3-Corrientes de agua superficiales de México (Imagen elaborada con base en información dada por el INEGI; fecha de consulta 13 de julio de 2012)

La Península de Yucatán corresponde a una cuenca hidrológica abierta, con un acuífero cárstico de tipo libre, de ahí que al manto de agua se le denomine como freático, donde los niveles de agua varían alrededor de más de 120 metros de profundidad en la parte de lomeríos, 30 metros en la parte de planicie, hasta menos de 5 metros en una franja de 15 km de ancho paralela a la línea de costa. Las rocas acuíferas corresponden al Miembro Pisté del Eoceno Medio y a la formación Carrillo Puerto del Mioceno – Plioceno, las primeras se ubican en la zona de lomeríos y valles, en tanto que las otras en la planicie interior, en ellas se lleva a cabo la mayor parte de extracción de agua subterránea (agua para consumo humano) en la península, con pozos que llegan a producir gastos en un rango de 50 a 80 litros/segundo.

Para establecer el sistema de flujo del acuífero de la península, es necesario determinar las áreas de recarga y descarga. La descarga se lleva a cabo mediante manantiales a lo largo de la costa Este y en forma difusa en la costa Norte, y mucho más difusa hacia la costa Oeste. La alta precipitación y la ausencia de corrientes superficiales indican una gran permeabilidad en toda la Península. En lo que se refiere a la recarga, esta se produce de manera uniforme en toda el área, siguiendo el patrón de distribución de la precipitación.

En los acuíferos cársticos la permeabilidad puede ser función del fracturamiento o bien de la combinación de éste y la permeabilidad de las rocas carbonatadas; sin embargo, frecuentemente las grietas se ensanchan debido a la disolución, con mayor preferencia unas de otras, debido al contenido de carbonato de calcio (CaCO₃) y a las características del agua del lugar; el sistema evoluciona hacia una mayor heterogeneidad con direcciones preferenciales de flujo. Este fenómeno (carstificación) complica los posibles cálculos hidráulicos. En general, esta situación propicia que el almacenamiento y el movimiento del agua subterránea se verifique a través de la red de cavidades interconectadas tales como fisuras, fracturas, planos de estratificación, fallas y conductos de disolución, encontrándose en estos últimos canales, oquedades y cavernas.

La tendencia de la circulación del agua está en relación directa con la densidad de fracturamiento de las formaciones geológicas que conforman el acuífero. El agua en la Península se mueve de las zonas de mayor precipitación hacia la costa, donde se realiza la descarga natural del acuífero, alimentando de paso a los esteros y lagunas costeras, incluso llegando a producir descargas de agua dulce dentro del mar. De esta manera se establece que la dirección general del flujo subterráneo en la península es radial, a partir de la porción más alta que se localiza en la parte centro – sur de la misma (Bolonchén y Xpujil).

La porosidad y permeabilidad de la secuencia calcárea no es la misma en todas direcciones, debido a las diferencias litoestratigráficas. A causa de la gran transmisibilidad del acuífero el gradiente hidráulico es muy pequeño, lo que significa que el agua se mueve en promedio algunos metros por día.³

Para concluir este apartado, en lo que se refiere a la dirección general del flujo subterráneo, Cervantes (2007) expone que dicho flujo no está bien definido y existen muchas dudas sobre tal circulación del agua en la península. Según él, existen tres hipótesis que tratan de explicarlo:

1. Doehring & Butler (1974) y la CNA (2002) sugieren el patrón radial ya descrito.
2. Herrera & Comín (2000) establecen tres patrones de circulación: una principal del centro hacia el norte, una secundaria sin un flujo claro y por último una al sur de Campeche hacia el Golfo de México.
3. Suárez & Rivera (2000) marcan un flujo dominante desde el Sur, hacia el Este y Norte de la misma

Continuando con Cervantes, estas diferencias en opinión se deben a que los patrones de flujo se han construido exclusivamente por las diferencias en altitud de la península. Por lo tanto, esto refleja el desconocimiento sobre la circulación del agua subterránea a escala regional.

2.5. VIENTOS

En meteorología, el viento se estudia como aire en movimiento tanto vertical como horizontalmente. Los vientos que se desplazan verticalmente dan lugar a los fenómenos atmosféricos locales, como la formación de nubes de tormenta, por ejemplo. Para hacer una distinción en ambos movimientos, a las masas de aire que se desplazan verticalmente se les conoce como “corrientes de convección”, mientras que el término de “viento” se aplica a los desplazamientos de masa de aire horizontales.

El viento tiene su génesis por la diferencia de temperaturas existentes en la atmósfera. Esta diferencia de temperaturas existe por la sencilla razón de que en el ecuador se recibe mayor cantidad de energía solar y en los polos se recibe poca y a veces nula energía (ver Figura 2.4).

³ Esta información puesta aquí en estos últimos 5 párrafos fueron tomados del documento **Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán**: UNIDAD DE PROGRAMAS RURALES Y PARTICIPACIÓN SOCIAL. Coordinación de Consejos de Cuenca. Gerencia Regional Península de Yucatán. Comisión Nacional del Agua. SEMARNAT

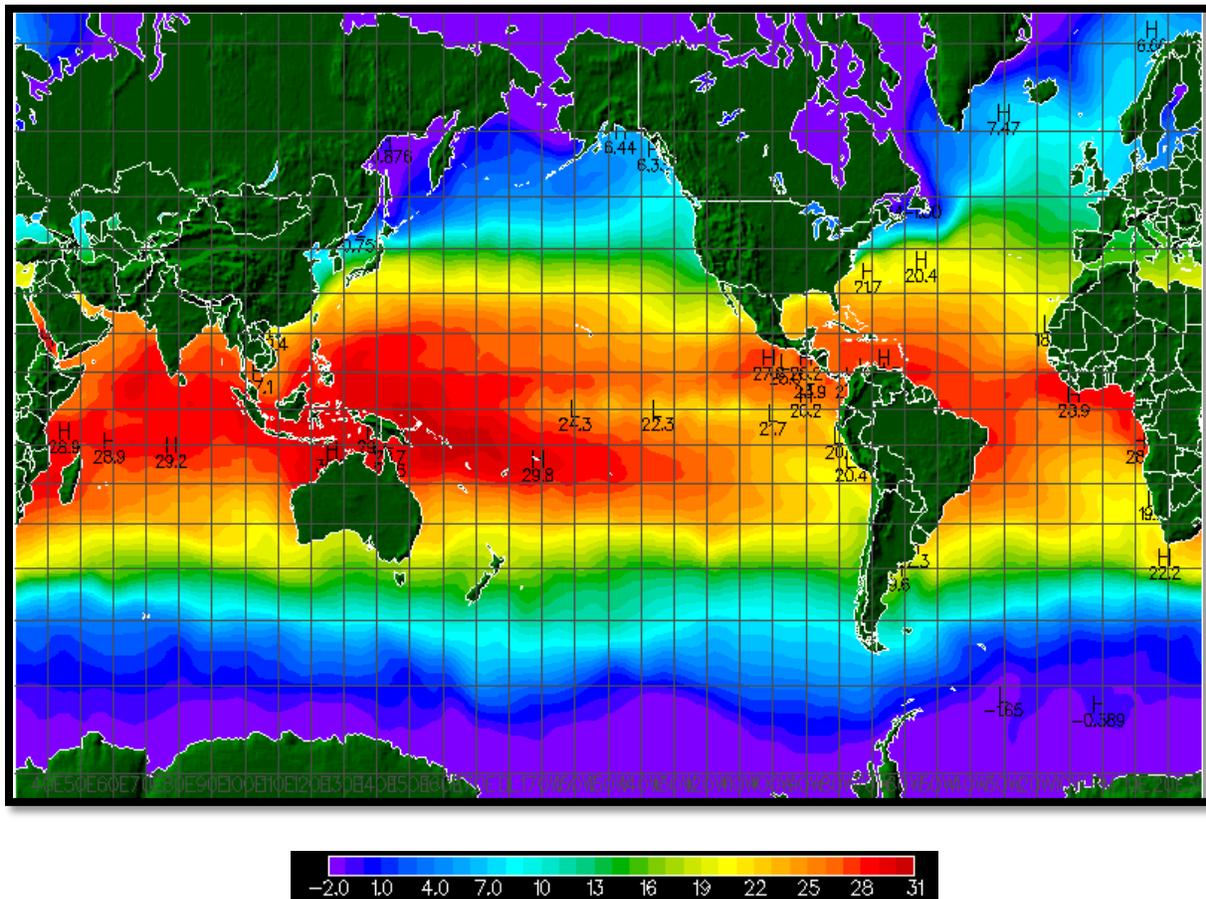


Figura 2.4 Variación de la temperatura del planeta. Imagen modificada del sitio web <http://weather.unisys.com/archive/sst/sst-000102.gif>, fechado el 13/marzo/2000, hora 10:52 am.

El proceso que se lleva a cabo en dicha génesis se resume de la siguiente manera: la mayor parte de la luz solar atraviesa la atmósfera sin calentarla, de tal manera que cuando alcanza la superficie terrestre, dicha energía la calienta, finalizando con la transmisión de este calor al aire atmosférico en contacto con la superficie. Con ello, este aire más caliente se eleva por poseer una densidad menor, generando así una zona de baja presión. Para suplir este “hueco” dejado por el aire caliente, aire más denso y frío ocupa dicho espacio, generando con ello un movimiento horizontal. Las masas de aire se mueven hacia los polos y por encima de masas de aire frío, y éstas últimas, a su vez, se mueven de los polos hacia los trópicos y ecuador, ganando así energía que posee la superficie del suelo, haciendo nuevamente que se eleven estas masas de aire, cerrando así el ciclo (Del Valle, 2010). Como puede apreciarse, esta es una forma de explicar los vientos, pero en una escala global. En el caso particular de la Península de Yucatán, los vientos que dominan son los vientos “alisios” o vientos del norte. Los huracanes, que generalmente aparecen a fines de junio y predominan en agosto son generados en la porción atlántica oriental. Como información adicional, en el periodo comprendido entre los años de 1886 a 1995, y al revisar información que proporciona el sitio web Unisys Weather, tocaron tierra 82 eventos atmosféricos. En la Tabla 2.2 se resume el número de ciclones que ingresaron a la península a partir del año 1996.

Tabla 2.2 Tormentas tropicales (TORM TROP) y huracanes que tocaron e ingresaron a la Península de Yucatán. Dicha tabla fue realizada con base en la información proporcionada en la página web <http://weather.unisys.com/hurricane/> a partir del año 1996 a la fecha (julio de 2012).

PERIODO 1996 - 2012				
	FECHA	NOMBRE	TIPO	MAX CATEG
1996	19-23 AGO	DOLLY	HURACÁN	1
1998	22 OCT-05 NOV	MITCH	HURACÁN	5
1999	28 OCT-01 NOV	KATRINA	TORM TROP	--
2000	14-18 SEP	GORDON	HURACÁN	1
	28 SEP-06 OCT	KEITH	HURACÁN	4
2001	15-22 AGO	CHANTAL	TORM TROP	--
2002	14-26 SEP	ISIDORE	HURACÁN	3
2003	05-16 JUL	CLAUDETTE	HURACÁN	1
2005	03-07 JUL	CINDY	TORM TROP	--
	11-21 JUL	EMILY	HURACÁN	4
	01-05 OCT	STAN	HURACÁN	1
	15-25 OCT	WILMA	HURACÁN	5
2007	13-23 AGO	DEAN	HURACÁN	5
2008	31 MAY-02 JUN	ARTHUR	TORM TROP	--
	20-25 JUL	DOLLY	HURACÁN	2
2010	25 JUN-02 JUL	ALEX	HURACÁN	2
	14-18 SEP	KARL	HURACÁN	3
	21-26 OCT	RICHARD	HURACÁN	2
2011	23-28 OCT	RINA	HURACÁN	2

Así, en la región se presenta durante la primavera y el verano los vientos del sureste, con una fuerte influencia de vientos del este, producto del desplazamiento hacia el Norte tanto de la Zona Intertropical de Convergencia como de la Zona Subtropical de Alta Presión causando lluvias en verano y en parte del otoño, en el que la influencia ciclónica se recibe con mayor intensidad reforzándose el movimiento y vigor de los vientos del Sureste y del Este. A fines del otoño y principios del invierno la componente principal de los vientos se invierte y tienen influencia las masas de aire frío del Norte o “nortes”.

Los vientos del sureste que predominan, como se dijo antes, en primavera - verano (22.7 %), registran velocidades medias más altas de 9.8 km/h y los del este (20.9%) con velocidades medias de 8.5 km/h. Los vientos del Noreste predominan en parte del otoño y todo el invierno (40%) con velocidades medias de 3.2 km/h.

Los vientos del Noroeste predominan durante la primavera, con velocidades medias de 7.9 km/h. Finalmente, se estima que se presentan más de 300 días con viento al año en la península.

Los vientos más importantes son los que se originan por la circulación ciclónica de junio a octubre, con mayor incidencia en septiembre y los *nortes* que abarcan de noviembre a marzo, haciendo descender la temperatura y aportando humedad en la época invernal, y en la que algunas veces se acompañan, con vientos de hasta 100 km/h.

2.6. CLIMA MARÍTIMO

El tiempo y el clima han sido una preocupación permanente en la historia del hombre y el desarrollo de la humanidad, el conocer su variabilidad y posible comportamiento ha representado un reto primordial para sustentar la seguridad de las persona y de sus bienes (de <http://www.conagua.gob.mx/ocpy>).

Este apartado de alguna manera resume parte de lo explicado en los apartados anteriores de este capítulo. Es importante, antes de aterrizar específicamente en lo que es el clima marítimo, exponer los factores climáticos (Orellana et al., 2010) que prevalecen en la Península de Yucatán.

Corrientes marinas: todos los ramales de las corrientes marítimas que bordean la Península de Yucatán son derivados de la Corriente Ecuatorial Norte del Atlántico, formando la corriente del Caribe que deriva en la del Canal de Yucatán y a su vez en la corriente del Golfo de México. Se trata de corrientes cálidas que influyen de modo importante en los vientos cálidos húmedos o secos.

Circulación del Este o vientos alisios: durante el verano, la región recibe estos vientos procedentes de la Celda Bermuda Azores, cargados de humedad y que depositan cada vez más precipitación conforme se adentran al interior de la península. La profundidad de estos vientos determina los distintos regímenes de lluvia que prevalecen en la zona o provincia fisiográfica.

Ondas tropicales: se producen en el cinturón de los vientos alisios. Son líneas de flujo onduladas superpuestas a los vientos del Este. Apuntan la baja presión hacia el norte y tienen una dirección Este-Oeste. Ya que son un reforzamiento de los vientos alisios, es muy posible que constituyan los principales contribuyentes de la lluvia durante el verano.

Depresiones o tormentas tropicales: se producen en el seno de las ondas tropicales. Constituyen zonas de baja presión temporal que se forman por el calentamiento del océano y pueden llegar a crecer hasta formar los huracanes en las diferentes categorías. Las tormentas tropicales que afectan a Yucatán se generan en el Atlántico Oriental (Cabo Verde) o en el Mar de las Antillas; raramente en la Sonda de Campeche (pero si hay generación de estos eventos; por ejemplo ver Figura 2.5).

Frentes fríos: comúnmente llamados “nortes”, que son masas de aire polar, cuando se les considera “modificados” es porque el choque de los vientos circumpolares con los vientos del Oeste provenientes de los anticiclones de latitudes medias. A veces ocasionan una bajada abrupta de temperatura con vientos fuertes y en ocasiones con lluvias de ligeras a muy fuertes, dependiendo de la saturación que hayan tenido en el Golfo de México.

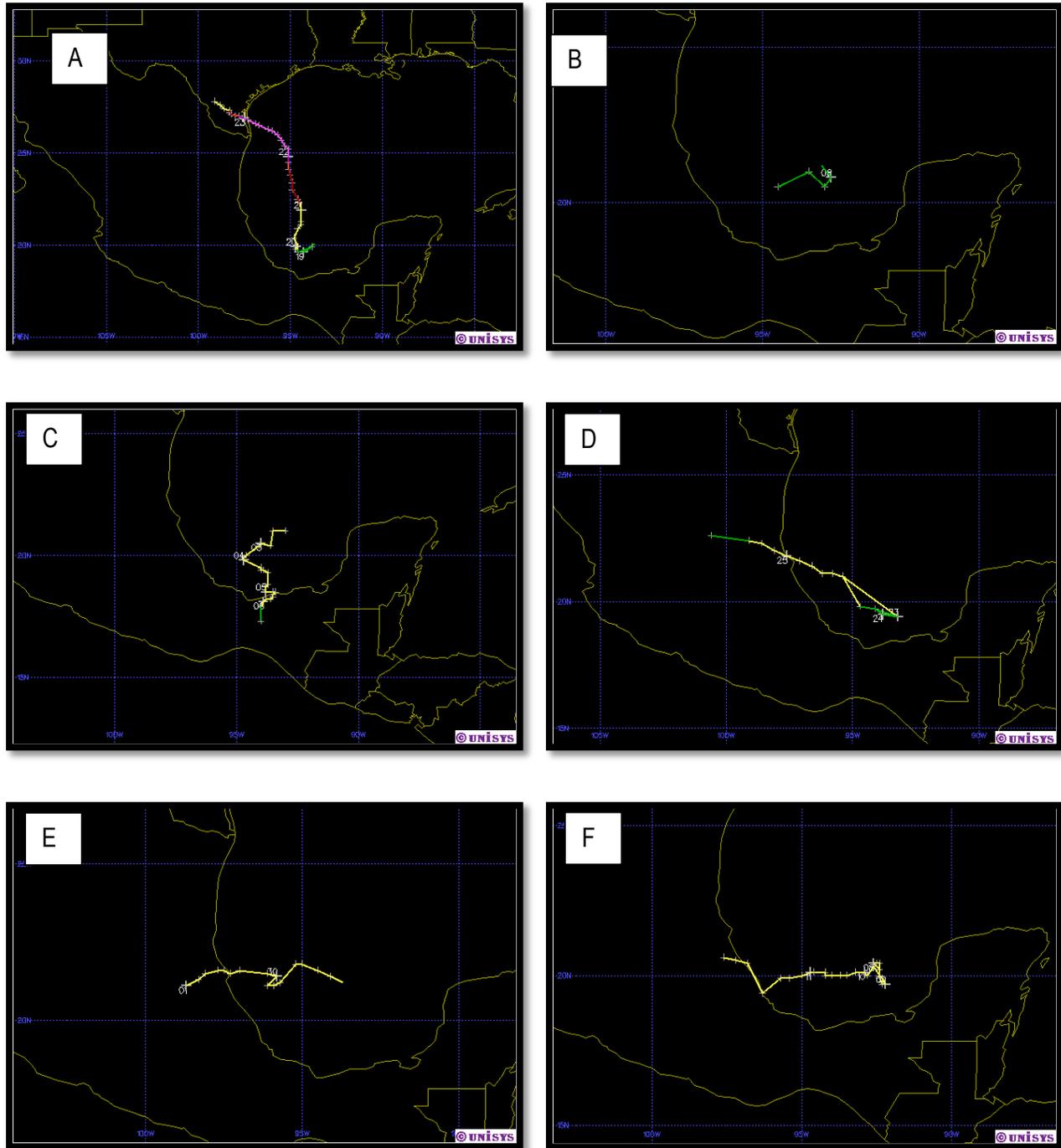


Figura 2.5 A: Huracán Bret, 18-23 agosto 1999; B: Tormenta Tropical One, 07-08 junio 2000; C: Tormenta Tropical Larry 02-06 octubre 2003; D: Tormenta Tropical Gert 23-25 julio 2005; E: Tormenta Tropical Arlene 29 junio – 01 julio 2011; y F: Tormenta Tropical Nate 07-11 septiembre 2011 (Información del sitio web <http://weather.unisys.com/hurricane/>; fecha de consulta 25/julio/2012)

El estudio del clima marítimo es fundamental para el desarrollo de la navegación y de las actividades portuarias, viéndose involucrado de manera directa en las solicitudes para el diseño y construcción de obras marítimas e infraestructura costera, así como en la generación de la dinámica costera, análisis de escenarios y valoración del riesgo en playas (CFE, 2012).

Así, por ejemplo, en 2008 el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó un proyecto nombrado como “Reanálisis del oleaje para México de 1948 a 2007”, donde el objetivo

de tal trabajo fue obtener los parámetros de oleaje y viento, el cual incluye a más de 2000 zonas del litoral mexicano.

En síntesis, el aspecto más importante del clima marítimo es el oleaje (oleaje generado por condiciones ordinarias y extraordinarias) y de viento. En lo referente a esto último ya se explicó en el apartado anterior. En lo que respecta al oleaje, Pérez (2012) menciona que el oleaje en el Golfo de México y el Caribe está dominado por el oleaje distante⁴ (swell por su palabra equivalente en inglés). Cabe mencionar que en los estados de Yucatán y Campeche la zona inmediata a la línea de costa es poco profunda, favoreciendo el fenómeno de refracción consiguiendo un oleaje de este tipo. En el estado de Quintana Roo, la plataforma continental es menor en su ancho, pero de manera intermitente se tiene un oleaje poco energético debido a la presencia del Sistema Arrecifal Mesoamericano. En síntesis, el oleaje en la región es de características tranquilas o de poca energía cerca de la línea de costa.

⁴ Este tipo de oleaje se puede observar sobre la plataforma costera, especialmente en profundidades reducidas. Es más regular con frentes de cresta muy grandes y las diferencias entre periodos y longitudes de onda son mínimas (Silva, 2005)

CAPÍTULO III

TRABAJO DE CAMPO, EXPERIMENTAL Y DE GABINETE

"Se debe hacer todo tan sencillo como sea posible, pero no más sencillo."

Albert Einstein (1879-1955)

3. TRABAJO DE CAMPO, EXPERIMENTAL Y DE GABINETE

En esta tesis una parte muy importante es el trabajo realizado en campo y laboratorio, ya que de estos se desprende la información base de esta investigación. Así que, antes de explicar la metodología llevada a cabo en el laboratorio y la forma de tratar la información, se mencionará el trabajo de campo realizado para la adquisición de las muestras.

3.1. TRABAJO DE CAMPO

3.1.1. Recolección de muestras

Como el objeto de dar continuidad al esfuerzo que se está realizando en el Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM para determinar las características físicas y mecánicas que poseen las arenas que conforman a las playas de la zona norte de la Península de Yucatán, se ha realizado y aplicado un análisis sedimentológico a una serie de muestras de arena recolectadas de varias playas de la zona.

Como primer paso, se necesitó planear y realizar diversas campañas de campo a los sitios de interés y extraer material a lo largo del perfil de playa. A todo esto, el trabajo aquí presente está soportado con la información ya obtenida en el laboratorio de tres segmentos de playa: un segmento de playa para el Estado de Quintana Roo, otro para el Estado de Yucatán y por último uno más para el Estado de Campeche (ver Figura 3.1 para visualizar la localización de las zonas muestreadas).

Se recolectaron muestras de 67 perfiles de playa de 2007 hasta 2010, de las cuales 49 pertenecen al estado de Quintana Roo, 15 al estado de Yucatán y 3 al estado de Campeche. En cada una de los perfiles se extrajeron tres muestras de alrededor de 2 kg de material sedimentario, el cual fue obtenido de manera superficial sin realizar pozos de sondeo (Ruiz, 2007). Las tres posiciones muestreadas son representativas del perfil de playa: 1) de la zona de berma o zona seca, 2) de la zona de lavado (swash en inglés) y 3) de la zona sumergida, tratando de que fuera en la mayoría de los casos en la zona de rotura. Hay algunos sitios en los cuales se tomaron una o dos muestra de material, y en algunos otros hasta cuatro muestras. En la Tabla 3.1 se presenta la ubicación en coordenadas geográficas de los sitios muestreados.

Comenzando con el estado de Quintana Roo, el sitio de Boca Sur se extrajeron muestras sólo de las zonas de lavado y sumergida; en el sitio Punto 10 se tomaron 4 muestras que corresponden a las tres diferentes zonas del perfil de playa, pero con la particularidad de que dos de las cuatro pertenecen a la zona sumergida, una se tomó a una profundidad de 0.5 m y la otra (que es la cuarta muestra adicional) a una profundidad de 1.5 m; el sitio Punto F se tomaron 4 muestras al igual que en el Punto 10; en los sitios Playa del Carmen 1 y Playa del Carmen 2 sólo se extrajo una muestra de la zona de lavado, respectivamente; mientras que en el sitio Punta Brava 1 se extrajeron dos muestras que pertenecen a la zona lavado y sumergida; en los sitios Punta Brava 2 y Punta Brava 3 se extrajo una muestra de la zona lavado, respectivamente. En el estado de Yucatán, en los sitios ECCA, Chelem, Progreso, UAY, Telchac y Dzilam se extrajeron 4 muestras para cada sitio, con la particularidad de que dos de las cuatro corresponden a la zona sumergida (Del Valle, 2010). Por último, para el estado de Campeche, en los sitios Isla del Carmen y Punta Xen se tomaron muestras sólo de las zonas seca y de lavado.

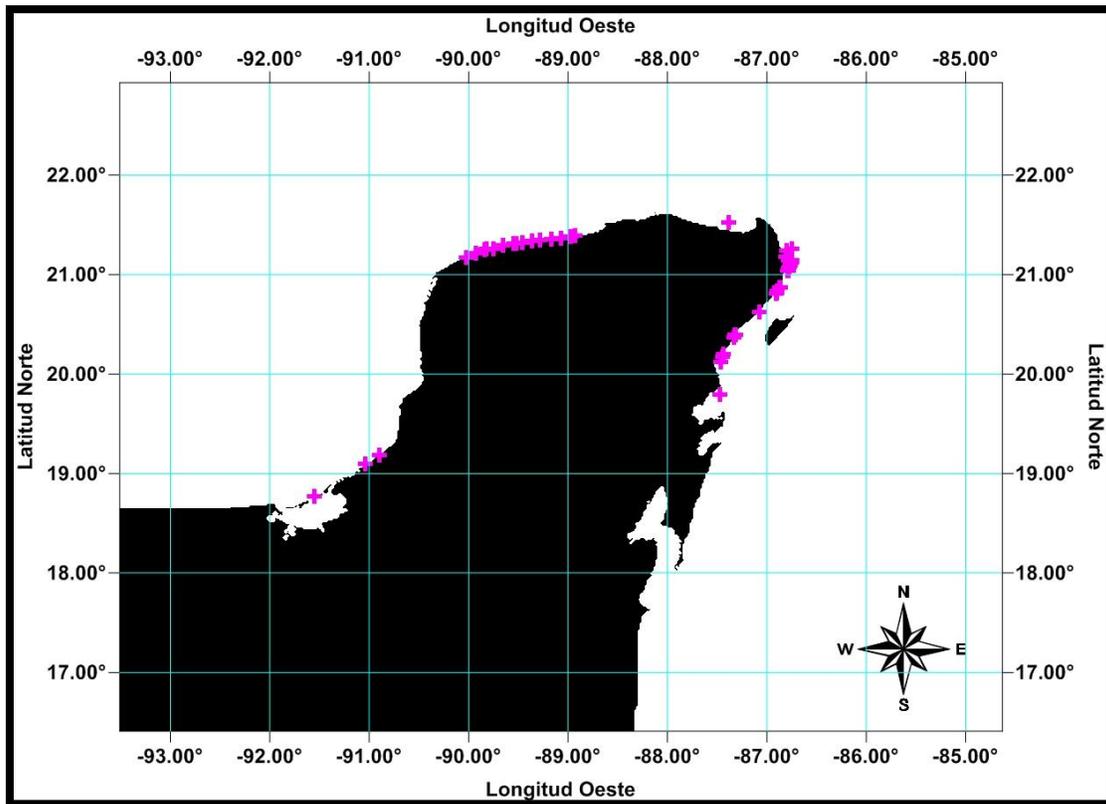


Figura 3.1 Localización de los puntos muestreados dentro de la región de interés.

Como puede observarse de la Tabla 3.1 y la Figura 3.1, los perfiles de playa muestreados no están regularmente espaciados, principalmente debido a la dificultad de acceder a algunos sitios; en algunos casos por falta de caminos y en otros por ser reservas naturales protegidas. Esto sucedió hacia el sur del estado de Quintana Roo, hacia el norte del mismo estado (en la frontera con el estado de Yucatán) debido a la reserva de Río Lagartos, en las inmediaciones de la isla Holbox (punto Holbox, ver Tabla 3.1), así como hacia el Noroeste del estado de Yucatán, en una zona que abarca parte del mismo estado junto con el estado de Campeche. En lo referente a las posiciones dentro del perfil de playa, se decidió así la extracción debido a la asimetría del oleaje, principalmente. La extensión espacial de cada posición (zona seca, zona de lavado y zona sumergida) es la siguiente

1. Zona seca, berma (backshore en inglés): dicha zona se extiende a partir de un cambio importante fisiográfico en el perfil de playa hasta la línea imaginaria de pleamar
2. Zona de lavado (swash): esta parte del perfil comprende desde la línea imaginaria de pleamar hasta la línea de bajamar. La extensión dentro de una misma región costera de esta zona es muy variable debido a la aleatoriedad del estado de mar que esté presente.
3. Zona sumergida (offshore): esta parte comprende desde la línea de bajamar hasta la posición donde las olas rompen por primera vez. Su extensión estará determinada por la combinación del estado de mar presente en el lugar de interés con las características morfológicas del sitio. En la Figura 3.2 se puede apreciar un esquema de las zonas que comprenden un perfil de playa.

Tabla 3.1 Ubicación de los sitios de las muestras recolectadas en tres segmentos de playa de la Península de Yucatán, México.

Estado	Nombre de sitio	Coordenadas geográficas		Estado	Nombre de sitio	Coordenadas geográficas	
		Longitud Oeste	Latitud Norte			Longitud Oeste	Latitud Norte
Quintana Roo	Boca Sur	-86.795	21.035	Quintana Roo	Isla Mujeres	-86.751	21.260
Quintana Roo	PME UNAM	-86.867	20.868	Quintana Roo	Tulum A	-87.436	20.197
Quintana Roo	PM2	-86.865	20.870	Quintana Roo	Tulum B	-87.447	20.173
Quintana Roo	PM3	-86.868	20.865	Quintana Roo	Sian Ka'an	-87.466	20.119
Quintana Roo	Punto 1	-86.745	21.133	Quintana Roo	Bahía Príncipe	-87.332	20.364
Quintana Roo	Punto 2	-86.748	21.130	Quintana Roo	Akumal 1	-87.315	20.394
Quintana Roo	Punto 3	-86.749	21.128	Quintana Roo	Akumal 2	-87.319	20.391
Quintana Roo	Punto 4	-86.757	21.114	Quintana Roo	Playa del Carmen 2	-87.071	20.625
Quintana Roo	Punto 4A	-86.763	21.103	Quintana Roo	Punta Brava 1	-86.911	20.812
Quintana Roo	Punto 5	-86.766	21.094	Quintana Roo	Punta Brava 2	-86.902	20.815
Quintana Roo	Punto 6	-86.774	21.074	Quintana Roo	Punta Brava 3	-86.898	20.832
Quintana Roo	Punto 7	-86.779	21.060	Quintana Roo	Punta Allen	-87.474	19.797
Quintana Roo	Punto 8	-86.781	21.047	Quintana Roo	Holbox	-87.382	21.523
Quintana Roo	Punto 9	-86.781	21.042	Yucatán	Chelem	-89.748	21.256
Quintana Roo	Punto 10	-86.779	21.036	Yucatán	Dzilam	-88.930	21.387
Quintana Roo	Punto A	-86.751	21.139	Yucatán	ECCA	-89.817	21.255
Quintana Roo	Punto B	-86.748	21.139	Yucatán	Progreso	-89.651	21.290
Quintana Roo	Punto C	-86.774	21.143	Yucatán	Telchac	-89.279	21.343
Quintana Roo	Punto D	-86.787	21.143	Yucatán	Uay	-89.523	21.313
Quintana Roo	Punto E	-86.785	21.144	Campeche	Isla de Carmen	-91.553	18.768
Quintana Roo	Punto F	-86.806	21.176	Campeche	Punta Xen	-90.898	19.187
Quintana Roo	Punto G	-86.802	21.241	Campeche	Bahía Tortugas	-91.036	19.096

Finalmente, como procedimiento para la extracción del material sedimentario en la zona sumergida, específicamente en la zona de rotura del oleaje, se hizo a través de un recipiente tubular de boca aproximada de 3 pulgadas con el cual se extrajo el material. Inmediatamente a esto, se tapó el recipiente para evitar la pérdida del material. Posteriormente, ya fuera del agua, por decantación se separaron el material y el agua recolectados con el recipiente tubular y colocado el material sedimentario en bolsas herméticas.

Como se mencionó antes, se decidió recoger 2 kg (y no 0.5 kg como marca la norma ASTM C 136, cantidad suficiente para realizar el análisis granulométrico) porque se pensó que serían necesarias más pruebas al material y se requeriría, por tanto, más material respecto del medio kilogramo que marca la norma antes mencionada.

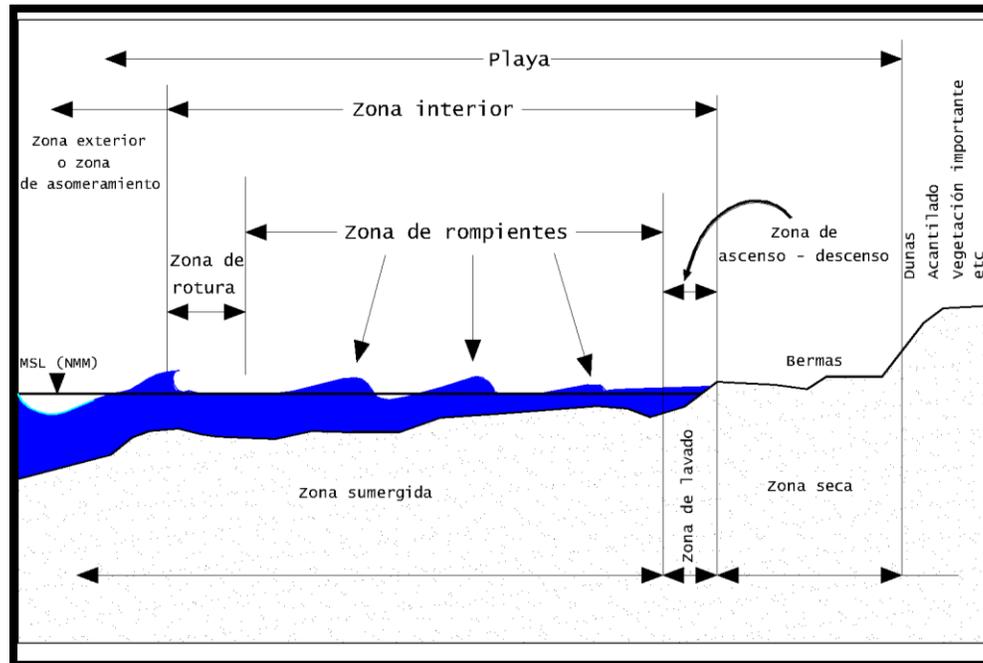


Figura 3.2 Representación esquemática de las zonas de un perfil de playa

3.2. TRABAJO DE LABORATORIO

A continuación se describen los pasos de procedimiento para la caracterización sedimentológica que se utilizó en el presente trabajo.

3.2.1. Análisis granulométrico

En el laboratorio, para determinar la distribución de tamaños de material granular se realizó el cribado de mediante mallas de diferente abertura (ver Tabla 1.3). En particular, en la medición de los tamaños de la arena de las playas de la península, se emplearon las mallas # 8, # 10, #14, #18, #25, #35, #45, #60, #80, #120 y #200. En algunas muestras se utilizó la malla #230, esto por cantidad de material fino contenido en algunas muestras. En la Figura 3.3 se muestra algunas de las mallas y la máquina Ro –Top utilizados en el cribado del material.



Figura 3.3 En el panel A, la máquina Ro –Top con algunas de las mallas cuya aberturas van desde la malla #230 (0.063 mm) hasta #25 (0.71 mm). En el panel B, las mallas con aberturas mayores, a partir de la malla # 4 (4.76 mm).

El principal dato que resulta del análisis granulométrico es el diámetro característico D_{50} , que corresponde al percentil 50 dentro de la curva granulométrica una vez interpolados los datos obtenidos del cribado. A su vez, otros diámetros son necesarios, pero no tan relevantes como el D_{50} , como fueron los diámetros correspondientes a los percentiles 5, 10, 16, 25, 30, 50, 60, 75, 84, 90 y 95. Su finalidad fue utilizar sus valores en las ecuaciones presentadas en las tablas 2.1, 2.2 y 2.4 del capítulo 2 de este trabajo.

3.2.2. Forma natural del material sedimentario.

Como se ha explicado en el capítulo 1, la forma que posee el material sedimentario analizado en este trabajo es muy irregular, tan así es que la hipótesis del elipsoide como forma aproximada para caracterizar y cuantificar de alguna manera la forma natural de las partículas prácticamente no aplica a este tipo de material.

Como anotación principal, cabe mencionar que, con base en lo estudiado en la literatura especializada sobre este tema, nunca se menciona, o se incluye, que las partículas naturales puedan tener oquedades o por decirlo de manera común, “agujeros” en ellas. Así, si por el solo hecho de que la forma tan irregular de un grano de arena a otro puede representar una variación de la incertidumbre en la velocidad de caída, y con ello la velocidad de inicio de movimiento, si se agrega esta nueva variable, solo se puede esperar que algunas de las ecuaciones, o sino es que todas, puedan arrojar resultados bastantes inciertos o poco precisos. Sin más que añadir, en la Figura 3.4 se puede apreciar la importancia de tomar en cuenta lo mencionado.

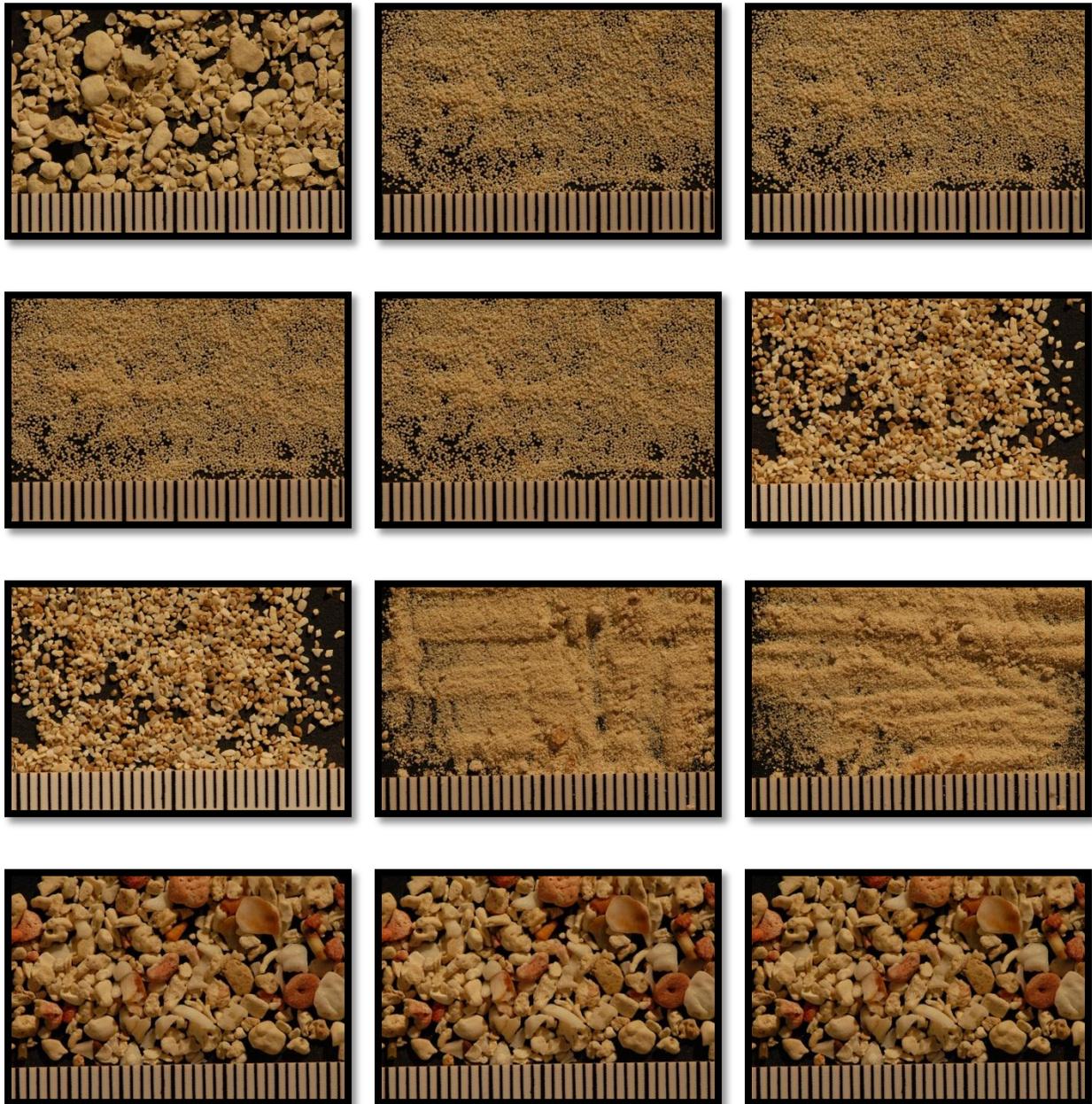


Figura 3.4 Tamaños y formas diversas del material sedimentario de algunas playas de la Península de Yucatán. La distancia entre las marcas de las líneas negras corresponde a 1 mm.

3.2.3. Densidad relativa del material sedimentario, (S_s)

Como fue mencionado en la parte teórica (subtema *Propiedades físicas del sedimento*, capítulo 1), para determinar las principales propiedades de volumen del material sedimentario, se requiere forzosamente el conocimiento del valor de la densidad relativa de cada una de las muestras. El procedimiento llevado a cabo fue desarrollado de la siguiente manera:

1. El material por ensayar debe estar completamente seco. De no ser así deberá aplicarse un pre-secado al mismo. Como menciona Ruíz (2007), una forma de realizar este pre-secado es colocar el material de forma extendida sobre una superficie sobre la cual existan algunos reflectores (en este caso 3 de ellos) y transcurrido un tiempo se puede lograr este pre-secado.

2. Se pesan 50 y 25 gramos de material sedimentario (W_s) para que posteriormente sean colocados en dos matraces de aforo de vidrio con marca de enrase de 100 y 50 ml, respectivamente. Posteriormente, si se desea, pueden pesarse los matraces vacíos, aunque este dato no es necesario en el cálculo de la densidad relativa.
3. Se pesan los matraces con agua destilada hasta la marca de enrase de forma separada (W_{iw}). Después de registrar este peso, se vacían ambos matraces y es colocado la cantidad de material sedimentario en los matraces, tal como se indica en el paso 2. Finalmente, se vuelve a colocar agua destilada hasta la marca de enrase.
4. Se someten a “Baño María” ambos matraces. El objetivo de esto es que por ebullición “escape” el aire atrapado en los intersticios del material. Las condiciones para realizar este baño maría es, en primer lugar, llevar el agua contenida en un vaso de precipitado, que en este caso fue de una capacidad de 2 litros, a una temperatura entre 70 y 80°C. La cantidad de agua colocada en el vaso de precipitado, así como el tipo, fue más o menos a la marca de 1 litro y el tipo fue el agua de llave. Al obtener la temperatura antes indicada, se colocaron los matraces y durante 15 minutos se aguarda para retirarlos del vaso de precipitado. Durante el baño maría, se debe regular la temperatura del calentador de modo que el agua contenida en el vaso de precipitado no baje de los 70°C y no supere los 80°C.
5. Al término de los 15 minutos, se retiraron ambos matraces, observando en los ensayos una sobreelevación del nivel del agua contenida respecto de la marca de enrase que poseen los recipientes. De esta manera, se dejan enfriando los matraces alrededor de 3 horas, tiempo suficiente para que el agua destilada alcance la temperatura ambiente en el laboratorio.
6. En algunos ensayos, el nivel del agua se encontró por debajo de la marca de enrase, para lo cual se colocó más agua muy cuidadosamente hasta alcanzar dicha marca. Realizado esto, se registra el peso del matraz junto con el agua destilada y el material sedimentario (W_{fsw}). En los ensayos donde no hubo necesidad de colocar agua, simplemente se registra este peso.

Así, se aplica la ecuación 1.16 para obtener el valor de la densidad relativa de cada una de las muestras. Tanto este parámetro físico, como del diámetro característico D_{50} , son fundamentales para determinar a través de ecuaciones empíricas, las velocidades de caída y de inicio de movimiento del material sedimentario.

De manera gráfica, en las siguientes figuras se muestra el equipo y la secuencia descrita en los incisos 1 a 6 que ya se ha mencionado.



Figura 3.5 Matraces de aforo de 100 y 50 ml



Figura 3.6 Báscula electrónica (izquierda) y calentador eléctrico junto con vaso de precipitado (derecha)

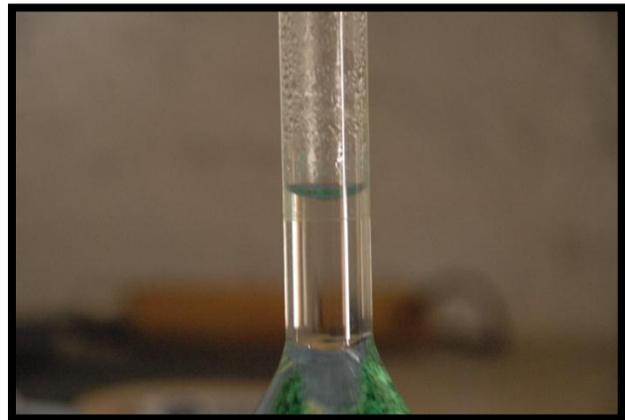
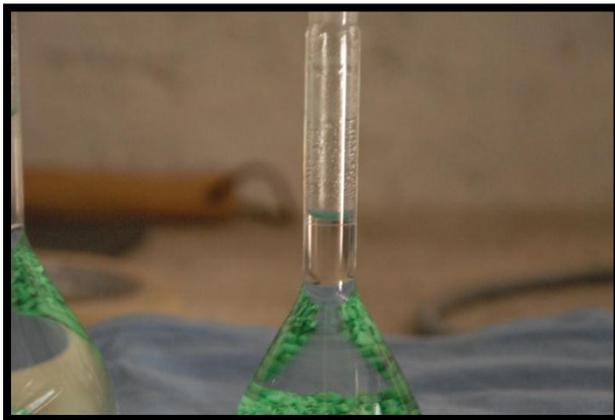


Figura 3.7 Material sometido a “Baño María”. En las imágenes central e izquierda superiores, después del baño maría. En las mismas imágenes, además de las dos fotos inferiores, se ilustra la dilatación del agua destilada al estar el nivel del agua por encima de la marca de enrase

3.2.4. Velocidad de caída, (W_f)

La metodología empleada para medir la velocidad de caída de partículas naturales en el laboratorio se expone en seguida, presentándola tal y como lo hicieron en su momento Alcérreca (2009) y Del Valle (2010) en el laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

3.2.4.1. Instrumentación y aparatos empleados

La lista de instrumentos y aparatos para realizar la medición de la velocidad en el laboratorio es

Instrumentos

- Recipiente para colocar las partículas seleccionadas. En este caso se empleó una caja rectangular con fondo negro, pudiendo ser algún otro recipiente con fondo negro. Este color de fondo se optó debido al color que, en general, la arena de estas playas es de color muy claro.
- Papel milimétrico
- Instrumento de madera con punta aguda para la extracción de las partículas
- Lupa
- Probeta de cristal transparente sin graduación
- Cinta métrica
- Mamparas de color negro, pudiendo ser algún otro material que tenga como función proporcionar un fondo negro colocado detrás de la probeta.
- Dos tripies

Aparatos

- Cámara digital Nikon® D700 con microlentes de 105 mm y enfoque autoajutable. En general se recomienda este tipo de cámara profesional debido a la calidad de las fotografías que se obtienen. No necesariamente tiene que ser con estas especificaciones particulares la cámara que se desee utilizar, pero si se recomienda el tipo de cámara.
- Cámara de video con una resolución de 30 cuadros por segundo (calidad de 10.2 megapíxeles por cuadro), pudiendo ser una cámara de video con especificaciones de calidad superior a ésta.

3.2.4.2. Medición de la velocidad de caída

Los pasos que se siguieron para obtener la velocidad de caída está resumido en tres pasos fundamentalmente:

- Análisis fotográfico
- Registro de la velocidad de caída
- Análisis de videos

3.2.4.2.1. *Análisis fotográfico*

Al disponer una pequeña cantidad de sedimento encima de una hoja milimétrica, se procede a seleccionar un número determinado de partículas. Para ello, del análisis granulométrico se tomó como dato de referencia el D_{50} considerado como un diámetro teórico (esto porque dicho dato proviene de la interpolación entre los valores medidos durante el proceso de cribado del material sedimentario). El material se dispuso sobre la hoja milimétrica de tal suerte que pudo extraerse las partículas. Esto se llevó a cabo a través de una rutina sencilla con el programa Matlab® en la cual se transforma el diámetro teórico a pixeles y se localizan las partículas que posean los diámetros más próximos a éste último. Los comandos fueron

```
A = imread('nombre de fotografía.extensión');
```

```
Imtool(A);
```

Donde A es el nombre que se le asignó al archivo, puede ser cualquier otra letra o alguna otra etiqueta que se desee asignar. La extensión de las imágenes puede ser jpg, png, o alguna otra extensión que permita el comando.

Después de registrados tales diámetros en pixeles, se convirtieron nuevamente a unidades de milímetros mediante una regla de tres; para ello se mide a cuanto equivale un mm en pixeles. Cabe aclarar que un mm en pixeles varía de foto a foto que se haga y esto es debido al enfoque que se realice con la lente de la cámara fotográfica en cada ensayo. Estas conversiones se programaron fácilmente en una hoja de cálculo del programa Microsoft Excel®.

La razón de haber usado un papel milimétrico es que el mismo funge como un sistema coordenado cartesiano, porque las partículas fueron localizadas en el monitor de la computadora a través de la hoja milimétrica. En la Figura 3.8, panel A, se muestra la forma como fueron localizadas las partículas de uno de los ensayos.

En todas las muestras ensayadas se trató de extraer a lo más 12 partículas, tomando como límite inferior 9 partículas. En los casos en que no fue posible extraer a lo más 9 partículas, el procedimiento tuvo que repetirse pues se consideró que 9 partículas era un número mínimo óptimo para realizar la estadística del diámetro experimental y velocidad de caída. La razón que sustenta esto es la cantidad de tiempo que se requiere al extraer las partículas de manera manual.

3.2.4.2.2. *Registro de la velocidad de caída*

Este paso consistió básicamente en dejar caer uno a uno los granos a través de una probeta con agua destilada (con densidad $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$). Para ello se deben tener ordenadas las partículas tal y como se registraron sus valores de diámetros en tablas, pues de esa manera en el análisis de los videos se podrá identificar fácilmente a las partículas.

Por otra parte, a la probeta se le colocó una cinta métrica en la parte posterior de ella, con el fin de medir la distancia que recorrieron cada una de las partículas. Debido a la naturaleza del color de los granos, el fondo que se optó fue un fondo negro para contrastar su color con el fondo. Una buena cantidad de partículas pudo visualizarse a simple vista, en muchos otros casos no fue así.

Otro aspecto fue la eliminación o cantidad de luz permisible en las pruebas. En los primeros ensayos se determinó la cantidad de luz que se necesitaba para poder visualizar las partículas lo mejor posible, por lo cual tales ensayos a falta de experiencia previa, tuvieron que realizarse nuevamente. A pesar de este inconveniente,

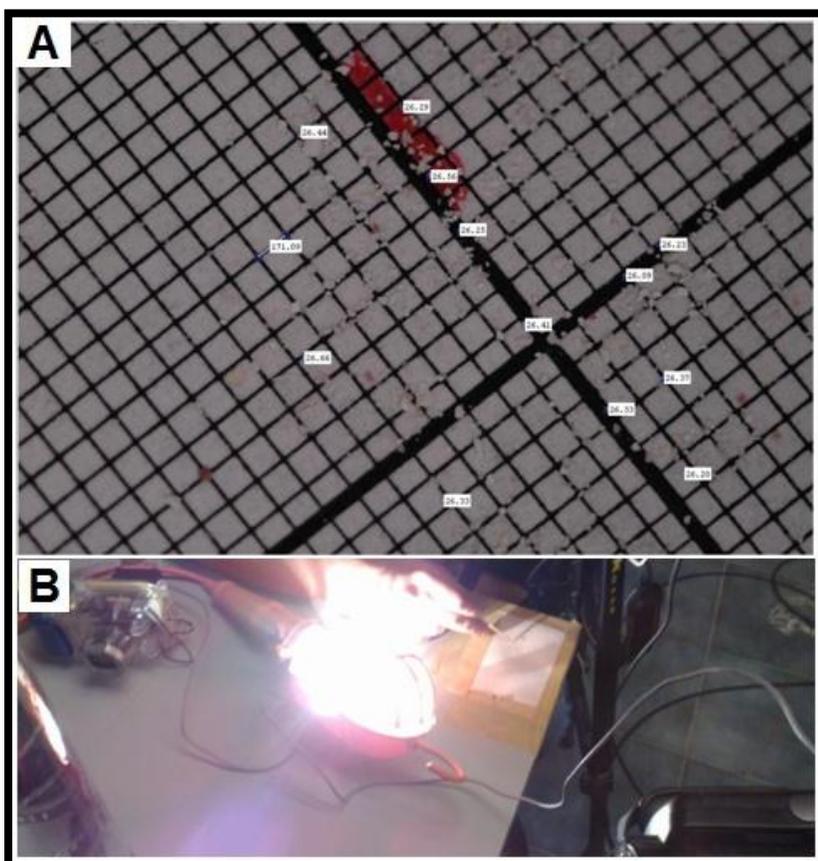


Figura 3.8 Selección de partículas sobre una retícula con aberturas de 1 mm². En el panel (A) se muestra la selección de partículas a través de una rutina con Matlab; en el panel (B) se ve el modo manual de selección de los granos

con el paso de más ensayos se ganó destreza a tal grado que en las últimas pruebas se realizaban con una combinación de las luces por prueba para obtener mejores videos.

Un aspecto más que se puede mencionar es el enfoque que se requiere dar con la cámara de video para registrar los recorridos de cada grano, esto puede expresarse de la siguiente manera: a mayor diámetro de partícula, menor acercamiento de la lente de la cámara hacia el grano y por tanto mayor campo visual en el recorrido durante el análisis de videos; y viceversa, a menor diámetro, mayor acercamiento hacia el objetivo y menor campo visual registrado en los videos. En la Tabla 3.2 se presenta los intervalos de diámetros y la distancia que se optó para el registro de los recorridos de las partículas ensayadas. Se hace hincapié que estos intervalos fueron los óptimos para estos experimentos, seguramente en otros experimentos donde se utilice otro tipo de material (arena de cuarzo, por ejemplo), y/u otro tipo de cámara, los

enfoques que se den en la cámara de video resultará en diferentes intervalos de diámetros con su correspondiente distancia de recorrido.

Tabla 3.2 Intervalos de diámetros de partículas y su correspondiente distancia recorrida

Diámetro de partícula (mm)	Distancia recorrida por las partículas
$D_{50} < 0.15$	10 cm
$0.15 \leq D_{50} < 0.25$	15 cm
$0.25 \leq D_{50} < 0.50$	20 cm
$0.50 \leq D_{50} < 0.80$	25 cm
$D_{50} \geq 0.80$	Máximo campo visual posible con la cámara

3.2.4.2.3. *Análisis de videos*

A partir de los registros de los recorridos de las partículas, se procedió al análisis de los mismos cuadro por cuadro con ayuda de una rutina con el programa Matlab®. Como los cuadros o imágenes que conforman los videos poseen un tiempo predeterminado, es posible determinar el tiempo que le corresponde a un cuadro en algún punto del trayecto de los granos que se fije como inicial y final del recorrido. Lo que sigue es hacer la resta del tiempo del cuadro final y del tiempo del cuadro inicial fijados.

La distancia de recorrido se determina a partir de la cinta métrica que se colocó detrás de la probeta. Esta distancia estuvo determinada por los puntos inicial y final que se fijaron en cada uno de los videos. La rutina que se empleó es básicamente un comando que posee Matlab®. El comando es

```
implay('nombre de video.avi',10);
```

En donde el número 10 significa que la mitad de ese valor será la frecuencia con la cual se podrá visualizar el video. Cabe aclarar que esta instrucción solo funciona con videos con la extensión avi. Para cualquier otro tipo de videos, se tendrá que hacer la transformación de la extensión que posea el video original a la extensión avi, si es que se desea utilizar esta instrucción.

Por último, se realiza el cociente distancia/tiempo que corresponde al valor de velocidad de caída experimental. En la Figura 3.9 se muestra la disposición del equipo de medición.

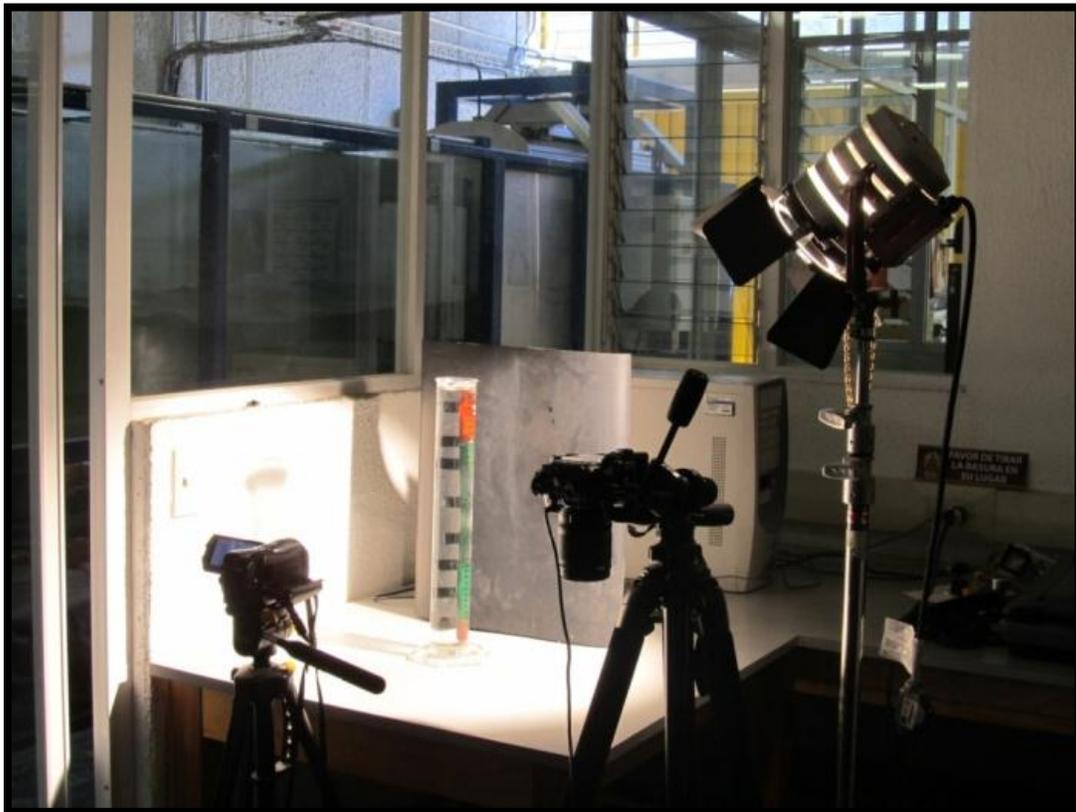


Figura 3.9 Disposición de las cámaras y demás herramientas para la grabación de la caída de las partículas de arena ensayadas

Las mediciones registradas en tablas de las partículas seleccionadas de cada una de las muestras están reunidas en el anexo 1.

3.2.4.3. Medición de la velocidad de caída con la cámara de alta velocidad

A la fecha (2012), el Grupo de Costas y Puertos (II, UNAM) posee una cámara de alta velocidad blanco y negro. Aquí se delinearán sobre algunas ventajas que posee la utilización de este tipo de cámaras con respecto a las videocámaras convencionales para la medición de la velocidad de caída de partículas, también de algunos inconvenientes, pero que debido a las muchas ventajas que ofrece el usar este tipo de cámara, dichas desventajas se ven disminuidas.

Las cámaras de alta velocidad son capaces de realizar grabaciones mediante las cuales permiten visualizar los fenómenos con un gran detalle, imposible de captar a simple vista. Como lo precisa Gutiérrez (2012; pág. 45), la resolución de la cámara utilizada en el laboratorio de costas, posee una resolución temporal de hasta 506 imágenes por segundo con resolución espacial de 1280 x 1024 pixeles. El número máximo de imágenes por segundo que puede dar esta cámara es hasta 12000.

La cámara de alta velocidad ofrece las siguientes ventajas sobre este método “tradicional” que aplicaron Alcérreca (2009) y Del Valle (2010):

- I. La cámara de video utilizada en los ensayos genera grabaciones con un formato que algunos reproductores de video (como el media player) no reconocen. En su momento, se debió de hacer una transformación del formato de salida de las grabaciones a un formato más estándar (formato con extensión .avi). La cámara de alta velocidad no genera un video, sino imágenes, lo cual hace que esta operación de transformación de videos no sea necesaria.
- II. Las imágenes que resultan de la grabación con la cámara de alta velocidad, poseen el tiempo de grabación, con la cual se elimina los pasos que debían seguirse para determinar los tiempos de recorrido de cada una de las partículas (lo cual se lograba con ayuda de Matlab).

Con estas dos ventajas, se reducen los tiempos de cálculo en la determinación de la velocidad de caída experimental. Los inconvenientes, que como en su principio también hubo con la cámara de video, se resuelven con la práctica, no hay método de medición que no presente inconvenientes y que la única forma de superarlos es con la experiencia que se adquiere a partir de la práctica constante en el laboratorio. Las “desventajas” son:

- A. Se debe poseer una sincronización muy buena para arrojar el grano y poner a grabar la cámara, porque el tiempo que puede grabar es de apenas unos segundos, a diferencia de la cámara de video, donde se tiene un par de horas de grabación. Y la variación de esos segundos que se tiene para realizar la grabación dependerá de las imágenes por segundo que se quiera, esto es, a mayor cuadros por segundo, menor el tiempo de grabación y viceversa.
- B. Como consecuencia de lo dicho en el párrafo anterior, solo puede hacerse una grabación por partícula, a diferencia de la cámara de video, que se puede grabar las 10 o más partículas que se seleccionen por muestra de material.
- C. Para partículas muy pequeñas (iguales o menores a 0.15 mm de diámetro), habrá de verificar si es posible utilizar esta cámara, debido a la velocidad de caída tan pequeña que se tiene en este tamaño de partículas, sin mencionar que la cámara no puede estar a menos de 50 cm de distancia de su objetivo. Esto último es debido a las especificaciones propias de los microlentes

Salvo para las partículas pequeñas, y a reserva de verificar lo dicho en el paso 3, la cámara de alta velocidad proporciona una gran ventaja con respecto al método aplicado, la reducción del tiempo para calcular la velocidad de caída experimental. Sin mencionar que se tiene el desplazamiento de los granos en cámara lenta, e

inclusive, para partículas relativamente grandes (0.5 mm o más), se podrían usar algunas de las imágenes que se obtienen de la cámara para medir la forma de dichas partículas, y eso vendría a resolver el problema que se tiene al medir el eje corto de los granos.

Sin duda alguna, la cámara de alta velocidad, como parte de las nuevas tecnologías con las que cuenta el Grupo de Costas y Puertos, en este tipo de mediciones vienen a reducir los tiempos de medición, lo cual resulta en una mejora, sin lugar a dudas, en los experimentos. En las siguientes figuras se presenta como es la cámara de alta velocidad con la que se cuenta actualmente.

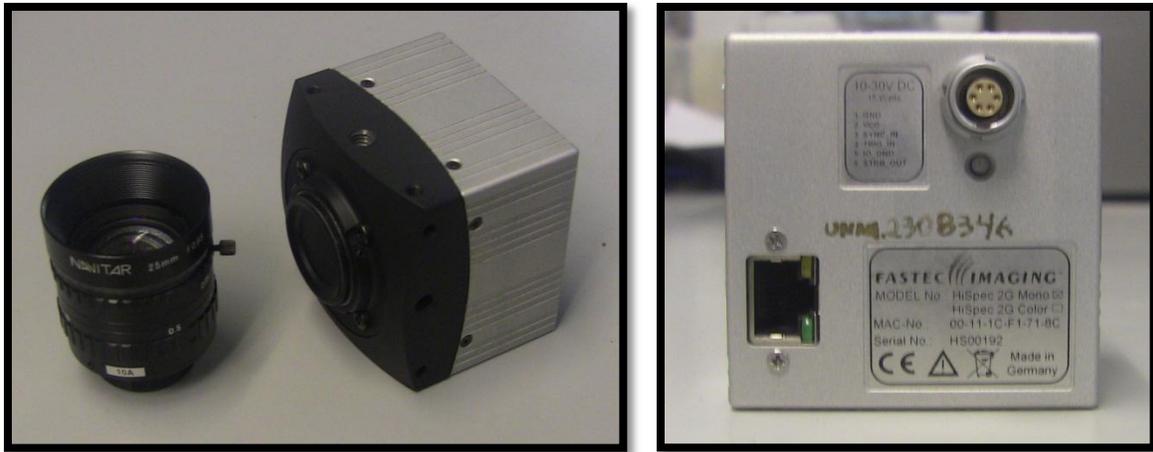


Figura 3.10 Cámara marca Fastec, modelo Hispec con la que se cuenta en el laboratorio

En lo referente a las lentes que tiene la cámara, cabe mencionar que mientras más grande es la distancia focal, la curvatura con la cual son tomadas las imágenes se reduce. Es decir, las imágenes tomadas con la lente de 50 mm poseen menos curvatura que las imágenes tomadas con la lente de 17 mm.



Figura 3.11 Lentes de 17 mm, 25 mm y 50 mm, de izquierda a derecha

3.3. TRABAJO DE GABINETE

En este apartado se resume el procedimiento utilizado para procesar la información obtenida a raíz del esfuerzo realizado en el laboratorio.

3.3.1. Factor de forma, *CSF* [1]

Antes de abordar sobre el procedimiento para determinar la velocidad de caída y velocidad de inicio de movimiento, a continuación se explica brevemente como se realizó la medición de los tres ejes axiales representativos de las partículas de arena que fueron seleccionadas durante la ejecución de los ensayos en el laboratorio. Los pasos para realizar esto son

1. Leer y cargar las fotografías tomadas con el programa Matlab ® a través de la rutina mencionada en el apartado “análisis fotográfico” de este capítulo. Estas imágenes deben tener marcadas o localizadas las partículas que fueron extraídas para medir su velocidad de caída.
2. Después de esto, simplemente se midió las tres longitudes de cada una de las partículas marcadas en las fotografías. En lo referente a la medición del eje corto (eje c), este se estimó a partir del tamaño de la sombra que proyectaban tales partículas. En todo caso, el realizar la medición de los ejes de esta forma lleva consigo un grado de incertidumbre sobre la medición de los ejes de las partículas.

Después, simplemente se calculó el factor de forma a través de la ecuación planteada por Corey (ecuación 1.43), al ser el factor de forma una de las variables independientes dentro de algunas de las ecuaciones de velocidad de caída [Dietrich (1982), Swamee & Ohja (1991), Wu & Wang (2006), y Camenen (2007)]

3.3.2. Velocidad de caída teórica y velocidad de caída experimental

Los valores de las propiedades de volumen enunciadas en el capítulo 1, además de una clasificación a partir de las diversas tablas citadas en el mismo capítulo, se condensaron en una base de datos.

Dentro de la información de la base de datos, está desde luego el dato de velocidad de caída experimental y de la velocidad de caída calculada a partir de 12 formulaciones empíricas reunidas por Ruíz (2007). Estas expresiones son de Rubey, 1933; Zanke, 1977; Hallemeier, 1981; Swamee & Ohja, 1991; Van Rijn, 1993; Julien, 1995; Cheng, 1997; Soulsby, 1997; Ahrens, 2000; Chang & Liou, 2001; Jiménez & Madsen, 2003; Camenen, 2007. Como dato, la ecuación de Zanke fue consultada en Jiménez & Madsen (2003), y la ecuación de Rubey se utilizó como dice Ahrens (2003). Estas 12 expresiones fueron documentadas en los trabajos de Ruíz (2007), Alcérreca (2009), Ruíz (2009) y Del Valle (2010).

Adicionalmente, en esta tesis se han incluido 18 ecuaciones (Ahrens modificada; Rubey modificada; Chang & Liou modificada; Cheng modificada; Dietrich, 1982; Ferguson & Church, 2004; Fredsoe, 1992; Guo, 2002; Concharov, 1962; Sha, 1954; Zhang, 1989; Zhu & Cheng, 1993; She, 2005; Baba & Komar, 1981; Wu & Wang, 2006; Alcérreca & Silva & Mendoza, 2012) que junto con las 12 reunidas por Ruíz (2007), forman un conjunto de 30 expresiones empíricas que se han aplicado utilizando parte de la base de datos mencionada. Como información adicional, las ecuaciones de Ahrens, Chang & Liou, Rubey y Cheng modificadas fueron tomadas de Ahrens (2003); las fórmulas de Concharov, Sha, Zhang y Zhu & Cheng pueden consultarse en Cheng (1997); y de Ferguson & Church (2004) se consideró manejar los coeficientes para los dos diámetros característicos de interés [D_{50} y d_N] (ver Tabla 7.1) La intención de esto es hacer un comparativo cuantitativo de la precisión de cada una de ellas contra la información experimental obtenida a través de la aplicación del análisis sedimentológico de las muestras de arena (de las playas de la Península de Yucatán).

3.3.3. Comparación con formulaciones de velocidad de caída

Alcérreca et al. (2012) determinaron con base en la información sedimentológica obtenida, dos ecuaciones de velocidad de caída. Algo que distingue tal trabajo, es que las expresiones representan a un

número reducido de ecuaciones de velocidad aplicados a arenas de origen calcáreo, ya que en casi toda la información consultada en esta tesis, las ecuaciones de velocidad de caída provienen de la información sedimentológica de arenas de cuarzo (Hallemeier, 1981; Dietrich, 1982; Ahrens, 2000; entre muchos otros). Estas dos ecuaciones pretenden predecir el valor de la velocidad de caída de partículas naturales a través de dos parámetros adicionales, los cuales son el parámetro de Yalin (d^+), y el parámetro fluido – sedimento (S^*) (Madsen & Grant, 1976; Jiménez & Madsen, 2003). Estas expresiones se han nombrado como EQ 26 y EQ 27. Sobre las mismas se han dispuesto en el anexo 1 junto con el resto de las demás ecuaciones.

Estas expresiones fueron programadas en FORTRAN, llevando por título VELCAIDA.F90. Los resultados obtenidos son, además del valor de la velocidad de caída, los errores medio, mediano y cuadrático medio. De esta forma, se obtienen para cada ecuación un archivo de salida que posteriormente se utiliza para graficar el número de Reynolds (Re) contra el parámetro sedimento – fluido (S_*), variables adimensionales. La lista de los archivos junto con los nombres de las ecuaciones es la siguiente:

- EQTNS1.TXT representa la ecuación de Ahrens (2000)
- EQTNS2.TXT representa la ecuación de Ahrens modificada (Ahrens, 2003)
- EQTNS3.TXT representa la ecuación de Camenen (2007)
- EQTNS4.TXT representa la ecuación de Concharov (1962) (Cheng, 1997)
- EQTNS5.TXT representa la ecuación de Chang y Liou (2001) (Ahrens, 2003)
- EQTNS6.TXT representa la ecuación de Chang y Liou modificada (Ahrens, 2003)
- EQTNS7.TXT representa la ecuación de Cheng (1997)
- EQTNS8.TXT representa la ecuación de Cheng modificada (Ahrens, 2003)
- EQTNS9.TXT representa la ecuación de Dietrich (1982)
- EQTNS10.TXT representa la ecuación de Ferguson y Church (2004) [diámetro de tamiz]
- EQTNS11.TXT representa la ecuación de Ferguson y Church (2004) [diámetro nominal]
- EQTNS12.TXT representa la ecuación de Fredsoe (1992) (Liu, 2001)
- EQTNS13.TXT representa la ecuación de Guo (2002)
- EQTNS14.TXT representa la ecuación de Hallermeier (1981)
- EQTNS15.TXT representa la ecuación de Jiménez – Madsen (2003)
- EQTNS16.TXT representa la ecuación de Julien (1995)
- EQTNS17.TXT representa la ecuación de Rubey (Ahrens, 2003)
- EQTNS18.TXT representa la ecuación de Rubey modificada (Ahrens, 2003)
- EQTNS19.TXT representa la ecuación de Sha (1954) (Cheng, 1997)
- EQTNS20.TXT representa la ecuación de Soulsby (1997) (Jiménez – Madsen, 2003)
- EQTNS21.TXT representa la ecuación de Swamee y Ohja (1991)
- EQTNS22.TXT representa la ecuación de Van Rijn (1989) (Ruiz, 2007)
- EQTNS23.TXT representa la ecuación de Zanke (1977) (Jiménez – Madsen, 2003)
- EQTNS24.TXT representa la ecuación de Zhang (1989) (Cheng, 1997)
- EQTNS25.TXT representa la ecuación de Zhu y Cheng (1993) (Cheng, 1997)
- EQTNS26.TXT representa la ecuación de EQ 26
- EQTNS27.TXT representa la ecuación de EQ 27
- EQTNS28.TXT representa la ecuación de She et. al (2005)
- EQTNS29.TXT representa la ecuación de Baba – Komar (1981)
- EQTNS30.TXT representa la ecuación de Wu – Wang (2006)

Para realizar la comparación entre ecuaciones, se ha supuesto que las dos ecuaciones dadas por Alcérrecas, et al. (2012) son una exacta representación del conjunto de datos que se ha obtenido. Con base en esto, solo se debe resolver el problema sobre que diámetro usar en cada una de las ecuaciones, ya que algunas utilizan el diámetro nominal (d_N), mientras que otras el diámetro de tamiz (d_s). Esta situación fue resuelta usando la regla de dedo dada por Raudkivi (1990), la cual sugiere la siguiente relación (Jiménez & Madsen, 2003 pág. 73).

$$\frac{d_s}{d_N} \cong 0.9 \quad [3.1]$$

Además, también se ha realizado la comparación utilizando el diámetro D_{50} en todas las ecuaciones por igual, y ver la diferencia que se genera con ambos diámetros. Esta forma de comparar se ha adoptado del trabajo de Jiménez & Madsen (2003).

3.3.4. Umbral e inicio de movimiento

En estricto sentido, el umbral de movimiento son todos los puntos contenidos en la curva de Shields, ya sea la curva original, o la curva modificada por Madsen & Grant.

El inicio de movimiento, es la región localizada por encima de la curva de Shields. Así, al calcular el par coordinado (d_*, ψ_{cri}) define el inicio o no de movimiento del material sedimentario. La secuencia de cálculo es la siguiente:

1. Se calcula el parámetro sedimento – fluido (S_*) con los valores del diámetro D_{50} , densidad de la muestra, densidad del agua y el valor constante de la viscosidad cinemática.
2. Se obtiene una variable intermedia (x), para después calcular el parámetro de Shields (ψ). Así, de una manera directa, sin recurrir a iteraciones como se hace tradicionalmente, finalmente se determina el parámetro de Shields crítico (ψ_{cri}).
3. Adicionalmente, se obtuvo la magnitud de la velocidad del esfuerzo cortante crítico (u_{*c}) como función del parámetro de Shields crítico, en m/s.
4. Se calcula el esfuerzo cortante crítico (τ_c) como función de la velocidad del esfuerzo cortante crítico y la densidad del agua, en N/m².
5. Finalmente, se evaluaron números adimensionales: Reynolds y Rouse.

Los números adimensionales (Re y Rouse), así como el uso del valor del Índice de flotación de Arquímedes fueron requeridos para realizar una clasificación sobre aspectos como el modo de transporte, el tipo de flujo y forma de fondo (o tipo de fondo). La secuencia a través de fórmulas, además de los rangos para realizar esta clasificación se presenta enseguida.

Parámetro sedimento – fluido (S_*)

$$S_* = \frac{D_{50}}{4\nu} \sqrt{\Delta g D_{50}} \quad [3.2]$$

Parámetro de Shields crítico

$$x = \log_{10}(S_*) \quad [3.3]$$

$$\psi = 0.002235x^5 - 0.06043x^4 + 0.20307x^3 + 0.054252x^2 - 0.636397x - 1.03167 \quad [3.4]$$

$$\psi_{cri} = 10^\psi \quad [3.5]$$

Velocidad del esfuerzo cortante crítico

$$u_{*c} = \sqrt{\Delta g D_{50} \psi_{cri}} \quad [3.6]$$

Número de Reynolds

$$Re = \frac{u_{*c} D_{50}}{\nu} \quad [3.7]$$

Número de Rouse [Soulsby (1997; pág. 138)]

$$Rouse = \frac{W_f}{\kappa u_{*c}} \quad [3.8]$$

Donde $\kappa = 0.4$ (constante de Von Karman)

Tabla 3.3 Configuración del fondo como función del número de Reynolds, Re [CEM – Coastal Sediment Properties; citado en Ruíz (2007; 2009) y Del Valle (2010)]

Rango	Configuración del fondo
Re < 10	Fondo con rizos (ripples)
10 ≤ Re ≤ 100	Fondo con dunas
Re > 100	Fondo plano

Tabla 3.4 Clasificación del flujo a partir del Índice de flotación de Arquímedes, A [Ahrens (2003; pág. 146)]

Rango	Tipo de flujo
A < 39	Flujo laminar
39 ≤ A ≤ 10 000	Flujo transitorio
A > 10 000	Flujo turbulento

Tabla 3.5 Modo de transporte del material o sedimento a partir del número de Rouse [Ruíz (2007; 2009)]

Rango	Movimiento
$Rouse > 7.5$	Arrastre o rodamiento
$2.5 \leq Rouse \leq 7.5$	Saltación
$0.8 \leq Rouse < 2.5$	Suspensión
$Rouse < 0.8$	Suspensión sin transporte

Para determinar el inicio de movimiento del material sedimentario de cada una de las muestras de las playas de la península, se decidió utilizar las ocho ecuaciones para determinar el par coordenado (d_*, ψ_{cri}) con la finalidad de verificar el inicio o no de movimiento del material. Dichas ecuaciones están citadas en la Tabla 1.9.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

"El genio se compone de un uno por ciento de inspiración y un noventa y nueve por ciento de transpiración."

Thomas Alba Edison (1847-1931)

4. RESULTADOS

En este capítulo se presenta una comparación entre los resultados obtenidos de forma experimental y aquellos obtenidos de forma teórica utilizando las expresiones descritas en el capítulo previo. Los resultados se presentan a través de sus valores numéricos vía tablas y/o de forma gráfica a través de figuras y se han ordenado según al estado de la península a la cual correspondan.

4.1. EXPLICACIÓN CON RESPECTO A LA VELOCIDAD DE CAÍDA (W_f)

De esta manera se realizaron dos tipos de figuras:

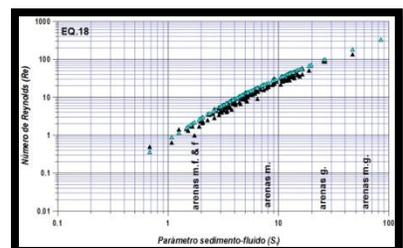
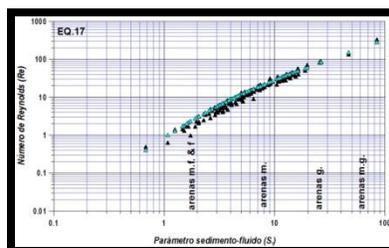
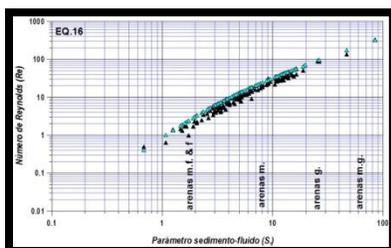
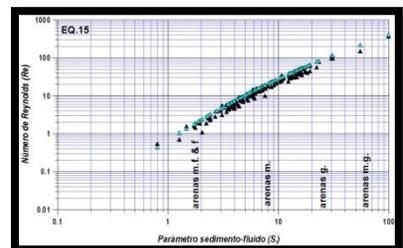
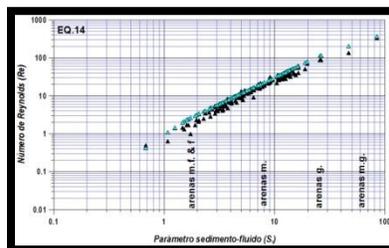
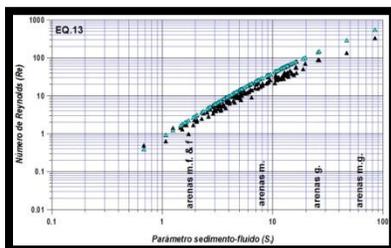
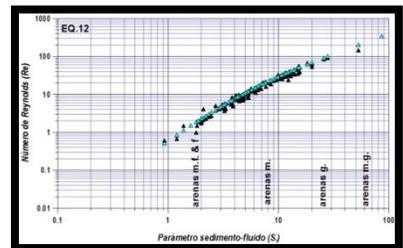
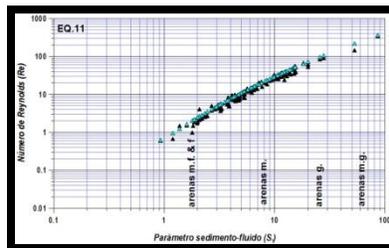
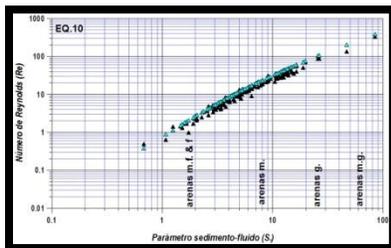
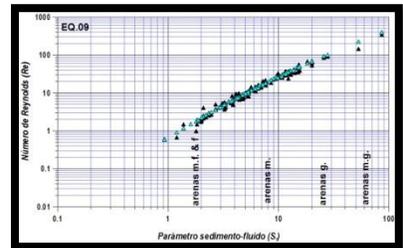
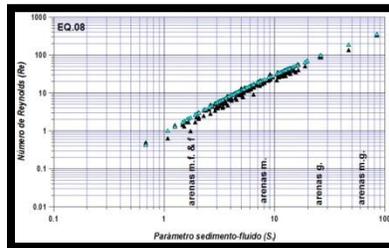
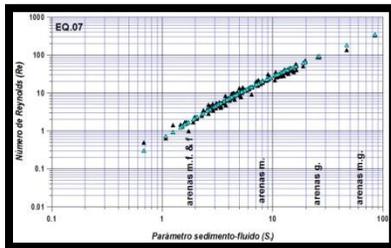
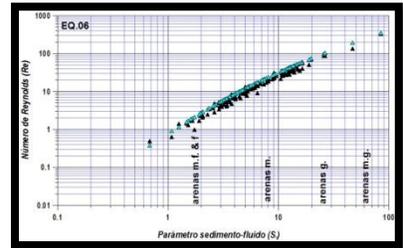
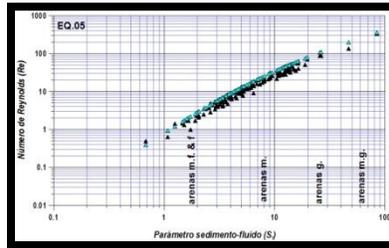
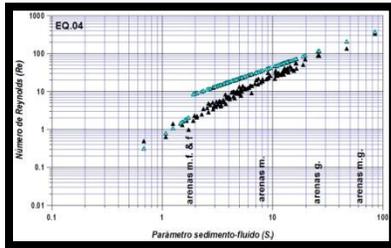
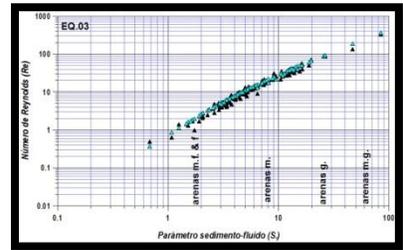
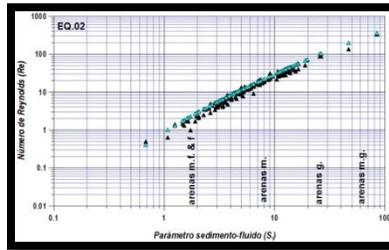
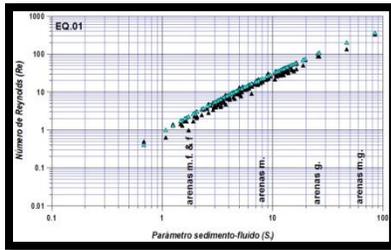
- El primer tipo de gráfica se ha elaborado representando el número de Reynolds (Re) contra el parámetro fluido – sedimento (S_*). El objetivo es mostrar el grado de mejor ajuste de las ecuaciones y los resultados de laboratorio.
- En el segundo tipo de gráfica se han representado los valores de la relación W_{fcal}/W_{fmed} contra el diámetro D_{50} o el diámetro d_N según sea el caso de cada ecuación.

4.1.1. Quintana Roo

Del primer tipo de gráfica (Figura 4.1), cabe destacar que la ecuación de Concharov (ecuación 7.9) presenta una desviación importante en la zona que va de arenas finas a arenas medias; mientras que la ecuación de Guo (ecuación 7.18) no representa adecuadamente los resultados experimentales a partir de las arenas medias. En general, el resto de las ecuaciones presentan una desviación en la zona de arenas muy gruesas.

Del segundo tipo de gráfica (Figura 4.2), es importante resaltar la sobrestimación del valor de la velocidad de caída que presentan las ecuaciones 7.6 a 7.29 y 7.33, con excepción de la 7.24. Tanto esta última ecuación, como las ecuaciones 7.30 a 7.32 y 7.34 a 7.35 arrojan, a simple vista, que en la mitad de los resultados sobrestiman, mientras que en la otra mitad subestiman el valor de la velocidad de caída. Adicionalmente, la ecuación de Concharov (ecuación 7.9) presenta el error más grande dentro del grupo de expresiones.

En la Tabla 4.1 se presentan los errores evaluados como mediana, promedio y media cuadrática. Para este caso (Quintana Roo), las ecuaciones 7.31 y 7.32 poseen los errores más pequeños del conjunto de ecuaciones (ver Tabla 7.1).



RESULTADOS

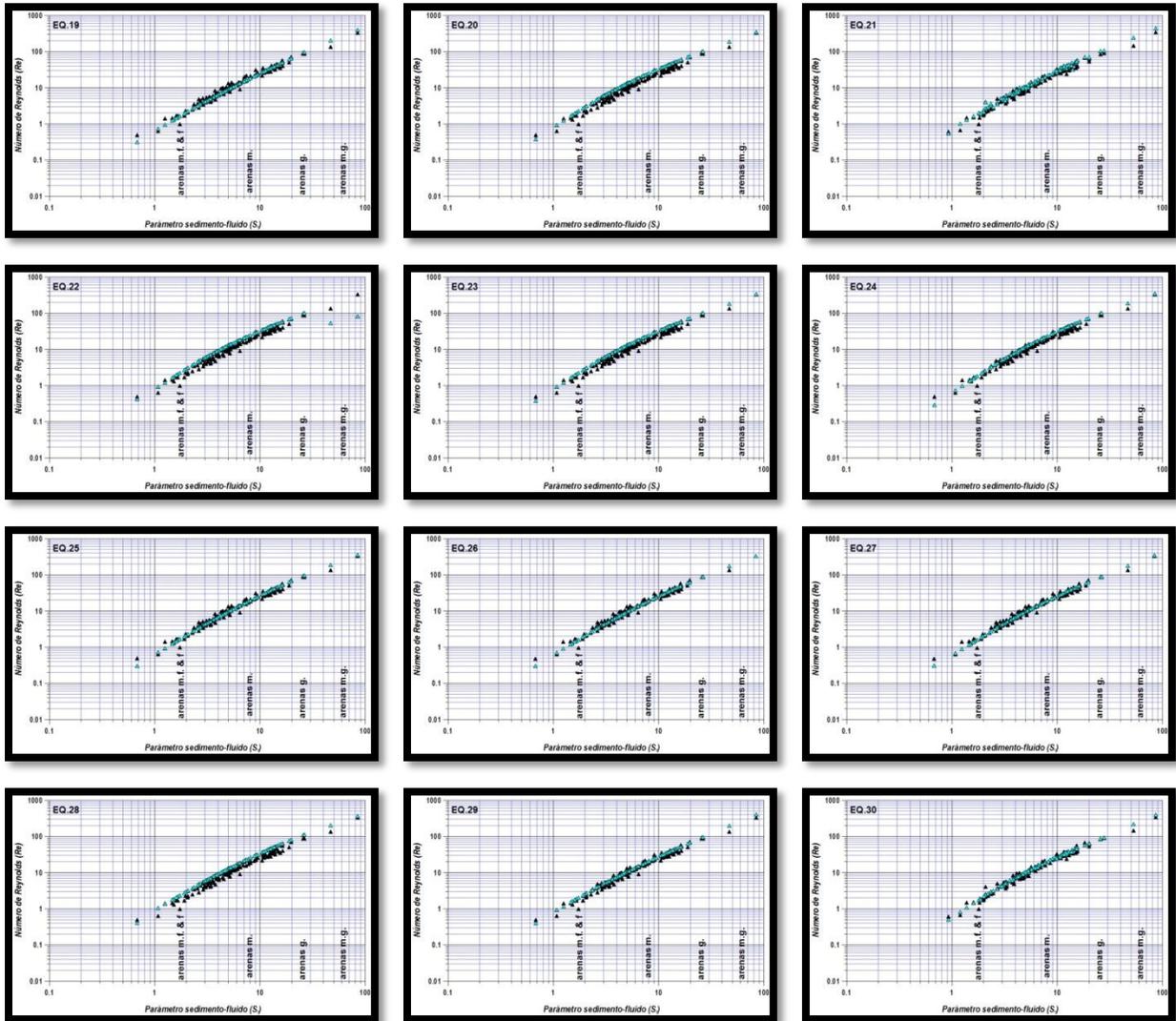
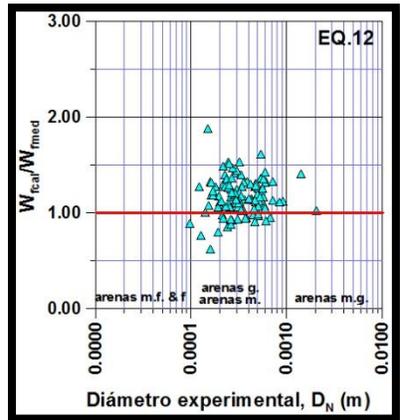
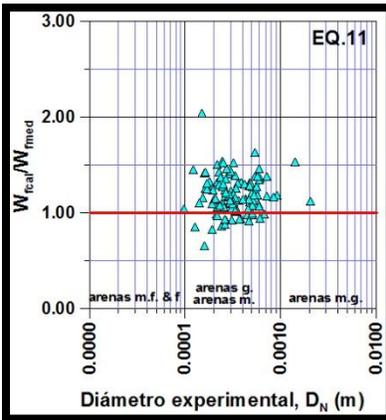
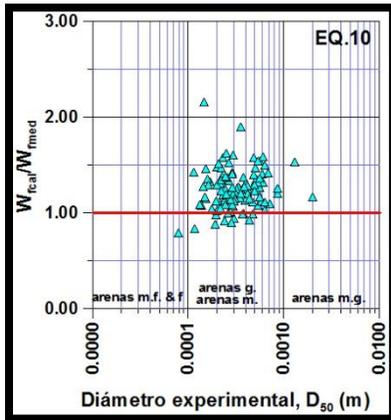
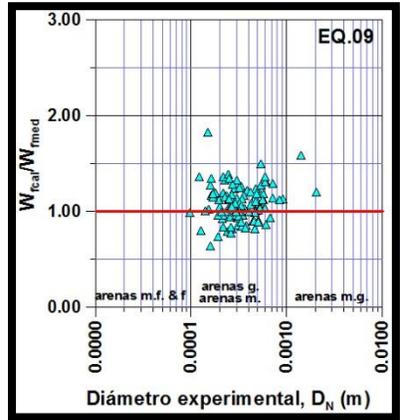
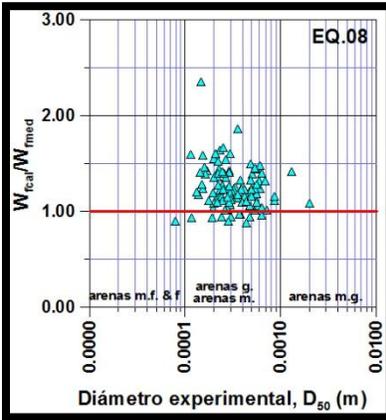
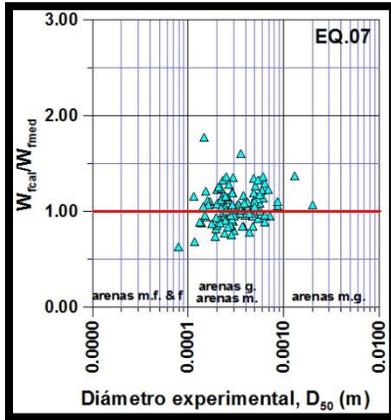
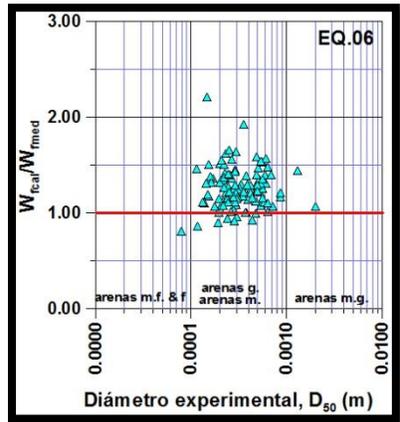
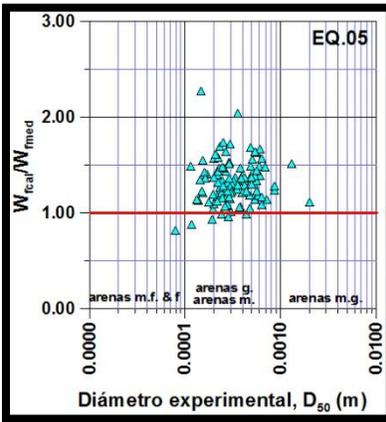
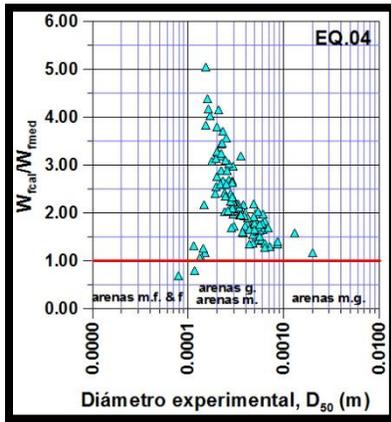
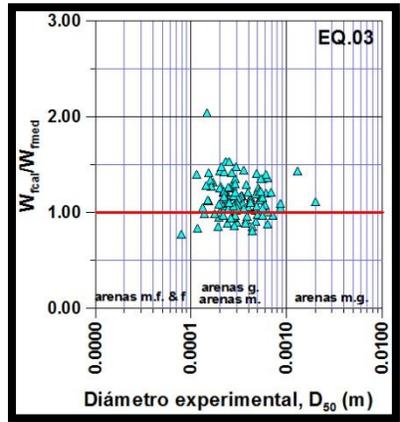
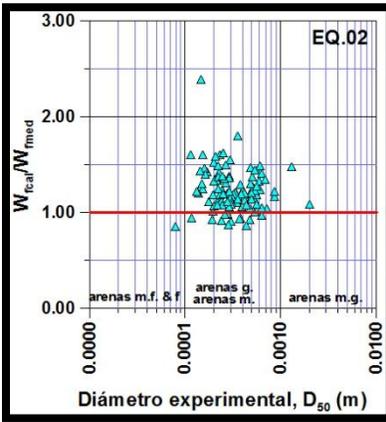
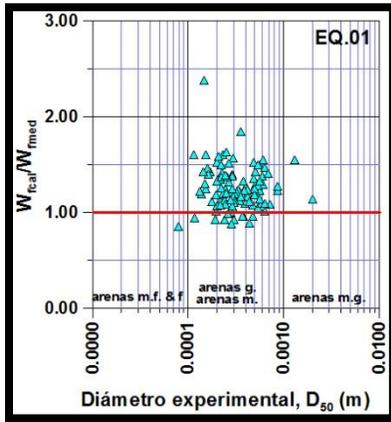
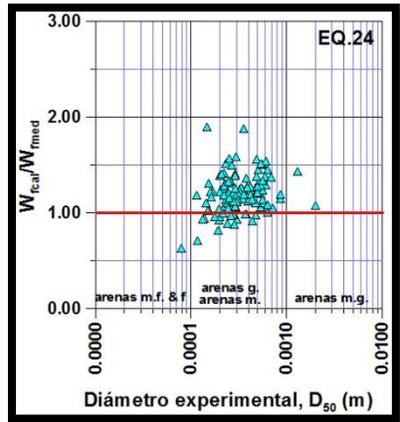
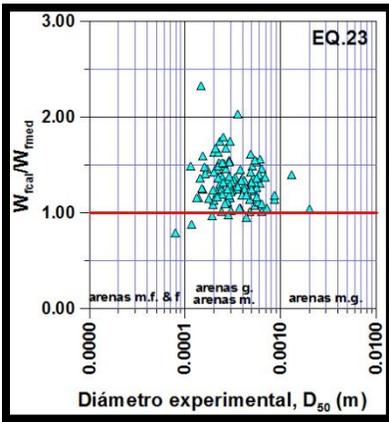
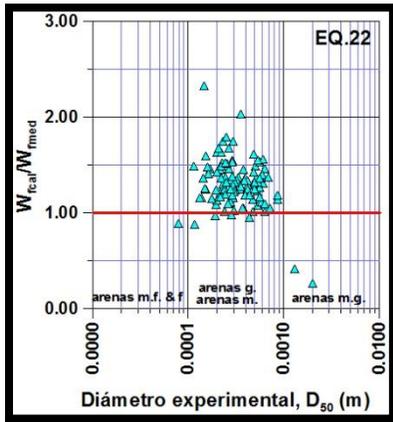
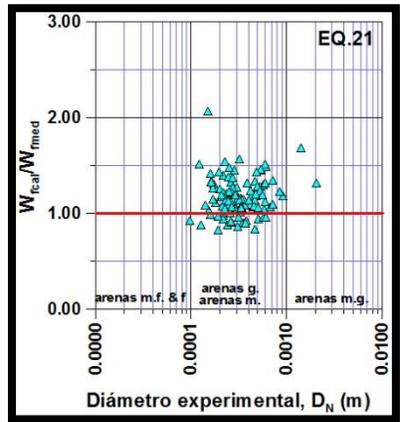
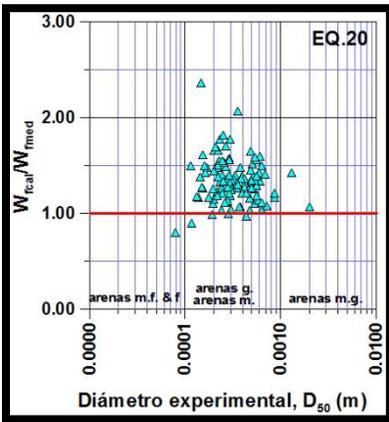
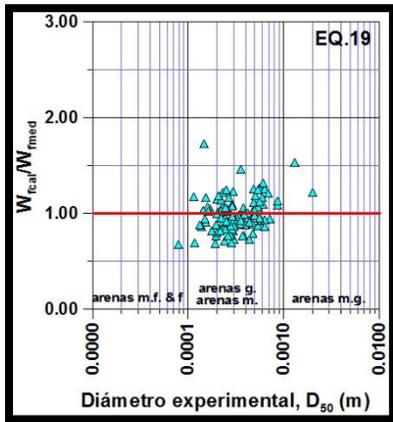
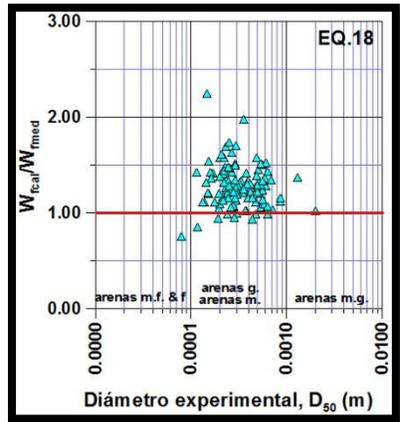
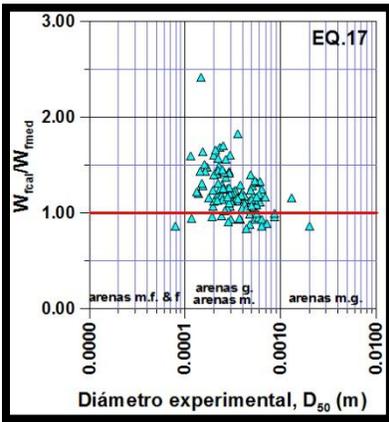
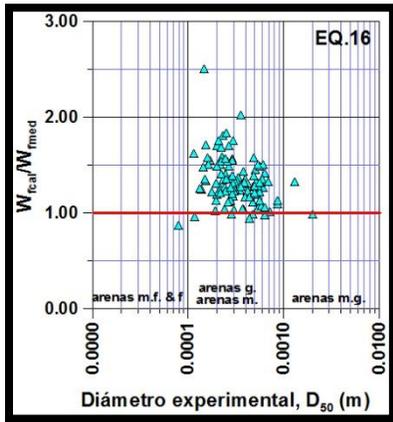
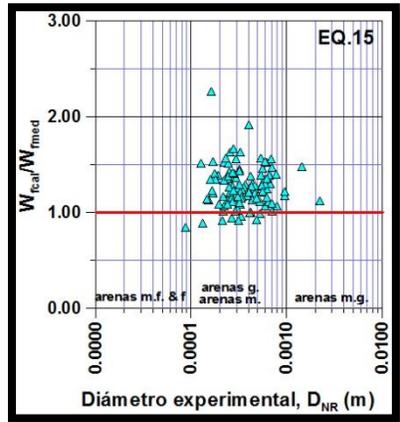
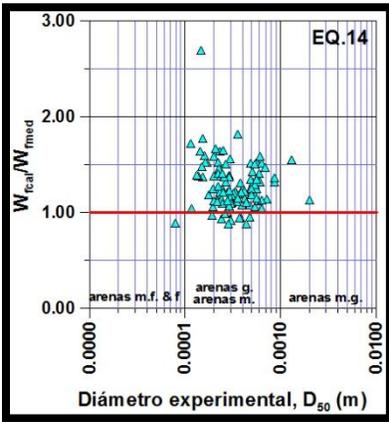
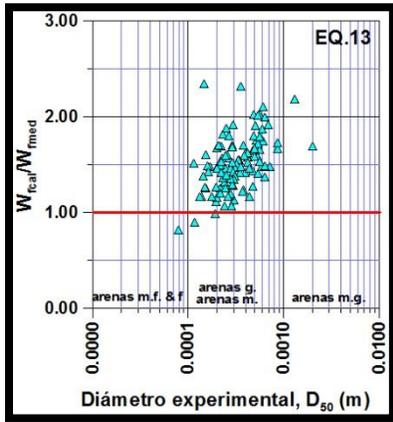


Figura 4.1 Número de Reynolds (Re) contra el parámetro fluido – sedimento (S_s). Estos gráficos corresponden a la información de las 111 muestras de arena del estado de Quintana Roo, México

En la Figura 4.2, los rótulos EQ. 01, EQ. 02,..., EQ.30 que aparecen corresponden a las ecuaciones 7.6, 7.7,..., 7.35, respectivamente.



RESULTADOS



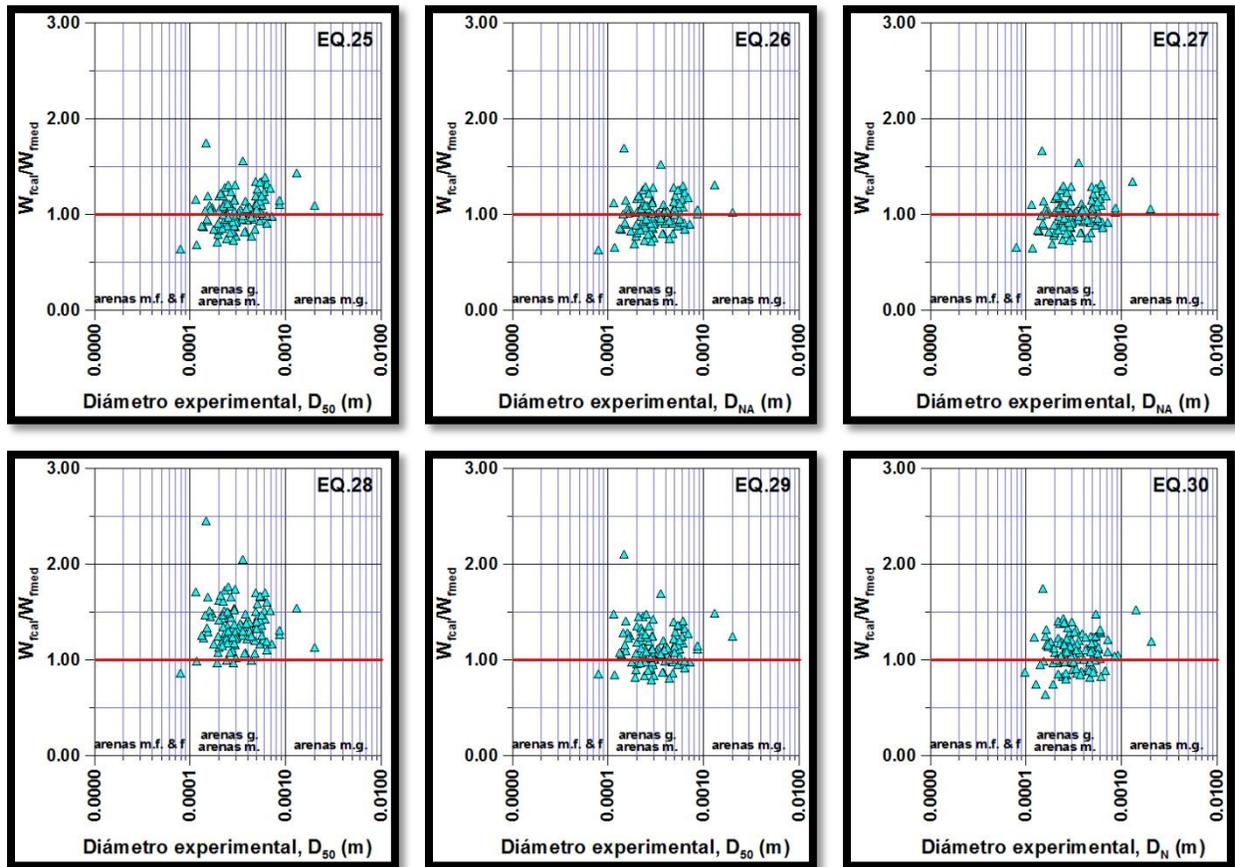


Figura 4.2 Relación entre la velocidad de caída calculada (EQ. l-ésima) y la velocidad de caída medida en el laboratorio [m.f. & f = muy fina y fina; m. = media; g. = gruesa; m.g. = muy gruesa]; resultados del Estado de Quintana Roo, México.

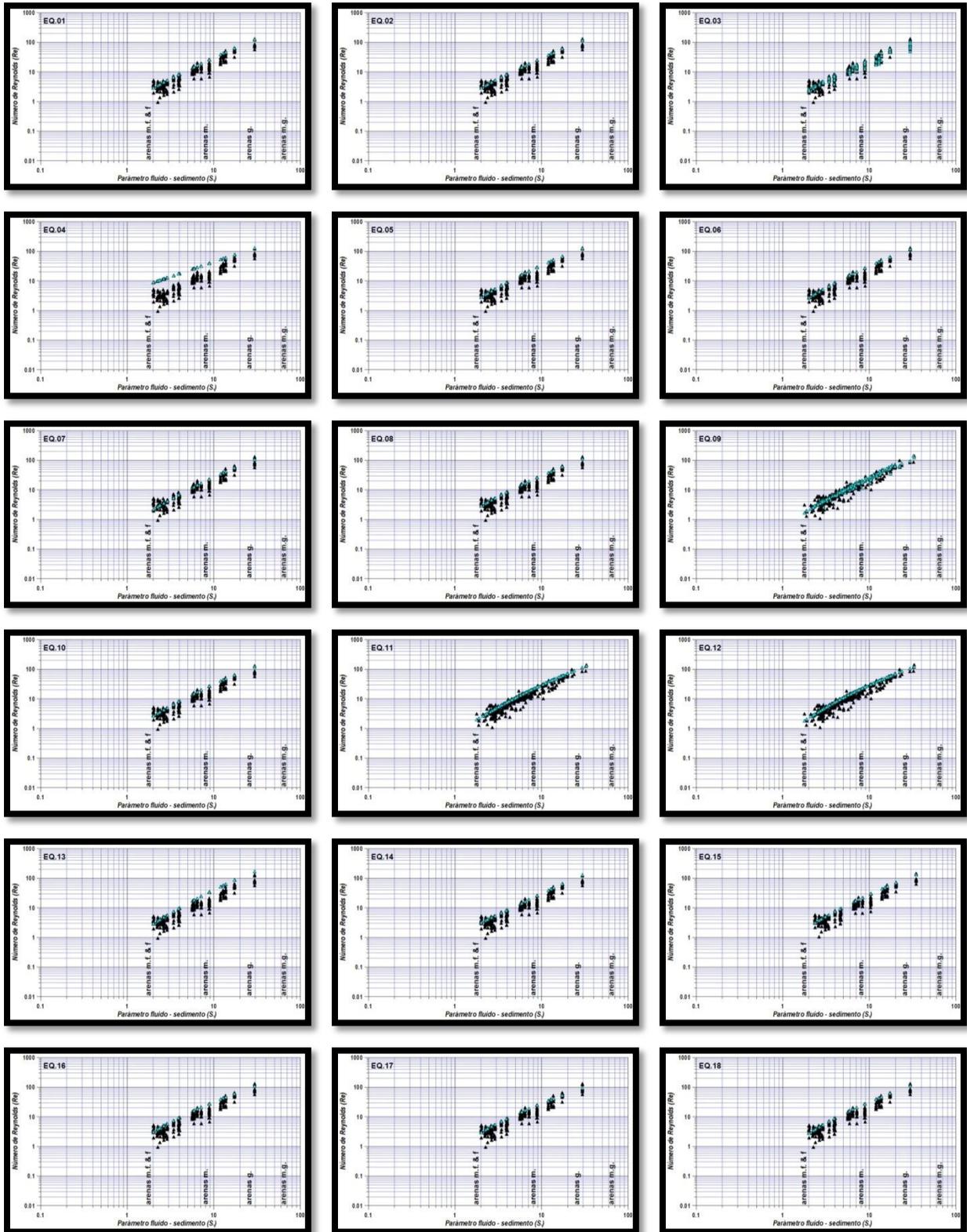
4.1.2. Yucatán

En el caso de las muestras tomadas de la costa del estado de Yucatán, en virtud que el número de muestras es mucho menor que en Quintana Roo, se optó por realizar la comparación utilizando los resultados de cada partícula ensayada. Con ello, para valores de diámetros similares, se obtienen diferentes valores de velocidad de caída experimentales, lo cual indica que el tamaño representativo de las partículas no es lo más importante al momento de calcular la velocidad de caída.

Del primer tipo de gráfica (Figura 4.3) queda decir que la ecuación de Camenen (ecuación 7.8) es la que mejor se ajusta. Sin embargo, de la Tabla 4.1, y tomando al error como mediana y el umbral del 20%, las mejores expresiones son Sha (ecuación 7.24), Dietrich (ecuación 7.15), EQ 26 (ecuación 7.31), EQ 27 (ecuación 7.32) y Wu & Wang (ecuación 7.35).

Del segundo tipo de gráfica (Figura 4.4) destaca la elevada sobrestimación de cada una de las ecuaciones.

RESULTADOS



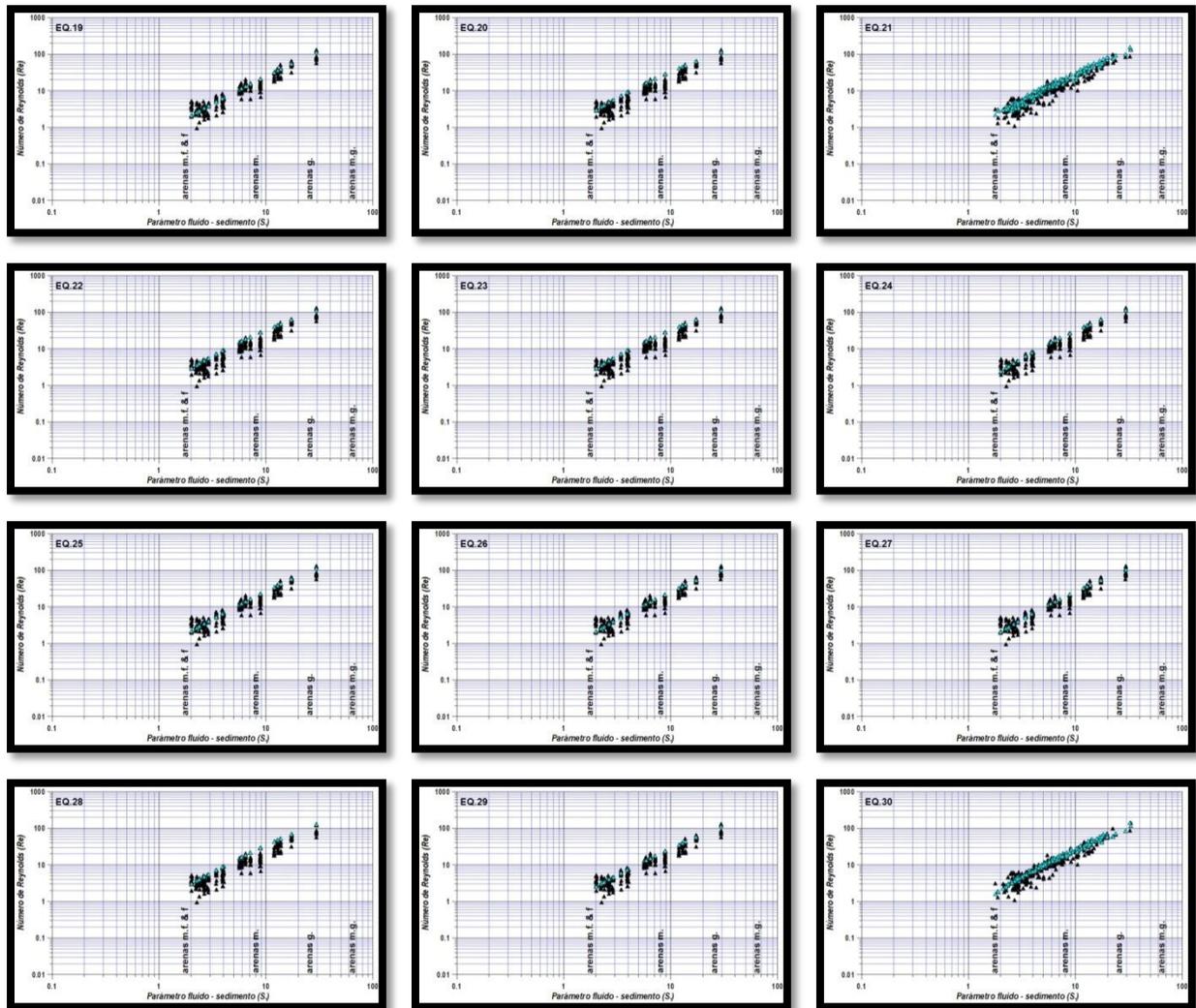
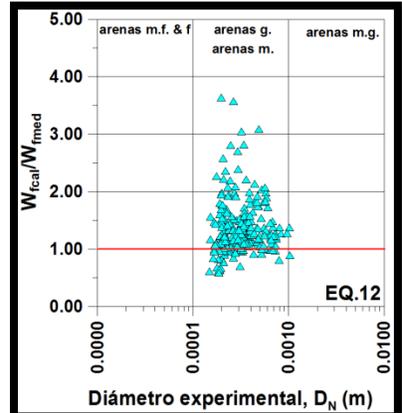
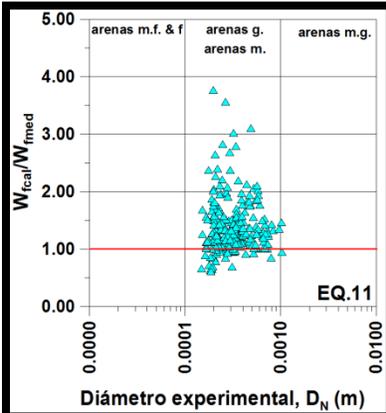
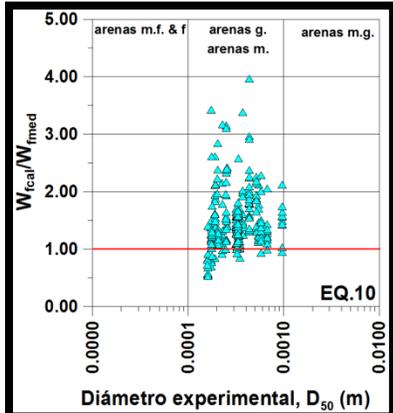
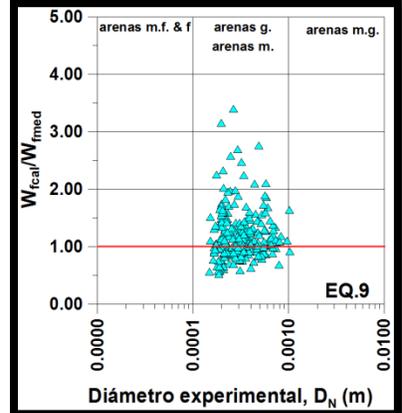
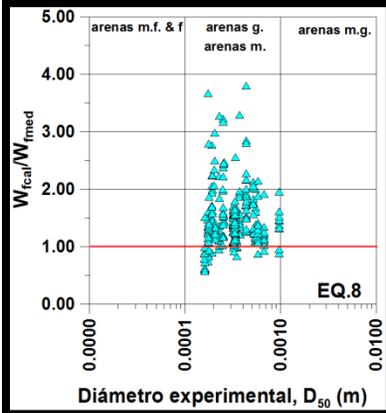
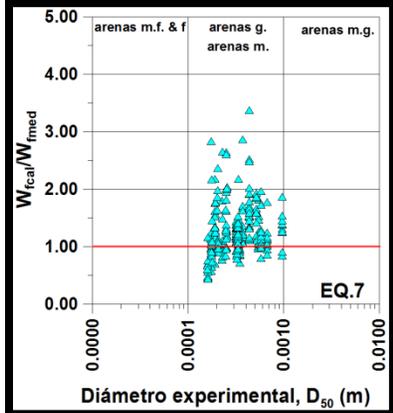
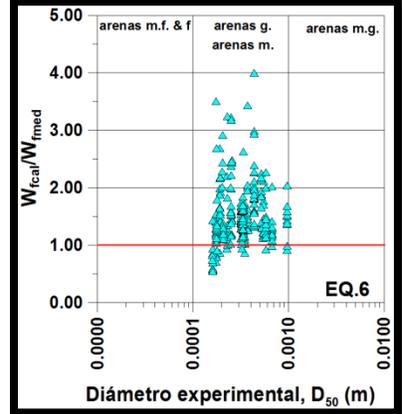
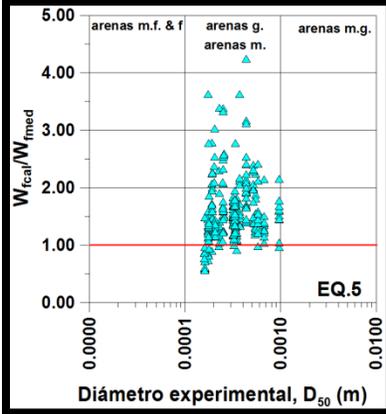
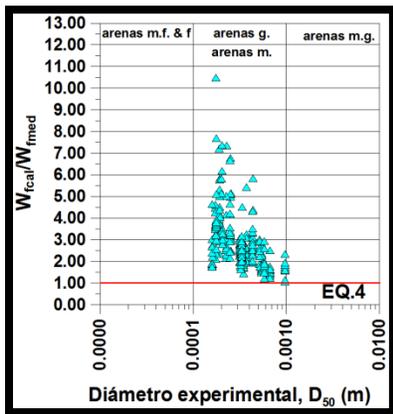
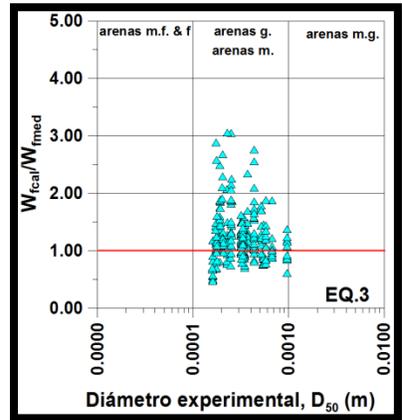
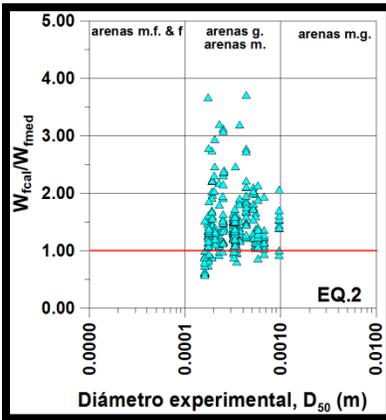
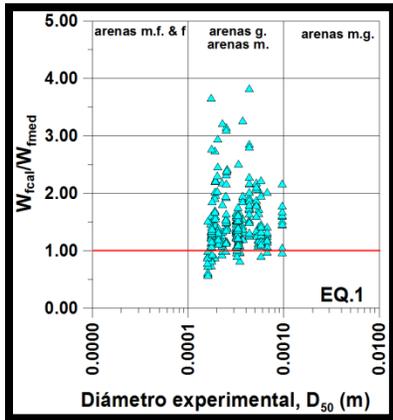
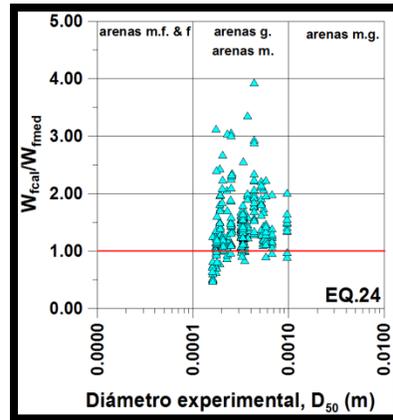
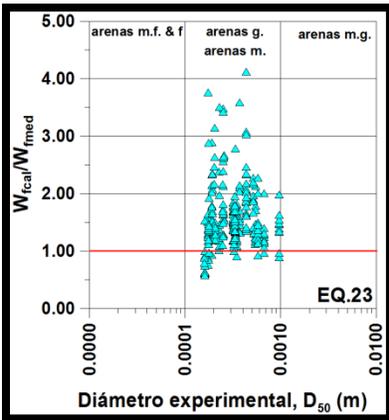
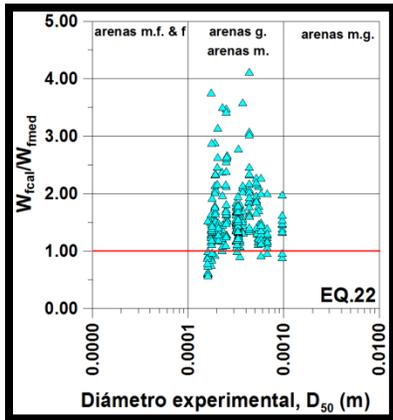
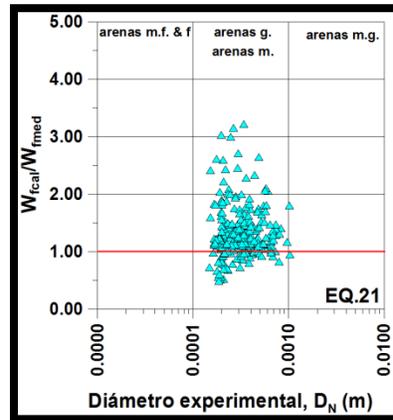
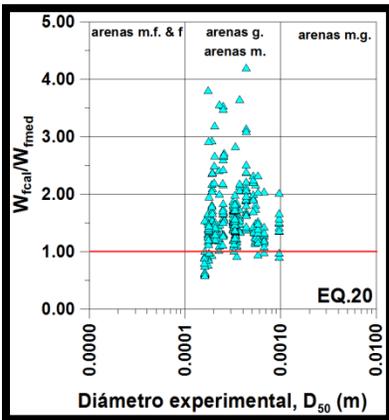
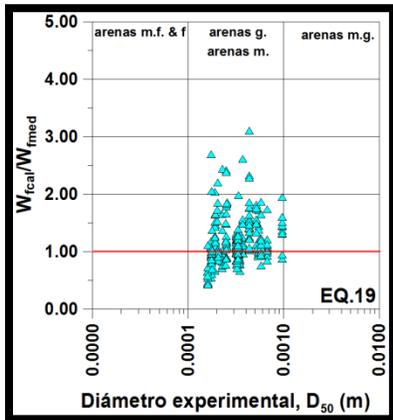
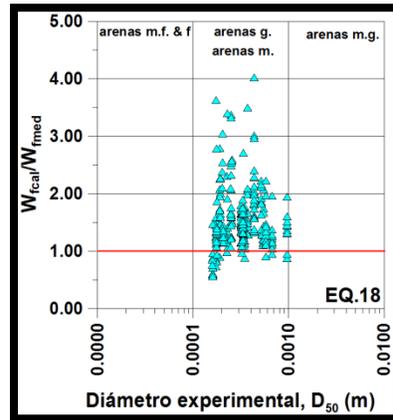
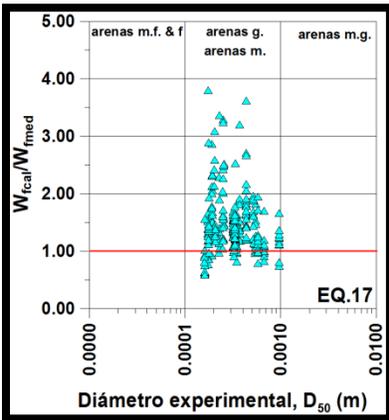
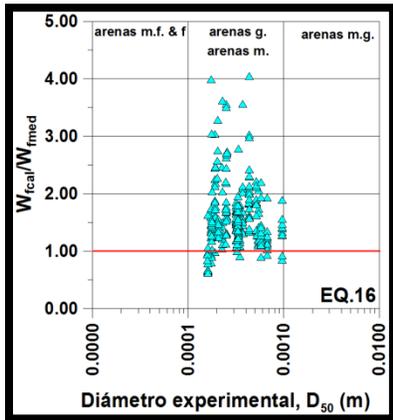
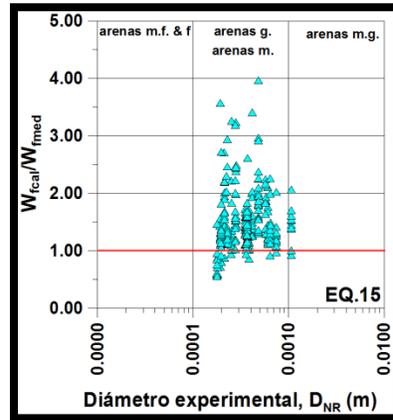
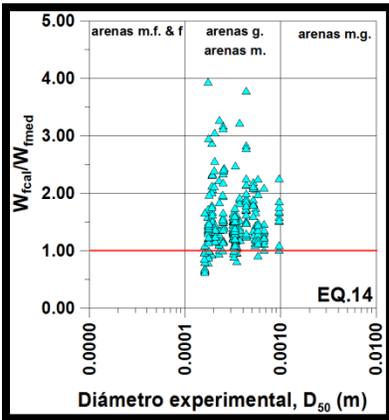
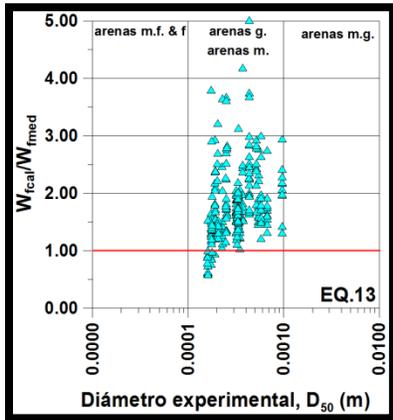


Figura 4.3 Número de Reynolds (Re) contra el parámetro fluido – sedimento de las muestras de arena del estado de Yucatán, México

En la Figura 4.4, los rótulos EQ. 1, EQ. 2,..., EQ.30 que aparecen corresponden a las ecuaciones 7.6, 7.7,..., 7.35, respectivamente.

RESULTADOS





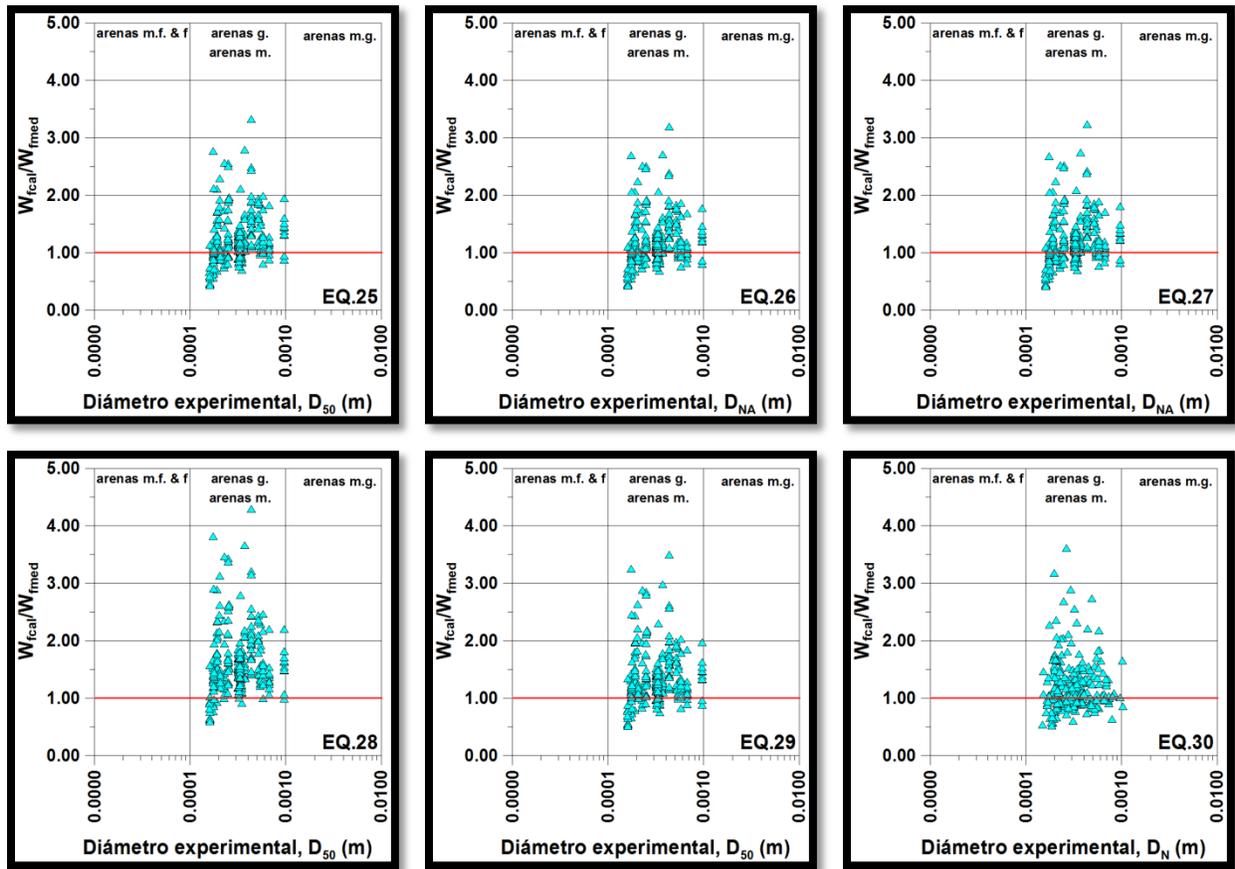


Figura 4.4 Relación W_{fcal}/W_{fmed} contra el diámetro característico (D_{50} ó d_N) de las muestras de arena del estado de Yucatán, México

4.1.3. Campeche

En este estado, como en Yucatán, se representaron gráficamente los resultados por partícula y no por muestra. Simplemente lo que reflejan cada uno de los gráficos de la Figura 4.5 es el poco nivel de precisión de casi todas las ecuaciones. Así, de la Tabla 4.1 cabe destacar una vez más la eficiencia de la fórmula de Camenen, seguida de la ecuación de Dietrich y la de Wu & Wang, principalmente. Lo cual se debe esencialmente a que las muestras contienen una mayor proporción de material de origen terrígeno.

Del segundo tipo de gráfica (Figura 4.6), una vez y como argumento sólido y final, puede decirse que las ecuaciones analizadas en este trabajo, al menos para este tipo de material sedimentario, sobrestiman en casi todos los casos el valor de la velocidad de caída en prácticamente todo el rango de diámetros tratados.

RESULTADOS

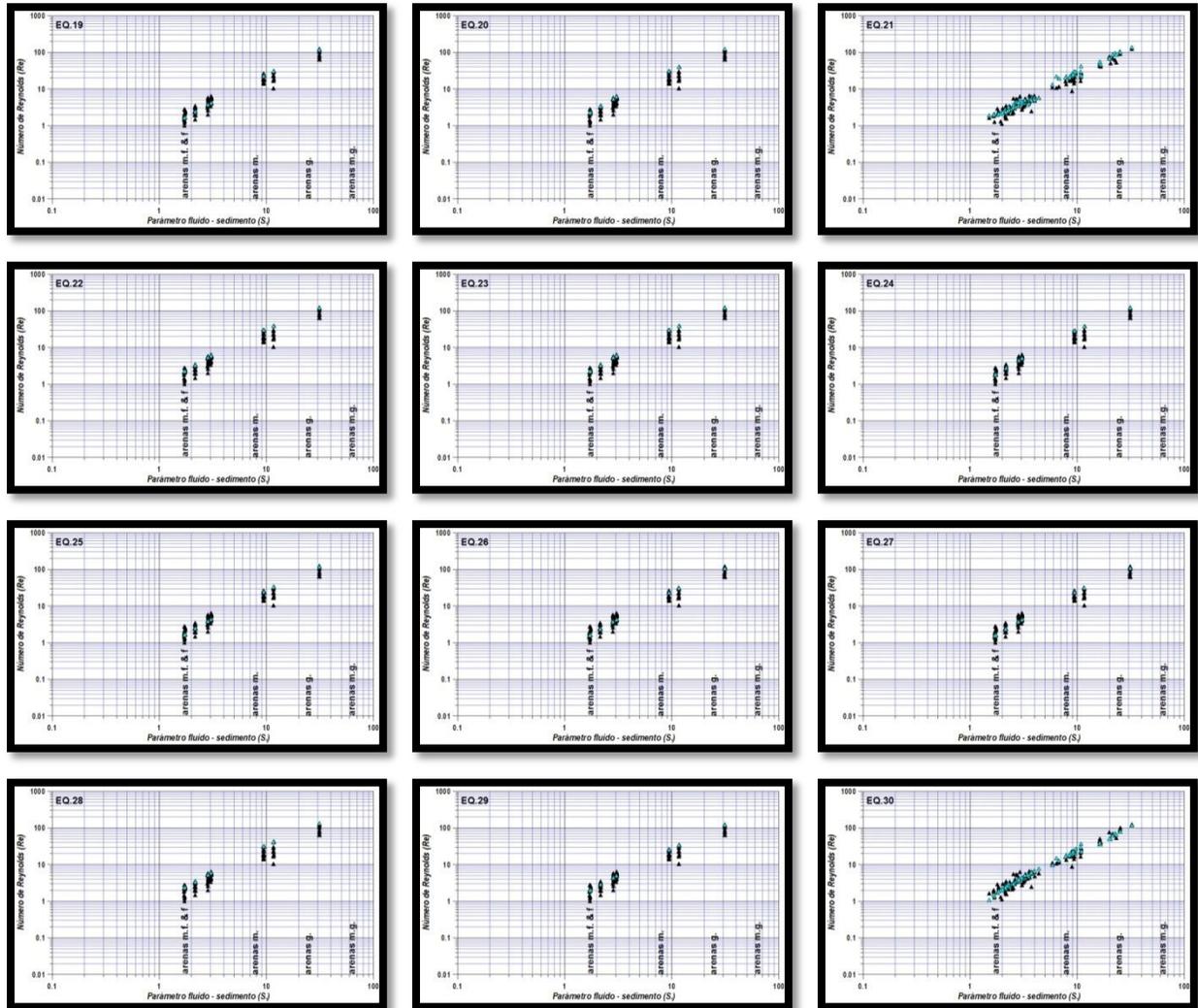
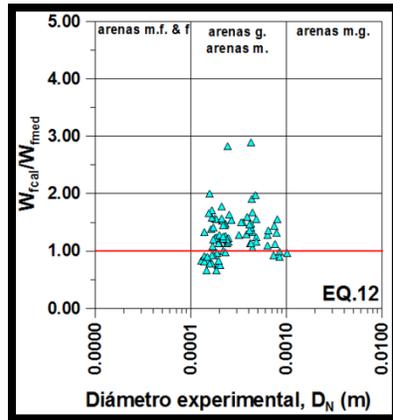
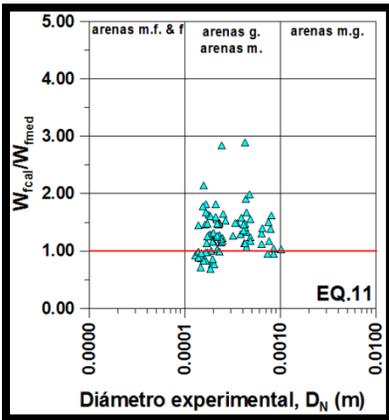
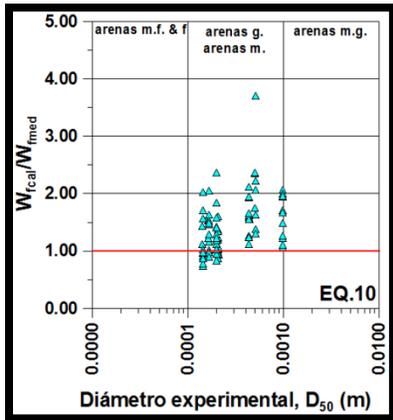
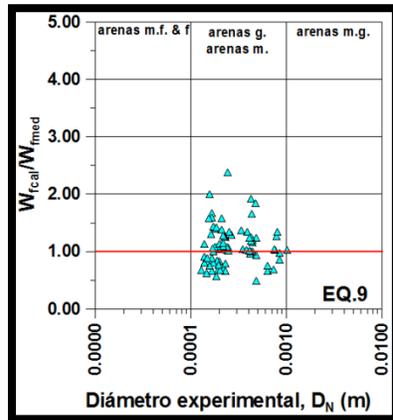
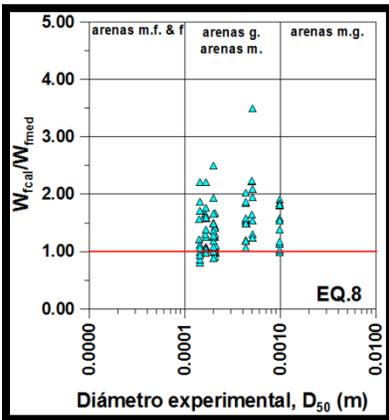
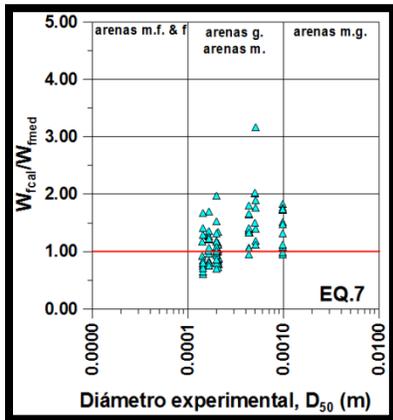
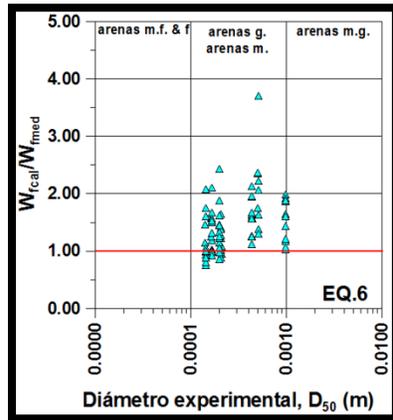
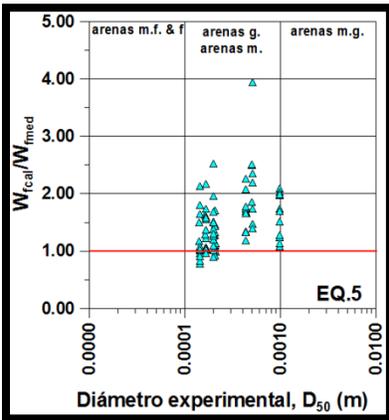
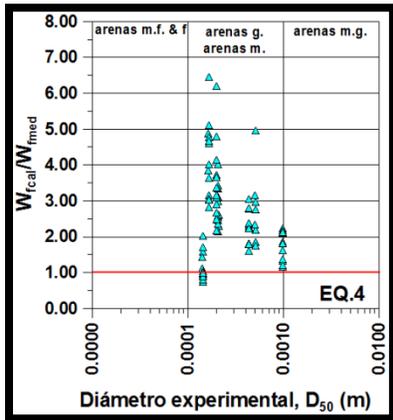
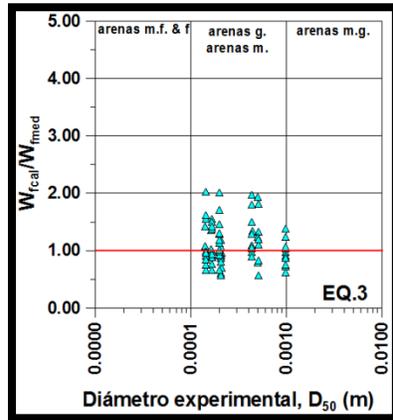
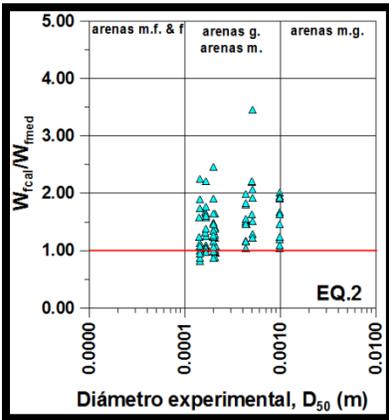
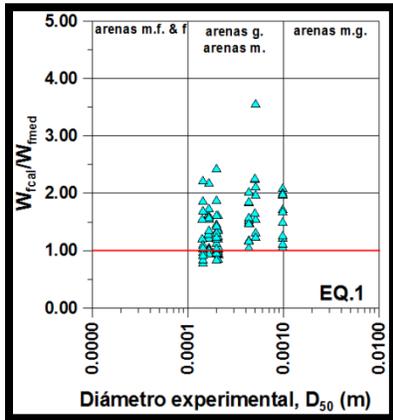
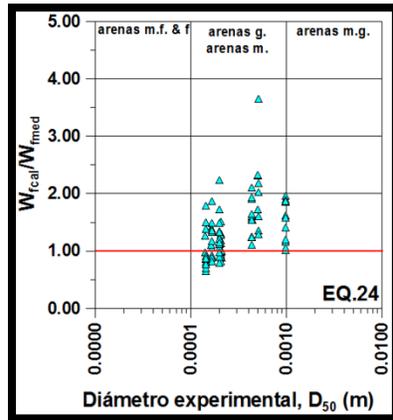
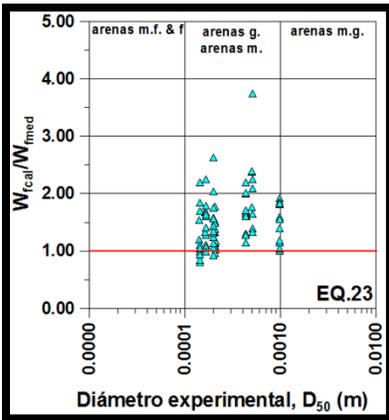
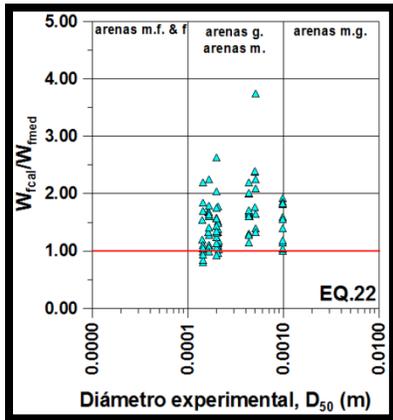
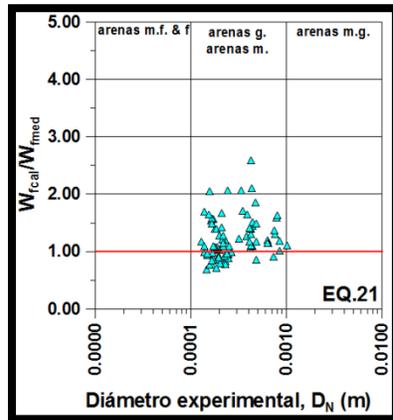
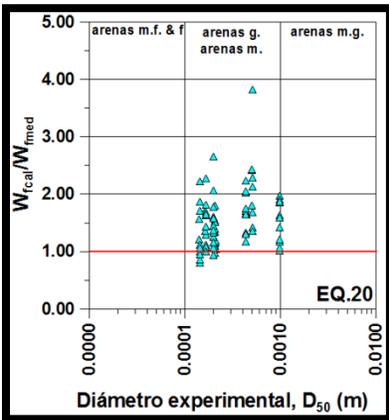
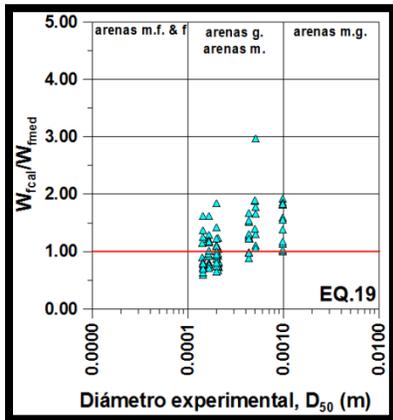
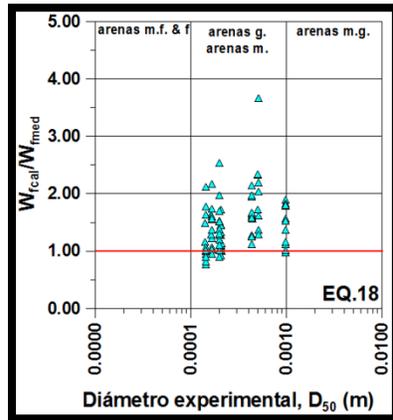
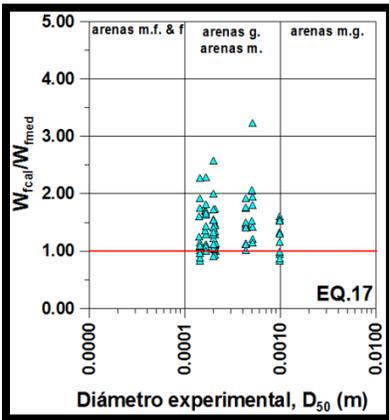
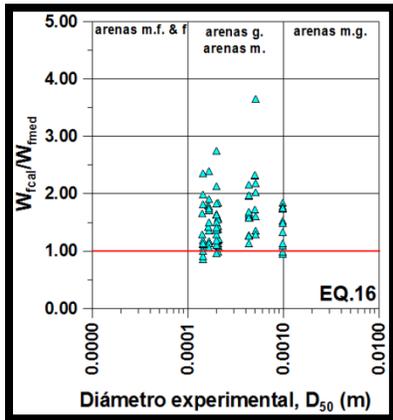
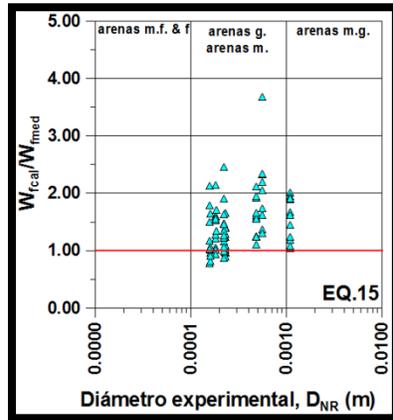
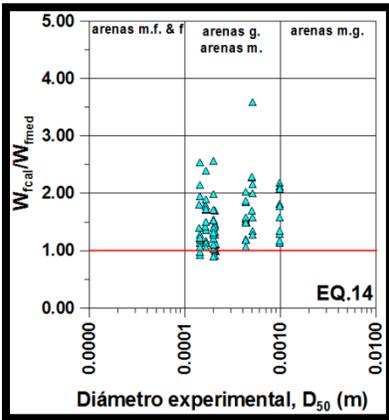
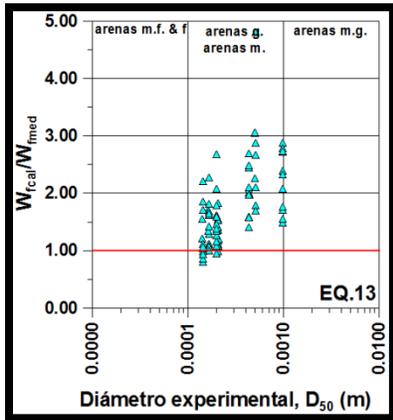


Figura 4.5 Número de Reynolds (Re) contra el parámetro fluido – sedimento (S) para las muestras de arena del estado de Campeche, México

En la Figura 4.6, los rótulos EQ. 1, EQ. 2,..., EQ.30 que aparecen corresponden a las ecuaciones 7.6, 7.7,..., 7.35, respectivamente.



RESULTADOS



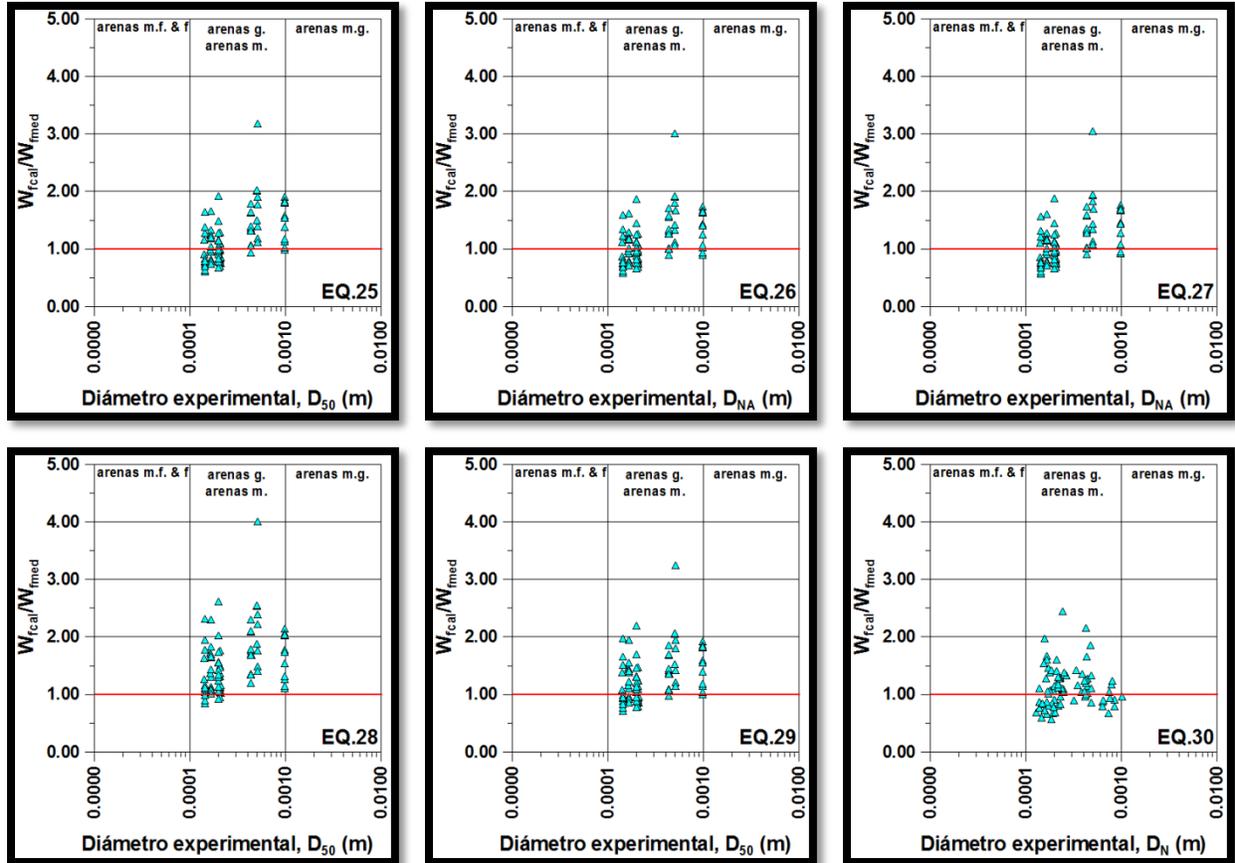


Figura 4.6 Relación W_{fcal}/W_{fmed} contra el diámetro característico (D_{50} ó d_N) de las muestras de arena del estado de Campeche, México



Figura 4.7 Diferencias en la morfología de los sedimentos de la Península de Yucatán. La foto de la izquierda corresponde a una muestra de Punta Sam y la de la derecha de Cancún, ambas en Quintana Roo.

RESULTADOS

Tabla 4.1 Errores representativos de los resultados al aplicar las 30 ecuaciones de velocidad de caída. En esta tabla, la columna con la etiqueta ERMEDIAN es el error mediano, la columna con el nombre ERPROM se refiere al error medio o promedio y MEDCUAD representa el error cuadrático medio

NÚMERO	NOMBRE EC.	QUINTANA ROO			YUCATÁN			CAMPECHE		
		ERMEDIAN (%)	ERPROM (%)	MEDCUAD (%)	ERMEDIAN (%)	ERPROM (%)	MEDCUAD (%)	ERMEDIAN (%)	ERPROM (%)	MEDCUAD (%)
1	Ahrens	21.267266	25.606807	10.520786	39.026527	52.764951	51.304204	36.516034	47.955331	42.64606
2	Ahrens modificada	18.560579	23.65492	9.44995	36.074945	50.23293	47.888487	36.46953	45.441297	38.62949
3	Camenen	14.597028	17.842702	5.481988	21.899704	34.065662	25.359318	21.456004	26.564193	12.940497
4	Concharov	100.16825	120.523523	209.257574	154.910433	188.907538	533.30908	144.056894	166.495027	418.760933
5	Chang & Liou	31.741117	32.213618	14.706569	45.856398	62.332951	66.546224	42.835629	52.158441	50.939074
6	Chang & Liou modificada	24.589359	26.398853	10.667374	39.872375	55.089369	54.750497	36.065957	46.411005	41.400681
7	Cheng	10.603315	13.934454	3.373576	22.956188	35.251204	26.65639	23.973622	33.344248	21.613506
8	Cheng modificada	21.541711	24.903599	10.164203	37.368928	52.525856	51.45278	36.111644	45.293686	38.599391
9	Dietrich	12.567939	15.050229	3.883313	18.225639	30.001955	21.355069	23.707151	*	*
10	Ferguson & Church (D ₅₀)	23.000098	25.375073	9.881842	38.441083	53.41761	51.934225	33.739009	46.079302	40.948359
11	Ferguson & Church (d _N)	16.733029	21.235269	7.081591	27.573705	40.550682	35.083579	26.822718	36.506429	24.770182
12	Fredsoe	16.329125	19.794027	6.099573	26.106757	39.614371	33.746902	26.660294	35.480615	22.972393
13	Guo	48.026772	51.034837	33.351469	67.667839	84.152138	109.152886	58.559057	73.794533	98.145848
14	Hallermeier	21.776473	28.145791	13.232023	38.612306	54.447032	54.444114	42.074478	53.118059	49.532077
15	Jiménez & Madsen	24.441104	26.63729	10.900152	40.512017	55.093568	54.818188	36.164731	46.988077	42.007978
16	Julien	29.989149	32.585475	16.090363	45.609701	62.875373	69.442039	47.12986	52.750885	48.527227
17	Rubey	17.179747	23.797278	9.959109	37.280711	50.425479	49.925537	32.962974	42.338507	33.607235
18	Rubey modificada	26.938337	28.339028	12.114711	42.568994	58.017692	59.892803	35.643289	47.175721	42.013512
19	Sha	11.242573	13.770021	3.20721	18.138515	30.320248	20.106369	23.330281	31.695695	18.932804
20	Soulsby	32.616544	33.555142	16.049918	47.570387	64.332229	70.828267	42.041494	52.887213	50.299864
21	Swamee & Ohja	16.532504	19.876739	6.612062	24.786931	38.549086	31.291413	19.547339	30.49378	18.112723
22	Van Rijn	30.295222	32.201239	15.153098	44.668586	61.818168	66.446208	40.10487	50.656294	46.838122
23	Zanke	30.136132	31.436022	14.474238	44.668589	61.818171	66.446214	40.104873	50.656297	46.838126
24	Zhang	19.989551	22.32812	7.786145	35.644982	49.861367	46.579624	29.367619	42.232458	35.121387
25	Zhu & Cheng	10.472706	13.885285	3.367756	20.538273	33.976222	24.853662	24.839084	33.802923	22.153967
26	EQ 26	10.389031	12.736724	2.873373	18.936487	31.415175	21.64959	24.378556	30.615522	17.794137
27	EQ 27	9.901887	12.890925	2.907749	19.341835	32.056452	22.397287	25.4449	31.266764	18.621826
28	She	33.059345	35.096349	17.324273	48.401172	65.095321	71.56413	46.453894	56.343239	56.945509
29	Baba & Komar	12.714612	16.953733	5.297143	26.759312	40.723457	34.268021	25.185165	37.22429	26.976004
30	Wu & Wang	13.748354	15.379905	3.877201	19.731123	31.314528	23.572553	20.65069	26.080264	12.923148

4.2. DISCUSIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE CAÍDA

En un principio, es lógico suponer que: 1) mientras más grande sea el diámetro característico que represente una muestra de material sedimentario mayor será el valor de la velocidad de caída de las partículas desplazándose en una columna de agua en reposo y 2) que diámetros muy similares (con diferencias del orden de milésimas) deberán poseer velocidades de caída prácticamente iguales. La experiencia en este trabajo ha dejado claro que el tamaño no es lo único que condiciona la velocidad del desplazamiento de las partículas a través de la columna de agua contenida, en este caso, en una probeta en el laboratorio. Como se explicó anteriormente, las partículas naturales sedimentarias se comportan de una manera diferente a lo que predice la ecuación de Stokes, ya que dicha expresión es aplicable a partículas con forma esférica y la superficie lisa; muy distinto de una partícula natural de arena. Para hallar una respuesta debe ponerse atención a otras propiedades físicas de las partículas naturales que difieren de las de una partícula esférica.

Además del tamaño y densidad de las partículas naturales, otras propiedades que condicionan su velocidad de caída son la forma y, en menor medida, la redondez. Con base en los resultados experimentales presentados en este capítulo, para partículas con diámetros similares se obtuvieron velocidades de caída diferentes, sin embargo, con las formulaciones disponibles en la literatura se obtienen valores teóricos muy parecidos debido a las diferencias morfológicas entre los granos. Así por ejemplo, un grano con un factor de forma muy bajo (del orden de 0.3, Goossens, 1987) pero diámetro de arena fina o media presentará velocidad de caída baja porque estos granos tienden a parecer “laja”, es decir, forma plana y por tanto, una mayor superficie de resistencia a caer en el agua. Si a este ejemplo se le añade que frecuentemente las arenas muestran formas muy complejas y, en ocasiones, los granos son porosos y el agua circula a su través, resulta que factores de forma iguales pueden presentar diferentes valores de velocidad de caída (ver, por ejemplo, ejemplo la Figura 4.7).

Complementariamente, la morfología de las partículas también afecta el modo y trayectoria en que se desplazan los granos de arena a través de la columna de agua. Entendiéndose por modo a la rotación o no rotación alrededor del centro de masa de la partícula. La trayectoria simplemente es el camino que sigue la partícula y puede ser, de acuerdo con la experimentación llevada a cabo, recta, helicoidal, en zigzag o una combinación de las tres. La incertidumbre que existe sobre qué tanto afecta la trayectoria en el valor de velocidad de caída ha quedado fuera de los alcances de esta tesis. Lo que se puede afirmar es que la forma afecta el modo y trayectoria de las partículas y que esto se ve reflejado en los resultados experimentales donde aquellas partículas con un mismo diámetro característico, pero diferentes formas, tienen diferentes velocidades de caída.

Como parte de la morfología del sedimento, en lo que se refiere a la redondez, el nivel de agudeza de las aristas y bordes de la superficie puede afectar también la velocidad de desplazamiento de los granos de arena, ya que la velocidad final y trayectoria que adquiere una partícula natural de arena con aristas lisas difiere de los resultados obtenidos con una partícula que presente muchos “picos” en su superficie. La fricción que desarrolla en las partículas con muchas irregularidades es mayor que la que desarrolla una la partícula con aristas lisas, y por ende, la fuerza de arrastre será mayor, toda vez que la redondez es una propiedad física independiente de la forma del grano.

Con base en lo anterior, es posible explicar cómo estos dos factores (forma y redondez) influyen en el desplazamiento de los granos de arena y qué se puede esperar en torno a la magnitud de la velocidad de caída:

1. Para partículas relativamente largas (cilindros, rollos y “lajas” o planos), con redondez alta, es posible esperar una trayectoria recta sin rotación. Para la misma forma, pero con redondez baja, es posible que se presenten trayectorias en zigzag combinado con la rotación. Con esto, uno de los factores que propicien la rotación de las partículas muy largas es la redondez que posean, es decir, para valores de

redondez elevados ($P = 5$ o 6), la rotación puede ser nula, mientras que para un valor de redondez bajo, es de esperarse un comportamiento rotatorio.

2. Las partículas con formas que varían entre las muy largas y las casi redondas, en la mayoría de los casos se desplazan rotando, pero en algunos casos siguen una trayectoria helicoidal y otras en zigzag. Algunas más presentan combinación de ambas trayectorias, por lo cual es difícil dar un diagnóstico más preciso sobre la trayectoria. Lo que sí es posible afirmar es que los granos con redondeces bajas presentaron rotación, mientras que para aquellas partículas muy lisas, al menos a simple vista, no presentaron giros.
3. Las partículas redondas en todos los casos observados presentaron una trayectoria recta. Para los granos con redondez alta se observó una rotación, pero conservando la trayectoria rectilínea. Dicha rotación se acentúa más cuando el grado de redondez baja.

Los tres puntos antes descritos resumen las observaciones que se realizaron durante el trabajo experimental en laboratorio para aquellas partículas de mayor tamaño, ya que hubo ocasiones en que el tamaño del grano era tan pequeño que no se pudo percibir a simple vista la rotación (para aquellos granos en donde el D_{50} era igual o menor a 0.15 mm (Del Valle, 2010)). Aquí cabe mencionar que mientras más pequeña sea una partícula natural de arena, la trayectoria se puede suponer será rectilínea, toda vez que la rotación no se pueda percibir a simple vista.

Todo esto lleva a decir que las ecuaciones de velocidad de caída que no toman en cuenta estos dos parámetros, presentarán mayor dispersión respecto de las que sí toman en cuenta la forma y redondez de las partículas (Camenen, Dietrich, Swamme & Ohja y Wu & Wang). Las dos primeras ecuaciones toman en cuenta ambas variables, mientras que las dos últimas solo incluyen el CSF.

4.3. EXPLICACIÓN CON RESPECTO A LA VELOCIDAD DE INICIO DE MOVIMIENTO (u_*)

Como un inicio, Ruíz (2009) se dio a la tarea de investigar una manera más directa para determinar la velocidad del esfuerzo cortante crítico para fondo plano u horizontal, con el cálculo previo del parámetro de Shields crítico. Tradicionalmente, el parámetro de Shields crítico se determina por medio de iteraciones, además de consultar a “ojo” la curva propuesta por Shields. Esta operación de observar la gráfica de Shields conlleva un error de precisión, además de ser poco eficiente y más cuando se maneja un gran volumen de datos. La secuencia que se sugiere aquí es

1. Conocido el diámetro característico de la muestra de material (en este caso sería el D_{50}) y la pendiente del fondo, suponer el valor del radio hidráulico R_{HC} .
2. Calcular la velocidad del esfuerzo cortante $u_{*c} = \sqrt{SgR_{HC}}$
3. Evaluar el número de Reynolds $Re = \frac{(u_{*c})(D_{50})}{\nu}$ para determinar con ayuda de la gráfica de Shields el parámetro de Shields crítico ψ_{cri} .
4. Despejar el valor de la velocidad del esfuerzo cortante crítico del parámetro de Shields crítico, es decir

$$u_{*c} = \sqrt{\Delta g D_{50} \psi_{cri}}$$

5. Si el valor de la velocidad obtenida del paso 4 es igual al del paso 2, entonces el valor del parámetro de Shields crítico es el correcto, sino, se debe probar con otro valor del radio hidráulico, hasta que ambas velocidades sean iguales.

Cabe señalar que la figura que se utiliza es la gráfica original de Shields, donde el eje horizontal de dicha gráfica representa los valores del número de Reynolds. Como se dijo antes, Madsen & Grant (1976) modificaron esta gráfica simplemente colocando en el eje horizontal los valores del parámetro sedimento-fluido S_{*c} , reajustando la curva con una serie de datos de varios investigadores utilizando dicho parámetro. A partir de esto, Ruíz (2009) encontró en la literatura una ecuación que verifica muy bien con el ajuste propuesto por Madsen & Grant. Dicha ecuación es la número 3.4 del capítulo anterior. Adicionalmente a este esfuerzo realizado por Ruíz, se aplicaron 8 ecuaciones para determinar si, con las características físicas de los sedimentos determinadas en el laboratorio, se presenta o no el inicio de movimiento (ver Tabla 1.9). El resumen de este cálculo se muestra en las Tabla 4.2, Tabla 4.3, Tabla 4.4, así como en las figuras del anexo 2, que pertenecen a los estados de Quintana Roo, Yucatán y Campeche, respectivamente.

Las ecuaciones utilizadas para determinar el parámetro de Shields, y a través de éste la velocidad de inicio de movimiento, suponen que condiciones de flujo permanente y fondo plano. Sin embargo, hay que precisar que las condiciones que estén presentes en cualquier playa de arena son distintas a las ya señaladas, entre las que destacan la pendiente de la cara de la playa, la asimetría del oleaje (cresta y valle diferentes) y las diferentes corrientes longitudinal y transversal que puedan estar presentes.

En las siguientes tablas se presentan las velocidades de inicio de movimiento para las muestras de los tres estados, Quintana Roo, Yucatán y Campeche. En estas tablas se utilizó la siguiente nomenclatura para representar los valores obtenidos para la velocidad de inicio de movimiento: USCB corresponde a la formulación propuesta por Bonnefille (1963); USCCW a la ecuación de Chien & Wan (1983); UPSICRIS a la presentada por Soulsby (1997); USCPF a la dada por Paphitis (2001); USCHO a la de Hager & Oliveto (2002); USCC a la de Cheng (2004); USCSR por Sheppard & Renna (2005); USCCE por Cao et al. (2006) [*referencias dadas por Beheshti & Ashtiani (2008), con excepción de la ecuación de Soulsby*]. En todos los casos, los valores de velocidad de inicio de movimiento están en m/s.

Tabla 4.2 Velocidades de inicio de movimiento críticas de las muestras de arena del Estado de Quintana Roo, México

# muestra	USCB	USCCW	UPSICRIS	USCPF	USCHO	USCC	USCSR	USCCE
1	0.013354	0.014416	0.013452	0.015579	0.014511	0.01985	0.050223	0.02067
2	0.01273	0.01348	0.012704	0.014328	0.013437	0.01764	0.040153	0.018156
3	0.013339	0.014288	0.013344	0.015306	0.014326	0.019276	0.046715	0.019979
4	0.013978	0.015266	0.014388	0.016829	0.015459	0.021683	0.058646	0.02274
5	0.013804	0.01498	0.014016	0.016319	0.01512	0.020921	0.054549	0.021856
6	0.012201	0.012822	0.012198	0.013594	0.012731	0.016443	0.035942	0.016846
7	0.012795	0.013575	0.012768	0.014442	0.013545	0.017854	0.041059	0.018398
8	0.014742	0.016294	0.015787	0.018501	0.017784	0.023887	0.069277	0.025233
9	0.013515	0.014566	0.01359	0.01571	0.014651	0.019975	0.050103	0.020781
10	0.01245	0.013256	0.012427	0.014132	0.01325	0.0176	0.041271	0.018176

RESULTADOS

Tabla 4.2 Continuación

# muestra	USCB	USCCW	UPSICRIS	USCPF	USCHO	USCC	USCSR	USCCE
11	0.013512	0.014604	0.013634	0.015812	0.014711	0.02018	0.051437	0.021031
12	0.014014	0.015241	0.014288	0.016665	0.0154	0.021407	0.056513	0.022393
13	0.015053	0.016718	0.016473	0.019266	0.018899	0.024823	0.07408	0.026298
14	0.013274	0.014305	0.013346	0.015427	0.014388	0.019613	0.049172	0.020403
15	0.013184	0.01416	0.013213	0.01521	0.014217	0.01924	0.047328	0.019974
16	0.015043	0.016728	0.016567	0.019359	0.019086	0.024921	0.074943	0.026423
17	0.013569	0.014727	0.013781	0.016047	0.014866	0.020575	0.05369	0.021496
18	0.013713	0.014861	0.013892	0.016153	0.01499	0.020679	0.053504	0.021586
19	0.014946	0.016574	0.016242	0.019011	0.018536	0.024513	0.072518	0.025947
20	0.015073	0.016755	0.016569	0.019367	0.019067	0.024938	0.074829	0.026434
21	0.013544	0.014613	0.013635	0.015781	0.014705	0.020094	0.050692	0.020918
22	0.01511	0.016791	0.016583	0.019387	0.019061	0.024969	0.074774	0.026462
23	0.01474	0.016299	0.015814	0.018531	0.017847	0.023922	0.069563	0.025277
24	0.013382	0.014447	0.013482	0.015616	0.014544	0.0199	0.050387	0.020725
25	0.01268	0.013432	0.012653	0.014279	0.013391	0.017594	0.040132	0.018113
26	0.014985	0.016745	0.016948	0.01972	0.019804	0.025274	0.078288	0.026876
27	0.014591	0.01604	0.015312	0.01795	0.016833	0.023183	0.065139	0.024409
28	0.014749	0.016221	0.015502	0.018174	0.01708	0.023473	0.066132	0.024722
29	0.015265	0.017019	0.017043	0.019875	0.019793	0.025531	0.077995	0.027112
30	0.01477	0.016325	0.015819	0.018538	0.017822	0.023934	0.069429	0.025284
31	0.012851	0.013685	0.012828	0.014591	0.01368	0.018177	0.042658	0.018773
32	0.012871	0.013692	0.012846	0.014589	0.01368	0.018135	0.042311	0.018717
33	0.014978	0.016677	0.016605	0.019386	0.01921	0.024931	0.075561	0.026453
34	0.015886	0.017919	0.01909	0.021924	0.022692	0.027724	0.090942	0.029649
35	0.016128	0.01835	0.020725	0.023395	0.024759	0.029052	0.100585	0.031233
36	0.0148	0.016424	0.016138	0.018882	0.018466	0.024339	0.072312	0.025773
37	0.015051	0.016799	0.016904	0.019693	0.01969	0.025272	0.077704	0.026854
38	0.015488	0.017364	0.017866	0.020708	0.021032	0.026436	0.083531	0.028167
39	0.014277	0.01564	0.014817	0.017354	0.015992	0.022392	0.061627	0.023526
40	0.015243	0.016962	0.016849	0.019679	0.019457	0.025319	0.076476	0.026856
41	0.015229	0.017019	0.017228	0.020045	0.020134	0.02569	0.079597	0.027319
42	0.013353	0.014507	0.013586	0.015832	0.01465	0.020317	0.0533	0.021239
43	0.013952	0.015261	0.014419	0.016877	0.015466	0.021764	0.059383	0.022846
44	0.013694	0.014821	0.013844	0.016077	0.014939	0.02055	0.052766	0.021433
45	0.012688	0.013483	0.012662	0.014357	0.013464	0.017809	0.041315	0.018369
46	0.013298	0.01431	0.01335	0.015404	0.014381	0.019541	0.048582	0.02031
47	0.01332	0.014254	0.013318	0.015257	0.014285	0.019183	0.046254	0.019872
48	0.013521	0.014589	0.013613	0.015758	0.014683	0.020068	0.05066	0.020892
49	0.012336	0.013027	0.012316	0.01383	0.012966	0.01692	0.037941	0.017386
50	0.012071	0.012645	0.012084	0.013399	0.012534	0.016076	0.034545	0.016438

Tabla 4.2 Continuación

# muestra	USCB	USCCW	UPSICRIS	USCPF	USCHO	USCC	USCSR	USCCE
51	0.012101	0.012791	0.012078	0.013585	0.012738	0.016659	0.037563	0.017129
52	0.012827	0.0137	0.012815	0.014639	0.013716	0.018339	0.043733	0.018974
53	0.012897	0.013788	0.012889	0.014744	0.01381	0.018505	0.044371	0.019157
54	0.015587	0.017471	0.017955	0.020817	0.021129	0.026584	0.083888	0.028321
55	0.013588	0.014652	0.01367	0.015812	0.014741	0.020118	0.050599	0.020936
56	0.014601	0.016078	0.015413	0.01807	0.017079	0.02334	0.066227	0.0246
57	0.013293	0.014345	0.013386	0.015497	0.014438	0.019739	0.049866	0.020551
58	0.012938	0.013892	0.012964	0.014917	0.013946	0.01886	0.046319	0.019576
59	0.013727	0.014859	0.01388	0.016121	0.014978	0.02061	0.05296	0.021497
60	0.013284	0.014348	0.013391	0.015518	0.014447	0.019787	0.050227	0.020612
61	0.012749	0.013512	0.012721	0.014367	0.013474	0.017722	0.040533	0.018251
62	0.011123	0.011744	0.011105	0.012468	0.011689	0.015249	0.034173	0.015668
63	0.017618	0.020835	0.033125	0.033697	0.037302	0.036548	0.162728	0.040224
64	0.011103	0.011367	0.011135	0.012047	0.011174	0.01384	0.027353	0.014013
65	0.012904	0.013763	0.012885	0.014691	0.01377	0.018358	0.043458	0.018978
66	0.013457	0.014464	0.013495	0.015549	0.014528	0.019692	0.048643	0.020453
67	0.014094	0.015498	0.014804	0.017355	0.016295	0.022415	0.063078	0.023605
68	0.012779	0.013727	0.012809	0.014747	0.013783	0.018657	0.04593	0.019371
69	0.012268	0.013022	0.012241	0.013858	0.012997	0.017152	0.039567	0.017681
70	0.012492	0.013347	0.012481	0.014266	0.013365	0.017886	0.042749	0.01851
71	0.012311	0.012954	0.012302	0.013739	0.012871	0.01667	0.036689	0.017093
72	0.011955	0.012526	0.011966	0.013274	0.012419	0.015937	0.034295	0.016299
73	0.011624	0.012332	0.011599	0.013119	0.012304	0.016217	0.037286	0.01671
74	0.011721	0.012364	0.011704	0.013123	0.012301	0.016018	0.035734	0.01645
75	0.012385	0.013164	0.012359	0.014019	0.013147	0.017398	0.040412	0.017948
76	0.012703	0.013523	0.012679	0.014416	0.013517	0.017948	0.042055	0.018534
77	0.012819	0.013802	0.012876	0.014868	0.013875	0.018877	0.047084	0.019627
78	0.012895	0.013813	0.0129	0.014798	0.01385	0.018636	0.04517	0.019316
79	0.013112	0.014255	0.01336	0.015578	0.014402	0.020005	0.052711	0.020922
80	0.014344	0.015866	0.015412	0.018058	0.017417	0.023309	0.067916	0.024634
82	0.016512	0.018803	0.021372	0.024078	0.025531	0.029837	0.103867	0.032093
83	0.012093	0.012648	0.012113	0.013401	0.012529	0.016018	0.034157	0.016365
84	0.011875	0.012407	0.011901	0.013144	0.012283	0.015667	0.033219	0.015995
85	0.010939	0.011378	0.010989	0.012052	0.011239	0.014198	0.029413	0.014456
86	0.013721	0.015244	0.015044	0.01759	0.017282	0.022657	0.067778	0.024009
87	0.010566	0.010957	0.010631	0.011608	0.010806	0.013565	0.027676	0.013787
88	0.01016	0.010421	0.010281	0.01105	0.01022	0.01253	0.024185	0.01265
90	0.013147	0.014144	0.013196	0.015222	0.014214	0.019305	0.047937	0.020062

RESULTADOS

Tabla 4.2 Continuación

# muestra	USCB	USCCW	UPSICRIS	USCPF	USCHO	USCC	USCSR	USCCE
91	0.015796	0.017788	0.01877	0.021613	0.022267	0.027407	0.089024	0.029282
92	0.015357	0.017186	0.017517	0.02035	0.020541	0.026039	0.081368	0.027714
93	0.017114	0.019854	0.02635	0.028278	0.030893	0.033101	0.129823	0.036008
94	0.013906	0.015019	0.014017	0.016243	0.015122	0.02071	0.052561	0.021574
95	0.012287	0.013112	0.012271	0.014002	0.013122	0.017515	0.041583	0.018112
96	0.011521	0.012001	0.011564	0.012712	0.011862	0.015033	0.031375	0.015319
97	0.010097	0.010353	0.010422	0.01099	0.010074	0.011956	0.021429	0.01196
98	0.011473	0.01192	0.011532	0.012626	0.011767	0.01483	0.030543	0.015089
99	0.014232	0.015723	0.015212	0.017829	0.017103	0.023022	0.066588	0.024312
100	0.011174	0.011575	0.01125	0.012262	0.011409	0.014286	0.028972	0.014509
158	0.014737	0.016376	0.016174	0.018909	0.018593	0.024353	0.07294	0.02581
159	0.014752	0.016341	0.01595	0.018679	0.018127	0.024098	0.070814	0.02549
160	0.01479	0.016361	0.015899	0.018627	0.017975	0.024043	0.070103	0.025412
161	0.015407	0.017265	0.01772	0.020551	0.020841	0.026252	0.082714	0.027963
162	0.015165	0.016902	0.016902	0.019716	0.019611	0.025334	0.077244	0.026898
163	0.014316	0.015727	0.014986	0.017565	0.016411	0.022683	0.063448	0.023872
164	0.015088	0.01681	0.016783	0.019583	0.019451	0.025172	0.076575	0.026719
165	0.01403	0.015326	0.014448	0.0169	0.01552	0.021777	0.058953	0.022841
166	0.014474	0.015854	0.015018	0.017589	0.016203	0.022695	0.062436	0.023844
167	0.013123	0.014077	0.01314	0.0151	0.014124	0.019061	0.046556	0.019773
168	0.013861	0.015104	0.014192	0.016577	0.015278	0.021328	0.056948	0.022337
169	0.013837	0.015093	0.0142	0.016596	0.015274	0.021367	0.057378	0.022392
170	0.01261	0.013483	0.012604	0.01442	0.013506	0.018101	0.043427	0.01874

Tabla 4.3 Velocidades de inicio de movimiento críticas de las muestras de arena del Estado de Yucatán, México

# muestra	USCB	USCCW	UPSICRIS	USCPF	USCHO	USCC	USCSR	USCCE
101	0.01365	0.01484	0.013908	0.016217	0.014993	0.020826	0.054872	0.021781
102	0.015405	0.017302	0.017974	0.020782	0.021231	0.026465	0.084541	0.028229
103	0.012851	0.013756	0.012851	0.014726	0.013787	0.018521	0.044701	0.019187
104	0.012133	0.012806	0.012115	0.013594	0.012743	0.016611	0.037149	0.017063
105	0.013724	0.014973	0.01409	0.01647	0.015154	0.021207	0.057002	0.022226
106	0.01318	0.01429	0.013362	0.015544	0.014417	0.019908	0.051643	0.020787
107	0.013938	0.015313	0.014598	0.01711	0.015999	0.022096	0.061869	0.023257
108	0.013444	0.014554	0.013597	0.015794	0.014672	0.020196	0.051944	0.021068
109	0.014977	0.016657	0.016505	0.019285	0.019023	0.024824	0.074709	0.026321
110	0.012699	0.013526	0.012676	0.014423	0.013522	0.017975	0.042233	0.018567
111	0.012889	0.013791	0.012887	0.014759	0.01382	0.018551	0.044685	0.019215
112	0.013572	0.014709	0.013749	0.015988	0.014836	0.020468	0.052961	0.021365
113	0.016264	0.018588	0.021721	0.024262	0.02592	0.029782	0.106087	0.032105

Tabla 4.3 Continuación

# muestra	USCB	USCCW	UPSICRIS	USCPF	USCHO	USCC	USCSR	USCCE
114	0.011873	0.01247	0.011872	0.01322	0.012379	0.015968	0.034801	0.016355
115	0.011845	0.012398	0.011861	0.013137	0.012286	0.015733	0.033683	0.016081
116	0.013999	0.015381	0.014664	0.017188	0.016076	0.022197	0.062168	0.023364
117	0.014828	0.016451	0.016148	0.018897	0.018459	0.024361	0.072261	0.025792
118	0.012352	0.013049	0.01233	0.013856	0.012992	0.01697	0.038146	0.017442
120	0.013347	0.014471	0.013531	0.015741	0.0146	0.020162	0.052304	0.021052
121	0.014775	0.016467	0.016465	0.019206	0.019102	0.02468	0.075234	0.026203
122	0.012337	0.013066	0.012312	0.013889	0.013025	0.017105	0.038971	0.017608
123	0.012312	0.01296	0.012302	0.013746	0.012879	0.016692	0.036805	0.017119

Tabla 4.4 Velocidades de inicio de movimiento críticas de las muestras de arena del Estado de Campeche, México

# muestra	USCB	USCCW	UPSICRIS	USCPF	USCHO	USCC	USCSR	USCCE
151	0.012702	0.013476	0.012674	0.014337	0.013446	0.017726	0.040774	0.018266
152	0.01489	0.016506	0.016155	0.018912	0.018413	0.024391	0.072002	0.025811
153	0.012198	0.012797	0.012203	0.013564	0.012695	0.016337	0.03539	0.01672
154	0.012454	0.013184	0.012429	0.01401	0.013139	0.017235	0.039158	0.017736
155	0.014608	0.016081	0.015406	0.018062	0.017051	0.023329	0.066097	0.024585
156	0.016599	0.019003	0.02251	0.025037	0.026835	0.030587	0.110149	0.033007
157	0.0118	0.012289	0.011845	0.013017	0.012147	0.015389	0.032098	0.015681

A su vez, Chávez (2011; pág. 69) reporta valores experimentales de la velocidad de inicio de movimiento, para los casos en que el fondo inicialmente fuera plano y en otro con rizados. Aquí se presentan los errores que se han manejado en sus diferentes formas, para las muestras utilizadas en dicha experimentación y solo el caso en que el fondo fuera plano.

Tabla 4.5 Muestras seleccionadas y a las cuales se les determinó su velocidad de inicio de movimiento experimental

Número	Sitio	Sección de la playa	U^*_c (m/s) experimental: Fondo plano					
7	Puerto Morelos 2	Zona foreshore	0.07008	0.11681	0.16998	0.24674	0.13425	0.10587
43	Pto 10	Zona foreshore	0.06212	0.08762	0.10313	0.12346	0.14662	0.12483
60	Pto E	Zona offshore	0.09409	0.09484	0.10036	0.10753	0.15009	0.16761
69	Isla Mujeres	Zona foreshore	0.06759	0.13875	0.08009	0.14166	0.12824	0.19091
78	Sian Ka'an	Zona foreshore	0.06326	0.13420	0.16451	0.19108	0.11511	0.10693
87	Akumal 2	Zona foreshore	0.08230	0.15750	0.09128	0.10671	0.20867	0.20507
99	Holbox	Zona foreshore	0.04929	0.14126	0.10783	0.15266	0.17609	0.11945
101	Chelem	Zona backshore	0.05092	0.10291	0.13537	0.12007	0.20418	0.15401
157	Bahía Tortugas	Zona offshore	0.05160	0.09280	0.16824	0.11825	0.17840	0.13755

RESULTADOS

EN la Tabla 4.6, ERRORMED es el error como mediana, ERRORPROM es el error medio, y ERRORCUAD es el error cuadrático medio.

Tabla 4.6 Errores de las 9 muestras dispuestas en la Tabla 4.5

	T [s]						
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	
ERRORMED	79.62	89.05	88.42	90.10	91.15	91.14	USCB
ERRORPROM	79.47	88.66	88.96	90.58	91.65	90.65	
ERRORCUAD	63.41	78.67	79.23	82.09	84.04	82.23	
ERRORMED	78.16	88.38	88.00	89.70	90.44	90.36	USCCW
ERRORPROM	77.95	87.82	88.16	89.89	91.05	89.95	
ERRORCUAD	61.09	77.22	77.82	80.87	82.94	80.99	
ERRORMED	79.61	89.07	88.35	90.04	91.08	90.97	UPSICRIS
ERRORPROM	79.09	88.47	88.77	90.42	91.53	90.48	
ERRORCUAD	62.85	78.35	78.90	81.81	83.82	81.94	
ERRORMED	76.61	87.38	87.28	88.99	89.66	89.47	USCPF
ERRORPROM	76.05	86.80	87.16	89.05	90.31	89.10	
ERRORCUAD	58.29	75.46	76.09	79.37	81.61	79.48	
ERRORMED	78.11	87.89	88.16	89.73	90.29	90.26	USCHO
ERRORPROM	77.61	87.69	88.00	89.78	90.95	89.81	
ERRORCUAD	60.64	76.99	77.55	80.67	82.76	80.74	
ERRORMED	70.54	83.70	84.62	86.99	86.82	86.48	USCC
ERRORPROM	69.97	83.45	83.91	86.30	87.86	86.32	
ERRORCUAD	49.76	69.85	70.63	74.61	77.27	74.68	
ERRORMED	37.79	64.85	59.47	72.07	69.15	64.37	USCSR
ERRORPROM	34.39	58.81	59.96	66.06	69.93	65.83	
ERRORCUAD	15.08	36.68	38.08	44.92	49.69	44.98	
ERRORMED	69.61	83.10	83.91	86.74	86.27	85.86	USCCE
ERRORPROM	68.79	82.81	83.29	85.78	87.39	85.79	
ERRORCUAD	48.26	68.81	69.62	73.73	76.47	73.78	

En la Tabla 4.7, la Desviación Cuadrática Media Normalizada se calculó como:

$$DCMN = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (V_m - V_c)^2 / N \right]^2}{V_{\max} - V_{\min}} \quad [4.1]$$

En donde V es el valor o dato, N es el número total de datos, los subíndices m y c representan medido y calculado (con la ecuación), y los subíndices max y min son los datos máximo y mínimo del conjunto.

Tabla 4.7 Desviación Cuadrática Media Normalizada (*DCMN* ó *NRMSD* por sus siglas en inglés), en porcentaje.

		T [s]						
		1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	
<i>DCMN</i>		0.020	0.198	0.206	0.270	0.552	0.359	<i>USCB</i>
		0.019	0.192	0.200	0.264	0.539	0.351	<i>USCCW</i>
		0.020	0.197	0.205	0.269	0.548	0.358	<i>UPSICRIS</i>
		0.018	0.184	0.192	0.256	0.523	0.340	<i>USCPF</i>
		0.019	0.190	0.199	0.262	0.536	0.349	<i>USCHO</i>
		0.013	0.161	0.170	0.230	0.474	0.306	<i>USCC</i>
		0.002	0.053	0.063	0.100	0.214	0.135	<i>USCSR</i>
		0.013	0.156	0.166	0.226	0.465	0.300	<i>USCCE</i>

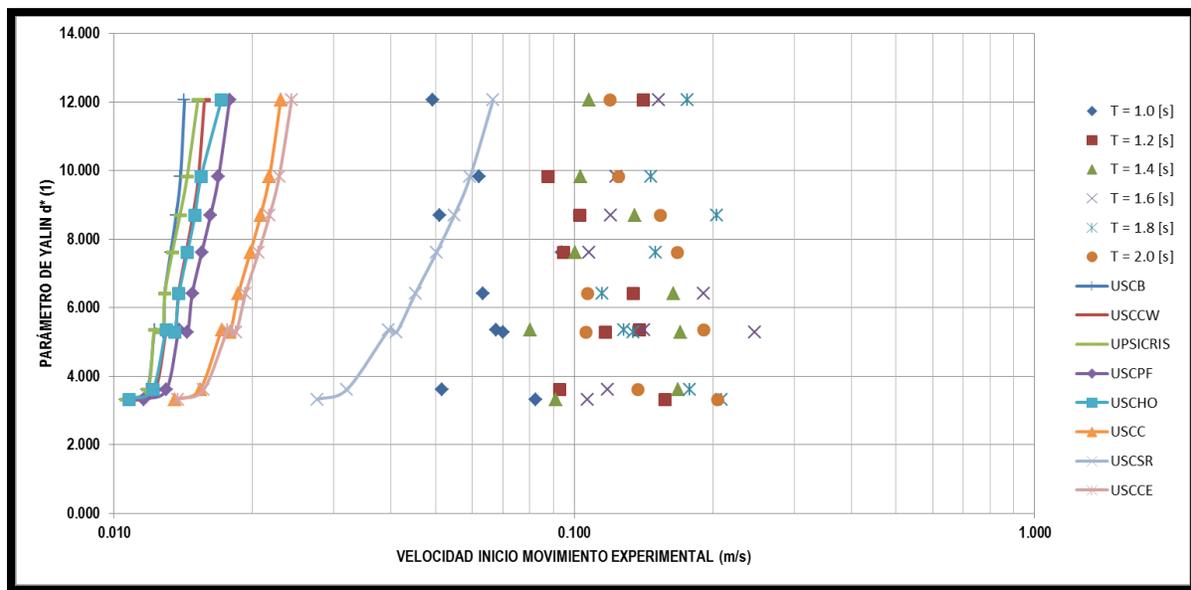


Figura 4.8 Parámetro de Yalin [d^*] contra la velocidad de inicio de movimiento experimental [u_c]. A su vez, se han dibujado las 8 ecuaciones de la Tabla 1.9

Al reordenar los resultados de la Tabla 4.6 y tomando al error cuadrático medio, resulta que la ecuación de Sheppard & Renna (2005) [*USCSR*] ofrece un mejor comportamiento o se ajusta mejor a los resultados determinados experimentalmente de las 9 muestras de arena (ver Tabla 4.5, Tabla 4.7 y Figura 4.8). Así, en la se han reordenado los errores cuadráticos medios de cada una de las ecuaciones de menor a mayor valor.

Tabla 4.8 Errores cuadráticos medios para el caso de fondo plano

	T [s]						
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	
ERRORCUAD	15.08	36.68	38.08	44.92	49.69	44.98	USCSR
ERRORCUAD	48.26	68.81	69.62	73.73	76.47	73.78	USCCE
ERRORCUAD	49.76	69.85	70.63	74.61	77.27	74.68	USCC
ERRORCUAD	58.29	75.46	76.09	79.37	81.61	79.48	USCPF
ERRORCUAD	60.64	76.99	77.55	80.67	82.76	80.74	USCHO
ERRORCUAD	61.09	77.22	77.82	80.87	82.94	80.99	USCCW
ERRORCUAD	62.85	78.35	78.90	81.81	83.82	81.94	UPSICRIS
ERRORCUAD	63.41	78.67	79.23	82.09	84.04	82.23	USCB

4.4. VELOCIDAD DE CAÍDA EXPERIMENTAL $[W_F]$ Y DE INICIO DE MOVIMIENTO $[u_{*c}]$ CONTRA EL FACTOR DE FORMA $[CSF]$.

Algo que se ha puntualizando en este trabajo es que la forma que poseen las partículas naturales de arena afecta de manera importante el valor de la velocidad de caída medida. A raíz de ello, en la Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 4.11, para las muestras evaluadas de los estados de Quintana Roo, Yucatán y Campeche, respectivamente, se muestran gráficamente la dependencia que existe entre el factor de forma y la velocidad de caída.

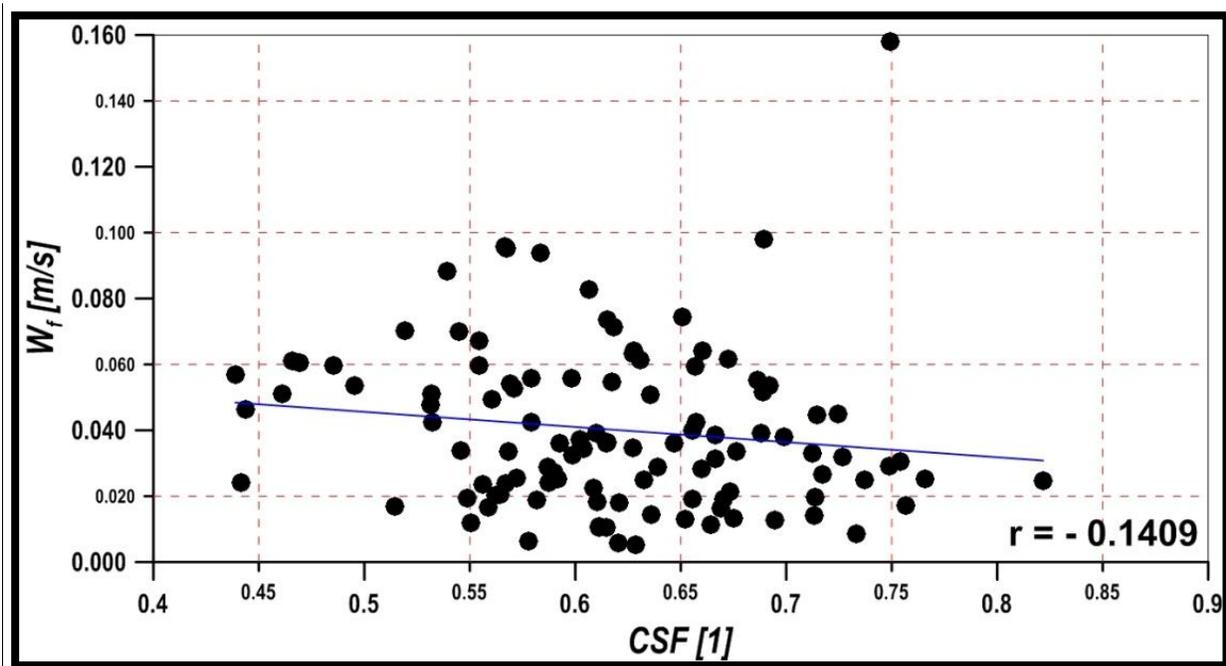


Figura 4.9 Coeficiente de correlación $[r]$, de las muestras del Estado de Quintana Roo

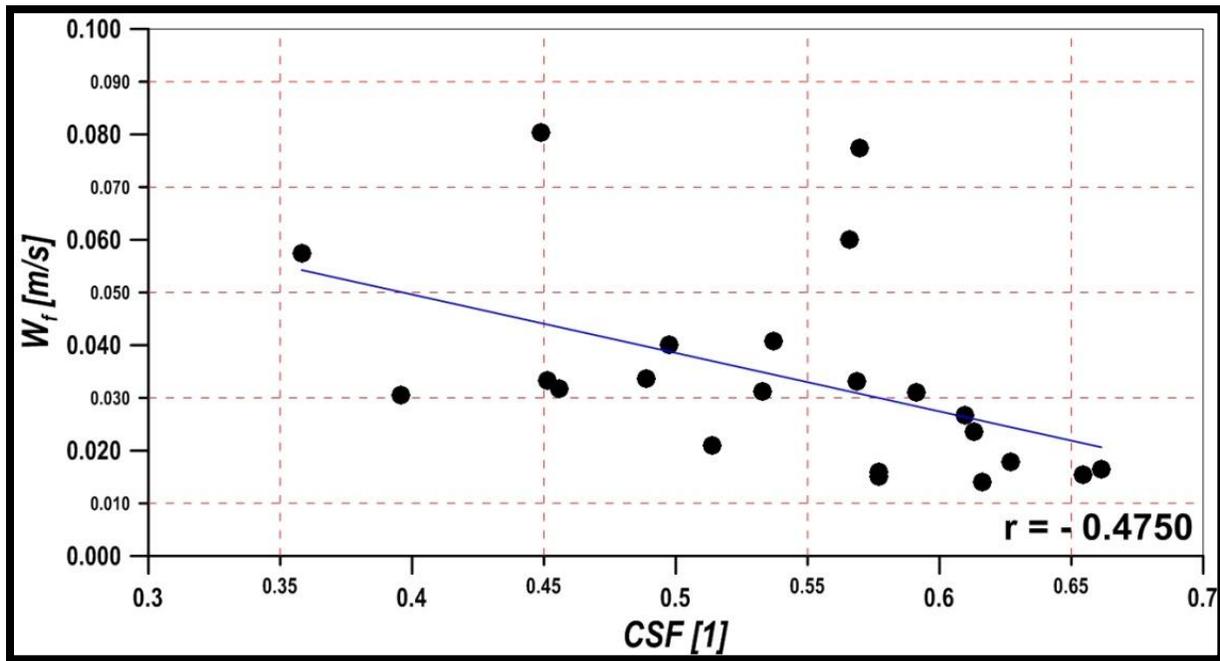


Figura 4.10 Coeficiente de correlación $[r]$, de las muestras del Estado de Yucatán

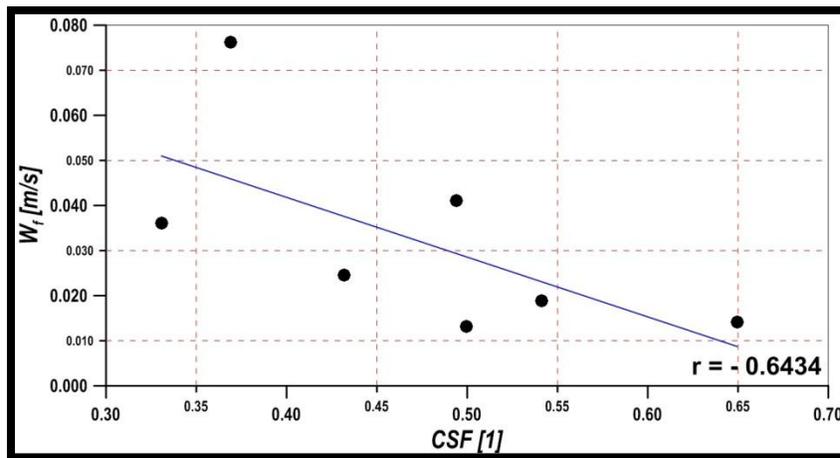


Figura 4.11 Coeficiente de correlación $[r]$, de las muestras del Estado de Campeche

En las tres figuras anteriores se observa que la línea de tendencia presenta una pendiente negativa, por lo cual puede afirmarse que a mayor valor del factor de forma menor será la velocidad de caída, siempre y cuando el diámetro característico (y por lo tanto el tamaño representativo de la muestra) es menor; y viceversa, a menor factor de forma, mayor velocidad de caída, pero con un tamaño de partícula más grande

e irregular. Y en efecto, mientras el factor de forma tiende a uno, es decir tiende la forma hacia una esfera, el D_{50} de las muestras analizadas fueron los más pequeños.

Las correlaciones obtenidas entre el factor de forma y la velocidad de caída experimental de las muestras evaluadas fue de: $r=-0.1409$ para Quintana Roo, (Figura 4.9), $r=-0.4750$ para Yucatán (Figura 4.10) y de $r=-0.6434$ para Campeche (Figura 4.11). A pesar que la correlación no es muy alta, se puede afirmar que existe una dependencia entre estos dos parámetros.

De forma complementaria, en las figuras siguientes se muestran las regresiones lineales por estado territorial para cada una de las ocho ecuaciones de velocidad de inicio de movimiento presentadas en la Tabla 1.9 contra el factor de forma $[CSF]$.

RESULTADOS

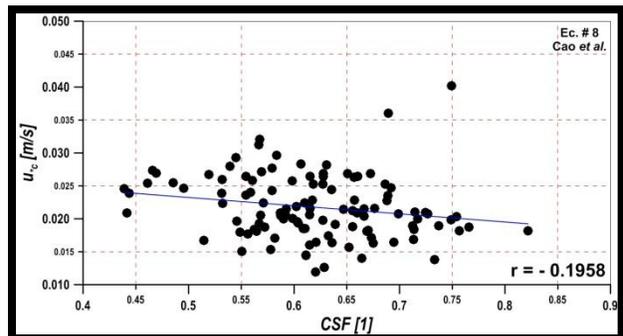
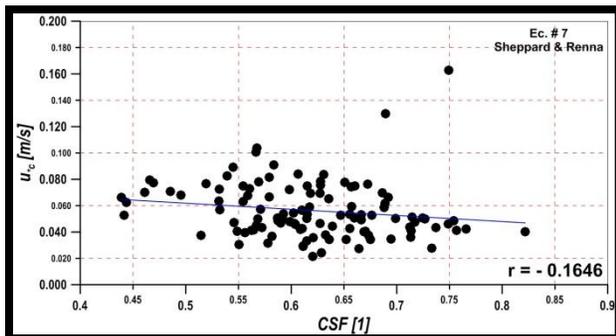
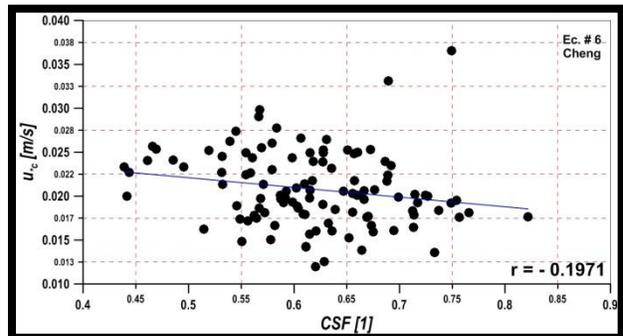
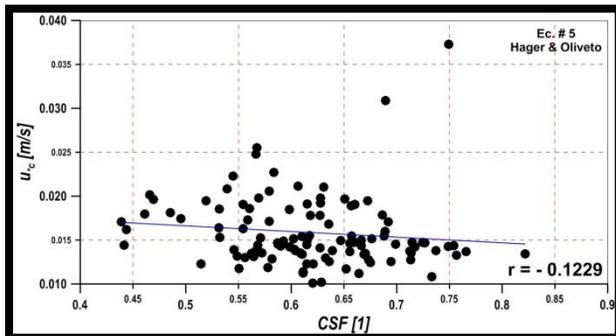
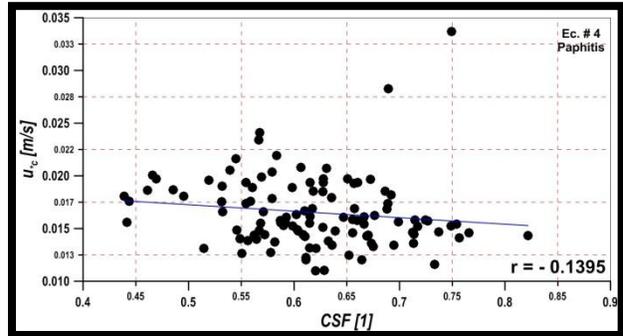
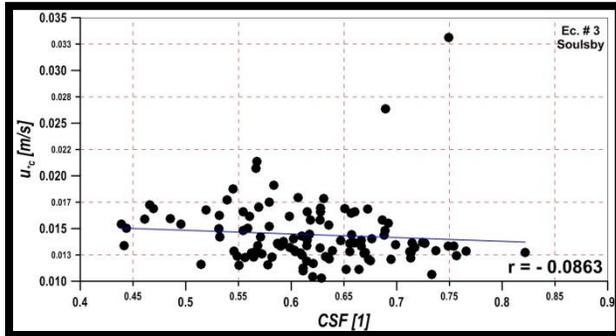
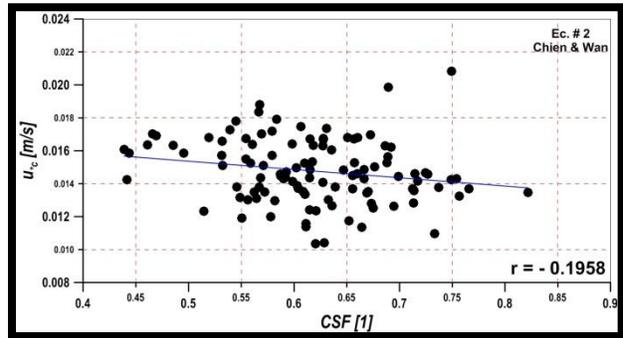
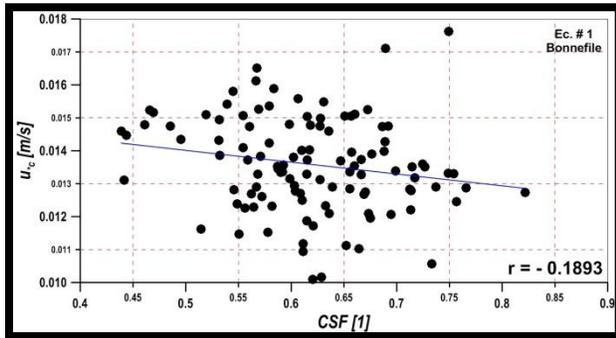


Figura 4.12 Velocidad de inicio de movimiento (u_{*c}) contra el factor de forma (CSF) del estado de Quintana Roo

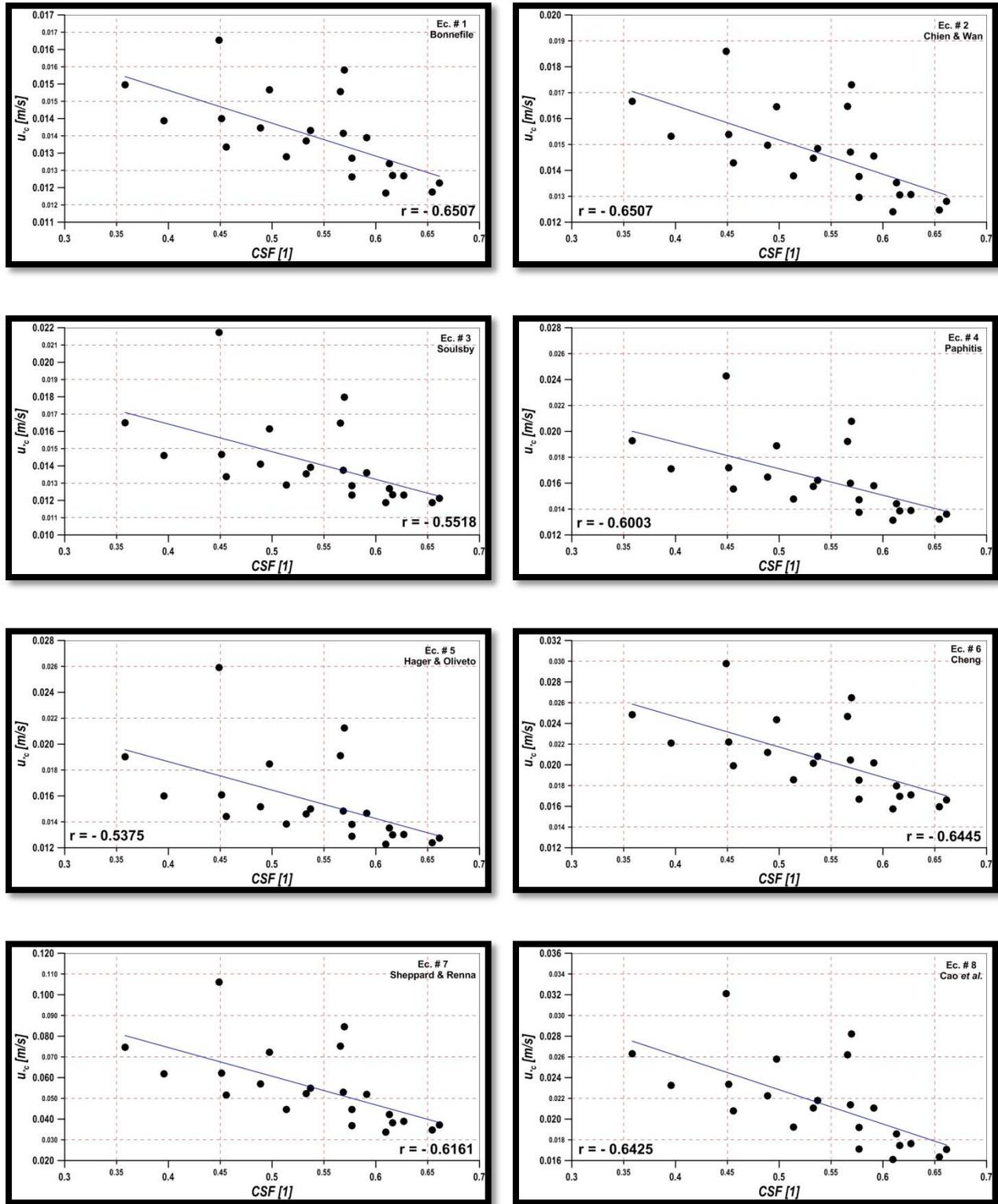


Figura 4.13 Velocidad de inicio de movimiento (u_{*c}) contra el factor de forma (CSF) del estado de Yucatán

RESULTADOS

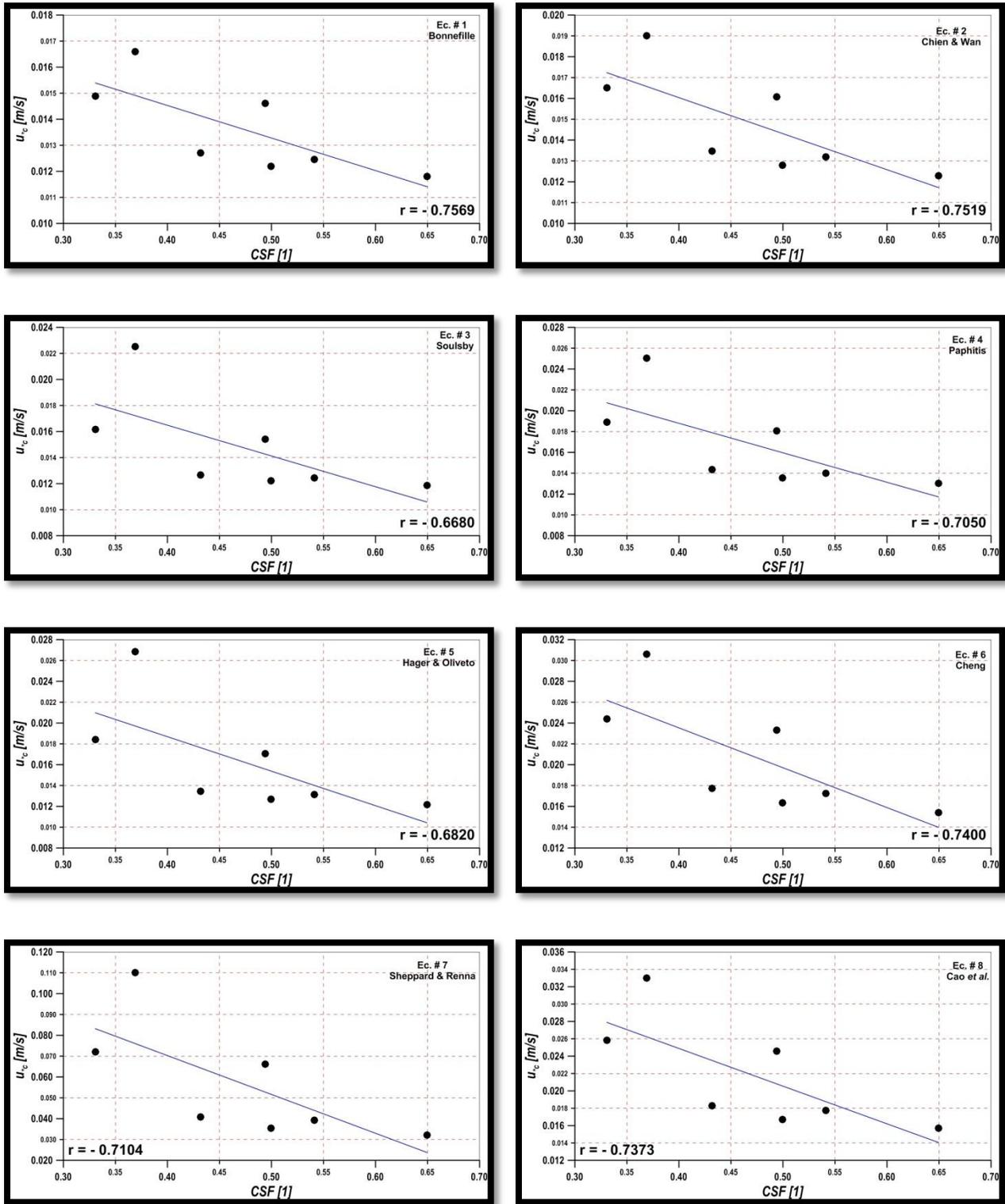


Figura 4.14 Velocidad de inicio de movimiento (u_{*c}) contra el factor de forma (CSF) del estado de Campeche

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

“Conclusión es el lugar donde llegaste cansado de pensar”

Anónimo

5. CONCLUSIONES

Se encontró una dependencia importante entre la velocidad de caída con el factor de forma, al ser esta última determinante en el modo en el que se desplaza la partícula natural a través del agua.

Con ello, y de acuerdo con Camenen, Dietrich, Swamme & Ohja y Wu & Wang, no se recomienda el usos de las ecuaciones que presenten errores superiores al 20%. Esto porque en las mencionadas expresiones se está tomando en cuenta el factor de forma. Pero además, se impone este umbral debido a la gran sensibilidad en los resultados al momento de utilizar las ecuaciones de la Tabla 7.1.

A su vez, tomando al error como media cuadrática y el umbral de 20%, se determina que:

Para Quintana Roo, las únicas ecuaciones que no cumplen con dicho 20% de error son las de Guo (ecuación 7.18) y Concharov (ecuación 7.9), y dentro de éstas, las mejores son las ecuaciones 7.31 y 7.32 (EQ 26 y EQ 27).

Para Yucatán, la única expresión cercana al 20% es la ecuación de Sha (ecuación 7.24).

Para Campeche, las expresiones que se sugiere utilizar son: Wu & Wang, Camenen, EQ 26, Swamee & Ohja, EQ 27 y Sha (ecuaciones 7.35, 7.8, 7.31, 7.26, 7.32 y 7.24)

Puede notarse que en los tres casos prevalecen aquellas ecuaciones que toman en cuenta la forma de la partícula (CSF).

Con respecto a la velocidad de inicio de movimiento, y tomando como base las Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14 y a las figuras del anexo 2, puede concluirse que todas las muestras inician su movimiento con las características físicas medidas, donde se puede elegir alguna de las ecuaciones que dan cuenta de ello para incorporar dicho resultado en algún modelo de transporte de sedimentos donde sea requerido la velocidad de inicio de movimiento [ver Shibayama (2009; págs. 147 – 150)]. Asimismo, de la Tabla 4.6, Tabla 4.7 y Figura 4.8 cabe reiterar que la ecuación propuesta por Sheppard & Renna (2005) – etiquetada con las letras USCSR – resulta ser la más adecuada a utilizar para este tipo de material si se requiere calcular el valor de la velocidad de inicio de movimiento.

Por otra parte, se observó una dependencia lineal débil entre el factor de forma [CSF] y la velocidad de caída experimental [W_i], (ver Figura 4.9 a Figura 4.11). Sin embargo, como se mencionó, esto implica una falta de linealidad, pero no así una falta de asociación, donde dicha asociación si bien no puede describirse matemáticamente, si se puede describir de manera cualitativamente. En otras palabras, las gráficas sugieren que para factores de forma bajos, mayor será la velocidad de caída, y viceversa. Pero esto se cumple siempre y cuando el tamaño de las partículas para factores de forma bajo sean grandes.

También se pudo observar que para aquellas partículas con diámetros grandes y factores de forma bajos, la velocidad de caída es grande y por ende, mientras más pequeña sea la partícula mayor será su factor de forma y la velocidad de caída es menor. En ambos casos se puede suponer que la forma de la partícula no es determinante, toda vez que el tamaño si lo es al momento de medir la velocidad, no obstante para partículas con factores de forma bajos y tamaños grandes, en ocasiones la velocidad de caída es similar al valor que poseen aquellos granos cuyo diámetro es menor y con factores de forma altos, lo cual aparentemente es contradictorio. La explicación de esto es que la forma de estas partículas grandes con factores de forma bajos corresponden a

partículas muy planas, por ello ofrecen una mayor área de exposición a su caída libre a través del agua, la resistencia a la caída es mayor y por lo tanto la velocidad tiende a ser menor. Esto es muy importante, porque si no se cuenta con el tiempo suficiente para determinar la forma de las partículas, se deberá optar por ensayar con partículas muy parecidas a una esfera para que de esta forma pueda reducirse los errores en la aplicación de aquellas ecuaciones empíricas que no toman en cuenta de manera directa la forma de las partículas naturales.

5.1. FUTURAS LÍNEA DE INVESTIGACIÓN Y RECOMENDACIONES ADICIONALES

A raíz de la experiencia adquirida en este trabajo, se sugieren algunos puntos que pueden ser investigados, y que sin duda contribuirán al mejor entendimiento sobre el comportamiento de este tipo de material sedimentario, refiriéndose a comportamiento a los valores de velocidad de caída y velocidad de inicio de movimiento.

1. En vez de elegir de manera aleatoria las partículas a ensayar, se deberán de elegir aquellas formas de partículas que han representado una incertidumbre en el cálculo de la velocidad de caída. La forma que se sugiere son las partículas planas, y clasificándolas por tamaño de área máxima expuesta durante la velocidad. Aquí, las condiciones de temperatura, densidad y viscosidad cinemática del agua deberán ser constantes, como en este trabajo.
2. En otro experimento, se puede realizar pruebas de velocidad haciendo variar la temperatura del agua (de menor a mayor) y observar como afecta esto en las mediciones. Para esto se sugiere que se realice con partículas previa selección donde una sola forma de partícula predomine, y poder decir que para tal o cual forma de grano, haciendo variar la temperatura, hay o no diferencia en las mediciones.

En caso que puedan integrarse los puntos 1 y 2, se deberá realizar un diagnóstico combinando las variaciones de la temperatura del agua y las diferentes formas de partículas, de tal suerte que todo esto lleve a generar información, y que en estudios de transporte de sedimentos se tengan este diagnóstico y que sirva como un punto más de partida para dicho análisis.

Por otra parte y como sugerencia, para reducir el nivel de error que se tiene cuando se mide el eje corto (eje c) de las partículas naturales, a los granos seleccionados se les deberá de tomar al menos tres fotografías donde las partículas estarán colocadas en diferentes posiciones, de tal suerte que en alguna (o algunas) de las tomas pueda notarse el eje corto representativo. Con ello se puede realizar un promedio de las mediciones de cada una de las fotos, reduciendo considerablemente el error al calcular el factor de forma.

En lo referente a la redondez, se sugiere utilizar un microscopio lo bastante preciso para poder asignar el valor numérico de dicha variable apoyándose de la escala modificada de Powers (1953), aun con el inconveniente de la subjetividad. Esta forma sin lugar a dudas es la más práctica del resto de los caminos que existen para calcular la redondez. Con ello se pretende ganar un poco más de precisión al momento de utilizar las ecuaciones de velocidad de caída de Dietrich (1982) y Camenen (2007) donde P se requiere.

“He hecho esta carta más larga de lo usual porque no tengo tiempo para hacer una más corta.”

Blaise Pascal (1623-1662)

6. REFERENCIAS

- AEEUM. (2011). *Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos*. Aguascalientes, Ags: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Ahrens, J. P. (2000). "A Fall-Velocity Equation". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, Vol. 126, No. 2, March/April, 99 - 102.
- Ahrens, J. P. (2003). "Simple Equations to Calculate Fall Velocity and Sediment Scale Parameter". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, Vol. 129, No. 3, May 1, 146 - 150.
- Ahrens, J. P., & Seelig, W. N. (1996). "Wave runup on beaches". *Proc., 25th Int. Conf. on Coast. Engrg., ASCE, New York*, 981 - 993.
- Alcérreca Huerta, J. C. (2009). *Determinación de la Velocidad de Caída de sedimentos costeros de la Península de Yucatán, México*. México, D.F.: Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Alcérreca Huerta, J. C. (2011). *Determinación de los Umbrales de Movimiento de Arenas de la Península de Yucatán*. México, D.F.: Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Alcérreca Huerta, J. C., Silva Casarín, R., & Mendoza Baldwin, E. G. (2012). "Simplified Settling Velocity Formula for Calcareous Sand". *In review*.
- Alger, G. R., & Simons, D. B. (1968). "Fall Velocity of Irregular Shaped Particles". *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, May*, 721 - 737.
- Almedeij, J. (2008). "Drag coefficient of flow around a sphere: Matching asymptotically the wide trend". *Powder Technology, 186*, 218 - 223.
- Aparicio Mijares, F. J. (2008). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México, D.F: Limusa.
- Aschenbrenner, B. C. (1956). "A new method of expressing particle sphericity". *Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 26, No. 1, March*, 15 - 31.
- ASTM Specifications E 11-04; U.S.A. Standard Testing Sieves. Nominal Dimensions, Permissible Variation for Wire Cloth of Standard Testing Sieves (U.S.A) Standard Series. (s.f.).
- Baba, J., & Komar, P. D. (1981a). "Settling Velocities of Irregular Grains at Low Reynolds Numbers". *Journal of Sedimentary Petrology, SEPM, Vol. 51, No. 1, March*, 121 - 128.
- Baba, J., & Komar, P. D. (1981b). "Measurements and Analysis of Settling Velocities of Natural Quartz Sand Grains". *Journal of Sedimentary Petrology, SEPM, Vol. 51, No. 2, June*, 631 - 640.
- Bagnold, R. A. (1966). *An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics*. Washington: United States Department of the Interior, Geological Survey.
- Ballantyne, C. K. (1982). "Aggregate clast form characteristics of deposits near the margins of four glaciers in the Jotunheimen Massif, Norway". *Norsk Geogr. Tids., 36*, 103 - 113.
- Barret, P. J. (1980). "The shape of rock particles, a critical review". *Sedimentology, 27*, 291 - 303.

- Beheshti, A. A., & Ataie-Ashtiani, B. (2008). "Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement". *Coastal Engineering*, 55, 423 - 430.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). "Gradstat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments". *earth Surf. Process. Landforms*, 26, 1237 - 1248.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2008). "Particle shape: a review and new methods of characterization and classification". *Sedimentology*, 55, 31 - 63.
- Bonnefille, R. (1963). "Essais de synthese des lois de debut d'entrainement des sediment sous l'action d'un courant en regime uniform". *Bull. Du CREC, No. 5, Chatou*.
- Briggs, L. I., McCulloch, D. S., & Moser, F. (1962). "The Hydraulic Shaped of Sand Particles". *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 32, No. 4, December, 645 - 656.
- Cailloux, A. (1945). "Distinction des galets marins et fluviatiles". *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 15, 375 - 404.
- Camenen, B. (2007). "Simple and General Formula for the Settling Velocity of Particles". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 133, No. 2, February 1, 229 - 233.
- Cao, Z., Pender, G., & Meng, J. (2006). "Explicit formulation of the Shields diagram for incipient motion of sediment". *J. Hydraul. Eng.* 132 (10), 1097 - 1099.
- CEM. (2002). *Coastal Engineering Manual*. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Department of Army.
- Cervantes Martínez, A. (2007). "El balance hídrico en cuerpos de agua cársticos de la Península de Yucatán". *Teoría y Praxis* 3, 143 - 152.
- CFE. (2012). *Manual de Diseño de Obras Civiles. Sección A: Hidrotecnia. Tema 2: Hidráulica. Capítulo 13*. México, D.F.: Comisión Federal de Electricidad.
- Chang, H. K., & Liou, J. C. (2001). "A Fall Velocity Equation. Discussion". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, July/August, 250.
- Chang, T. J. (1998). "Simplified Settling Velocity Formula for Sediment Particle. Discussion". *Journal of Hydraulic Engineering*, 653 - 654.
- Chávez Cerón, V. (2011). *Determinación Experimental del Inicio de Arrastre de Arenas del Estado de Quintana Roo, México*. México, D.F.: Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Cheng, N. S. (1997). "Simplified Settling Velocity Formula for Sediment Particle". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No. 2, February, 149 - 152.
- Cheng, N. S. (1998). "Simplified Settling Velocity Formula for Sediment Particle. Closure". *Journal of Hydraulic Engineering*, June, 655.
- Cheng, N. S. (2004). "Analysis of bedload transport in laminar flows". *Adv. Water Resour.* 27, 937 - 942.
- Cheng, N. S. (2008). "Comparison of Settling-Velocity-Based Formulas for Threshold of Sediment Motion". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 134, No. 8, August 1, 1136 - 1141.
- Chien, N., & Wan, Z. H. (1983). *Mechanics of Sediment Movement*. Beijing: Science Publications (in Chinese).

- Comisión Nacional del Agua. (2002). *Región XII, Península de Yucatán. México*. CNA, 16 p.
- Corey, A. T. (1949). *Influence of Shape on Fall Velocity of Sand Grains*. Unpublished MSc Thesis, Colorado A&M College.
- Dalrymple, R. A. (1992). "Prediction of storm/normal beach profiles". *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, 118(2), 193 - 200.
- Dalrymple, R. A., & Thompson, W. (1976). "Study of equilibrium beach profiles". *Proc. 15th Int. Conf. on Coast. Engrg., ASCE, New York*, 1277 - 1296.
- Dean, R. G. (1973). "Heuristic models of sand transport in the surf zone". *Proc., Conf. on Engrg. Dyn. in the Surf Zone, Institution of Engineers. Sydney, Australia*, 208 - 214.
- Dean, R. G. (1987). "Coastal sediment processes: Towards engineering solutions". *Proc., Coast. Sediments '87, ASCE, New York*, 1 - 24.
- Del Valle Morales, J. (2010). *Velocidad de Caída de Arenas Costeras de la Península de Yucatán, México*. México, D. F.: Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Dietrich, W. E. (1982). "Settling Velocity of Natural Particles". *Water Resources Research, Vol. 18, No. 6, December*, 1615 - 1626.
- Doehring, D., & Butler, J. (1974). "Hydrogeologic constraints on Yucatan development". *Science*, 186, 591 - 595.
- Ehrlich, R., & Weinberg, B. (1970). "An Exact Method for Characterization of Grain Shape". *Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 40, No. 1, March*, 205 - 212.
- Ferguson, R. I., & Church, M. (2004). "A Simple Universal Equation for Grain Settling Velocity". *Journal of Sedimentary Research, SEPM, Vol. 74, No. 6, November*, 933 - 937.
- Flemming, N. C. (1965). "Form and Function of Sedimentary Particles". *Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 35, No. 2, June*, 381 - 390.
- Folk, R. L. (1955). "Student Operator Error in Determination of Roundness, Sphericity, and Grain Size". *Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 25, No. 4, December*, 297 - 301.
- Folk, R. L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. United States of America: Department of Geological Sciences. The University of Texas at Austin.
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). "Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters". *Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 27, No. 1, March*, 3 - 26.
- Gao, S. (1996). "A Fortran Program for Grain-Size Trend Analysis to Define Net Sediment Transport Pathways". *Computers & Geosciences, Vol. 22, No. 4*, 449 - 452.
- Gao, S., & Collins, M. (1992). "Net Sediment Transport Patterns Inferred from Grain-Size Trends, based upon definition of "Transport Vectors" ". *Sedimentary Geology, 80*, 47 - 60.
- Gao, S., Collins, M. B., Lanckneus, J., De Moor, G., & Van Lancker, V. (1994). "Grain size trends associated with net sediment transport patterns: An example from the Belgian continental shelf". *Marine Geology 121*, 171 - 185.

- García Flores, M., & Maza Álvarez, J. (1998). *Origen y Propiedades de los Sedimentos*. México, D.F.: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Gibbs, R. J., Matthews, M. D., & Link, D. A. (1971). "The relationship Between Sphere Size and Settling Velocity". *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 41, No. 1, March, 7 - 18.
- Goossens, L. (1987). "A Drag Coefficient Equation for Natural, Irregularly Shaped Particles". *CATENA VERLAG*, Vol. 14, 73 - 99.
- Guo, J. (2002). "Logarithmic matching and its applications in computational hydraulics and sediment transport". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 5, 555 - 565.
- Gutiérrez Valencia, C. E. (2012). *Caracterización Hidrodinámica de Flujos Turbulentos por medio de la Técnica de Trazado de Burbujas*. México, D.F.: Tesis de Maestría. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Hager, W. H., & Oliveto, G. (2002). "Shields' entrainment criterion in bridge hydraulics". *J. Hydraul. Eng.* 128 (5), 538 - 542.
- Hallermeier, R. J. (1981). "Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains". *Sedimentology*, 28, 859 - 865.
- Hardisty, J. (1990). *Beaches Form & Process, numerical experiments with monochromatic waves on the orthogonal profile*. Great Britain: Academic Division of Unwin Hyman Ltd.
- Harvey, J. C. (1987). *Geología para Ingenieros Geotécnicos*. México, D.F.: Limusa.
- Hawley, N. (1982). "Settling Velocity Distribution of Natural Aggregates". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87, No. C12, November 20, 9489 - 9498.
- Herrera, J., & Comín, F. (2000). "An introductory account of types of aquatic ecosystems of Yucatan Peninsula (SE México)". En M. S. Munawar, I. Lawrence, & S. D. Malley, *Aquatic ecosystems of Mexico. Status and scope* (págs. 213 - 227). The Netherlands: Backhuys Publishers.
- Hockey, B. (1970). "An improved coordinate system for particle shape representation". *J. Sed. Petrol.*, 40, 1054 - 1056.
- Ibad-zade, Y. A. (1992). *Movement of sediment in open channels*. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands: S. P. Ghosh, translator, Russian translations series, Vol. 49.
- INEGI. (1997). *Estadísticas del medio ambiente*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Inter-Agency Committee on Water Resources. (1957). *A Study of Methods Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams. Report No. 12. Some Fundamentals of Particles Size Analysis*. Minneapolis, Minnesota, USA: Project Offices of Cooperating Agencies at St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory.
- Janke, N. C. (1965). "Empirical Formula for Velocities and Reynolds Numbers of Single, Settling Spheres". *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 35, September, 749 - 750.
- Jerolmack, D. J., Mohrig, D., Grotzinger, J. P., Fike, D. A., & Watters, W. A. (2006). "Spatial grain size sorting in eolian ripples and estimation of wind conditions on planetary surfaces: Application to Meridiani Planum, Mars". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, E12S02, 1 - 14.
- Jiménez, J. A., & Madsen, O. S. (2003). "A Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, Vol. 129, No. 2, March 1, 70 - 78.

- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de Suelos. Tomo 1. Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México, D.F.: Limusa, S.A de C.V. Grupo Noriega Editores.
- Julien, P. Y. (1995). *Erosion and Sedimentation*. United Kingdom: Cambridge University Press; 2° edition (2010).
- Kraus, N. C., Larson, M., & Kriebel, D. L. (1991). "Evaluation of beach erosion and accretion predictors". *Proc., Coast. Sediments '91, ASCE, New York*, 572 - 587.
- Kriebel, D. L., Dally, W. R., & Dean, R. G. (1986). "Undistorted Froude model for surf zone sediment transport". *Proc., 20th Int. Conf. on Coast. Engrg., ASCE, New York*, 1295 - 1309.
- Krumbein, W. C. (1934). "Size Frequency Distributions of Sediments". *Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 4, No. 2, August*, 65 - 77.
- Krumbein, W. C. (1941). "Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles". *Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 11, No. 2, August*, 64 - 72.
- Krumbein, W. C., & Pettijohn, F. J. (1938). *Manual of Sedimentary Petrography*. New York: D. Appleton-Century Company, Inc.
- Le Roux, J. P. (2002). "Shape Entropy and Settling Velocity of Natural Grains". *Journal of Sedimentary Research, Vol. 72, No. 3, May*, 363 - 366.
- Le Roux, J. P. (2005). "Grains in motion: A review". *Sedimentary Geology, 178*, 285 - 313.
- Lees, G. (1964). "A new method for determining the angularity of particles". *Sedimentology, 3*, 2 - 21.
- Liu, Z. (2001). *Sediment Transport*. Denmark: Aalborg Universitet.
- López Ramos, E. (1973). *Estudio Geológico de la Península de Yucatán. Resumen*.
- Madsen, O. S., & Grant, W. D. (1976). Chapter 65: Quantitative Description of Sediment Transport by Waves. En *Part II: Coastal Sediment Problems* (págs. 1093 - 1112). Coastal Engineering.
- McLaren, P., & Bowles, D. (1985). "The Effects of Sediment Transport on Grain-Size Distributions". *Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 55, No. 4, July*, 457 - 470.
- Orellana Lanza, R., Espadas Manrique, C., & Nava Marín, F. (2010). Parte 1. El Estado. Capítulo 1. Contexto Físico. Climas. En R. Durán García, & M. Méndez González, *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán* (pág. 496). Mérida, Yucatán. México: CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma.
- Paphitis, D. (2001). "Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves". *Coas. Eng. 43*, 227 - 245.
- Pérez Peña, A. I. (2012). *Estimación del clima marítimo y la energía del oleaje disponible en las costas mexicanas. Tesis de maestría*. México, D.F.: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Pettijohn, F. J. (1949). *Sedimentary Rocks*. New York: Harper and Brothers.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (1973). *Sand and Sandstone*. United States of America: Springer Verlag.
- Plomaritis, T. A., Paphitis, D., & Collins, M. (2008). "The use of grain size trend analysis in macrotidal areas with breakwaters: Implications of settling velocity and spatial sampling density". *Marine Geology, 253*, 132 - 148.

- Poizot, E., Mear, Y., Thomas, M., & Garnaud, S. (2006). "The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis". *Computers & Geosciences* 32, 360 - 370.
- Poizot, E., Méat, Y., & Biscara, L. (2008). "Sediment Trend Analysis through the variation of granulometric parameters: A review of theories and applications". *Earth-Sciences Reviews*, 86, 15 - 41.
- Poole, D. M. (1957). "Size Analysis of Sand by a Sedimentation Technique". *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 27, No. 4, December, 460 - 468.
- Powers, M. C. (1953). "A New Roundness Scale for Sedimentary Particles". *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 23, No. 2, June, 117 - 119.
- Raudkivi, A. J. (1990). *Loose boundary hydraulics*. Tarrytown, N. Y.: 3rd Ed., Pergamon Press, Inc.
- Rubey, W. W. (1933). "Settling Velocities of Gravel, Sand and Silt Particles". *Published with the permission of the Director of the U.S. Geological Survey*, 325 - 338.
- Ruiz Cavazos, D. (2010). *Zonificación de la Península de Yucatán a partir de un análisis sedimentológico*. México, D.F.: Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Ruiz Martínez, G. (2009). *Determinación del Estado Morfodinámico de Segmentos de Playa que poseen Obstáculos Sumergidos y Emergidos*. México, D.F.: Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Ruiz Martínez, G., & Silva Casarín, R. (2007a). *Caracterización (granulometría, propiedades físicas e inicio de movimiento) de las muestras de arena, extraídas de las campañas de campo en Cancún, Quintana Roo del 2007*. México, D.F., Septiembre: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Ruiz Martínez, G., & Silva Casarín, R. (2007b). *Conclusiones del análisis de las muestras de arena, de Septiembre de 2007*. México, D.F., Noviembre: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Russell, R. D., & Taylor, R. E. (1937). "Roundness and shape of Mississippi River sands". *J. Geol.*, 45, 225 - 267.
- Salinas Tapia, H., García Aragón, J. A., & Díaz Delgado, C. (2008). "Análisis Experimental del Efecto de la Turbulencia en la Velocidad de Caída de Sedimentos en Suspensión". *Ingeniería, Investigación y Tecnología, enero-marzo, año/vol. IX, No. 001, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México*, 49 - 58.
- Sha, Y. Q. (1956). "Basic principles of sediment transport". *J. Sediment Res., Beijing, China*, 1(2), 1 - 54 (in Chinese).
- She, K., Trim, L., & Pope, D. (2005). "Fall velocities of natural sediment particles: a simple mathematical presentation of the fall velocity law". *Journal of Hydraulic Research, IAHR/AIRH*, Vol. 43, No. 2, 189 - 195.
- Sheppard, D. M., & Renna, R. (2005). *Florida Bridge Scour Manual*. Florida Department of Transportation, 605 Suwannee Street, Tallahassee, FL 32399 - 0450.
- Shibayama, T. (2009). *Coastal Processes: Concepts in Coastal Engineering and their Applications to Multifarious Environments*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Shields, A. (1936). *Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-Load Movement*. Pasadena, California; USA: Soil Conservation Service Cooperative Laboratory California Institute of Technology.
- Silva Casarín, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje. Serie Docencia*. México, D.F.: Instituto de Ingeniería, UNAM.

- Smith, D. A., & Cheung, K. F. (2003). "Settling Characteristics of Calcareous Sand". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 6, June 1*, 479 - 483.
- Smith, D. A., & Cheung, K. F. (2004). "Initiation of Motion of Calcareous Sand". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 5, May 1*, 467 - 472.
- Sneed, E. D., & Folk, R. L. (1958). "Pebbles in the Lower Colorado River, Texas: a study in particle morphogenesis". *J. Geol.*, 66, 114 - 150.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands. A manual for practical applications*. Great Britain: Thomas Telford Publications.
- Stevens, H. H., & Hubbell, D. W. (1986). *Computer Programs for Computing Particle-Size Statistics*. Denver, Colorado, USA: U.S. Geological Survey.
- Suárez, E., & Rivera. (2000). "The aquatic fauna of karstic environments in the Yucatan Peninsula, Mexico: an updated overview". En M. Munawar, I. Lawrence, & S. D. Malley, *Aquatic ecosystems of Mexico. Status and scope* (págs. 151 - 164). The Netherlands: Backhuys Publishers.
- Swamme, P. K., & Ojha, S. P. (1991). "Drag Coefficient and Fall Velocity of Nonspherical Particles". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 5, May*, 660 - 667.
- Van Rijn, L. C. (1984a). Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 10, October*, 1431 - 1456.
- Van Rijn, L. C. (1984b). "Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 11, November*, 1613 - 1641.
- Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal seas*. Amsterdam, The Netherlands: Aqua Publications.
- Virgen Magaña, Á., & Baca Carreón, J. C. (1988). *Monografía Geológico - Minera del Estado de Quintana Roo*. Puebla, Pue., Octubre: Consejo de Recursos Minerales. Subgerencia Regional Zona Sur.
- Wadell, H. (1932). "Volume, shape, and roundness of rock particles". *J. Geol.*, 40, 443 - 451.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros, 6a ed.* México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
- Ward, W. C., Weidie, A. E., & Back, W. (1985). *Geology and Hydrogeology of the Yucatan and Quaternary Geology of Northeastern Yucatan Peninsula*. New Orleans, LA (Luisiana): New Orleans Geological Society.
- Weidie, A. E. (1975). *Field Seminar on Water and Carbonate Rocks of the Yucatan Peninsula, Mexico*. New Orleans, LA, USA: New Orleans Geological Society.
- Wentworth, C. K. (1919). "A laboratory and field study of cobble abrasion". *J. Geol.*, 27, 507 - 521.
- Wentworth, C. K. (1922). "A scale of grade and class terms for clastic sediments". *Jour. Geology* 30, 377 - 392.
- Wright, L. D., & Short, A. D. (1984). "Morphodynamic Variability of Surf zones and Beaches: A Synthesis". *Marine Geology*, 56, 93 - 118.
- Wu, W., & Wang, S. S. (2006). "Formulas for Sediment Porosity and Settling Velocity". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 8, August 1*, 858 - 862.

Yalin, M. S. (1977). *Mechanics of Sediment Transport*. Great Britain: Pergamon Press; second edition.

Zhu, L. J., & Cheng, N. S. (1993). "Settlement of sediment particles". *Res. Rep., Dept. of River and Harbor Engrg., Nanjing Hydr. Res. Inst., Nanjing, China*.

Referencias electrónicas

ORGANISMOS DE CUENCA PENÍNSULA DE YUCATÁN - CNA - SEMARNAT. (Lunes 23 de Agosto de 2010). Recuperado el 24 de julio de 2012, de ORGANISMOS DE CUENCA PENÍNSULA DE YUCATÁN - CNA - SEMARNAT: <http://www.conagua.gob.mx/ocpy/>

Unisys Weather. (2011). Recuperado el 26 de julio de 2012, de Unisys Weather: <http://weather.unisys.com/hurricane/>

ANEXOS

“Los mejores libros son aquellos que quienes los leen creen que también ellos pudieron haberlos escrito.”

Blaise Pascal (1623-1662)

7. ANEXOS

7.1. ANEXO 1: VELOCIDAD DE CAÍDA [W_F]

En este apartado se presentan las 30 ecuaciones de velocidad de caída utilizadas en esta tesis, alimentada con la información de los sedimentos ya descritos antes. Sin embargo, es conveniente reescribir algunas expresiones que están involucradas de manera directa y que representan las definiciones de: densidad relativa de la muestra dentro del agua, diámetro nominal, diámetro adimensional o parámetro de Yalin, Índice de flotación de Arquímedes y parámetro fluido – sedimento, representadas por las ecuaciones [7.1], [7.2], [7.3], [7.4] y [7.5] respectivamente.

$$\Delta = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \quad [7.1]$$

$$d_N = \sqrt[3]{abc} \quad [7.2]$$

$$d_* = \left[\frac{g\Delta}{\nu^2} \right]^{1/3} [D_{50}] \quad [7.3]$$

$$A = d_*^3 \quad [7.4]$$

$$S_* = \frac{D_{50}}{4\nu} \sqrt{\Delta g D_{50}} \quad [7.5]$$

7.1.1. Resumen de las ecuaciones de velocidad de caída

Se realizó en diferentes revistas de divulgación científica, una revisión del estado del arte que guarda la ingeniería costera en torno al tema de velocidad de caída de partículas individuales, ya sea naturales o artificiales, tomando en cuenta en la medida de lo posible, la mayoría de los factores que se ven involucrados en este tipo de estudios. Tales factores ya fueron ampliamente explicados en este trabajo. En la Tabla 7.1 se muestran las ecuaciones estudiadas en esta tesis.

Tabla 7.1 Ecuaciones empíricas de velocidad de caída de partículas individuales

Autor	Ecuación	Consideraciones
Ahrens	$CL = 0.055 \tanh \left[\left(12A^{-0.59} \right) \left(e^{-0.0004A} \right) \right]$ $CT = 1.06 \tanh \left[\left(0.016A^{0.5} \right) \left(e^{-120/A} \right) \right]$ $W_f = \frac{CL\Delta g D_{50}^2}{\nu} + CT\sqrt{\Delta g D_{50}} \quad [7.6]$	<p>El autor propone dos ecuaciones para calcular el valor de la viscosidad cinemática, las cuales son:</p> $\nu \text{ (cm}^2/\text{s)} = 0.0178 - 0.000529C$ <p style="text-align: center;">+0.0000069C² para agua dulce</p> $\nu \text{ (cm}^2/\text{s)} = 0.0182 - 0.000529C$ <p style="text-align: center;">+ 0.0000069C² para agua salada</p> <p>En donde C = temperatura del agua, en grados Celsius, aplicable al rango de 0° ≤ C ≤ 30°</p>
Ahrens modificada	$CL = 0.055 \tanh \left[\left(12A^{-0.59} \right) \left(e^{-0.0004A} \right) \right]$ $CT = 1.01 \tanh \left[\left(0.016A^{0.5} \right) \left(e^{-115/A} \right) \right]$ $W_f = \frac{CL\Delta g D_{50}^2}{\nu} + CT\sqrt{\Delta g D_{50}} \quad [7.7]$	<p>El valor de la viscosidad cinemática se calcula de acuerdo a la fila anterior de esta tabla. A su vez, en esta ocasión el autor recomienda calcular el valor de la densidad del agua como:</p> $\rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = c_0 + c_1T + c_2T^2$ <p>Donde T es la temperatura en grados Celsius en el rango de 0° ≤ C ≤ 30°; y los valores de los coeficientes son:</p> <p>Para agua dulce c₀ = 0.999859 c₁ = 0.0000436 c₂ = -0.00000624</p> <p>Para agua salada: c₀ = 1.028043 c₁ = -0.0000721 c₂ = -0.00000471</p>
Camenen	$a_1 = 24$ $a_2 = 100$ $a_3 = 2.1 + 0.06P$ $b_1 = 0.39 + 0.22(6 - P)$ $b_2 = 20$ $b_3 = 1.75 + 0.35P$ $m_1 = 1.2 + 0.12P$ $m_2 = 0.47$ <p>Si CSF = 0.7 ⇒ P = 3.5</p> $A_{ca} = a_1 + a_2 \left[1 - \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} CSF \right) \right]^{a_3}$ $B_{ca} = b_1 + b_2 \left[1 - \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} CSF \right) \right]^{b_3}$ $m_{ca} = m_1 \left[\text{sen} \left(\frac{\pi}{2} CSF \right) \right]^{m_2}$ $W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left[\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A_{ca}}{B_{ca}} \right)^{2/m_{ca}} + \left(\frac{4d_*^3}{3B_{ca}} \right)^{1/m_{ca}} - \frac{1}{2} \left(\frac{A_{ca}}{B_{ca}} \right)^{1/m_{ca}}} \right]^{m_{ca}} \quad [7.8]$	<p>La ecuación fue calibrada utilizando los resultados del trabajo extenso que realizó Dietrich (1982) así como de un conjunto grande de datos con varios tipos de tamaños, formas, redondeces y densidades.</p> <p>Esta fórmula es, por tanto, aplicable a cualquier tipo de partícula natural.</p> <p>El autor sugiere los valores de CSF y P de 0.7 y 3.5, respectivamente, en el caso que no se tengan a la mano los valores de estas dos variables.</p>

<p>Concharov</p>	$W_f = \frac{1}{24} \frac{\Delta g D_{50}^2}{\nu} \quad \text{para } D_{50} < 0.015 \text{ cm}$ $W_f = 1.068 \sqrt{\Delta g D_{50}} \quad \text{para } D_{50} > 0.15 \text{ cm}$ $W_f = 67.6 \Delta D_{50} + 0.52 \Delta \left(\frac{T}{26} - 1 \right)$ <p>para $D_{50} = 0.015 \sim 0.15 \text{ cm}$ [7.9]</p>	<p>En la tercera ecuación, la temperatura T está en °C, d en cm y W_f en cm/s</p>
<p>Chang – Liou</p>	$W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left[\frac{30.22 A^{0.463}}{18.00 + 543.96 A^{-0.537}} \right] \quad [7.10]$	<p>Para valores pequeños de A (flujo laminar), la ecuación anterior puede tomar la forma siguiente</p> $W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left(\frac{A}{18} \right)$ <p>Para valores altos de A (flujo turbulento), la forma que toma la expresión es</p> $W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left(\frac{30.22 A^{0.463}}{18.00} \right)$
<p>Chang – Liou modificada</p>	$W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left[\frac{24.6 A^{0.477}}{17.90 + 440.34 A^{-0.523}} \right] \quad [7.11]$	
<p>Cheng</p>	$W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left(\sqrt{25.0 + 1.2 d_*^2} - 5.0 \right)^{1.5} \quad [7.12]$	<p>Esta fórmula propone una explícita relación entre el número de Reynolds y el parámetro de Yalin (d*). Es aplicable a un amplio rango del número de Reynolds desde el flujo de Stokes (flujo laminar) hasta el flujo turbulento.</p>
<p>Cheng modificada</p>	$W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left[\sqrt{3.61^2 + 1.18 A^{1/1.53}} - 3.61 \right]^{1.53} \quad [7.13]$	
<p>Dietrich</p>	$D_* = \frac{\Delta g d_N^3}{\nu^2}$ $R_1 = -3.76715 + 1.92944 \log_{10} (D_*) - 0.09815 [\log_{10} (D_*)]^{2.0}$ $- 0.00575 (\log_{10} D_*)^{3.0} + 0.00056 (\log_{10} D_*)^{4.0}$ $R_2 = \log_{10} \left[1 - \frac{1 - CSF}{0.85} \right] - (1 - CSF)^{2.3} \tanh (\log_{10} (D_*) - 4.6)$ $+ 0.3 (0.5 - CSF) (1 - CSF)^{2.0} (\log_{10} (D_*) - 4.6)$ $R_3 = \left[0.65 - \left(\frac{CSF}{2.83} \tanh (\log_{10} (D_*) - 4.6) \right) \right]^{1 + \frac{3.5 - P}{2.5}}$ $W_* = R_3 (10^{R_1 + R_2})$ $W_f = \sqrt[3]{\Delta g \nu W_*} \quad [7.14]$	<p>Esta ecuación no deberá ser aplicada cuando se tengan valores de D* por encima de 5x10⁹.</p> <p>Por otra parte, los efectos del desarrollo de una capa turbulenta en la frontera alrededor de una esfera no se incluyeron en este análisis realizado por el autor.</p> <p>Las partículas ensayadas que utilizó el autor son arenas de cuarzo, por lo cual se recomienda utilizar esta expresión con cierto criterio si es que se quiere aplicar a otro tipo de sedimentos, como es el caso de las arenas de la península de Yucatán.</p>
<p>Ferguson – Chuch: 1</p>	$W_f = \frac{\Delta g D_{50}^2}{C_1 \nu + (0.75 C_2 \Delta g D_{50}^3)^{0.5}} \quad [7.15]$ <p>Con C₁ = 18 y C₂ = 1.0 utilizando el diámetro de malla</p>	<p>Esta expresión fue desarrollada a partir de un amplio rango de tamaños, pero para un solo valor de densidad puesto que este trabajo se utilizaron partículas de arena de cuarzo (Δ = 1.65) y agua a 20 °C.</p>

		<p>Para partículas finas esta ecuación de velocidad de caída se reduce a la Ley de Stokes, mientras que para partículas gruesas el coeficiente de arrastre se mantiene constante.</p> <p>Para partículas esféricas $C_1 = 18$ y $C_2 = 0.4$</p> <p>Para partículas naturales de arena $C_1 = 18$ y $C_2 = 1.0$ utilizando el diámetro de malla; o $C_1 = 20$ y $C_2 = 1.1$ utilizando el diámetro nominal.</p> <p>Para partículas muy angulares, $C_1 = 24$ y $C_2 = 1.2$</p> <p>Los autores mencionan que como primer ventaja, esta expresión es fácil de incorporar a modelos de cómputo de largo plazo que traten de solucionar problemas de sedimentación y sedimento – transporte. Como segunda ventaja es que esta ecuación puede ser aplicada utilizando o el diámetro de malla o el diámetro nominal, solo tomando en cuenta los valores de los coeficientes de C_1 y C_2 expuestos en los párrafos anteriores.</p>
Ferguson - Church: 2	$W_f = \frac{\Delta g d_N^2}{C_1 \nu + (0.75 C_2 \Delta g d_N^3)^{0.5}} \quad [7.16]$ <p>Con $C_1 = 20$ y $C_2 = 1.1$ utilizando el diámetro nominal</p>	
Fredsoe	$W_f = \frac{\sqrt{\left(\frac{36\nu}{d_N}\right)^2 + 7.5\Delta g d_N} - \frac{36\nu}{d_N}}{2.8} \quad [7.17]$	<p>El coeficiente de arrastre que dio origen a esta expresión está determinado como</p> $C_D = 1.4 + \frac{36}{Re}$
Guo	$W_f = \left(\frac{\nu}{D_{50}}\right) \left(\frac{d_*^3}{24 + \frac{\sqrt{3}}{2} d_*^{3/2}}\right)$ <p>O también se puede expresar como</p> $W_f = \sqrt{\Delta g D_{50}} \left(\frac{6}{S_*} + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^{-1} \quad [7.18]$ <p>Ambas ecuaciones desde luego aplicables a partículas naturales</p>	<p>Para partículas esféricas, el autor proporciona la siguiente fórmula</p> $W_f = \left(\frac{\nu}{D_{50}}\right) \left(\frac{d_*^3}{18 + \frac{1}{\sqrt{3}} d_*^{3/2}}\right)$ <p>O también se puede escribir como</p> $W_f = \sqrt{\Delta g D_{50}} \left(\frac{4.5}{S_*} + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{-1}$
Hallemeier	$W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left(\frac{A}{18.00}\right) \quad A < 39$ $W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left(\frac{A^{0.7}}{6.00}\right) \quad 39 \leq A \leq 10\,000$ $W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left(1.05 A^{1/2}\right) \quad 10\,000 < A < 10^6$ <p>[7.19]</p>	<p>Las partículas ensayadas fueron arenas de cuarzo, carbón, piedra pómez, plásticos y otros</p> <p>Las tres ecuaciones anteriores corresponden aproximadamente a: arena muy fina, arena fina a gruesa y arena muy gruesa</p>

<p>Jiménez – Madsen</p>	$d_{NR} = \frac{D_{50}}{0.9}$ $S_* = \frac{d_{NR}}{4\nu} \sqrt{\Delta g d_{NR}}$ $W_f = \left(A + \frac{B}{S_*} \right)^{-1} \left(\sqrt{\Delta g d_{NR}} \right) \quad [7.20]$	<p>La ecuación que desarrollaron los autores puede ser aplicada sin mayor problema a un rango de $0.063 \text{ mm} < D_{\text{malla}} < 1.00 \text{ mm}$. Se sugiere que valores de diámetros que estén fuera de este rango la expresión se utilice de manera que dé una idea del valor de velocidad de caída.</p> <p>El trabajo de los investigadores está basado en gran parte por el estudio realizado por Dietrich (1982), el cual utilizó partículas de arena de cuarzo, por lo cual debe tomarse en cuenta si se quiere aplicar esta ecuación a otro tipo de material.</p> <p>Este estudio también sugiere que al desconocerse la información de la forma y redondez de las partículas, pueden usarse en las expresiones como $CSF = 0.7$ y $P = 3.5$ para partículas naturalmente deterioradas (trabajadas o gastadas sus aristas en un grado más o menos intermedio tomando en cuenta estos valores propuestos). Además, en varias aplicaciones prácticas el sedimento puede ser una arena de cuarzo trabajada, por lo cual se sugiere los valores anteriores de dichos factores acompañados de los siguientes: $A = 0.954$ y $B = 5.12$, utilizando $d_N = D_{\text{malla}}/0.9$. Sin embargo, esta investigación sugiere otros valores para estos parámetros, por lo cual se sugiere consultar, si así el lector lo considera pertinente, el trabajo de los autores.</p>
<p>Julien</p>	$W_f = \frac{8\nu}{D_{50}} \left(\sqrt{1.00 + 0.0139A} - 1.00 \right) \quad [7.21]$	<p>Se recomienda consultar la referencia acerca de esta expresión, ya que en la misma vienen registrados valores de velocidad de caída a diferentes temperaturas. Esto con fines de comprobación para la ecuación propuesta.</p>
<p>Rubey</p>	$W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left(\sqrt{36 + \frac{2A}{3}} - 6 \right) \quad [7.22]$	<p>Esta expresión se ajusta muy bien al conjunto de datos de Hallermeier (1981) en el régimen laminar, pero en régimen turbulento su predicción se aleja bastante alrededor del 20% (Ahrens, 2003). No obstante, su estructura sencilla la hace muy versátil si se considera su aplicación como una primera aproximación del valor de velocidad de caída de partículas de arena.</p> <p>Como en otros casos, esta ecuación fue desarrollada a partir de datos de partículas de arena de cuarzo, por lo cual como se ha mencionado antes, se recomienda su uso con criterio si se desea aplicar a otro tipo de material.</p>
<p>Rubey modificada</p>	$W_f = \frac{\nu}{D_{50}} \left(\sqrt{10.09^2 + 0.968A} - 10.09 \right) \quad [7.23]$	<p>A diferencia de la expresión original, esta nueva forma se ajusta un poco mejor para régimen laminar, además de corregir la desviación grande de valores en la zona de turbulencia, por lo cual se recomienda esta ecuación para su aplicación.</p> <p>Esta modificación según Ahrens (2003) se realizó con el conjunto de datos de Hallermeier (1981) conformado por dos subconjuntos, uno con datos de partículas de cuarzo y el otro con datos distintas a partículas de cuarzo, pero no se especifica que tipo. A pesar de ello puede aplicarse a otro tipo de material y comparar con otras expresiones para verificar la precisión de la misma.</p>

<p>Sha</p>	$W_f = \frac{1}{24} \left(\frac{\Delta g D_{50}^2}{\nu} \right) \quad \text{para } D_{50} < 0.01 \text{ cm}$ $W_f = 1.14 \sqrt{\Delta g D_{50}} \quad \text{para } D_{50} > 0.20 \text{ cm}$ $\left. \begin{aligned} L &= (\log_{10}(d_*) - 5.777)^2 \\ M &= 39 - L \\ N &= \sqrt{M} - 3.79 \end{aligned} \right\} \quad \text{para } 0.01 \leq D_{50} \leq 0.20 \text{ cm [7.24]}$ $W_f = \frac{\nu d_* 10^N}{D_{50}}$	
<p>Soulsby</p>	$S_* = \frac{D_{50}}{4\nu} \sqrt{\Delta g D_{50}}$ $W_* = \frac{2.59}{S_*} \left[(1.0 + 0.156 S_*^2)^{0.5} - 1.0 \right]$ $W_f = W_* \sqrt{\Delta g D_{50}} \quad [7.25]$	
<p>Swamme - Ohja</p>	$\omega_* = \left[\frac{44.84 \nu_*^{0.667}}{(1.0 + 4.5 CSF^{0.35})^{0.833}} + \frac{0.794}{(CSF^4 + 20 CSF^{20} + \nu_*^{2.4} e^{18.6 CSF^{0.4}})^{0.125}} \right]^{-1}$ <p>donde $\nu_* \geq 1.8 \times 10^{-4} \sqrt{CSF}$</p> <p>y $\nu_* = \frac{\nu}{d_N \sqrt{\Delta g d_N}}$</p> $W_f = \omega_* \sqrt{\Delta g d_N} \quad [7.26]$	<p>Los autores proporcionan otras expresiones para calcular el parámetro adimensional ω_*:</p> <p>Para partículas esféricas</p> $\omega_* = \left[\frac{(18 \nu_*^2 + 72 \nu_*^{0.54})^5}{(10^8 \nu_*^{1.7} + 1.43 \times 10^6)} \right]^{-0.346}$ <p>donde $\nu_* \geq 4 \times 10^{-5}$</p> <p>Para partículas trituradas</p> $\omega_* = \left[\frac{44.84 \nu_*^{0.667}}{(1.0 + 4.5 CSF^{0.35})^{0.833}} + \frac{0.866}{(CSF^{18} + 1.05 CSF^{0.8} + 34 \nu_* CSF^{1.3})^{0.625}} \right]^{-1}$ <p>donde $\nu_* \geq \frac{1.8 \times 10^{-4}}{CSF}$</p>
<p>Van Rijn</p>	$W_f = \frac{\nu A}{18 D_{50}} \quad A < 16.187$ $W_f = \left(\frac{10\nu}{D_{50}} \right) (\sqrt{1 + 0.01A} - 1) \quad 16.187 \leq A \leq 16187$ $W_f = \frac{1.1 \nu d_*^{1.1}}{D_{50}} \quad A > 16187$ <p>[7.27]</p>	

Zanke	$W_* = \left(\frac{2.5}{S_*} \right) \left[(1 + 0.16S_*^2)^{0.5} - 1 \right]$ $W_f = W_* \sqrt{\Delta g D_{50}} \quad [7.28]$	
Zhang	$W_f = \sqrt{\left(13.95 \frac{v}{D_{50}} \right)^2 + 1.09 \Delta g D_{50} - 13.95 \frac{v}{D_{50}}} \quad [7.29]$	
Zhu – Cheng	$W_f = \left(\frac{v}{D_{50}} \right) \left(\frac{-24 \cos^3 \alpha + \sqrt{576 \cos^6 \alpha + (18 \cos^3 \alpha + 3.6 \sin^2 \alpha) d_*^3}}{9 \cos^3 \alpha + 1.8 \sin^2 \alpha} \right) \quad [7.30]$	$\alpha = 0 \text{ para } d_* \leq 1$ $\alpha = \frac{\pi}{2 + 2.5 (\log_{10} (d_*))^{-3}} \text{ para } d_* > 1$
EQ 26	$d_{NA} = D_{50} / 1.00256$ $W_f = \left(\frac{v}{d_{NA}} \right) \left(\sqrt{22.0 + 1.13 d_*^2} - 4.67 \right)^{1.5} \quad [7.31]$	<p>El valor que se recomienda para la viscosidad cinemática es</p> $\nu = 1.081 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$ <p>El valor de la temperatura con la cual se realizaron los experimentos en el laboratorio fue de 17 °C.</p>
EQ 27	$W_f = \left(\frac{v}{d_{NA}} \right) \left[2.21 (1.0 + S_*^{1.5})^{1/3} - 2.0 \right]^2 \quad [7.32]$	<p>El rango del parámetro fluido – sedimento en el cual se recomienda aplicar esta expresión es:</p> $1.14 < S < 100$
She	$W_f = \left(\frac{v}{D_{50}} \right) \left[1.05 d_*^{1.5} \left(1.0 - e^{-0.08 d_*^{1.2}} \right) \right] \text{ para } d_* > 2$ $W_f = \left(\frac{v}{D_{50}} \right) \left[1.05 d_*^{1.5} \left(1.0 - e^{-0.315 d_*^{0.7652}} \right)^{2.2} \right] \text{ para } d_* < 2$ <p style="text-align: center;">[7.33]</p>	
Baba – Komar	$W_s = \frac{-3\mu + \sqrt{9\mu^2 + g\rho r^2 (\rho_s - \rho) (0.015476 + 0.19841r)}}{\rho (0.011607 + 0.14881r)}$ $W_f = 0.977 W_s^{0.913} \text{ para } D_{50} < 1.6 \text{ mm}$ $W_f = 0.761 W_s \text{ para } D_{50} \geq 1.6 \text{ mm} \quad [7.34]$	<p>En donde $r = D_{50}/2$, $g = 981 \text{ cm/s}^2$, ρ es la densidad del agua (g/cm^3), ρ_s es la densidad de la partícula (g/cm^3) y μ es la viscosidad dinámica del agua, en poises.</p> <p>Las unidades de ambas velocidades están en cm/s.</p> <p>Propiamente, la ecuación de W_s es de Gibbs et al. (1971)</p>
Wu – Wang	$M = 53.5 e^{-0.65 CSF}$ $N = 5.65 e^{-2.5 CSF}$ $n = 0.7 + 0.9 CSF$ $W_f = \frac{Mv}{Nd_N} \left[\sqrt{0.25 + \left(\frac{4N}{3M^2} d_*^3 \right)^{1/n}} - 0.5 \right]^n \quad [7.35]$	<p>En donde a, b y c son los ejes largo, intermedio y corto respectivamente de la partícula, y CSF es el factor de forma, adimensional, dado por Corey</p>

7.1.2. Información utilizada

La información respecto a las densidades de la partícula y agua, forma y redondez de las partículas naturales, diámetro característico y velocidad de caída experimental se presenta a continuación. Como parte de la investigación que se sigue llevando a cabo, esta información aquí mostrada sobre estos sedimentos costeros, en el futuro resultará en un pequeña porción de la base de datos que resguarda el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Tabla 7.2 Información utilizada para determinar la velocidad de caída en el estado de Quintana Roo, México. Los valores que se presentan aquí son los resultados por muestra de arena.

No	Nombre sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
1	Boca Sur	2650	1000	0.000412	0.000279	0.000201	0.591756	3.5	0.000297	0.02511
2	Boca Sur	2758	1000	0.000203	0.000142	0.00014	0.82173	3.5	0.000197	0.02474
3	Puerto Morelos estacion UNAM	2787	1000	0.000396	0.000246	0.000184	0.589913	3.5	0.000247	0.02713
4	Puerto Morelos estacion UNAM	2668	1000	0.000521	0.000367	0.000301	0.688086	3.5	0.000376	0.03922
5	Puerto Morelos estacion UNAM	2721	1000	0.000543	0.000331	0.000255	0.602094	3.5	0.000327	0.03704
6	Puerto Morelos 2	2680	1000	0.00023	0.000165	0.000139	0.713428	3.5	0.000171	0.01415
7	Puerto Morelos 2	2749	1000	0.000264	0.000185	0.000158	0.713836	3.5	0.000205	0.01957
8	Puerto Morelos 2	2721	1000	0.000597	0.000452	0.000326	0.627503	3.5	0.000475	0.06317
9	Puerto Morelos 3	2739	1000	0.000403	0.000275	0.000242	0.726638	3.5	0.000283	0.03182
10	Puerto Morelos 3	2550	1000	0.000284	0.000216	0.000187	0.756496	3.5	0.000229	0.01718
11	Puerto Morelos 3	2685	1000	0.000486	0.00031	0.000277	0.714646	3.5	0.000303	0.04477
12	Pto 1	2759	1000	0.0004	0.000329	0.000221	0.610166	3.5	0.000339	0.03922
13	Pto 1	2740	1000	0.000702	0.000533	0.000402	0.656667	3.5	0.000522	0.05952
14	Pto 1	2649	1000	0.000487	0.000304	0.000256	0.666587	3.5	0.000288	0.03134
15	Pto 2	2676	1000	0.000396	0.000284	0.000241	0.717188	3.5	0.000267	0.02667
16	Pto 2	2713	1000	0.00085	0.000565	0.000426	0.615242	3.5	0.000538	0.07353
17	Pto 2	2632	1000	0.000464	0.000335	0.000233	0.59241	3.5	0.000333	0.03615
18	Pto 3	2712	1000	0.00048	0.000338	0.000248	0.615151	3.5	0.000318	0.03628
19	Pto 3	2730	1000	0.000687	0.000489	0.000308	0.531806	3.5	0.000507	0.05102
20	Pto 3	2730	1000	0.000709	0.00048	0.000323	0.55422	3.5	0.000532	0.05977
21	Pto 4	2731	1000	0.000346	0.000262	0.000199	0.659929	3.5	0.000289	0.02837
22	Pto 4	2749	1000	0.000661	0.000535	0.000393	0.660427	3.5	0.000527	0.0641
23	Pto 4	2712	1000	0.000655	0.00051	0.000397	0.68654	3.5	0.00048	0.05531
24	Pto 4A	2658	1000	0.000446	0.000311	0.00026	0.699111	3.5	0.000298	0.03807
25	Pto 4A	2730	1000	0.000295	0.000204	0.000164	0.668855	3.5	0.000199	0.01646
26	Pto 4A	2606	1000	0.000736	0.000616	0.000423	0.627984	3.5	0.000608	0.0641
27	Pto 5	2768	1000	0.000714	0.000432	0.000353	0.635486	3.5	0.000422	0.05086
28	Pto 5	2817	1000	0.000556	0.000428	0.000337	0.692124	3.5	0.000422	0.053614
29	Pto 5	2740	1000	0.000755	0.000558	0.00037	0.569345	3.5	0.000565	0.05405
30	Pto 6	2730	1000	0.000712	0.000486	0.000364	0.618187	3.5	0.000474	0.07143

ANEXOS

Tabla 7.2 Continuación

No	Nombre sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
31	Pto 6	2702	1000	0.000335	0.000236	0.000184	0.655516	3.5	0.000223	0.01911
32	Pto 6	2730	1000	0.000271	0.000202	0.000179	0.765944	3.5	0.000217	0.02514
33	Pto 7	2667	1000	0.000686	0.000508	0.000371	0.627884	3.5	0.000558	0.06356
34	Pto 7	2730	1000	0.00099	0.000668	0.000475	0.583641	3.5	0.000717	0.09374
35	Pto 7	2649	1000	0.00126	0.000965	0.000625	0.566728	3.5	0.00087	0.09575
36	Pto 8	2667	1000	0.00067	0.000511	0.00035	0.598054	3.5	0.000521	0.05567
37	Pto 8	2649	1000	0.000786	0.0006	0.000447	0.65077	3.5	0.000587	0.07444
38	Pto 8	2712	1000	0.000823	0.000621	0.000451	0.631016	3.5	0.000636	0.06122
39	Pto 9	2721	1000	0.000578	0.000399	0.000331	0.688893	3.5	0.000396	0.0515
40	Pto 9	2768	1000	0.000796	0.00058	0.000457	0.672551	3.5	0.00054	0.06151
41	Pto 9	2685	1000	0.000735	0.000634	0.000318	0.466009	3.5	0.000598	0.06098
42	Pto 10	2540	1000	0.000487	0.000356	0.000273	0.655634	3.5	0.000347	0.03994
43	Pto 10	2632	1000	0.000613	0.000375	0.000315	0.657178	3.5	0.000391	0.04255
44	Pto 10	2730	1000	0.000437	0.000319	0.000242	0.646991	3.5	0.000309	0.03593
45	Pto 10	2676	1000	0.000282	0.000223	0.000141	0.562238	3.5	0.000215	0.0201
46	Pto A	2685	1000	0.000354	0.000274	0.000235	0.754068	3.5	0.000277	0.03046
47	Pto A	2797	1000	0.000329	0.000231	0.000207	0.748797	3.5	0.000242	0.02922
48	Pto A	2720	1000	0.00038	0.000282	0.000192	0.586959	3.5	0.000291	0.02871
49	Pto B	2649	1000	0.000276	0.000182	0.000142	0.632652	3.5	0.00019	0.02486
50	Pto B	2685	1000	0.000215	0.000155	0.000127	0.6946	3.5	0.00016	0.01259
51	Pto B	2539	1000	0.000272	0.000221	0.000165	0.67326	3.5	0.000198	0.02143
52	Pto C	2640	1000	0.000329	0.000224	0.000193	0.712249	3.5	0.00024	0.03311
53	Pto C	2649	1000	0.000351	0.000248	0.000189	0.638919	3.5	0.000244	0.02885
54	Pto C	2749	1000	0.001077	0.000672	0.000516	0.606474	3.5	0.000628	0.08266
55	Pto D	2758	1000	0.000404	0.000294	0.00025	0.724761	3.5	0.000285	0.04496
56	Pto D	2740	1000	0.001184	0.00047	0.000327	0.438796	3.5	0.000438	0.05688
57	Pto D	2632	1000	0.000421	0.000304	0.000203	0.568414	3.5	0.000297	0.03361
58	Pto E	2589	1000	0.000373	0.000272	0.000192	0.603207	3.5	0.00027	0.03474
59	Pto E	2740	1000	0.000442	0.000327	0.000253	0.66633	3.5	0.000309	0.03845
60	Pto E	2614	1000	0.000447	0.000316	0.000231	0.614942	3.5	0.000303	0.03619
61	Pto F	2749	1000	0.000283	0.000216	0.000166	0.670397	3.5	0.000201	0.01923
62	Pto F	2210	1000	0.00025	0.000201	0.000146	0.652131	3.5	0.00021	0.01289
63	Pto F	2417	1000	0.002464	0.002055	0.001686	0.74927	3.5	0.002014	0.15789
64	Pto F	2532	1000	0.000186	0.000112	0.000096	0.664206	3.5	0.000118	0.01143
65	Pto G	2694	1000	0.000293	0.00022	0.000187	0.737337	3.5	0.000231	0.025
66	Pto G	2768	1000	0.000405	0.000264	0.000192	0.587577	3.5	0.000266	0.02415
67	Pto G	2589	1000	0.000651	0.000492	0.000314	0.554567	3.5	0.000439	0.06709
68	Isla Mujeres	2524	1000	0.000351	0.000276	0.000188	0.604029	3.5	0.000276	0.03431
69	Isla Mujeres	2532	1000	0.000321	0.000215	0.000146	0.556189	3.5	0.000217	0.02369
70	Isla Mujeres	2508	1000	0.000351	0.000252	0.000181	0.610567	3.5	0.000249	0.01832

Tabla 7.2 Continuación

No	Nombre sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
71	Tulum A	2702	1000	0.000306	0.00017	0.000133	0.581671	3.5	0.000175	0.01891
72	Tulum A	2632	1000	0.000232	0.000159	0.00013	0.675032	3.5	0.000162	0.01316
73	Tulum A	2312	1000	0.000358	0.000246	0.000153	0.514468	3.5	0.000225	0.01679
74	Tulum B	2429	1000	0.000333	0.000214	0.000166	0.620741	3.5	0.000195	0.01793
75	Tulum B	2555	1000	0.000322	0.000205	0.000141	0.548811	3.5	0.000221	0.01931
76	Tulum B	2649	1000	0.000341	0.000242	0.000175	0.608879	3.5	0.000224	0.0225
77	Sian Ka'an	2500	1000	0.000503	0.00029	0.000208	0.545802	3.5	0.000291	0.03378
78	Sian Ka'an	2614	1000	0.000424	0.000249	0.000184	0.567187	3.5	0.000256	0.02381
79	Sian Ka'an	2446	1000	0.000501	0.000348	0.000184	0.441469	3.5	0.000359	0.02419
80	Bahia Principe	2572	1000	0.000704	0.000495	0.000293	0.495411	3.5	0.000497	0.05358
82	Bahia Principe	2753	1000	0.001158	0.000914	0.000584	0.567636	3.5	0.000867	0.09526
83	Akumal 1	2721	1000	0.000263	0.000165	0.000133	0.635994	3.5	0.000154	0.01429
84	Akumal 1	2649	1000	0.000218	0.000159	0.000114	0.61478	3.5	0.000153	0.01059
85	Akumal 1	2353	1000	0.00026	0.000153	0.000122	0.611267	3.5	0.000149	0.01076
86	Akumal 2	2312	1000	0.000753	0.000569	0.000366	0.558551	3.5	0.000578	0.01656
87	Akumal 2	2259	1000	0.000229	0.000142	0.000132	0.733276	3.5	0.000144	0.00868
88	Akumal 2	2260	1000	0.000178	0.000115	0.00009	0.628702	3.5	0.000115	0.00529
90	Playa del Carmen 2	2632	1000	0.000422	0.000288	0.000209	0.598874	3.5	0.000279	0.03234
91	Punta Brava 1	2730	1000	0.001112	0.000703	0.000482	0.544987	3.5	0.000694	0.06992
92	Punta Brava 1	2702	1000	0.000854	0.000605	0.000416	0.578955	3.5	0.000614	0.05585
93	Punta Brava 2	2597	1000	0.001828	0.001407	0.001106	0.689532	3.5	0.001308	0.09812
94	Punta Brava 3	2851.979	1000	0.000396	0.00028	0.000225	0.676455	3.5	0.000289	0.03353
95	Punta Allen	2454	1000	0.000373	0.000243	0.00017	0.564515	3.5	0.000245	0.0206
96	Punta Allen	2556	1000	0.000209	0.000155	0.000104	0.577887	3.5	0.000146	0.00637
97	Punta Allen	2523	1000	0.000141	0.000092	0.000071	0.620385	3.5	0.000079	0.0059
98	Holbox	2580	1000	0.000228	0.000153	0.000103	0.550379	3.5	0.000138	0.01188
99	Holbox	2556	1000	0.000837	0.000499	0.000374	0.579111	3.5	0.000486	0.04256
100	Holbox	2508	1000	0.0002	0.000137	0.000101	0.611329	3.5	0.000132	0.01044
158	Beach Paraiso Yalma Kan	2622	1000	0.000661	0.00053	0.000332	0.56064	3.5	0.00054	0.04952
159	F.A. Condesa	2684	1000	0.000663	0.000503	0.00028	0.485407	3.5	0.0005	0.05954
160	Gran Caribe Real	2721	1000	0.000711	0.000533	0.000284	0.461025	3.5	0.000483	0.05118
161	Hilton	2693.6	1000	0.0009	0.000622	0.000404	0.539184	3.5	0.000632	0.08825
162	Hilton cerca de corral	2712	1000	0.000854	0.000612	0.000339	0.469282	3.5	0.000564	0.06038
163	Royal Sands	2684	1000	0.000578	0.000428	0.000264	0.531582	3.5	0.000422	0.04783
164	Royal Solaris	2693	1000	0.000742	0.000536	0.000327	0.519059	3.5	0.000562	0.07009
165	Carissa Palma	2684	1000	0.000547	0.000368	0.000277	0.617146	3.5	0.000376	0.05457
166	Club Regina	2794.467	1000	0.000532	0.000373	0.000198	0.443667	3.5	0.00039	0.04622
167	Gran Melia	2676	1000	0.000366	0.000259	0.000193	0.627419	3.5	0.00026	0.03468
168	Hyatt Cancún Caribe	2666	1000	0.000467	0.000362	0.000219	0.532441	3.5	0.000359	0.04255
169	Ritz Carlton	2640	1000	0.0005	0.000403	0.000256	0.570839	3.5	0.000369	0.05263
170	Sheraton	2540	1000	0.000373	0.000279	0.000185	0.572214	3.5	0.00025	0.02559

ANEXOS

Tabla 7.3 Información utilizada para determinar la velocidad de caída en el estado de Yucatán, México. Los valores que se presentan aquí son los resultados por partícula de arena.

No	Nombre de sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
101	Chelem	2631.578	1000	0.000458	0.000339	0.000191	0.48622	3.5	0.000345	0.057143
		2631.578	1000	0.000689	0.000299	0.000209	0.460492	3.5	0.000345	0.036583
		2631.578	1000	0.000547	0.000373	0.000174	0.384957	3.5	0.000346	0.044773
		2631.578	1000	0.00047	0.000341	0.000315	0.786311	3.5	0.000346	0.03109
		2631.578	1000	0.000544	0.000373	0.000177	0.393044	3.5	0.000344	0.038964
		2631.578	1000	0.000614	0.000356	0.000315	0.674314	3.5	0.000346	0.048391
		2631.578	1000	0.000582	0.000356	0.00028	0.615763	3.5	0.000344	0.042553
		2631.578	1000	0.000533	0.000359	0.000217	0.496136	3.5	0.000345	0.028301
		2631.578	1000	0.000623	0.000329	0.00022	0.485178	3.5	0.000345	0.042854
		2631.578	1000	0.000448	0.00033	0.00019	0.494401	3.5	0.000345	0.035088
		2631.578	1000	0.000665	0.000354	0.000262	0.540568	3.5	0.000346	0.047619
		2631.578	1000	0.000437	0.000318	0.000254	0.680648	3.5	0.000346	0.031412
102	Chelem	2652.5	1000	0.0009	0.000634	0.000332	0.439761	3.5	0.000667	0.077328
		2652.5	1000	0.000802	0.000641	0.000327	0.455998	3.5	0.000668	0.073529
		2652.5	1000	0.000836	0.000648	0.000608	0.825898	3.5	0.000666	0.080645
		2652.5	1000	0.000969	0.000674	0.00037	0.457456	3.5	0.000666	0.065223
		2652.5	1000	0.000847	0.000628	0.000524	0.718681	3.5	0.000668	0.086207
		2652.5	1000	0.000764	0.000626	0.000301	0.435078	3.5	0.000668	0.077328
		2652.5	1000	0.001051	0.000671	0.000415	0.494242	3.5	0.000667	0.078125
		2652.5	1000	0.00082	0.0006	0.000442	0.629933	3.5	0.000667	0.045455
		2652.5	1000	0.000977	0.000672	0.000579	0.714718	3.5	0.000667	0.071429
		2652.5	1000	0.001075	0.000654	0.000548	0.653499	3.5	0.000666	0.094949
		2652.5	1000	0.001089	0.000646	0.000385	0.458364	3.5	0.000667	0.070087
		103	Chelem	2610.984	1000	0.000364	0.000247	0.000145	0.57707	3.5
2610.984	1000			0.000369	0.000234	0.000179	0.610082	3.5	0.000252	0.021127
2610.984	1000			0.000448	0.000266	0.000198	0.573193	3.5	0.000253	0.027778
2610.984	1000			0.000347	0.000265	0.000132	0.436548	3.5	0.000254	0.013274
2610.984	1000			0.000368	0.000281	0.000193	0.59981	3.5	0.000251	0.016424
2610.984	1000			0.000359	0.000228	0.000151	0.5265	3.5	0.000253	0.022614
2610.984	1000			0.000307	0.000295	0.00028	0.929715	3.5	0.000252	0.013393
2610.984	1000			0.000447	0.000271	0.000193	0.554454	3.5	0.000254	0.023317
2610.984	1000			0.000562	0.000314	0.000186	0.442371	3.5	0.000252	0.013274
2610.984	1000			0.000308	0.000249	0.000193	0.699706	3.5	0.000251	0.010022

Tabla 7.3 Continuación

No	Nombre sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
104	Chelem	2577.319	1000	0.000257	0.000238	0.000129	0.519852	3.5	0.000193	0.010067
		2577.319	1000	0.000252	0.000225	0.000167	0.699469	3.5	0.00019	0.019067
		2577.319	1000	0.000265	0.000216	0.00018	0.754236	3.5	0.000191	0.01875
		2577.319	1000	0.000283	0.000208	0.000171	0.705317	3.5	0.000189	0.016484
		2577.319	1000	0.000301	0.000191	0.000144	0.603078	3.5	0.000191	0.025424
		2577.319	1000	0.000276	0.000183	0.000157	0.700398	3.5	0.000192	0.011335
		2577.319	1000	0.000286	0.000204	0.00015	0.622548	3.5	0.000189	0.016544
		2577.319	1000	0.000226	0.000204	0.000167	0.777284	3.5	0.000191	0.013043
		2577.319	1000	0.000253	0.0002	0.000135	0.601662	3.5	0.000189	0.015255
		2577.319	1000	0.000377	0.000193	0.000161	0.597464	3.5	0.00019	0.0149
		2577.319	1000	0.000255	0.000209	0.000173	0.748468	3.5	0.000192	0.016854
105	Dzilam	2597.4	1000	0.000439	0.000368	0.00016	0.397554	3.5	0.000373	0.015189
		2597.4	1000	0.00042	0.000362	0.000203	0.521904	3.5	0.000373	0.041093
		2597.4	1000	0.000544	0.000346	0.000192	0.441438	3.5	0.000373	0.037736
		2597.4	1000	0.000459	0.000377	0.000343	0.825656	3.5	0.000374	0.041955
		2597.4	1000	0.000398	0.000366	0.000199	0.521336	3.5	0.000372	0.025974
		2597.4	1000	0.000466	0.000385	0.000239	0.565508	3.5	0.000373	0.035088
		2597.4	1000	0.000902	0.000373	0.000272	0.468185	3.5	0.000373	0.032258
		2597.4	1000	0.000525	0.000396	0.000194	0.424715	3.5	0.000373	0.025533
		2597.4	1000	0.0006	0.000418	0.000271	0.541033	3.5	0.000372	0.036147
		2597.4	1000	0.000727	0.000375	0.000148	0.283244	3.5	0.000373	0.026907
		106	Dzilam	2512.6	1000	0.000451	0.000361	0.000156	0.386104	3.5
2512.6	1000			0.000514	0.000354	0.000181	0.424786	3.5	0.000336	0.03261
2512.6	1000			0.000563	0.000333	0.000177	0.408049	3.5	0.000335	0.027027
2512.6	1000			0.000492	0.000325	0.000226	0.56437	3.5	0.000334	0.029412
2512.6	1000			0.000497	0.000327	0.000135	0.334513	3.5	0.000335	0.016902
2512.6	1000			0.000519	0.000364	0.000258	0.593741	3.5	0.000334	0.037037
2512.6	1000			0.000362	0.000353	0.000107	0.299727	3.5	0.000336	0.026316
2512.6	1000			0.000666	0.000325	0.000293	0.630991	3.5	0.000335	0.036812
2512.6	1000			0.000549	0.00034	0.000253	0.585366	3.5	0.000335	0.029555
2512.6	1000			0.000539	0.00033	0.000159	0.377029	3.5	0.000334	0.037502
2512.6	1000			0.000665	0.000351	0.000197	0.408752	3.5	0.000334	0.035714
2512.6	1000	0.000366	0.00033	0.000151	0.433805	3.5	0.000335	0.035505		

ANEXOS

Tabla 7.3 Continuación

No	Nombre sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
107	Dzilam	2551.02	1000	0.000604	0.000415	0.000231	0.461396	3.5	0.000434	0.037502
		2551.02	1000	0.000501	0.000493	0.000147	0.295762	3.5	0.000435	0.030455
		2551.02	1000	0.000694	0.000458	0.00016	0.283085	3.5	0.000435	0.029851
		2551.02	1000	0.000514	0.000411	0.00019	0.414485	3.5	0.000434	0.033518
		2551.02	1000	0.00067	0.000414	0.000227	0.43101	3.5	0.000435	0.028571
		2551.02	1000	0.000769	0.000468	0.00032	0.53382	3.5	0.000436	0.020135
		2551.02	1000	0.000525	0.000449	0.000224	0.462039	3.5	0.000435	0.046157
		2551.02	1000	0.000475	0.000444	0.000187	0.406236	3.5	0.000436	0.015038
		2551.02	1000	0.000569	0.000508	0.000153	0.284649	3.5	0.000436	0.038462
		2551.02	1000	0.000526	0.000416	0.000132	0.281319	3.5	0.000435	0.033333
		2551.02	1000	0.000623	0.000401	0.000182	0.363204	3.5	0.000433	0.020339
		2551.02	1000	0.000452	0.000406	0.000242	0.564446	3.5	0.000435	0.030614
108	ECCA	2631.57	1000	0.0004	0.000326	0.000196	0.543736	3.5	0.000317	0.028707
		2631.57	1000	0.000344	0.00033	0.000251	0.744223	3.5	0.000316	0.025316
		2631.57	1000	0.000401	0.000343	0.000179	0.481538	3.5	0.000316	0.030769
		2631.57	1000	0.000365	0.000307	0.000224	0.669212	3.5	0.000317	0.027651
		2631.57	1000	0.000409	0.000307	0.00015	0.423891	3.5	0.000317	0.029999
		2631.57	1000	0.000407	0.00031	0.000156	0.439862	3.5	0.000316	0.026202
		2631.57	1000	0.000513	0.000316	0.000248	0.615917	3.5	0.000316	0.034089
		2631.57	1000	0.000481	0.000322	0.000209	0.531087	3.5	0.000317	0.04
		2631.57	1000	0.000423	0.000316	0.000236	0.646488	3.5	0.000316	0.034483
		2631.57	1000	0.000473	0.000281	0.000264	0.724526	3.5	0.000317	0.032258
		2631.57	1000	0.000416	0.000314	0.00027	0.748415	3.5	0.000317	0.03125
		2631.57	1000	0.000429	0.000345	0.000214	0.557935	3.5	0.000316	0.039738
109	ECCA	2688.1	1000	0.000695	0.000584	0.000253	0.396883	3.5	0.000541	0.056818
		2688.1	1000	0.000601	0.000586	0.000222	0.374644	3.5	0.000541	0.064103
		2688.1	1000	0.000987	0.000645	0.000265	0.332766	3.5	0.000543	0.053961
		2688.1	1000	0.000779	0.000615	0.000228	0.328957	3.5	0.000542	0.060976
		2688.1	1000	0.000738	0.000557	0.000241	0.375911	3.5	0.000542	0.056395
		2688.1	1000	0.001185	0.000606	0.000393	0.46435	3.5	0.000542	0.068176
		2688.1	1000	0.000826	0.000594	0.000252	0.358912	3.5	0.000543	0.065223
		2688.1	1000	0.000743	0.00061	0.000274	0.406745	3.5	0.000542	0.05814
		2688.1	1000	0.000849	0.000586	0.000282	0.399411	3.5	0.000542	0.070761
		2688.1	1000	0.000909	0.000538	0.000134	0.190822	3.5	0.000543	0.044381
		2688.1	1000	0.000916	0.000561	0.000196	0.273047	3.5	0.000543	0.046296
		2688.1	1000	0.000718	0.000584	0.000263	0.406747	3.5	0.000543	0.037131

Tabla 7.3 Continuación

No	Nombre sitio	DS (kg/m³)	DW (kg/m³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
110	ECCA	2638.54	1000	0.000426	0.000251	0.000158	0.482421	3.5	0.000226	0.03082
		2638.54	1000	0.00025	0.000213	0.000139	0.604637	3.5	0.000228	0.02459
		2638.54	1000	0.000271	0.000228	0.00022	0.887524	3.5	0.000227	0.028846
		2638.54	1000	0.000317	0.000239	0.000133	0.485274	3.5	0.000227	0.015735
		2638.54	1000	0.000259	0.000242	0.000157	0.627908	3.5	0.000226	0.026316
		2638.54	1000	0.00028	0.000253	0.000108	0.405916	3.5	0.000226	0.025282
		2638.54	1000	0.000303	0.000233	0.00015	0.566284	3.5	0.000226	0.022388
		2638.54	1000	0.000356	0.000216	0.000186	0.670825	3.5	0.000227	0.021429
		2638.54	1000	0.000307	0.000259	0.000231	0.817538	3.5	0.000228	0.008858
		2638.54	1000	0.00036	0.000224	0.000181	0.638392	3.5	0.000226	0.012931
111	ECCA	2631.57	1000	0.000324	0.000271	0.000181	0.610519	3.5	0.000251	0.027778
		2631.57	1000	0.000404	0.000235	0.000111	0.361173	3.5	0.000249	0.010181
		2631.57	1000	0.000422	0.000231	0.000168	0.536345	3.5	0.000249	0.021429
		2631.57	1000	0.000285	0.00028	0.000167	0.591737	3.5	0.00025	0.020455
		2631.57	1000	0.000379	0.000293	0.000174	0.521776	3.5	0.00025	0.021429
		2631.57	1000	0.00045	0.000278	0.000185	0.521467	3.5	0.000248	0.031915
		2631.57	1000	0.000353	0.000239	0.000164	0.562864	3.5	0.000249	0.019312
		2631.57	1000	0.000346	0.000253	0.00024	0.81328	3.5	0.000248	0.016129
		2631.57	1000	0.00039	0.000251	0.000152	0.485111	3.5	0.000249	0.028127
		2631.57	1000	0.000331	0.000235	0.000144	0.516001	3.5	0.000249	0.01461
		2631.57	1000	0.000411	0.000258	0.000169	0.520053	3.5	0.000249	0.023559
		2631.57	1000	0.000456	0.000266	0.000073	0.209639	3.5	0.000248	0.020641
112	Progreso	2659.574	1000	0.000454	0.000298	0.000279	0.757359	3.5	0.000321	0.045116
		2659.574	1000	0.000368	0.000327	0.000265	0.765456	3.5	0.000322	0.03371
		2659.574	1000	0.000436	0.000294	0.000221	0.618351	3.5	0.000321	0.032431
		2659.574	1000	0.000357	0.000324	0.000269	0.790028	3.5	0.000321	0.028301
		2659.574	1000	0.000677	0.000345	0.000242	0.500738	3.5	0.000322	0.04878
		2659.574	1000	0.000455	0.000329	0.000149	0.385701	3.5	0.000321	0.027397
		2659.574	1000	0.000541	0.000306	0.000274	0.673627	3.5	0.000322	0.043478
		2659.574	1000	0.000513	0.000357	0.000178	0.415885	3.5	0.000321	0.028571
		2659.574	1000	0.000509	0.000333	0.000194	0.471311	3.5	0.000322	0.034288
		2659.574	1000	0.000565	0.000376	0.000204	0.443273	3.5	0.000321	0.032258
		2659.574	1000	0.000536	0.000318	0.000185	0.448158	3.5	0.000321	0.040543
		2659.574	1000	0.000419	0.000348	0.000271	0.708579	3.5	0.000322	0.028571

Tabla 7.3 Continuación

No	Nombre sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
113	Progreso	2610.9	1000	0.001134	0.001005	0.000919	0.86037	3.5	0.000962	0.082576
		2610.9	1000	0.001528	0.000996	0.000723	0.586393	3.5	0.000962	0.130435
		2610.9	1000	0.001336	0.000945	0.0004	0.355988	3.5	0.000961	0.12
		2610.9	1000	0.001116	0.001023	0.0005	0.468001	3.5	0.00096	0.078268
		2610.9	1000	0.000985	0.00095	0.000434	0.448225	3.5	0.000961	0.07758
		2610.9	1000	0.001043	0.000853	0.000443	0.469799	3.5	0.000962	0.08653
		2610.9	1000	0.001781	0.000986	0.000499	0.376182	3.5	0.00096	0.085714
		2610.9	1000	0.001248	0.00105	0.000239	0.208933	3.5	0.00096	0.057692
		2610.9	1000	0.000978	0.000914	0.000438	0.462936	3.5	0.000961	0.074386
		2610.9	1000	0.00158	0.000882	0.000368	0.31177	3.5	0.000962	0.070307
114	Progreso	2557.56	1000	0.00033	0.000139	0.000122	0.570779	3.5	0.000173	0.015255
		2557.56	1000	0.000313	0.000174	0.000164	0.703713	3.5	0.000172	0.012397
		2557.56	1000	0.000348	0.000192	0.000184	0.710175	3.5	0.000174	0.026786
		2557.56	1000	0.000242	0.000192	0.000156	0.720819	3.5	0.000174	0.017241
		2557.56	1000	0.0003	0.000216	0.00019	0.747869	3.5	0.000173	0.012032
		2557.56	1000	0.000282	0.000207	0.000166	0.688718	3.5	0.000174	0.023077
		2557.56	1000	0.000269	0.000196	0.000177	0.770457	3.5	0.000173	0.015571
		2557.56	1000	0.000212	0.000185	0.000134	0.67632	3.5	0.000174	0.014517
		2557.56	1000	0.00028	0.000216	0.000133	0.539185	3.5	0.000173	0.015957
		2557.56	1000	0.00026	0.000196	0.000181	0.798798	3.5	0.000172	0.013043
		2557.56	1000	0.000409	0.000196	0.00015	0.530665	3.5	0.000176	0.024323
		2557.56	1000	0.000289	0.000218	0.00012	0.480022	3.5	0.000174	0.005276
115	Progreso	2604.16	1000	0.000374	0.000189	0.000125	0.468799	3.5	0.00016	0.028736
		2604.16	1000	0.000297	0.000165	0.000148	0.670999	3.5	0.00016	0.029645
		2604.16	1000	0.000237	0.000171	0.000136	0.675229	3.5	0.000161	0.024834
		2604.16	1000	0.00028	0.000183	0.000152	0.671483	3.5	0.000161	0.02
		2604.16	1000	0.000242	0.00015	0.000089	0.466842	3.5	0.000159	0.020276
		2604.16	1000	0.000292	0.000201	0.000116	0.477991	3.5	0.00016	0.0117
		2604.16	1000	0.000333	0.000179	0.00015	0.614981	3.5	0.000159	0.022727
		2604.16	1000	0.000306	0.000176	0.000128	0.550113	3.5	0.00016	0.030488
		2604.16	1000	0.000293	0.000174	0.000171	0.757938	3.5	0.00016	0.018028
		2604.16	1000	0.000209	0.000209	0.00014	0.670139	3.5	0.000161	0.029762
		2604.16	1000	0.000226	0.00017	0.00017	0.864411	3.5	0.00016	0.02907
		2604.16	1000	0.000294	0.000181	0.00012	0.517787	3.5	0.00016	0.031646

Tabla 7.3 Continuación

No	Nombre sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
116	Telchac	2570.71	1000	0.000762	0.000416	0.000339	0.601942	3.5	0.000434	0.045455
		2570.71	1000	0.000575	0.000475	0.000213	0.406865	3.5	0.000433	0.026667
		2570.71	1000	0.000695	0.00043	0.000209	0.382614	3.5	0.000434	0.038964
		2570.71	1000	0.000725	0.000456	0.000226	0.392507	3.5	0.000433	0.033151
		2570.71	1000	0.000541	0.000412	0.000381	0.806314	3.5	0.000435	0.026667
		2570.71	1000	0.000488	0.000441	0.000256	0.552849	3.5	0.000432	0.033333
		2570.71	1000	0.00093	0.000654	0.000176	0.225363	3.5	0.000434	0.035292
		2570.71	1000	0.000587	0.000482	0.000217	0.407335	3.5	0.000434	0.032258
		2570.71	1000	0.000661	0.00042	0.000214	0.405833	3.5	0.000433	0.025264
		2570.71	1000	0.00064	0.00047	0.000272	0.496486	3.5	0.000434	0.044444
117	Telchac	2681.394	1000	0.001138	0.000555	0.000162	0.204259	3.5	0.000517	0.034886
		2681.394	1000	0.000924	0.000524	0.000217	0.311457	3.5	0.000516	0.033151
		2681.394	1000	0.000573	0.000523	0.000396	0.722235	3.5	0.000516	0.054054
		2681.394	1000	0.000848	0.000549	0.000415	0.608195	3.5	0.000519	0.058258
		2681.394	1000	0.001002	0.000585	0.000242	0.315331	3.5	0.000516	0.034288
		2681.394	1000	0.000794	0.000519	0.00039	0.607781	3.5	0.000518	0.04
		2681.394	1000	0.000674	0.000504	0.000193	0.331841	3.5	0.000516	0.04
		2681.394	1000	0.0007	0.000572	0.000348	0.55064	3.5	0.000516	0.045455
		2681.394	1000	0.000645	0.000586	0.000516	0.839873	3.5	0.000518	0.038707
		2681.394	1000	0.000889	0.00051	0.000436	0.647372	3.5	0.000516	0.040543
118	Telchac	2646.887	1000	0.000311	0.000212	0.000163	0.636377	3.5	0.000192	0.020738
		2646.887	1000	0.000294	0.000183	0.00014	0.603077	3.5	0.000191	0.011968
		2646.887	1000	0.000309	0.000193	0.000126	0.517364	3.5	0.000191	0.010368
		2646.887	1000	0.000317	0.000178	0.000123	0.516785	3.5	0.000192	0.018072
		2646.887	1000	0.000276	0.000198	0.000146	0.627233	3.5	0.000192	0.014423
		2646.887	1000	0.000192	0.000169	0.000107	0.596288	3.5	0.00019	0.008287
		2646.887	1000	0.000282	0.000204	0.000124	0.515371	3.5	0.000192	0.016077
		2646.887	1000	0.000207	0.000198	0.000189	0.930544	3.5	0.000193	0.014951
		2646.887	1000	0.000212	0.000199	0.000192	0.93734	3.5	0.000191	0.01372
		2646.887	1000	0.000248	0.000185	0.0001	0.466764	3.5	0.000192	0.010393
		2646.887	1000	0.000222	0.000181	0.000126	0.627085	3.5	0.000191	0.011278
		2646.887	1000	0.000317	0.000197	0.000131	0.524987	3.5	0.000191	0.018293

Tabla 7.3 Continuación

No	Nombre sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
120	Uay	2570.711	1000	0.00042	0.00033	0.000275	0.738037	3.5	0.00033	0.035088
		2570.711	1000	0.000374	0.000312	0.000207	0.605794	3.5	0.000332	0.033333
		2570.711	1000	0.000372	0.000307	0.000147	0.435128	3.5	0.000331	0.024489
		2570.711	1000	0.000444	0.000348	0.000211	0.535679	3.5	0.000331	0.031746
		2570.711	1000	0.000399	0.00033	0.000167	0.459764	3.5	0.000331	0.027397
		2570.711	1000	0.000488	0.00035	0.000229	0.554851	3.5	0.000332	0.030769
		2570.711	1000	0.000436	0.000334	0.000232	0.606878	3.5	0.00033	0.035714
		2570.711	1000	0.000388	0.00029	0.000188	0.561615	3.5	0.000331	0.035505
		2570.711	1000	0.000414	0.000334	0.000204	0.547323	3.5	0.00033	0.028169
		2570.711	1000	0.000412	0.000324	0.000136	0.372414	3.5	0.000331	0.026667
		2570.711	1000	0.000428	0.000315	0.00019	0.51621	3.5	0.00033	0.030769
		2570.711	1000	0.000595	0.000316	0.000205	0.473675	3.5	0.00033	0.039216
121	Uay	2583.99	1000	0.001022	0.000618	0.000508	0.63893	3.5	0.000577	0.087199
		2583.99	1000	0.000864	0.000624	0.000206	0.280486	3.5	0.00058	0.053568
		2583.99	1000	0.000785	0.000641	0.000363	0.512333	3.5	0.000578	0.035048
		2583.99	1000	0.000858	0.000682	0.000562	0.734051	3.5	0.00058	0.070087
		2583.99	1000	0.001102	0.000577	0.0005	0.62725	3.5	0.000577	0.06147
		2583.99	1000	0.000777	0.000739	0.000326	0.430152	3.5	0.000578	0.039891
		2583.99	1000	0.000776	0.000558	0.000378	0.573898	3.5	0.000577	0.06697
		2583.99	1000	0.001164	0.000636	0.000378	0.43977	3.5	0.000579	0.070761
		2583.99	1000	0.000609	0.000579	0.000501	0.843691	3.5	0.000577	0.058589
		2583.99	1000	0.000912	0.000583	0.000486	0.666995	3.5	0.00058	0.055151
122	Uay	2597.42	1000	0.000304	0.000223	0.000139	0.534344	3.5	0.000205	0.022166
		2597.42	1000	0.000268	0.000192	0.000134	0.592697	3.5	0.000202	0.010417
		2597.42	1000	0.000242	0.000189	0.000173	0.810387	3.5	0.000205	0.017647
		2597.42	1000	0.00025	0.000239	0.000153	0.62681	3.5	0.000204	0.009868
		2597.42	1000	0.000247	0.000222	0.000136	0.580284	3.5	0.000204	0.018072
		2597.42	1000	0.000309	0.000196	0.000144	0.586118	3.5	0.000204	0.008257
		2597.42	1000	0.000291	0.000187	0.000153	0.655264	3.5	0.000202	0.011811
		2597.42	1000	0.000244	0.000166	0.000161	0.797904	3.5	0.000203	0.018987
		2597.42	1000	0.000408	0.00025	0.000159	0.497207	3.5	0.000205	0.01875
		2597.42	1000	0.000279	0.000214	0.000171	0.70072	3.5	0.000205	0.020548

Tabla 7.3 Continuación

No	Nombre sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
123	Uay	2695.95	1000	0.241958	0.165154	0.113281	0.566688	3.5	0.000176	0.015902
		2695.95	1000	0.218865	0.183134	0.112707	0.56296	3.5	0.000177	0.016484
		2695.95	1000	0.368164	0.203068	0.157456	0.575863	3.5	0.000177	0.018594
		2695.95	1000	0.417107	0.183479	0.152229	0.550276	3.5	0.000176	0.016072
		2695.95	1000	0.349494	0.173828	0.159869	0.648611	3.5	0.000176	0.019737
		2695.95	1000	0.191349	0.190832	0.146829	0.768376	3.5	0.000176	0.007563
		2695.95	1000	0.223058	0.180549	0.113511	0.565628	3.5	0.000176	0.015
		2695.95	1000	0.258502	0.190774	0.126436	0.56935	3.5	0.000177	0.02296
		2695.95	1000	0.2419	0.16659	0.129251	0.643859	3.5	0.000175	0.015571
		2695.95	1000	0.265165	0.179975	0.103401	0.473325	3.5	0.000177	0.015423
		2695.95	1000	0.186179	0.183536	0.101333	0.548181	3.5	0.000177	0.01145
		2695.95	1000	0.220531	0.183881	0.104837	0.520608	3.5	0.000175	0.018219

Tabla 7.4 Información utilizada para determinar la velocidad de caída en el estado de Campeche, México. Los valores que se presentan aquí son los resultados por partícula de arena.

No	Nombre de sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
151	Playa Isla Carmen	2710.04	1000	0.00032	0.000232	0.000178	0.653985	3.5	0.000206	0.024863
		2710.04	1000	0.000357	0.000237	0.000146	0.503295	3.5	0.000206	0.018519
		2710.04	1000	0.00048	0.000219	0.000096	0.29582	3.5	0.000206	0.02459
		2710.04	1000	0.000417	0.000207	0.00009	0.30622	3.5	0.000207	0.018987
		2710.04	1000	0.00043	0.000238	0.000095	0.296166	3.5	0.000206	0.015789
		2710.04	1000	0.000732	0.000208	0.000078	0.200574	3.5	0.000206	0.021225
		2710.04	1000	0.000365	0.000247	0.000165	0.55051	3.5	0.000208	0.024458
		2710.04	1000	0.000271	0.000206	0.000117	0.495105	3.5	0.000205	0.02027
		2710.04	1000	0.000409	0.000231	0.000129	0.41912	3.5	0.000208	0.027778
		2710.04	1000	0.000386	0.000231	0.000168	0.562613	3.5	0.000206	0.025862
		2710.04	1000	0.000256	0.000208	0.000129	0.559339	3.5	0.000207	0.02711
2710.04	1000	0.000279	0.000209	0.00014	0.579089	3.5	0.000207	0.029803		
152	Playa Isla Carmen	2717.39	1000	0.000781	0.00039	0.000277	0.502392	3.5	0.000505	0.045798
		2717.39	1000	0.000571	0.000488	0.000153	0.289561	3.5	0.000504	0.031581
		2717.39	1000	0.000566	0.000529	0.000275	0.503268	3.5	0.000504	0.031412
		2717.39	1000	0.000754	0.000586	0.000171	0.256836	3.5	0.000505	0.02
		2717.39	1000	0.000834	0.000518	0.000195	0.297064	3.5	0.000506	0.036147
		2717.39	1000	0.000847	0.000744	0.000175	0.219803	3.5	0.000503	0.042553
		2717.39	1000	0.001421	0.000544	0.000147	0.166891	3.5	0.000505	0.054054
		2717.39	1000	0.000496	0.000482	0.000464	0.949715	3.5	0.000505	0.057143
2717.39	1000	0.000728	0.000597	0.000075	0.114213	3.5	0.000505	0.033518		

Tabla 7.4 Continuación

No	Nombre sitio	DS (kg/m ³)	DW (kg/m ³)	A(m)	B(m)	C(m)	CSF (Adim)	P (Adim)	D ₅₀ exp (m)	WFLAB (m/s)
153	Punta Xen	2710.04	1000	0.000315	0.000247	0.000144	0.517302	3.5	0.000164	0.017928
		2710.04	1000	0.000257	0.000196	0.000114	0.507464	3.5	0.000163	0.011538
		2710.04	1000	0.000241	0.000155	0.000115	0.593482	3.5	0.000165	0.011084
		2710.04	1000	0.000238	0.00016	0.000071	0.363825	3.5	0.000164	0.008721
		2710.04	1000	0.00021	0.000172	0.00006	0.315885	3.5	0.000164	0.012262
		2710.04	1000	0.000273	0.00019	0.0001	0.437345	3.5	0.000164	0.018519
		2710.04	1000	0.000192	0.000171	0.000151	0.834027	3.5	0.000164	0.011811
		2710.04	1000	0.000284	0.000196	0.000115	0.485033	3.5	0.000164	0.015517
		2710.04	1000	0.000313	0.000169	0.000143	0.622431	3.5	0.000164	0.018673
		2710.04	1000	0.000278	0.000187	0.000109	0.479179	3.5	0.000163	0.014658
		2710.04	1000	0.000288	0.000165	0.000129	0.591605	3.5	0.000164	0.012097
		2710.04	1000	0.000301	0.000181	0.000093	0.397751	3.5	0.000165	0.014107
		2710.04	1000	0.000273	0.000183	0.000089	0.397104	3.5	0.000164	0.020088
154	Punta Xen	2652.54	1000	0.000532	0.00021	0.000168	0.50485	3.5	0.0002	0.021127
		2652.54	1000	0.000256	0.000201	0.000145	0.640632	3.5	0.000199	0.024724
		2652.54	1000	0.000302	0.000218	0.000143	0.556839	3.5	0.000198	0.014706
		2652.54	1000	0.000397	0.000194	0.000174	0.626847	3.5	0.0002	0.023077
		2652.54	1000	0.00029	0.000209	0.000131	0.534022	3.5	0.000199	0.016424
		2652.54	1000	0.000349	0.000201	0.000148	0.558416	3.5	0.0002	0.016728
		2652.54	1000	0.000479	0.000194	0.000148	0.487521	3.5	0.000199	0.009825
		2652.54	1000	0.000332	0.0002	0.000155	0.60166	3.5	0.0002	0.019912
		2652.54	1000	0.000333	0.000326	0.000146	0.442907	3.5	0.0002	0.018293
		2652.54	1000	0.000311	0.000204	0.000163	0.648033	3.5	0.0002	0.019397
		2652.54	1000	0.000299	0.000197	0.000107	0.442554	3.5	0.000199	0.028302
		2652.54	1000	0.000291	0.00022	0.000143	0.566944	3.5	0.000199	0.012712
155	Bahía Tortugas	2747.25	1000	0.000535	0.000466	0.000232	0.46469	3.5	0.000436	0.03371
		2747.25	1000	0.000647	0.000453	0.00025	0.462899	3.5	0.000435	0.051852
		2747.25	1000	0.000648	0.000433	0.0002	0.378236	3.5	0.000436	0.041093
		2747.25	1000	0.000629	0.000401	0.000347	0.690748	3.5	0.000436	0.058824
		2747.25	1000	0.000738	0.000455	0.000225	0.388578	3.5	0.000435	0.04
		2747.25	1000	0.000422	0.00035	0.000259	0.674328	3.5	0.000436	0.030614
		2747.25	1000	0.000579	0.000469	0.000281	0.539704	3.5	0.000437	0.041955
		2747.25	1000	0.000591	0.000476	0.000246	0.464504	3.5	0.000435	0.039216
		2747.25	1000	0.000573	0.000489	0.000276	0.521195	3.5	0.000436	0.052632
		2747.25	1000	0.000746	0.000474	0.000189	0.318586	3.5	0.000434	0.041667
2747.25	1000	0.000716	0.00043	0.000347	0.626257	3.5	0.000436	0.033333		

En la Tabla 7.2, Tabla 7.3, Tabla 7.4, DS y DW son las densidades del material y agua, respectivamente; A, B y C son los ejes largo, intermedio y corto del material; CSF y P son el factor de forma e índice de redondez, respectivamente; D₅₀ exp es el diámetro experimental representativo del material y WFLAB es la velocidad de caída experimental.

7.1.3. Registro en tablas de la velocidad de caída de algunas de las muestras de material sedimentario

A continuación se presentan algunas de las tablas donde se fueron registrando y calculando tanto el diámetro experimental promedio, como del valor de la velocidad de caída. Solo se muestran algunas de las tablas pues el objetivo es mostrar al lector como se fueron acomodando las mediciones conforme se fueron realizando los ensayos de velocidad de caída.

7.1.3.1. Estado de Quintana Roo

Muestra # 1

BOCA SUR ZONA FORESHORE (ZONA DE LAVADO O SWASH ZONE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.29736	166.58	49.5342288	49.53	0.29733	20	00:21.433	00:29.433	00:08.000	8	0.02500
2	0.29736	166.58	49.5342288	49.52	0.29727	20	00:39.966	00:52.533	00:12.567	12.567	0.01591
3	0.29736	166.58	49.5342288	49.6	0.29775	20	00:46.366	00:54.466	00:08.100	8.100	0.02469
4	0.29736	166.58	49.5342288	49.58	0.29763	20	01:14.933	01:30.466	00:15.533	15.533	0.01288
5	0.29736	166.58	49.5342288	49.38	0.29643	20	01:28.266	01:35.366	00:07.100	7.100	0.02817
6	0.29736	166.58	49.5342288	49.4	0.29655	20	01:40.866	01:48.366	00:07.500	7.5	0.02667
7	0.29736	166.58	49.5342288	49.66	0.29812	20	01:50.166	01:58.033	00:07.867	7.867	0.02542
8	0.29736	166.58	49.5342288	49.65	0.29805	20	02:00.766	02:05.966	00:05.200	5.200	0.03846
9	0.29736	166.58	49.5342288	49.31	0.29601	20	02:26.333	02:40.433	00:14.100	14.100	0.01418
10	0.29736	166.58	49.5342288	49.55	0.29745	20	02:47.533	02:55.466	00:07.933	7.933	0.02521
11	0.29736	166.58	49.5342288						00:00.000	---	---
12	0.29736	166.58	49.5342288						00:00.000	---	---
					0.29726						0.02511

Muestra # 10

PUERTO MORELOS 3 (ZONA FORESHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.22893	159.45	36.5028885	36.6	0.22954	15	01:12.733	01:21.766	00:09.033	9.033	0.01661
2	0.22893	159.45	36.5028885	36.63	0.22973	15	01:14.633	01:22.133	00:07.500	7.500	0.02000
3	0.22893	159.45	36.5028885	36.43	0.22847	15	02:12.300	02:18.066	00:05.766	5.766	0.02601
4	0.22893	159.45	36.5028885	36.6	0.22954	15	02:54.733	03:04.866	00:10.133	10.133	0.01480
5	0.22893	159.45	36.5028885	36.56	0.22929	15	03:02.366	03:10.266	00:07.900	7.900	0.01899
6	0.22893	159.45	36.5028885	36.34	0.22791	15	03:19.333	03:26.166	00:06.833	6.833	0.02195
7	0.22893	159.45	36.5028885	36.75	0.23048	15	03:42.666	03:51.566	00:08.900	8.900	0.01685
8	0.22893	159.45	36.5028885	36.69	0.23010	15	03:43.766	03:51.233	00:07.467	7.467	0.02009
9	0.22893	159.45	36.5028885	36.68	0.23004	15	04:36.500	04:46.833	00:10.333	10.333	0.01452
10	0.22893	159.45	36.5028885	36.33	0.22785	15	04:43.266	04:51.933	00:08.667	8.667	0.01731
11	0.22893	159.45	36.5028885	36.68	0.23004	15	04:57.266	05:06.066	00:08.800	8.800	0.01705
12	0.22893	159.45	36.5028885	36.59	0.22948	15	04:57.266	05:07.733	00:10.467	10.467	0.01433
					0.22937						0.01718

Muestra # 20

PUNTO 3 (ZONA OFFSHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.53203	163.62	87.0507486	87.26	0.53331	25	00:14.566	00:19.433	00:04.867	4.867	0.05137
2	0.53203	163.62	87.0507486	87.32	0.53368	25	00:24.333	00:28.866	00:04.533	4.533	0.05515
3	0.53203	163.62	87.0507486	87.38	0.53404	25	00:33.766	00:37.766	00:04.000	4.000	0.06250
4	0.53203	163.62	87.0507486	86.93	0.53129	25	00:47.966	00:53.466	00:05.500	5.500	0.04545
5	0.53203	163.62	87.0507486	87.23	0.53313	25	01:00.733	01:04.866	00:04.133	4.133	0.06049
6	0.53203	163.62	87.0507486	86.89	0.53105	25	01:14.266	01:18.766	00:04.500	4.500	0.05556
7	0.53203	163.62	87.0507486	86.95	0.53141	25	01:27.466	01:31.366	00:03.900	3.900	0.06410
8	0.53203	163.62	87.0507486	86.59	0.52921	25	01:39.766	01:44.766	00:05.000	5.000	0.05000
9	0.53203	163.62	87.0507486	87.29	0.53349	25	01:49.866	01:53.733	00:03.867	3.867	0.06465
10	0.53203	163.62	87.0507486	87.34	0.53380	25	01:59.033	02:03.266	00:04.233	4.233	0.05906
11	0.53203	163.62	87.0507486	87.13	0.53251	25	02:07.433	02:10.833	00:03.400	3.400	0.07353
12	0.53203	163.62	87.0507486	86.8	0.53050	25	02:21.733	02:25.833	00:04.100	4.100	0.06098
					0.53229						0.05977

ANEXOS

Muestra # 30

PUNTO 6(ZONA BACKSHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.47484	153.44	72.8594496	72.42	0.47198	20	00:38.133	00:40.933	00:02.800	2.800	0.07143
2	0.47484	153.44	72.8594496	72.57	0.47295	20	00:51.233	00:54.166	00:02.933	2.933	0.06819
3	0.47484	153.44	72.8594496	72.36	0.47158	20	01:01.966	01:04.133	00:02.167	2.167	0.09229
4	0.47484	153.44	72.8594496	72.84	0.47471	20	01:16.133	01:18.933	00:02.800	2.800	0.07143
5	0.47484	153.44	72.8594496	72.89	0.47504	20	01:32.466	01:35.933	00:03.467	3.467	0.05769
6	0.47484	153.44	72.8594496	72.79	0.47439	20	01:41.866	01:44.666	00:02.800	2.800	0.07143
7	0.47484	153.44	72.8594496	72.84	0.47471	20	01:49.666	01:52.033	00:02.367	2.367	0.08450
8	0.47484	153.44	72.8594496	72.69	0.47374	20	02:53.133	02:56.433	00:03.300	3.300	0.06061
9	0.47484	153.44	72.8594496	72.56	0.47289	20	02:59.233	03:01.833	00:02.600	2.600	0.07692
10	0.47484	153.44	72.8594496	73.09	0.47634	20	03:13.066	03:15.966	00:02.900	2.900	0.06897
11	0.47484	153.44	72.8594496	73.19	0.47699	20	03:21.433	03:25.333	00:03.900	3.900	0.05128
12	0.47484	153.44	72.8594496	72.77	0.47426	20	03:28.666	03:31.233	00:02.567	2.567	0.07791
					0.47413						0.07143

Muestra # 40

PUNTO 9 (ZONA FORESHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.53931	155.76	84.0029256	84.04	0.53955	25	00:25.566	00:29.533	00:03.967	3.967	0.06302
2	0.53931	155.76	84.0029256	84.16	0.54032	25	00:43.133	00:47.333	00:04.200	4.200	0.05952
3	0.53931	155.76	84.0029256	84.22	0.54070	25	01:05.333	01:08.133	00:02.800	2.800	0.08929
4	0.53931	155.76	84.0029256	84.41	0.54192	25	01:20.033	01:23.566	00:03.533	3.533	0.07076
5	0.53931	155.76	84.0029256	84	0.53929	25	01:32.166	01:36.333	00:04.167	4.167	0.06000
6	0.53931	155.76	84.0029256	84.05	0.53961	25	02:16.333	02:19.533	00:03.200	3.200	0.07813
7	0.53931	155.76	84.0029256	84.04	0.53955	25	02:32.466	02:37.133	00:04.667	4.667	0.05357
8	0.53931	155.76	84.0029256	84.1	0.53993	25	02:41.666	02:46.033	00:04.367	4.367	0.05725
9	0.53931	155.76	84.0029256	84.28	0.54109	25	03:00.866	03:04.166	00:03.300	3.300	0.07576
10	0.53931	155.76	84.0029256	84.41	0.54192	25	03:18.266	03:22.466	00:04.200	4.200	0.05952
11	0.53931	155.76	84.0029256						00:00.000	---	---
12	0.53931	155.76	84.0029256						00:00.000	---	---
					0.54039						0.06151

Muestra # 50

PUNTO B (ZONA FORESHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.15964	153.05	24.432902	24.59	0.16067	15	00:27.933	00:35.066	00:07.133	7.133	0.02103
2	0.15964	153.05	24.432902	24.12	0.15760	15	00:57.633	01:07.766	00:10.133	10.133	0.01480
3	0.15964	153.05	24.432902	24.85	0.16237	15	01:15.233	01:29.466	00:14.233	14.233	0.01054
4	0.15964	153.05	24.432902	24.68	0.16125	15	01:33.366	01:40.866	00:07.500	7.500	0.02000
5	0.15964	153.05	24.432902	24.32	0.15890	15	01:50.566	02:02.933	00:12.367	12.367	0.01213
6	0.15964	153.05	24.432902	24.39	0.15936	15	02:07.033	02:16.866	00:09.833	9.833	0.01525
7	0.15964	153.05	24.432902	24.01	0.15688	15	03:11.066	03:18.733	00:07.667	7.667	0.01956
8	0.15964	153.05	24.432902	24.57	0.16054	15	03:42.266	04:05.466	00:23.200	23.200	0.00647
9	0.15964	153.05	24.432902	24.76	0.16178	15	03:50.666	04:04.466	00:13.800	13.800	0.01087
10	0.15964	153.05	24.432902	24.34	0.15903	15	04:16.333	04:27.833	00:11.500	11.500	0.01304
11	0.15964	153.05	24.432902	24.27	0.15858	15	05:01.033	05:16.966	00:15.933	15.933	0.00941
12	0.15964	153.05	24.432902	24.6	0.16073	15	05:20.233	05:35.966	00:15.733	15.733	0.00953
					0.15981						0.01259

Muestra # 60

PUNTO E (ZONA OFFSHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.30352	153.97	46.7329744	47.02	0.30538	20	00:17.333	00:23.333	00:06.000	6.000	0.03333
2	0.30352	153.97	46.7329744	46.86	0.30435	20	00:27.266	00:31.833	00:04.567	4.567	0.04379
3	0.30352	153.97	46.7329744	46.62	0.30279	20	00:38.533	00:45.666	00:07.133	7.133	0.02804
4	0.30352	153.97	46.7329744	46.29	0.30064	20	00:54.633	00:59.633	00:05.000	5.000	0.04000
5	0.30352	153.97	46.7329744	46.87	0.30441	20	01:13.833	01:23.333	00:09.500	9.500	0.02105
6	0.30352	153.97	46.7329744	46.6	0.30266	20	01:25.566	01:31.733	00:06.167	6.167	0.03243
7	0.30352	153.97	46.7329744	46.52	0.30214	20	01:33.433	01:39.166	00:05.733	5.733	0.03489
8	0.30352	153.97	46.7329744	46.75	0.30363	20	01:39.833	01:43.633	00:03.800	3.800	0.05263
9	0.30352	153.97	46.7329744	46.61	0.30272	20	01:53.966	01:59.066	00:05.100	5.100	0.03922
10	0.30352	153.97	46.7329744	46.49	0.30194	20	02:01.866	02:06.766	00:04.900	4.900	0.04082
11	0.30352	153.97	46.7329744	46.76	0.30370	20	02:13.433	02:18.766	00:05.333	5.333	0.03750
12	0.30352	153.97	46.7329744	46.46	0.30175	20	02:19.766	02:25.766	00:06.000	6.000	0.03333
					0.30301						0.03619

Muestra # 70

ISLA MUJERES (ZONA OFFSHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.2487	172.53	42.908211	42.89	0.24859	15	00:25.966	00:33.466	00:07.500	7.500	0.02000
2	0.2487	172.53	42.908211	42.8	0.24807	15	00:42.366	00:51.866	00:09.500	9.500	0.01579
3	0.2487	172.53	42.908211	42.86	0.24842	15	00:54.633	01:04.866	00:10.233	10.233	0.01466
4	0.2487	172.53	42.908211	43.1	0.24981	15	01:10.633	01:19.866	00:09.233	9.233	0.01625
5	0.2487	172.53	42.908211	42.62	0.24703	15	01:18.433	01:26.933	00:08.500	8.500	0.01765
6	0.2487	172.53	42.908211	42.75	0.24778	15	01:27.533	01:30.933	00:03.400	3.400	0.04412
7	0.2487	172.53	42.908211	42.86	0.24842	15	01:51.966	01:58.033	00:06.067	6.067	0.02472
8	0.2487	172.53	42.908211	43	0.24923	15	02:09.833	02:23.166	00:13.333	13.333	0.01125
9	0.2487	172.53	42.908211	43.01	0.24929	15	02:15.033	02:24.866	00:09.833	9.833	0.01525
10	0.2487	172.53	42.908211	42.77	0.24790	15	02:20.266	02:25.166	00:04.900	4.900	0.03061
11	0.2487	172.53	42.908211	42.96	0.24900	15	02:39.866	02:46.433	00:06.567	6.567	0.02284
12	0.2487	172.53	42.908211	42.97	0.24906	15	02:50.433	02:58.333	00:07.900	7.900	0.01899
					0.24855						0.01832

Muestra # 80

BAHIA PRINCIPE (ZONA BACKSHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.49694	177.15	88.032921	87.95	0.49647	25	00:14.266	00:18.666	00:04.400	4.400	0.05682
2	0.49694	177.15	88.032921	88.05	0.49704	25	00:23.933	00:28.866	00:04.933	4.933	0.05068
3	0.49694	177.15	88.032921	88.04	0.49698	25	00:37.633	00:42.233	00:04.600	4.600	0.05435
4	0.49694	177.15	88.032921	87.92	0.49630	25	00:45.166	00:49.166	00:04.000	4.000	0.06250
5	0.49694	177.15	88.032921	88.16	0.49766	25	00:53.533	00:58.266	00:04.733	4.733	0.05282
6	0.49694	177.15	88.032921	88.02	0.49687	25	01:02.133	01:05.433	00:03.300	3.300	0.07576
7	0.49694	177.15	88.032921	88	0.49675	25	01:14.633	01:19.533	00:04.900	4.900	0.05102
8	0.49694	177.15	88.032921	88.04	0.49698	25	01:23.433	01:30.166	00:06.733	6.733	0.03713
9	0.49694	177.15	88.032921	88.07	0.49715	25	01:30.733	01:35.566	00:04.833	4.833	0.05173
10	0.49694	177.15	88.032921	88.02	0.49687	25	01:43.166	01:47.933	00:04.767	4.767	0.05244
11	0.49694	177.15	88.032921	88.17	0.49771	25	01:54.866	01:58.066	00:03.200	3.200	0.07813
12	0.49694	177.15	88.032921	88.22	0.49800	23	02:01.866	02:05.233	00:03.367	3.367	0.06831
					0.49706						0.05358

ANEXOS

Muestra # 90

PLAYA DEL CARMEN 2 (ZONA FORESHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.27936	174.66	48.7930176	48.62	0.27837	20	00:17.233	00:23.633	00:06.400	6.400	0.03125
2	0.27936	174.66	48.7930176	48.42	0.27722	20	00:28.266	00:33.233	00:04.967	4.967	0.04027
3	0.27936	174.66	48.7930176	48.55	0.27797	20	00:38.833	00:45.033	00:06.200	6.200	0.03226
4	0.27936	174.66	48.7930176	48.64	0.27848	20	01:04.766	01:11.133	00:06.367	6.367	0.03141
5	0.27936	174.66	48.7930176	48.62	0.27837	20	01:14.566	01:20.733	00:06.167	6.167	0.03243
6	0.27936	174.66	48.7930176	48.75	0.27911	20	01:29.466	01:37.766	00:08.300	8.300	0.02410
7	0.27936	174.66	48.7930176	48.67	0.27866	20	01:37.033	01:41.466	00:04.433	4.433	0.04512
8	0.27936	174.66	48.7930176	48.88	0.27986	20	01:48.866	01:55.266	00:06.400	6.400	0.03125
9	0.27936	174.66	48.7930176	48.63	0.27843	20	02:00.433	02:05.633	00:05.200	5.200	0.03846
10	0.27936	174.66	48.7930176	48.76	0.27917	20	02:16.033	02:20.866	00:04.833	4.833	0.04138
11	0.27936	174.66	48.7930176	48.69	0.27877	20	02:40.533	02:47.733	00:07.200	7.200	0.02778
12	0.27936	174.66	48.7930176	48.89	0.27992	20	02:51.733	02:57.066	00:05.333	5.333	0.03750
					0.27869						0.03234

Muestra # 100

HOLBOX (ZONA OFFSHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.13212	171.97	22.7206764	22.74	0.13223	10	00:42.433	00:51.766	00:09.333	9.333	0.01071
2	0.13212	171.97	22.7206764	22.56	0.13119	10	00:54.533	01:03.333	00:08.800	8.800	0.01136
3	0.13212	171.97	22.7206764	22.71	0.13206	10	01:13.366	01:22.566	00:09.200	9.200	0.01087
4	0.13212	171.97	22.7206764	22.75	0.13229	10	01:24.633	01:32.466	00:07.833	7.833	0.01277
5	0.13212	171.97	22.7206764	22.74	0.13223	10	01:51.166	02:02.866	00:11.700	11.700	0.00855
6	0.13212	171.97	22.7206764	22.85	0.13287	10	02:03.533	02:15.433	00:11.900	11.900	0.00840
7	0.13212	171.97	22.7206764	22.7	0.13200	10	02:13.066	02:20.366	00:07.300	7.300	0.01370
8	0.13212	171.97	22.7206764	22.61	0.13148	10	02:41.233	02:50.433	00:09.200	9.200	0.01087
9	0.13212	171.97	22.7206764	22.53	0.13101	10	02:57.733	03:09.066	00:11.333	11.333	0.00882
10	0.13212	171.97	22.7206764	22.76	0.13235	10	03:19.266	03:29.333	00:10.067	10.067	0.00993
11	0.13212	171.97	22.7206764	22.57	0.13124	10	03:41.566	03:52.233	00:10.667	10.667	0.00937
12	0.13212	171.97	22.7206764	22.8	0.13258	10	03:49.533	03:59.366	00:09.833	9.833	0.01017
					0.13196						0.01044

Muestra # 158, de la isla barrera de Cancún (originalmente con el número 124)

BEACH PARAISO YALMA KAN											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.54055	162.16	87.655588	87.73	0.54101	25	00:16.366	00:21.566	00:05.200	5.200	0.04808
2	0.54055	162.16	87.655588	87.74	0.54107	25	00:27.966	00:31.666	00:03.700	3.700	0.06757
3	0.54055	162.16	87.655588	87.43	0.53916	25	00:42.466	00:48.433	00:05.967	5.967	0.04190
4	0.54055	162.16	87.655588	87.65	0.54052	25	00:56.733	01:02.233	00:05.500	5.500	0.04545
5	0.54055	162.16	87.655588	87.51	0.53965	25	01:06.633	01:10.466	00:03.833	3.833	0.06522
6	0.54055	162.16	87.655588	87.86	0.54181	25	01:16.366	01:22.766	00:06.400	6.400	0.03906
7	0.54055	162.16	87.655588	87.51	0.53965	25	01:24.266	01:29.233	00:04.967	4.967	0.05033
8	0.54055	162.16	87.655588	87.58	0.54008	25	01:35.033	01:39.566	00:04.533	4.533	0.05515
9	0.54055	162.16	87.655588	87.51	0.53965	25	01:46.066	01:50.066	00:04.000	4.000	0.06250
10	0.54055	162.16	87.655588	87.84	0.54169	25	02:02.133	02:07.266	00:05.133	5.133	0.04870
11	0.54055	162.16	87.655588						00:00.000	---	---
12	0.54055	162.16	87.655588						00:00.000	---	---
					0.54043						0.04952

Muestra # 162, de la isla barrera de Cancún (originalmente con el número 131)

HILTON CERCA DE CORRAL											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.56361	165.12	93.0632832	93.06	0.56359	20	00:11.133	00:14.733	00:03.600	3.600	0.05556
2	0.56361	165.12	93.0632832	93	0.56323	20	00:22.233	00:25.866	00:03.633	3.633	0.05505
3	0.56361	165.12	93.0632832	93.08	0.56371	20	00:32.733	00:35.866	00:03.133	3.133	0.06384
4	0.56361	165.12	93.0632832	93.25	0.56474	20	00:47.866	00:50.833	00:02.967	2.967	0.06741
5	0.56361	165.12	93.0632832	93.12	0.56395	20	01:01.933	01:05.133	00:03.200	3.200	0.06250
6	0.56361	165.12	93.0632832	93.17	0.56426	20	01:17.433	01:20.866	00:03.433	3.433	0.05826
7	0.56361	165.12	93.0632832	93.01	0.56329	20	01:28.433	01:33.066	00:04.633	4.633	0.04317
8	0.56361	165.12	93.0632832	93.13	0.56401	20	01:37.733	01:41.233	00:03.500	3.500	0.05714
9	0.56361	165.12	93.0632832	93.24	0.56468	20	01:51.166	01:53.533	00:02.367	2.367	0.08450
10	0.56361	165.12	93.0632832	93.07	0.56365	20	02:02.733	02:05.766	00:03.033	3.033	0.06594
11	0.56361	165.12	93.0632832						00:00.000	---	---
12	0.56361	165.12	93.0632832						00:00.000	---	---
					0.56391						0.06038

Muestra # 167, de la isla barrera de Cancún (originalmente con el número 129)

GRAN MELIA											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.26005	170.27	44.2787135	44.2	0.25959	20	00:20.633	00:26.966	00:06.333	6.333	0.03158
2	0.26005	170.27	44.2787135	44.17	0.25941	20	00:29.933	00:35.733	00:05.800	5.800	0.03448
3	0.26005	170.27	44.2787135	44.32	0.26029	20	00:38.366	00:43.633	00:05.267	5.267	0.03797
4	0.26005	170.27	44.2787135	44.28	0.26006	20	00:47.166	00:52.966	00:05.800	5.800	0.03448
5	0.26005	170.27	44.2787135	44.24	0.25982	20	00:56.633	01:01.966	00:05.333	5.333	0.03750
6	0.26005	170.27	44.2787135	44.28	0.26006	20	01:08.966	01:14.633	00:05.667	5.667	0.03529
7	0.26005	170.27	44.2787135	44.25	0.25988	20	01:17.466	01:24.133	00:06.667	6.667	0.03000
8	0.26005	170.27	44.2787135	44.17	0.25941	20	01:27.933	01:33.166	00:05.233	5.233	0.03822
9	0.26005	170.27	44.2787135	44.35	0.26047	20	01:35.666	01:41.533	00:05.867	5.867	0.03409
10	0.26005	170.27	44.2787135	44.31	0.26023	20	01:47.366	01:54.266	00:06.900	6.900	0.02899
11	0.26005	170.27	44.2787135	44.43	0.26094	20	01:57.033	02:02.766	00:05.733	5.733	0.03489
12	0.26005	170.27	44.2787135	44.17	0.25941	20	02:07.433	02:12.933	00:05.500	5.500	0.03636
					0.25996						0.03468

Muestra # 170 (originalmente con el número 136)

SHERATON											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.25012	168.82	42.2252584	42.13	0.24956	20	00:18.066	00:25.966	00:07.900	7.900	0.02532
2	0.25012	168.82	42.2252584	42.22	0.25009	20	00:26.366	00:31.766	00:05.400	5.400	0.03704
3	0.25012	168.82	42.2252584	42.31	0.25062	20	00:39.233	00:48.566	00:09.333	9.333	0.02143
4	0.25012	168.82	42.2252584	42.37	0.25098	20	00:45.166	00:51.766	00:06.600	6.600	0.03030
5	0.25012	168.82	42.2252584	42.06	0.24914	20	00:56.866	01:06.933	00:10.067	10.067	0.01987
6	0.25012	168.82	42.2252584	42.25	0.25027	20	01:05.833	01:13.766	00:07.933	7.933	0.02521
7	0.25012	168.82	42.2252584	42.17	0.24979	20	01:14.133	01:22.833	00:08.700	8.700	0.02299
8	0.25012	168.82	42.2252584	42.3	0.25056	20	01:20.133	01:27.866	00:07.733	7.733	0.02586
9	0.25012	168.82	42.2252584	42.51	0.25181	20	01:31.833	01:37.166	00:05.333	5.333	0.03750
10	0.25012	168.82	42.2252584	42.31	0.25062	20	01:41.333	01:47.933	00:06.600	6.600	0.03030
11	0.25012	168.82	42.2252584	42.16	0.24973	20	01:55.966	02:05.266	00:09.300	9.300	0.02151
12	0.25012	168.82	42.2252584	42.25	0.25027	20	02:03.366	02:10.966	00:07.600	7.600	0.02632
					0.25029						0.02559

7.1.3.2. Estado de Yucatán

Muestra # 101

			CHELEM MC41 (A)								
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.34529	170.37	58.8270573	58.74	0.34478	20	00:17.466	00:20.966	00:03.500	3.500	0.05714
2	0.34529	170.37	58.8270573	58.85	0.34542	20	00:27.866	00:33.333	00:05.467	5.467	0.03658
3	0.34529	170.37	58.8270573	58.97	0.34613	20	00:44.766	00:49.233	00:04.467	4.467	0.04477
4	0.34529	170.37	58.8270573	58.87	0.34554	20	00:56.933	01:03.366	00:06.433	6.433	0.03109
5	0.34529	170.37	58.8270573	58.61	0.34402	20	01:10.233	01:15.366	00:05.133	5.133	0.03896
6	0.34529	170.37	58.8270573	58.92	0.34584	20	01:18.733	01:22.866	00:04.133	4.133	0.04839
7	0.34529	170.37	58.8270573	58.62	0.34407	20	01:34.066	01:38.766	00:04.700	4.700	0.04255
8	0.34529	170.37	58.8270573	58.79	0.34507	20	01:45.766	01:52.833	00:07.067	7.067	0.02830
9	0.34529	170.37	58.8270573	58.77	0.34496	20	02:00.866	02:05.533	00:04.667	4.667	0.04285
10	0.34529	170.37	58.8270573	58.74	0.34478	20	02:17.733	02:23.433	00:05.700	5.700	0.03509
11	0.34529	170.37	58.8270573	58.94	0.34595	20	02:25.166	02:29.366	00:04.200	4.200	0.04762
12	0.34529	170.37	58.8270573	58.87	0.34554	20	02:40.566	02:46.933	00:06.367	6.367	0.03141
					0.34518						0.04076

Muestra # 105

			TELCHAC (A)								
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.43442	172.54	74.9548268	74.82	0.43364	20	00:13.166	00:17.566	00:04.400	4.400	0.04545
2	0.43442	172.54	74.9548268	74.76	0.43329	20	00:31.433	00:38.933	00:07.500	7.500	0.02667
3	0.43442	172.54	74.9548268	74.84	0.43375	20	00:43.833	00:48.966	00:05.133	5.133	0.03896
4	0.43442	172.54	74.9548268	74.76	0.43329	20	00:57.533	01:03.566	00:06.033	6.033	0.03315
5	0.43442	172.54	74.9548268	74.97	0.43451	20	01:14.633	01:22.133	00:07.500	7.500	0.02667
6	0.43442	172.54	74.9548268	74.62	0.43248	20	01:27.233	01:33.233	00:06.000	6.000	0.03333
7	0.43442	172.54	74.9548268	74.95	0.43439	20	01:38.066	01:43.733	00:05.667	5.667	0.03529
8	0.43442	172.54	74.9548268	74.81	0.43358	20	01:55.566	02:01.766	00:06.200	6.200	0.03226
9	0.43442	172.54	74.9548268	74.76	0.43329	16	02:08.433	02:14.766	00:06.333	6.333	0.02526
10	0.43442	172.54	74.9548268	74.81	0.43358	20	02:17.266	02:21.766	00:04.500	4.500	0.04444
11	0.43442	172.54	74.9548268						00:00.000	---	---
12	0.43442	172.54	74.9548268						00:00.000	---	---
					0.43358						0.03324

Muestra # 110 (originalmente con el número 115)

			ECCA (C)								
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.22674	173.71	39.3870054	39.3	0.22624	15	00:15.466	00:20.333	00:04.867	4.867	0.03082
2	0.22674	173.71	39.3870054	39.55	0.22768	15	00:34.066	00:40.166	00:06.100	6.100	0.02459
3	0.22674	173.71	39.3870054	39.45	0.22710	15	00:46.666	00:51.866	00:05.200	5.200	0.02885
4	0.22674	173.71	39.3870054	39.42	0.22693	15			00:00.000	---	---
5	0.22674	173.71	39.3870054	39.5	0.22739	15	01:18.633	01:28.166	00:09.533	9.533	0.01573
6	0.22674	173.71	39.3870054	39.25	0.22595	15	01:36.233	01:41.933	00:05.700	5.700	0.02632
7	0.22674	173.71	39.3870054	39.3	0.22624	15	01:45.733	01:51.666	00:05.933	5.933	0.02528
8	0.22674	173.71	39.3870054	39.24	0.22589	15	01:54.566	02:01.266	00:06.700	6.700	0.02239
9	0.22674	173.71	39.3870054	39.45	0.22710	15	02:04.166	02:11.166	00:07.000	7.000	0.02143
10	0.22674	173.71	39.3870054	39.56	0.22774	15	02:23.433	02:40.366	00:16.933	16.933	0.00886
11	0.22674	173.71	39.3870054	39.3	0.22624	15	02:37.633	02:49.233	00:11.600	11.600	0.01293
12	0.22674	173.71	39.3870054						00:00.000	---	---
					0.22677						0.02349

Muestra # 115 (originalmente con el número 112)

UAY (D)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.17554	171.22	30.0559588	30.08	0.17568	15	00:31.433	00:40.866	00:09.433	9.433	0.01590
2	0.17554	171.22	30.0559588	30.29	0.17691	15	00:43.433	00:52.533	00:09.100	9.100	0.01648
3	0.17554	171.22	30.0559588	30.25	0.17667	15	00:51.666	00:59.733	00:08.067	8.067	0.01859
4	0.17554	171.22	30.0559588	30.06	0.17556	15	01:13.233	01:22.566	00:09.333	9.333	0.01607
5	0.17554	171.22	30.0559588	30.15	0.17609	15	01:34.166	01:41.766	00:07.600	7.600	0.01974
6	0.17554	171.22	30.0559588	30.12	0.17591	15	02:04.233	02:24.066	00:19.833	19.833	0.00756
7	0.17554	171.22	30.0559588	30.19	0.17632	15	03:07.366	03:17.366	00:10.000	10.000	0.01500
8	0.17554	171.22	30.0559588	30.25	0.17667	15	03:22.233	03:28.766	00:06.533	6.533	0.02296
9	0.17554	171.22	30.0559588	30.01	0.17527	15	03:53.033	04:02.666	00:09.633	9.633	0.01557
10	0.17554	171.22	30.0559588	30.24	0.17661	15	04:02.440	04:12.166	00:09.726	9.726	0.01542
11	0.17554	171.22	30.0559588	30.35	0.17726	15	04:15.833	04:28.933	00:13.100	13.100	0.01145
12	0.17554	171.22	30.0559588	30.02	0.17533	15	04:23.433	04:31.666	00:08.233	8.233	0.01822
					0.17619						0.01599

Muestra # 120 (originalmente con el número 109)

UAY (A)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.33087	165.24	54.6729588	54.47	0.32964	20	00:20.033	00:25.733	00:05.700	5.700	0.03509
2	0.33087	165.24	54.6729588	54.85	0.33194	20	00:30.866	00:36.866	00:06.000	6.000	0.03333
3	0.33087	165.24	54.6729588	54.69	0.33097	20	00:43.466	00:51.633	00:08.167	8.167	0.02449
4	0.33087	165.24	54.6729588	54.64	0.33067	20	00:52.366	00:58.666	00:06.300	6.300	0.03175
5	0.33087	165.24	54.6729588	54.67	0.33085	20	01:06.233	01:13.533	00:07.300	7.300	0.02740
6	0.33087	165.24	54.6729588	54.87	0.33206	20	01:20.933	01:27.433	00:06.500	6.500	0.03077
7	0.33087	165.24	54.6729588	54.48	0.32970	20	01:31.433	01:37.033	00:05.600	5.600	0.03571
8	0.33087	165.24	54.6729588	54.66	0.33079	20	01:41.133	01:46.766	00:05.633	5.633	0.03551
9	0.33087	165.24	54.6729588	54.5	0.32982	20	01:52.833	01:59.933	00:07.100	7.100	0.02817
10	0.33087	165.24	54.6729588	54.64	0.33067	20	02:02.666	02:10.166	00:07.500	7.500	0.02667
11	0.33087	165.24	54.6729588	54.6	0.33043	20	02:12.433	02:18.933	00:06.500	6.500	0.03077
12	0.33087	165.24	54.6729588	54.57	0.33025	20	02:25.966	02:31.066	00:05.100	5.100	0.03922
					0.33065						0.03126

Muestra # 123 (originalmente con el número 112)

DZILAM (D)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.43509	168.64	73.3735776	73.21	0.43412	20	00:15.633	00:20.966	00:05.333	5.333	0.03750
2	0.43509	168.64	73.3735776	73.39	0.43519	20	00:36.366	00:42.933	00:06.567	6.567	0.03046
3	0.43509	168.64	73.3735776	73.37	0.43507	20	00:49.833	00:56.533	00:06.700	6.700	0.02985
4	0.43509	168.64	73.3735776	73.24	0.43430	20	01:04.766	01:10.733	00:05.967	5.967	0.03352
5	0.43509	168.64	73.3735776	73.31	0.43471	20	01:21.333	01:28.333	00:07.000	7.000	0.02857
6	0.43509	168.64	73.3735776	73.5	0.43584	20	01:46.433	01:56.366	00:09.933	9.933	0.02013
7	0.43509	168.64	73.3735776	73.33	0.43483	20	01:53.833	01:58.166	00:04.333	4.333	0.04616
8	0.43509	168.64	73.3735776	73.52	0.43596	20	02:32.466	02:45.766	00:13.300	13.300	0.01504
9	0.43509	168.64	73.3735776	73.51	0.43590	20	02:43.566	02:48.766	00:05.200	5.200	0.03846
10	0.43509	168.64	73.3735776	73.4	0.43525	20	02:54.333	03:00.333	00:06.000	6.000	0.03333
11	0.43509	168.64	73.3735776	73.1	0.43347	12	03:11.233	03:17.133	00:05.900	5.900	0.02034
12	0.43509	168.64	73.3735776	73.37	0.43507	20	03:19.533	03:26.066	00:06.533	6.533	0.03061
					0.43497						0.03053

7.1.3.3. Estado de Campeche

Muestra # 151 (originalmente con el número 140)

ISLA DEL CARMEN (ZONA BACKSHORE O DUNAS)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.20672	165.68	34.2493696	34.1	0.20582	15	00:20.733	00:26.766	00:06.033	6.033	0.02486
2	0.20672	165.68	34.2493696	34.2	0.20642	15	00:51.266	00:59.366	00:08.100	8.100	0.01852
3	0.20672	165.68	34.2493696	34.15	0.20612	15	00:59.333	01:05.433	00:06.100	6.100	0.02459
4	0.20672	165.68	34.2493696	34.24	0.20666	15	01:22.933	01:30.833	00:07.900	7.900	0.01899
5	0.20672	165.68	34.2493696	34.15	0.20612	15	01:39.666	01:49.166	00:09.500	9.500	0.01579
6	0.20672	165.68	34.2493696	34.12	0.20594	15	02:09.466	02:16.533	00:07.067	7.067	0.02123
7	0.20672	165.68	34.2493696	34.39	0.20757	15	02:36.733	02:42.866	00:06.133	6.133	0.02446
8	0.20672	165.68	34.2493696	34	0.20521	15	02:58.266	03:05.666	00:07.400	7.400	0.02027
9	0.20672	165.68	34.2493696	34.48	0.20811	15	03:07.033	03:12.433	00:05.400	5.400	0.02778
10	0.20672	165.68	34.2493696	34.11	0.20588	15	03:17.566	03:23.366	00:05.800	5.800	0.02586
11	0.20672	165.68	34.2493696	34.37	0.20745	15	03:37.033	03:42.566	00:05.533	5.533	0.02711
12	0.20672	165.68	34.2493696	34.26	0.20678	15	03:45.033	03:50.066	00:05.033	5.033	0.02980
					0.20651						0.02452

Muestra # 155 (originalmente con el número 137)

BAHÍA DE TORTUGAS (DUNAS O BACKSHORE)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.43565	169.34	73.772971	73.75	0.43551	20	00:15.233	00:21.166	00:05.933	5.933	0.03371
2	0.43565	169.34	73.772971	73.65	0.43492	14	00:23.366	00:26.066	00:02.700	2.700	0.05185
3	0.43565	169.34	73.772971	73.89	0.43634	20	00:32.066	00:36.933	00:04.867	4.867	0.04109
4	0.43565	169.34	73.772971	73.91	0.43646	20	00:59.133	01:02.533	00:03.400	3.400	0.05882
5	0.43565	169.34	73.772971	73.72	0.43534	20	01:10.133	01:15.133	00:05.000	5.000	0.04000
6	0.43565	169.34	73.772971	73.75	0.43551	20	01:25.533	01:32.066	00:06.533	6.533	0.03061
7	0.43565	169.34	73.772971	74	0.43699	20	01:36.366	01:41.133	00:04.767	4.767	0.04196
8	0.43565	169.34	73.772971	73.64	0.43486	20	01:44.066	01:49.166	00:05.100	5.100	0.03922
9	0.43565	169.34	73.772971	73.79	0.43575	20	01:54.466	01:58.266	00:03.800	3.800	0.05263
10	0.43565	169.34	73.772971	73.55	0.43433	20	02:12.933	02:17.733	00:04.800	4.800	0.04167
11	0.43565	169.34	73.772971	73.79	0.43575	20	02:24.133	02:30.133	00:06.000	6.000	0.03333
12	0.43565	169.34	73.772971						00:00.000	---	---
					0.43562						0.04109

Muestra # 157 Bahía Tortugas (originalmente con el número 139)

BAHÍA DE TORTUGAS (ZONA OFFSHORE, 50 CM PROFUNDIDAD)											
NUMERO GRANO	D50 (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	D50 MEDIDO (mm)	DISTANCIA (cm)	cuadro inicial	cuadro final	tiempo (s)	TIEMPO (s)	VEL. EXP (m/s)
1	0.14241	162.74	23.1758034	23.12	0.14207	10	01:00.133	01:14.633	00:14.500	14.500	0.00690
2	0.14241	162.74	23.1758034	23.03	0.14151	10	01:03.033	01:08.233	00:05.200	5.200	0.01923
3	0.14241	162.74	23.1758034	23.01	0.14139	10	01:30.833	01:38.833	00:08.000	8.000	0.01250
4	0.14241	162.74	23.1758034	23.36	0.14354	10	01:41.933	01:48.233	00:06.300	6.300	0.01587
5	0.14241	162.74	23.1758034	23.23	0.14274	10	02:01.233	02:12.266	00:11.033	11.033	0.00906
6	0.14241	162.74	23.1758034	23	0.14133	10	02:19.266	02:29.566	00:10.300	10.300	0.00971
7	0.14241	162.74	23.1758034	23.27	0.14299	10	02:22.566	02:28.033	00:05.467	5.467	0.01829
8	0.14241	162.74	23.1758034	23.27	0.14299	10	02:34.533	02:41.266	00:06.733	6.733	0.01485
9	0.14241	162.74	23.1758034	23.35	0.14348	10	03:29.666	03:36.833	00:07.167	7.167	0.01395
10	0.14241	162.74	23.1758034	23.14	0.14219	10	03:53.666	04:05.866	00:12.200	12.200	0.00820
11	0.14241	162.74	23.1758034	23.37	0.14360	10	04:04.466	04:10.433	00:05.967	5.967	0.01676
12	0.14241	162.74	23.1758034	23.04	0.14158	10	04:16.333	04:23.266	00:06.933	6.933	0.01442
					0.14245						0.01419

En las tablas, la columna con el título PIX FOT/mm significa a cuanto equivale en pixeles un milímetro lineal para cada caso, PIX TEORICO significa diámetro D_{50} teórico de milímetros a pixeles. La columna con la etiqueta PIXELES MEDIDOS significa el diámetro en pixeles de las partículas seleccionadas; D50 MEDIDO es la conversión del diámetro en pixeles medidos a unidades de milímetros; DISTANCIA es el trayecto grabado en los videos de las partículas. A su vez, el primer recuadro marcado con rojo (izquierda) es el diámetro D_{50} promedio, mientras que en el segundo recuadro marcado con el mismo color es la velocidad de caída como mediana.

7.1.4. Resultados de las “Propiedades de Volumen” de las muestras de arena

A continuación se presentan los resultados al aplicar las ecuaciones y tablas de los apartados 1.1 y 1.2

Número	Sitio	Sección de la playa	Long (°)	Lat (°)	X (UTM)	Y (UTM)
1	Boca Sur	Zona foreshore	-86.795388	21.035789	521259.99925	2326122.11750
2	Boca Sur	Zona offshore	-86.795388	21.035789	521259.99925	2326122.11750
3	Puerto Morelos estacion UNAM	Zona backshore	-86.867322	20.868031	513801.13745	2307548.01387
4	Puerto Morelos estacion UNAM	Zona foreshore	-86.867322	20.868031	513801.13745	2307548.01387
5	Puerto Morelos estacion UNAM	Zona offshore	-86.867322	20.868031	513801.13745	2307548.01387
6	Puerto Morelos 2	Zona backshore	-86.865947	20.870775	513943.91193	2307851.86314
7	Puerto Morelos 2	Zona foreshore	-86.865947	20.870775	513943.91193	2307851.86314
8	Puerto Morelos 2	Zona offshore	-86.865947	20.870775	513943.91193	2307851.86314
9	Puerto Morelos 3	Zona backshore	-86.868633	20.865994	513664.93969	2307322.56201
10	Puerto Morelos 3	Zona foreshore	-86.868633	20.865994	513664.93969	2307322.56201
11	Puerto Morelos 3	Zona offshore	-86.868633	20.865994	513664.93969	2307322.56201
12	Pto 1	Zona backshore	-86.745236	21.133473	526453.78847	2336940.78709
13	Pto 1	Zona foreshore	-86.745236	21.133473	526453.78847	2336940.78709
14	Pto 1	Zona offshore	-86.745236	21.133473	526453.78847	2336940.78709
15	Pto 2	Zona backshore	-86.748163	21.130361	526150.40474	2336595.85469
16	Pto 2	Zona foreshore	-86.748163	21.130361	526150.40474	2336595.85469
17	Pto 2	Zona offshore	-86.748163	21.130361	526150.40474	2336595.85469
18	Pto 3	Zona backshore	-86.749445	21.128680	526017.61265	2336409.63251
19	Pto 3	Zona foreshore	-86.749445	21.128680	526017.61265	2336409.63251
20	Pto 3	Zona offshore	-86.749445	21.128680	526017.61265	2336409.63251
21	Pto 4	Zona backshore	-86.757777	21.114632	525154.72455	2334853.49702
22	Pto 4	Zona foreshore	-86.757777	21.114632	525154.72455	2334853.49702
23	Pto 4	Zona offshore	-86.757777	21.114632	525154.72455	2334853.49702
24	Pto 4A	Zona backshore	-86.763100	21.103600	524605.00000	2333629.00000
25	Pto 4A	Zona foreshore o lavado	-86.763100	21.103600	524605.00000	2333629.00000
26	Pto 4A	Zona offshore	-86.763100	21.103600	524605.00000	2333629.00000
27	Pto 5	Zona backshore	-86.766819	21.094482	524218.96383	2332622.05869
28	Pto 5	Zona foreshore	-86.766819	21.094482	524218.96383	2332622.05869
29	Pto 5	Zona offshore	-86.766819	21.094482	524218.96383	2332622.05869
30	Pto 6	Zona backshore	-86.774186	21.074593	523456.94766	2330419.66125
31	Pto 6	Zona foreshore	-86.774186	21.074593	523456.94766	2330419.66125
32	Pto 6	Zona offshore	-86.774186	21.074593	523456.94766	2330419.66125
33	Pto 7	Zona backshore	-86.779073	21.060425	522951.51962	2328850.96251
34	Pto 7	Zona foreshore	-86.779073	21.060425	522951.51962	2328850.96251
35	Pto 7	Zona offshore	-86.779073	21.060425	522951.51962	2328850.96251
36	Pto 8	Zona backshore	-86.781970	21.047213	522652.51283	2327388.34379
37	Pto 8	Zona foreshore o lavado	-86.781970	21.047213	522652.51283	2327388.34379
38	Pto 8	Zona offshore	-86.781970	21.047213	522652.51283	2327388.34379
39	Pto 9	Zona backshore	-86.781857	21.042325	522664.98445	2326847.39345
40	Pto 9	Zona foreshore o lavado	-86.781857	21.042325	522664.98445	2326847.39345
41	Pto 9	Zona offshore	-86.781857	21.042325	522664.98445	2326847.39345
42	Pto 10	Zona backshore	-86.779980	21.036869	522860.88208	2326243.76931

ANEXOS

43	Pto 10	Zona foreshore	-86.779980	21.036869	522860.88208	2326243.76931
44	Pto 10	Intermedio	-86.779980	21.036869	522860.88208	2326243.76931
45	Pto 10	Zona offshore	-86.779980	21.036869	522860.88208	2326243.76931
46	Pto A	Zona backshore	-86.751098	21.139611	525843.99928	2337619.14409
47	Pto A	Zona foreshore o lavado	-86.751098	21.139611	525843.99928	2337619.14409
48	Pto A	Zona offshore	-86.751098	21.139611	525843.99928	2337619.14409
49	Pto B	Zona backshore	-86.748749	21.139200	526087.99997	2337574.02831
50	Pto B	Zona foreshore o lavado	-86.748749	21.139200	526087.99997	2337574.02831
51	Pto B	Zona offshore	-86.748749	21.139200	526087.99997	2337574.02831
52	Pto C	Zona backshore	-86.774225	21.143898	523442.00984	2338090.00042
53	Pto C	Zona foreshore o lavado	-86.774225	21.143898	523442.00984	2338090.00042
54	Pto C	Zona offshore	-86.774225	21.143898	523442.00984	2338090.00042
55	Pto D	Zona backshore	-86.787015	21.143951	522114.00058	2338094.00106
56	Pto D	Zona foreshore o lavado	-86.787015	21.143951	522114.00058	2338094.00106
57	Pto D	Zona offshore	-86.787015	21.143951	522114.00058	2338094.00106
58	Pto E	Zona backshore	-86.785367	21.144653	522285.00016	2338171.94086
59	Pto E	Zona foreshore o lavado	-86.785367	21.144653	522285.00016	2338171.94086
60	Pto E	Zona offshore	-86.785367	21.144653	522285.00016	2338171.94086
61	Pto F	Zona backshore	-86.806042	21.176700	520133.99938	2341716.01568
62	Pto F	Zona foreshore	-86.806042	21.176700	520133.99938	2341716.01568
63	Pto F	Rompiente	-86.806042	21.176700	520133.99938	2341716.01568
64	Pto F	Zona offshore	-86.806042	21.176700	520133.99938	2341716.01568
65	Pto G	Zona backshore	-86.802131	21.241117	520531.15916	2348845.89378
66	Pto G	Zona foreshore o lavado	-86.802131	21.241117	520531.15916	2348845.89378
67	Pto G	Zona offshore	-86.802131	21.241117	520531.15916	2348845.89378
68	Isla Mujeres	Zona backshore	-86.751200	21.260200	528811.61140	2350961.74780
69	Isla Mujeres	Zona foreshore	-86.751200	21.260200	528811.61140	2350961.74780
70	Isla Mujeres	Zona offshore	-86.751200	21.260200	528811.61140	2350961.74780
71	Tulum A	Zona backshore	-87.436390	20.197990	454407.29030	2233452.17410
72	Tulum A	Zona foreshore	-87.436390	20.197990	454407.29030	2233452.17410
73	Tulum A	Zona offshore	-87.436390	20.197990	454407.29030	2233452.17410
74	Tulum B	Zona backshore	-87.447720	20.173680	453219.45840	2230766.16130
75	Tulum B	Zona foreshore	-87.447720	20.173680	453219.45840	2230766.16130
76	Tulum B	Zona offshore	-87.447720	20.173680	453219.45840	2230766.16130
77	Sian Ka'an	Zona backshore	-87.466400	20.119660	451248.69260	2224795.64540
78	Sian Ka'an	Zona foreshore o lavado	-87.466400	20.119660	451248.69260	2224795.64540
79	Sian Ka'an	Zona offshore	-87.466400	20.119660	451248.69260	2224795.64540
80	Bahia Principe	Zona backshore	-87.332060	20.364280	465345.12790	2251828.36440
82	Bahia Principe	Zona offshore	-87.332060	20.364280	465345.12790	2251828.36440
83	Akumal 1	Zona backshore	-87.315310	20.394660	467099.66410	2255187.02400
84	Akumal 1	Zona foreshore o lavado	-87.315310	20.394660	467099.66410	2255187.02400
85	Akumal 1	Zona offshore	-87.315310	20.394660	467099.66410	2255187.02400
86	Akumal 2	Zona backshore	-87.319100	20.391600	466699.88580	2254845.03610
87	Akumal 2	Zona foreshore o lavado	-87.319100	20.391600	466699.88580	2254845.03610
88	Akumal 2	Zona offshore	-87.319100	20.391600	466699.88580	2254845.03610
90	Playa del Carmen 2	Zona foreshore	-87.071708	20.625218	492529.00000	2280672.00000
91	Punta Brava 1	Zona foreshore	-86.911012	20.812073	509260.00000	2301352.00000
92	Punta Brava 1	Zona offshore	-86.911012	20.812073	509260.00000	2301352.00000
93	Punta Brava 2	Zona foreshore	-86.902331	20.815619	510163.00000	2301745.00000

INSTITUTO DE INGENIERÍA

94	Punta Brava 3	Zona foreshore	-86.898100	20.832100	510531.20320	2413250.28920
95	Punta Allen	Zona backshore	-87.474300	19.797600	450321.03400	2189154.53700
96	Punta Allen	Zona foreshore	-87.474300	19.797600	450321.03400	2189154.53700
97	Punta Allen	Zona offshore	-87.474300	19.797600	450321.03400	2189154.53700
98	Holbox	Zona backshore	-87.382900	21.523200	460346.35000	2380104.77420
99	Holbox	Zona foreshore	-87.382900	21.523200	460346.35000	2380104.77420
100	Holbox	Zona offshore	-87.382900	21.523200	460346.35000	2380104.77420
101	Chelem	A	-89.748180	21.256660	214789.98600	2352896.45900
102	Chelem	B	-89.748180	21.256660	214789.98600	2352896.45900
103	Chelem	C	-89.748180	21.256660	214789.98600	2352896.45900
104	Chelem	D	-89.748180	21.256660	214789.98600	2352896.45900
105	Dzilam	B	-88.930920	21.387530	299812.67000	2366129.04900
106	Dzilam	C	-88.930920	21.387530	299812.67000	2366129.04900
107	Dzilam	D	-88.930920	21.387530	299812.67000	2366129.04900
108	ECCA	A	-89.817470	21.255520	207592.83400	2352896.39100
109	ECCA	B	-89.817470	21.255520	207592.83400	2352896.39100
110	ECCA	C	-89.817470	21.255520	207592.83400	2352896.39100
111	ECCA	D	-89.817470	21.255520	207592.83400	2352896.39100
112	Progreso	A	-89.651170	21.290190	224925.49300	2356437.03700
113	Progreso	B	-89.651170	21.290190	224925.49300	2356437.03700
114	Progreso	C	-89.651170	21.290190	224925.49300	2356437.03700
115	Progreso	D	-89.651170	21.290190	224925.49300	2356437.03700
116	Telchac	A	-89.279190	21.343420	263622.76600	2361728.63400
117	Telchac	B	-89.279190	21.343420	263622.76600	2361728.63400
118	Telchac	C	-89.279190	21.343420	263622.76600	2361728.63400
120	Uay	A	-89.523200	21.313220	238251.10500	2358769.93000
121	Uay	B	-89.523200	21.313220	238251.10500	2358769.93000
122	Uay	C	-89.523200	21.313220	238251.10500	2358769.93000
123	Uay	D	-89.523200	21.313220	238251.10500	2358769.93000
151	Playa Isla Carmen	Dunas	-91.553250	18.768620	652494.34050	2075720.75480
152	Playa Isla Carmen	Swash	-91.553250	18.768620	652494.34050	2075720.75480
153	Punta Xen	Swash	-90.898130	19.187800	721014.87650	2122813.11810
154	Punta Xen	Dunas	-90.898130	19.187800	721014.87650	2122813.11810
155	Bahía Tortugas	Dunas	-91.036110	19.096170	706614.94910	2112501.14430
156	Bahía Tortugas	Swash	-91.036110	19.096170	706614.94910	2112501.14430
157	Bahía Tortugas	Profundidad	-91.036110	19.096170	706614.94910	2112501.14430
158	Beach Paraiso Yalma Kan	foreshore	-86.779100	21.036315	522952.58900	2326182.65000
159	F.A. Condesa	foreshore	-86.772200	21.080704	523662.22800	2331096.28000
160	Gran Caribe Real	foreshore	-86.754390	21.120602	525505.35000	2335514.72000
161	Hilton	foreshore	-86.777370	21.066047	523127.64700	2329473.43000
162	Hilton cerca de corral	foreshore	-86.776700	21.068025	523196.55000	2329692.44000
163	Royal Sands	foreshore	-86.865620	21.097673	524342.90000	2332975.34000
164	Royal Solaris	foreshore	-86.781800	21.049700	522866.70000	2328572.66000
165	Carissa Palma	backshore	-86.747590	21.131288	526209.68000	2336698.57000
166	Club Regina	backshore	-86.781680	21.039634	522683.85000	2326549.59000
167	Gran Melia	backshore	-86.771210	21.083382	523764.99700	2331392.86000
168	Hyatt Cancún Caribe	backshore	-86.753500	21.122620	525597.44000	2335738.23000
169	Ritz Carlton	backshore	-86.767450	21.093018	524153.22700	2332459.86000
170	Sheraton	backshore	-86.760610	21.109422	524861.82000	2331392.86000

ANEXOS

Número	D ₅ (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₁₆ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm) teórico	D ₆₀ (mm)	D ₇₅ (mm)	D ₈₄ (mm)	D ₉₅ (mm)
1	0.10269	0.12302	0.13877	0.16474	0.29736	0.43297	0.63436	0.89039	4.07440
2	0.13813	0.15011	0.15904	0.16920	0.19653	0.21435	0.25007	0.27126	0.33516
3	0.14076	0.15439	0.16297	0.18503	0.24864	0.27315	0.30637	0.34009	0.46788
4	0.24059	0.26837	0.28976	0.31838	0.37452	0.41995	0.76866	0.87818	1.23860
5	0.17612	0.20391	0.22950	0.27487	0.32537	0.37566	0.53510	0.60175	0.83699
6	0.12295	0.13422	0.14349	0.15501	0.17223	0.19931	0.27309	0.31584	0.45954
7	0.13224	0.14441	0.15375	0.16578	0.20440	0.23741	0.28224	0.31556	0.43223
8	0.11256	0.13704	0.15286	0.28573	0.47531	0.54285	0.60800	0.67212	0.94252
9	0.14587	0.15988	0.16919	0.22077	0.28246	0.30194	0.34353	0.39203	0.51870
10	0.11315	0.12912	0.14174	0.16062	0.22893	0.27494	0.33971	0.41740	0.56348
11	0.1266	0.14522	0.15821	0.21953	0.30353	0.33831	0.45279	0.54517	0.72983
12	0.22946	0.26103	0.28125	0.30849	0.33938	0.37043	0.44732	0.51043	0.59749
13	0.30287	0.32777	0.34345	0.41964	0.52089	0.54930	0.58859	0.63071	0.72734
14	0.14713	0.16107	0.17087	0.22490	0.28665	0.30938	0.36384	0.43792	0.56773
15	0.15172	0.16517	0.17343	0.21241	0.26592	0.28430	0.32051	0.36056	0.54173
16	0.24989	0.28916	0.31918	0.41112	0.53833	0.56602	0.60710	0.65163	0.77741
17	0.18255	0.21052	0.23379	0.27780	0.33490	0.41888	0.57378	0.65195	0.94954
18	0.15848	0.17320	0.19993	0.25966	0.31812	0.37228	0.55479	0.65225	1.24220
19	0.26085	0.29384	0.31730	0.37817	0.50765	0.54642	0.59215	0.63932	0.77838
20	0.21217	0.24098	0.27045	0.32200	0.53203	0.60064	0.75339	1.00590	2.44530
21	0.14966	0.16472	0.17625	0.22780	0.28958	0.32155	0.45461	0.56216	0.80080
22	0.28181	0.31107	0.32997	0.40462	0.52691	0.55949	0.60788	0.65882	0.82252
23	0.23289	0.26948	0.29482	0.33620	0.47960	0.54220	0.61392	0.68880	1.04300
24	0.15541	0.17049	0.19264	0.24811	0.29727	0.32458	0.43356	0.54549	0.77367
25	0.12235	0.13535	0.14611	0.16107	0.19863	0.23543	0.28100	0.31039	0.39684
26	0.31039	0.33951	0.40768	0.53733	0.60798	0.64070	0.72665	0.82783	1.21700
27	0.17287	0.22061	0.26169	0.30968	0.42156	0.51229	0.59170	0.66086	0.99270
28	0.27515	0.29993	0.31721	0.34145	0.42090	0.47011	0.53500	0.56717	0.66411
29	0.28862	0.31756	0.33892	0.44525	0.56421	0.60391	0.69538	0.81574	1.42790
30	0.27745	0.30577	0.32384	0.36870	0.47484	0.52316	0.56821	0.60982	0.71121
31	0.12765	0.14104	0.15122	0.16558	0.22123	0.26447	0.33665	0.45488	0.85783
32	0.1348	0.14730	0.15631	0.16851	0.21759	0.25493	0.30885	0.44335	1.12520
33	0.2872	0.32000	0.34641	0.45212	0.55748	0.58993	0.66158	0.74566	1.32800
34	0.51975	0.56408	0.60151	0.64812	0.71707	0.76337	0.84250	0.92276	1.15350
35	0.553	0.60866	0.64543	0.71795	0.86964	0.97462	1.28950	1.70630	3.21920
36	0.20653	0.26715	0.29988	0.36303	0.52048	0.56606	0.63411	0.70569	0.97052
37	0.34475	0.40012	0.45675	0.53492	0.58752	0.60930	0.66122	0.71430	0.90435
38	0.29027	0.32277	0.36970	0.53148	0.63587	0.70403	0.90557	1.15970	2.16450
39	0.17841	0.22487	0.26144	0.30584	0.39511	0.48795	0.48795	0.67297	0.98751
40	0.29638	0.32213	0.33845	0.42621	0.53931	0.56925	0.61984	0.67283	0.83927
41	0.31503	0.34067	0.39128	0.50928	0.59835	0.64173	0.75578	0.90399	1.42680
42	0.17816	0.21815	0.25231	0.29350	0.34617	0.41691	0.55202	0.62651	0.92785
43	0.21138	0.25059	0.27582	0.31002	0.38976	0.48276	0.58005	0.64638	0.84042
44	0.1662	0.17864	0.20547	0.25832	0.30808	0.34336	0.49210	0.57450	0.80968
45	0.14108	0.15394	0.16247	0.17468	0.21476	0.23932	0.27608	0.30640	0.46165
46	0.12367	0.14210	0.15500	0.18799	0.27649	0.30466	0.38736	0.51759	0.73119
47	0.15443	0.16744	0.17459	0.20422	0.24297	0.26219	0.28249	0.30321	0.35238

INSTITUTO DE INGENIERÍA

48	0.15312	0.16552	0.17540	0.22752	0.29094	0.32556	0.48778	0.64400	1.30300
49	0.13852	0.15008	0.15896	0.16853	0.18976	0.20273	0.22807	0.25123	0.29647
50	0.09129	0.11194	0.12736	0.14489	0.15964	0.17027	0.20504	0.24825	0.28629
51	0.13569	0.14758	0.15664	0.16740	0.19687	0.21920	0.26033	0.28427	0.37051
52	0.14869	0.16284	0.17069	0.19730	0.23762	0.25943	0.28405	0.30937	0.40465
53	0.16769	0.16007	0.16836	0.19562	0.24432	0.26652	0.29486	0.32539	0.47856
54	0.16769	0.21044	0.27023	0.41767	0.62717	0.71113	0.91968	1.12950	1.73750
55	0.16769	0.16399	0.18120	0.23194	0.28456	0.30704	0.37287	0.50211	1.00440
56	0.16769	0.24093	0.27319	0.31650	0.43750	0.52276	0.60836	0.69243	1.12790
57	0.16769	0.16497	0.18851	0.24667	0.29811	0.32869	0.47568	0.60806	1.10970
58	0.15488	0.17105	0.18890	0.22786	0.27059	0.28413	0.31195	0.34231	0.50777
59	0.13156	0.15896	0.18684	0.26023	0.30841	0.33701	0.44414	0.53715	0.71613
60	0.11406	0.14678	0.16943	0.23728	0.30352	0.34288	0.50631	0.59696	0.93077
61	0.1289	0.14219	0.15285	0.16733	0.20091	0.22355	0.26185	0.28080	0.33918
62	0.10604	0.12573	0.13983	0.16074	0.20975	0.24837	0.29114	0.33488	0.72898
63	0.13967	0.18154	0.29423	0.76077	2.01420	2.54090	3.84730	5.48310	11.76770
64	0.05957	0.06526	0.07070	0.08257	0.12014	0.13943	0.18814	0.63532	2.52440
65	0.15902	0.14978	0.18684	0.17441	0.23033	0.26107	0.29712	0.33323	0.50200
66	0.16769	0.14594	0.15617	0.18071	0.26711	0.29563	0.35484	0.44628	0.58892
67	0.13648	0.15369	0.17109	0.27558	0.43786	0.55819	0.70824	0.89202	1.55330
68	0.15322	0.16673	0.17857	0.22919	0.27605	0.28914	0.31408	0.34019	0.42832
69	0.14521	0.15802	0.16579	0.17889	0.21673	0.23786	0.26722	0.28367	0.33265
70	0.14159	0.15480	0.16292	0.18300	0.24870	0.27398	0.30902	0.34538	0.49459
71	0.12066	0.13319	0.14337	0.15710	0.17501	0.19343	0.23625	0.26572	0.33017
72	0.10534	0.12160	0.13231	0.14772	0.16206	0.17291	0.20635	0.24232	0.29877
73	0.11042	0.12921	0.14253	0.16234	0.22540	0.26728	0.32123	0.40689	0.64232
74	0.12918	0.14164	0.15165	0.16447	0.19527	0.22145	0.26465	0.28741	0.35015
75	0.14313	0.15534	0.16302	0.17430	0.22089	0.25178	0.30225	0.35731	0.57035
76	0.14431	0.15689	0.16449	0.17816	0.22440	0.25478	0.31102	0.43280	0.90000
77	0.15396	0.16681	0.18137	0.23907	0.29168	0.31477	0.37952	0.47540	0.62241
78	0.14762	0.16131	0.16921	0.20037	0.25556	0.27735	0.31787	0.36975	0.59369
79	0.15158	0.16645	0.19235	0.27196	0.35992	0.50439	0.62526	0.72507	1.03100
80	0.28029	0.31105	0.33044	0.39142	0.49694	0.53818	0.58844	0.63916	0.78543
82	0.31424	0.34581	0.43160	0.59265	0.86763	1.13340	1.83830	2.35960	4.38170
83	0.089469	0.10472	0.11765	0.13751	0.15406	0.16568	0.21296	0.27361	0.52332
84	0.076104	0.08412	0.09512	0.12410	0.15266	0.17692	0.33110	0.54771	0.69064
85	0.075482	0.08530	0.09818	0.12644	0.14863	0.16298	0.25356	0.41184	0.67492
86	0.10752	0.14058	0.16142	0.29761	0.57821	0.63735	0.75661	0.86048	1.13750
87	0.078832	0.08693	0.09853	0.12247	0.14380	0.15311	0.17851	0.23763	0.66688
88	0.066716	0.07331	0.07878	0.09038	0.11422	0.12777	0.14358	0.15987	0.25979
90	0.15406	0.16693	0.17916	0.22990	0.27936	0.29555	0.33094	0.37281	0.53701
91	0.35832	0.44657	0.51510	0.59769	0.69485	0.77825	0.96888	1.15940	1.76090
92	0.3412	0.39275	0.44849	0.53833	0.61313	0.66225	0.82924	1.09870	2.68700
93	0.5277	0.63006	0.73131	0.97588	1.30940	1.51700	1.91340	2.17060	3.08470
94	0.17482	0.19576	0.21649	0.25259	0.28946	0.30776	0.35489	0.45022	0.61754
95	0.09704	0.12033	0.13610	0.15660	0.24579	0.30466	0.55498	0.69913	1.54610
96	0.087375	0.09927	0.11021	0.12957	0.14643	0.15646	0.19175	0.28280	0.74225
97	0.054699	0.05663	0.05924	0.06629	0.07883	0.08777	0.11201	0.13219	0.17337
98	0.089701	0.10053	0.10965	0.12419	0.13879	0.14346	0.15469	0.16712	0.24147

ANEXOS

99	0.10196	0.11838	0.13253	0.14985	0.48604	0.64918	0.87878	1.13580	3.29920
100	0.083233	0.09036	0.09930	0.11385	0.13212	0.13800	0.14867	0.16064	0.19816
101	0.16585	0.20042	0.24841	0.29567	0.34529	0.39064	0.48848	0.55805	0.65918
102	0.19124	0.25765	0.30780	0.49757	0.66675	0.81743	1.35700	2.30810	3.17320
103	0.11388	0.13618	0.14958	0.17073	0.25223	0.28788	0.40011	0.58161	1.15560
104	0.10154	0.11944	0.13328	0.15287	0.19013	0.23684	0.29802	0.36484	0.62731
105	0.1592	0.17644	0.21735	0.28403	0.37288	0.52186	0.68878	0.96006	2.22010
106	0.15807	0.17196	0.20169	0.26939	0.33407	0.44349	0.62238	0.78989	1.66360
107	0.16156	0.18126	0.22412	0.29039	0.43509	0.56200	0.74159	1.02360	2.09200
108	0.17135	0.19951	0.23271	0.27833	0.31699	0.34490	0.44272	0.52707	0.64788
109	0.16816	0.21187	0.26152	0.32649	0.54234	0.60419	0.76145	1.09140	2.87150
110	0.11708	0.13513	0.14780	0.16679	0.22674	0.26238	0.30036	0.34059	0.55379
111	0.11896	0.13763	0.15208	0.18068	0.24853	0.27189	0.29893	0.32740	0.46020
112	0.1508	0.16488	0.18364	0.25895	0.32116	0.37657	0.54680	0.64052	1.17940
113	0.15989	0.31966	0.54560	0.68538	0.96083	1.19500	1.83040	2.30810	3.33410
114	0.098755	0.11588	0.12922	0.14805	0.17309	0.20490	0.27080	0.29958	0.42439
115	0.097937	0.11663	0.12926	0.14560	0.16023	0.17169	0.21450	0.26031	0.37099
116	0.16571	0.18840	0.23119	0.29342	0.43442	0.54997	0.67715	0.83949	1.54960
117	0.13916	0.15547	0.17230	0.28240	0.51656	0.59997	0.76154	1.00260	2.43350
118	0.1102	0.12810	0.14037	0.15744	0.19140	0.22826	0.27717	0.30757	0.46913
120	0.16601	0.19185	0.23224	0.28361	0.33087	0.37891	0.52170	0.58779	0.78512
121	0.16436	0.19875	0.25929	0.35906	0.57784	0.62924	0.76343	0.94750	2.12810
122	0.10433	0.12388	0.13746	0.15645	0.20385	0.25300	0.30728	0.38099	0.62475
123	0.096474	0.11415	0.12827	0.14776	0.17554	0.21706	0.28614	0.33323	0.57040
151	0.12723	0.14069	0.15137	0.16614	0.20672	0.23752	0.27608	0.30438	0.50324
152	0.11819	0.14136	0.15749	0.23747	0.50478	0.66611	1.01320	1.29710	1.75060
153	0.10332	0.12168	0.13298	0.14902	0.16440	0.17662	0.21275	0.24789	0.30133
154	0.13065	0.14314	0.15295	0.16549	0.19985	0.22849	0.27031	0.29537	0.39776
155	0.17652	0.22772	0.26664	0.31424	0.43565	0.52161	0.60768	0.68849	1.01960
156	0.29137	0.52295	0.62338	0.76581	0.98078	1.14520	1.48980	1.77530	2.16550
157	0.073004	0.08113	0.09033	0.12185	0.14241	0.14833	0.16097	0.17466	0.23476
158	0.29555	0.32362	0.34523	0.44036	0.54055	0.56463	0.60380	0.64588	0.74157
159	0.28288	0.31248	0.33044	0.39083	0.50035	0.53723	0.57579	0.61518	0.70703
160	0.25903	0.28924	0.31111	0.35532	0.48338	0.53343	0.58173	0.62731	0.74715
161	0.33955	0.42473	0.50545	0.57737	0.63184	0.66210	0.73478	0.78610	0.94340
162	0.31365	0.34017	0.38577	0.49248	0.56361	0.58439	0.62648	0.67081	0.78004
163	0.25918	0.28550	0.30532	0.33213	0.42180	0.48513	0.54520	0.57540	0.66552
164	0.30285	0.32878	0.35820	0.47651	0.56224	0.58593	0.63206	0.68045	0.81095
165	0.24848	0.27329	0.29365	0.32007	0.37587	0.43019	0.52104	0.55523	0.65757
166	0.25207	0.27731	0.29762	0.32411	0.39001	0.44744	0.53321	0.57441	0.69304
167	0.16873	0.18110	0.19813	0.22524	0.26005	0.27202	0.29217	0.31539	0.39846
168	0.20742	0.24808	0.27282	0.30670	0.35964	0.42181	0.52670	0.56428	0.66799
169	0.21341	0.25665	0.28059	0.31198	0.36879	0.43548	0.53474	0.57500	0.68817
170	0.14418	0.15828	0.16652	0.19315	0.25012	0.27249	0.30773	0.35043	0.62270

Número	Cc [1]	Cu [1]	Coral	Arena	Finos	SUCS	Wentworth	ASTM	d_{medio} (mm)	σ (mm)	a_{se} [1]	k [1]
1	0.50953	3.51960	2.66440	94.49	2.85	SP	Arena media	Arena fina	0.33244	2.93930	0.81161	0.47728
2	1.42790	0.88975	0.00000	99.88	0.12	SP	Arena fina	Arena fina	0.20391	1.32470	0.86708	0.54048
3	0.81185	1.76920	0.00000	99.82	0.18	SP	Arena fina	Arena fina	0.23975	1.46830	1.03380	0.54844
4	0.89944	1.56480	0.00000	99.96	0.04	SP	Arena media	Arena media	0.45677	1.73380	0.70783	0.59919
5	0.98634	1.84230	0.00000	99.96	0.04	SP	Arena media	Arena fina	0.35552	1.65000	0.84435	0.53947
6	0.89822	1.48490	0.00000	99.12	0.88	SP	Arena fina	Arena fina	0.19837	1.51740	0.70081	0.52809
7	0.80159	1.64400	0.00000	99.77	0.23	SP	Arena fina	Arena fina	0.21485	1.45810	0.84895	0.54609
8	1.09740	3.96140	0.00000	97.75	2.25	SP	Arena media	Arena fina	0.36552	2.06350	1.36030	0.55116
9	1.00960	1.88850	0.00000	99.82	0.18	SP	Arena media	Arena fina	0.26559	1.52430	1.09490	0.51977
10	0.72674	2.12940	0.00000	98.55	1.45	SP	Arena fina	Arena fina	0.23837	1.71190	0.92201	0.56158
11	0.98096	2.32970	0.00000	98.71	1.29	SP	Arena media	Arena fina	0.29693	1.82440	1.01800	0.57353
12	0.98418	1.41910	0.00000	99.96	0.04	SP	Arena media	Arena fina	0.36523	1.36140	0.82601	0.50357
13	0.97811	1.67590	0.00000	100.00	0.00	SP	Arena media	Arena media	0.48322	1.34710	1.23470	0.54372
14	1.01500	1.92080	0.00000	99.85	0.15	SP	Arena media	Arena fina	0.27784	1.58460	1.03070	0.51989
15	0.96084	1.72130	0.00000	99.78	0.22	SP	Arena media	Arena fina	0.25524	1.48450	1.01740	0.47262
16	1.03270	1.95750	0.00000	99.98	0.02	SP	Arena media	Arena media	0.48198	1.44430	1.32740	0.52101
17	0.87516	1.98980	0.00000	99.99	0.01	SP	Arena media	Arena fina	0.37095	1.70100	0.82271	0.54613
18	1.04570	2.14950	0.00000	99.36	0.64	SP	Arena media	Arena fina	0.34618	1.89410	0.83001	0.49702
19	0.89072	1.85960	0.00000	9.97	0.03	SP	Arena media	Arena media	0.46873	1.42950	1.21410	0.55480
20	0.71634	2.49250	0.00000	100.00	0.00	SP	Arena gruesa	Arena media	0.52505	2.08720	0.92732	0.46741
21	0.97976	1.95210	0.00000	99.26	0.74	SP	Arena media	Arena fina	0.30614	1.76740	0.88371	0.54173
22	0.94072	1.79860	0.00000	99.99	0.01	SP	Arena media	Arena media	0.48565	1.42100	1.19840	0.53981
23	0.77356	2.01200	0.00000	99.96	0.04	SP	Arena media	Arena media	0.46009	1.58730	1.03900	0.51979
24	1.11240	1.90380	0.00000	99.44	0.56	SP	Arena media	Arena fina	0.31494	1.69510	0.88323	0.48784
25	0.81418	1.73940	0.00000	99.33	0.67	SP	Arena fina	Arena fina	0.20807	1.46880	0.88232	0.56542
26	1.32730	1.88710	0.00000	99.99	0.01	SP	Arena gruesa	Arena media	0.58982	1.49900	1.03980	0.33791
27	0.84858	2.32220	0.00000	99.47	0.53	SP	Arena media	Arena fina	0.41775	1.68690	1.01730	0.48939
28	0.82687	1.56740	0.00000	99.98	0.02	SP	Arena media	Arena fina	0.42307	1.33930	0.97885	0.59210
29	1.03380	1.90170	0.00000	99.98	0.02	SP	Arena gruesa	Arena media	0.53831	1.62590	0.99967	0.43606
30	0.84981	1.71100	0.00000	99.97	0.03	SP	Arena media	Arena media	0.45432	1.37040	1.12940	0.58268
31	0.73500	1.87510	0.00000	99.27	0.73	SP	Arena fina	Arena fina	0.24781	1.80910	0.77598	0.48174
32	0.75617	1.73070	0.00000	99.71	0.29	SP	Arena fina	Arena fina	0.24705	1.84830	0.72846	0.38592
33	1.08280	1.84350	0.00000	99.98	0.03	SP	Arena gruesa	Arena media	0.52415	1.56340	1.03800	0.39675
34	0.97551	1.35330	0.00000	100.00	0.00	SP	Arena gruesa	Arena media	0.73558	1.27110	0.87927	0.44792
35	0.86891	1.60130	1.63660	98.34	0.02	SP	Arena gruesa	Arena media	0.98570	1.71020	0.73903	0.45471
36	0.87148	2.11880	0.00000	99.63	0.37	SP	Arena media	Arena media	0.47935	1.60290	1.18230	0.50205
37	1.17370	1.52280	0.00000	100.00	0.00	SP	Arena gruesa	Arena media	0.57658	1.31330	1.08360	0.33859
38	1.24310	2.18120	0.00000	99.97	0.03	SP	Arena gruesa	Arena media	0.64842	1.86020	0.91045	0.39431
39	0.85244	2.16990	0.00000	99.71	0.29	SP	Arena media	Arena fina	0.41118	1.68460	0.93395	0.50038
40	0.99062	1.76710	0.00000	99.98	0.02	SP	Arena media	Arena media	0.49707	1.41240	1.19190	0.52814
41	1.18640	1.88370	0.00000	99.98	0.02	SP	Arena gruesa	Arena media	0.59594	1.58580	0.95390	0.39953
42	0.94715	1.91110	0.00000	99.85	0.15	SP	Arena media	Arena fina	0.37965	1.65270	0.84107	0.49767
43	0.79444	1.92650	0.00000	99.94	0.06	SP	Arena media	Arena fina	0.41112	1.55730	0.90084	0.55230
44	1.08790	1.92210	0.10746	99.85	0.04	SP	Arena media	Arena fina	0.33131	1.68360	0.86078	0.53239
45	0.82828	1.55470	0.00000	99.81	0.19	SP	Arena fina	Arena fina	0.22029	1.42790	0.86711	0.50153
46	0.81627	2.14390	0.00000	98.31	1.69	SP	Arena media	Arena fina	0.28098	1.81780	0.95446	0.53782
47	0.95000	1.56580	0.00000	99.96	0.04	SP	Arena fina	Arena fina	0.23430	1.31720	1.10810	0.53629

ANEXOS

48	0.96062	1.96680	0.00000	99.93	0.07	SP	Arena media	Arena fina	0.32031	1.97790	0.80599	0.49013
49	0.93350	1.35080	0.00000	99.88	0.13	SP	Arena fina	Arena fina	0.19642	1.27290	0.87091	0.50680
50	1.10140	1.52110	0.00000	95.28	4.72	SP	Arena fina	Arena fina	0.17154	1.49730	0.83037	0.34737
51	0.86621	1.48520	0.00000	99.85	0.15	SP	Arena fina	Arena fina	0.20619	1.37220	0.84324	0.53885
52	0.92145	1.59320	0.00000	99.85	0.15	SP	Arena fina	Arena fina	0.23238	1.37100	1.01720	0.50786
53	0.89697	1.66500	0.00000	99.82	0.18	SP	Arena fina	Arena fina	0.23743	2.11120	0.99950	0.49043
54	1.16570	3.37920	0.00000	99.94	0.06	SP	Arena gruesa	Arena media	0.57633	2.11120	1.11180	0.51236
55	1.06840	1.87230	0.00000	98.39	1.61	SP	Arena media	Arena fina	0.29583	1.78520	0.86789	0.36717
56	0.79535	2.16980	0.00000	99.88	0.12	SP	Arena media	Arena media	0.43579	1.69690	0.98188	0.48508
57	1.99250	1.12210	0.00000	98.46	1.54	SP	Arena media	Arena fina	0.32450	1.88880	0.84265	0.45285
58	1.06820	1.66110	0.00000	99.43	0.57	SP	Arena media	Arena fina	0.25961	1.41410	1.05290	0.40346
59	1.26410	2.12010	0.00000	98.13	1.87	SP	Arena media	Arena fina	0.31398	1.72700	0.45781	0.29879
60	1.11870	2.33600	0.00000	96.91	3.09	SP	Arena media	Arena fina	0.31312	1.94400	0.95208	0.50367
61	0.88086	1.57220	0.00000	99.42	0.58	SP	Arena media	Arena fina	0.20506	1.36790	0.93834	0.56139
62	0.82741	1.97540	0.00000	97.53	2.47	SP	Arena fina	Arena fina	0.21415	1.71540	0.88153	0.42329
63	1.25470	13.99610	9.05600	89.53	1.42	SW	Arena muy gruesa	Arena media	1.48120	4.35030	1.19710	0.50903
64	0.74929	2.13650	0.00000	63.73	36.27	SP	Arena fina	Arena fina	0.17540	3.23290	0.67302	0.29879
65	0.77789	1.74310	0.00000	99.72	0.28	SP	Arena fina	Arena fina	0.23024	1.49490	0.93480	0.52347
66	0.75688	2.02570	0.00000	99.74	0.26	SP	Arena media	Arena fina	0.26503	1.66930	0.98888	0.56351
67	0.88521	3.63180	0.00000	99.61	0.39	SP	Arena media	Arena fina	0.40580	2.26630	1.03410	0.52374
68	1.08960	1.73420	0.00000	99.65	0.35	SP	Arena media	Arena fina	0.25596	1.39440	1.18790	0.47875
69	0.85142	1.50530	0.00000	99.94	0.06	SP	Arena fina	Arena fina	0.21682	1.31310	0.98756	0.58433
70	0.78956	1.76990	0.00000	99.83	0.17	SP	Arena fina	Arena fina	0.24098	1.48630	1.00930	0.54390
71	0.95795	1.45220	0.00000	98.82	1.18	SP	Arena fina	Arena fina	0.18821	1.37990	0.80809	0.51653
72	1.03780	1.42200	0.00000	97.81	2.19	SP	Arena fina	Arena fina	0.17320	1.38410	0.84000	0.44373
73	0.76313	2.06860	0.00000	97.98	2.02	SP	Arena fina	Arena fina	0.23557	1.74320	0.89639	0.50165
74	0.86238	1.56350	0.00000	99.40	0.60	SP	Arena fina	Arena fina	0.20417	1.38540	0.87642	0.56724
75	0.77681	1.62090	0.00000	99.94	0.06	SP	Arena fina	Arena fina	0.23433	1.53200	0.81281	0.50839
76	0.79411	1.62400	0.00000	99.93	0.08	SP	Arena media	Arena fina	0.25185	1.72790	0.73828	0.41832
77	1.08850	1.88690	0.00000	99.94	0.06	SP	Arena media	Arena fina	0.29299	1.60600	0.96625	0.48643
78	0.89740	1.71930	0.00000	99.95	0.05	SP	Arena media	Arena fina	0.25193	1.53320	0.94723	0.47440
79	0.88097	3.03020	0.00000	99.83	0.18	SP	Arena media	Arena fina	0.36889	1.91800	0.94818	0.55236
80	0.91522	1.73020	0.00000	99.95	0.05	SP	Arena muy gruesa	Arena media	0.47170	1.40030	1.12840	0.54108
82	0.89616	3.27750	1.22560	98.75	0.03	SP	Arena gruesa	Arena media	0.95959	2.37230	0.86842	0.53895
83	1.08990	1.58220	0.00000	94.85	5.15	SP	Arena media	Arena fina	0.17053	1.65760	0.77229	0.35130
84	1.03480	2.10330	0.00000	86.43	13.57	SP	Arena fina	Arena fina	0.19961	2.23720	0.75046	0.55555
85	1.15000	1.91080	0.00000	87.64	12.36	SP	Arena fina	Arena fina	0.18181	2.06180	0.75707	0.44625
86	0.98857	4.53380	0.00000	96.56	3.44	SP	Arena media	Arena media	0.43145	2.25130	1.39050	0.54163
87	1.12700	1.76120	0.00000	88.28	11.72	SP	Arena fina	Arena fina	0.14988	1.77890	0.81844	0.25486
88	0.87210	1.74290	0.00000	70.34	29.66	SP	Arena muy fina	Arena fina	0.11289	1.49700	0.94634	0.47440
90	1.07130	1.77060	0.00000	99.92	0.08	SP	Arena media	Arena fina	0.26523	1.47890	1.05910	0.45116
91	1.02790	1.74270	0.00000	99.93	0.07	SP	Arena gruesa	Arena fina	0.74588	1.59710	0.86150	0.42149
92	1.11420	1.68620	0.00000	99.90	0.10	SP	Arena gruesa	Arena fina	0.67101	1.76460	0.77539	0.29651
93	0.99635	2.40780	0.00000	100.00	0.00	SP	Arena muy gruesa	Arena media	1.27620	1.76170	1.03540	0.51936
94	1.05900	1.57220	0.00000	99.97	0.03	SP	Arena media	Arena fina	0.30443	1.48200	0.86832	0.40072
95	2.53190	0.66893	0.00000	96.17	3.83	SP	Arena media	Arena fina	0.28597	2.38810	0.81052	0.54838
96	1.08090	1.57610	0.00000	93.84	6.16	SP	Arena fina	Arena fina	0.16587	1.80790	0.72845	0.25528
97	0.88396	1.54980	0.00000	37.89	62.11	SP	Arena muy fina	Arena fina	0.08515	1.48130	0.55971	0.25528
98	1.06940	1.42700	0.00000	94.88	5.12	SP	Arena fina	Arena fina	0.41825	1.31050	0.99993	0.34055

INSTITUTO DE INGENIERÍA

99	0.29221	5.48400	2.30150	95.08	2.62	SP	Arena media	Arena fina	0.41825	3.05420	1.03820	0.57947
100	1.03940	1.52710	0.00000	90.21	9.79	SP	Arena media	Arena fina	0.12821	1.30320	1.09150	0.44928
101	1.11660	1.94910	0.00000	99.90	0.10	SP	Arena media	Arena fina	0.36309	1.54080	0.95811	0.48878
102	1.17550	3.17260	0.00000	99.90	0.10	SP	Arena gruesa	Arena media	0.74619	2.55760	0.90435	0.51006
103	0.74349	2.11400	0.00000	97.32	2.68	SP	Arena media	Arena fina	0.27996	2.06620	0.82813	0.48212
104	0.82610	1.98280	0.00000	97.20	2.80	SP	Arena fina	Arena fina	0.20988	1.74240	0.81069	0.48111
105	0.87614	2.95770	0.00000	99.52	0.48	SP	Arena media	Arena media	0.42692	2.24920	0.80459	0.45332
106	0.95162	2.57910	0.00000	99.70	0.30	SP	Arena media	Arena fina	0.37615	2.08250	0.80529	0.41661
107	0.82780	3.10050	0.00000	99.60	0.40	SP	Arena media	Arena media	0.46387	2.24020	0.88488	0.48297
108	1.12580	1.72870	0.00000	99.98	0.02	SP	Arena media	Arena fina	0.33877	1.53120	0.89538	0.47706
109	0.83268	2.85160	0.00000	99.82	0.18	SP	Arena gruesa	Arena media	0.53693	2.29360	0.94815	0.41661
110	0.78465	1.94170	0.00000	98.20	1.80	SP	Arena fina	Arena fina	0.22515	1.59630	0.95789	0.49600
111	0.87243	1.97550	0.00000	98.60	1.40	SP	Arena fina	Arena fina	0.23130	1.51770	1.13690	0.51054
112	1.08000	2.28380	0.00000	99.74	0.26	SP	Arena media	Arena fina	0.33554	1.92540	0.87963	0.49984
113	1.22970	3.73820	0.00000	99.56	0.44	SP	Arena muy gruesa	Arena media	1.06560	2.37930	0.98812	0.43801
114	0.92320	1.76820	0.00000	96.84	3.16	SP	Arena fina	Arena fina	0.18853	1.57340	0.83074	0.52416
115	1.05860	1.47210	0.00000	96.60	3.40	SP	Arena fina	Arena fina	0.17535	1.48730	0.79906	0.40572
116	0.83094	2.91910	0.00000	99.92	0.08	SP	Arena media	Arena media	0.43849	2.00370	0.94623	0.49227
117	0.85497	3.85920	0.00000	99.46	0.54	SP	Arena media	Arena media	0.44687	2.50220	1.05830	0.48513
118	0.84766	1.78190	0.00000	98.00	2.00	SP	Arena fina	Arena fina	0.20217	1.54890	0.85646	0.50304
120	1.10650	1.97500	0.00000	99.82	0.18	SP	Arena media	Arena fina	0.35613	1.63410	0.88580	0.51149
121	1.03090	3.16593	0.00000	99.90	0.10	SP	Arena gruesa	Arena media	0.52166	2.11870	1.07870	0.43630
122	0.78096	2.04230	0.00000	97.40	2.60	SP	Arena fina	Arena fina	0.22019	1.73870	0.84719	0.49040
123	0.88118	1.90150	0.00000	96.39	3.61	SP	Arena fina	Arena fina	0.79303	1.70720	0.94723	0.48589
151	0.82604	1.68830	0.00000	99.28	0.72	SP	Arena fina	Arena fina	0.21197	1.49750	0.87000	0.48369
152	0.59888	4.71210	0.00000	98.02	1.98	SP	Arena media	Arena media	0.46893	2.65480	1.06510	0.62812
153	1.03330	1.45160	0.00000	97.23	2.77	SP	Arena fina	Arena fina	0.17565	1.39670	0.85530	0.45590
154	0.83737	1.59620	0.00000	99.50	0.50	SP	Arena fina	Arena fina	0.20823	1.41920	0.86344	0.54094
155	0.83132	2.29050	0.00000	99.74	0.26	SP	Arena media	Arena media	0.43084	1.69800	1.02290	0.49452
156	2.18980	1.71820	0.00000	99.58	0.42	SP	Arena muy gruesa	Arena media	1.02770	1.81470	1.02680	0.46373
157	1.23380	1.82830	0.00000	84.16	15.84	SP	Arena fina	Arena fina	0.13097	1.43260	1.19950	0.40732
158	1.06120	1.74470	0.00000	100.00	0.00	SP	Arena media	Arena media	0.49397	1.36330	1.29420	0.51995
159	0.90989	1.71930	0.00000	99.94	0.06	SP	Arena media	Arena media	0.46679	0.13608	1.22270	0.56726
160	0.81826	1.84420	0.00000	99.96	0.04	SP	Arena media	Arena media	0.45523	1.42170	1.16250	0.57901
161	1.18540	1.55890	0.00000	99.98	0.02	SP	Arena gruesa	Arena media	0.63084	1.32410	1.08150	0.35078
162	1.22000	1.71790	0.00000	100.00	0.00	SP	Arena gruesa	Arena media	0.52638	1.33660	1.25580	0.43468
163	0.79646	1.69930	0.00000	99.96	0.04	SP	Arena media	Arena fina	0.42003	1.37110	1.01850	0.59989
164	1.17870	1.78210	0.00000	100.00	0.00	SP	Arena gruesa	Arena media	0.51556	1.38340	1.25770	0.47159
165	0.87136	1.57420	0.00000	100.00	0.00	SP	Arena media	Arena fina	0.39426	1.37910	0.87830	0.58272
166	0.84663	1.61350	0.00000	99.96	0.04	SP	Arena media	Arena fina	0.39426	0.40550	0.89671	0.57753
167	1.02980	1.50210	0.00000	99.98	0.02	SP	Arena media	Arena fina	0.25329	1.29620	1.16250	0.57901
168	0.89890	1.70030	0.00000	99.90	0.10	SP	Arena media	Arena fina	0.38114	1.45730	0.90174	0.56019
169	0.87088	1.69680	0.00000	99.82	0.18	SP	Arena media	Arena fina	0.39040	1.45430	0.90011	0.55692
170	0.86503	1.72160	0.00000	99.70	0.30	SP	Arena fina	Arena fina	0.24438	1.53700	0.94822	0.46034

ANEXOS

Número	Clasif σ	Clasif a_{se}	Clasif k	Δ [1]	ρ_s (con $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$)	ρ_s (con $\rho_w = 1027 \text{ kg/m}^3$)
1	Muy buena	Muy fino	Mesocúrtico	1.650	2650.000	2721.550
2	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.758	2758.000	2832.466
3	Muy buena	Cerca Sim	Platicúrtico	1.787	2787.000	2862.249
4	Muy buena	Muy fino	Platicúrtico	1.668	2668.000	2740.036
5	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.721	2721.000	2794.467
6	Muy buena	Muy fino	Mesocúrtico	1.680	2680.000	2752.360
7	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.749	2749.000	2823.223
8	Muy buena	Muy grueso	Platicúrtico	1.721	2721.000	2794.467
9	Muy buena	Grueso	Mesocúrtico	1.739	2739.000	2812.953
10	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.550	2550.000	2618.850
11	Muy buena	Cerca Sim	Platicúrtico	1.685	2685.000	2757.495
12	Muy buena	Fino	Mesocúrtico	1.759	2759.000	2833.493
13	Muy buena	Muy Grueso	Platicúrtico	1.740	2740.000	2813.980
14	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.649	2649.000	2720.523
15	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.676	2676.000	2748.252
16	Muy buena	muy grueso	Mesocúrtico	1.713	2713.000	2786.251
17	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.632	2632.000	2703.064
18	Muy buena	Fino	Mesocúrtico	1.712	2712.000	2785.224
19	Muy buena	Grueso	Platicúrtico	1.730	2730.000	2803.710
20	Muy buena	Fino	Mesocúrtico	1.730	2730.000	2803.710
21	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.731	2731.000	2804.737
22	Muy buena	Grueso	Platicúrtico	1.749	2749.000	2823.223
23	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.712	2712.000	2785.224
24	Muy buena	Fino	Mesocúrtico	1.658	2658.000	2729.766
25	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.730	2730.000	2803.700
26	Muy buena	Cerca Sim	Muy Leptocúrtico	1.606	2606.000	2676.362
27	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.768	2768.000	2842.736
28	Muy buena	Cerca Sim	Platicúrtico	1.817	2817.000	2893.059
29	Muy buena	Cerca Sim	Leptocúrtico	1.740	2740.000	2813.980
30	Muy buena	Grueso	Platicúrtico	1.730	2730.000	2803.710
31	Muy buena	Muy fino	Mesocúrtico	1.702	2702.000	2774.954
32	Muy buena	Muy fino	Leptocúrtico	1.730	2730.000	2803.710
33	Muy buena	Cerca Sim	Leptocúrtico	1.667	2667.000	2739.009
34	Muy buena	Fino	Leptocúrtico	1.730	2730.000	2803.710
35	Muy buena	Muy fino	Leptocúrtico	1.649	2649.000	2720.523
36	Muy buena	Grueso	Mesocúrtico	1.667	2667.000	2739.009
37	Muy buena	Grueso	Muy Leptocúrtico	1.649	2649.000	2720.523
38	Muy buena	Fino	Leptocúrtico	1.712	2712.000	2785.224
39	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.721	2721.000	2794.467
40	Muy buena	Grueso	Mesocúrtico	1.768	2768.000	2842.736
41	Muy buena	Cerca Sim	Leptocúrtico	1.685	2685.000	2757.495
42	Muy buena	Fino	Mesocúrtico	1.540	2540.000	2608.580
43	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.632	2632.000	2703.064
44	Muy buena	Fino	Mesocúrtico	1.730	2730.000	2803.710
45	Muy buena	Fino	Mesocúrtico	1.676	2676.000	2748.252
46	Muy buena	Cerca Sim	Platicúrtico	1.685	2685.000	2757.495

INSTITUTO DE INGENIERÍA

47	Muy buena	Grueso	Platicúrtico	1.797	2797.000	2872.519
48	Muy buena	Muy fino	Mesocúrtico	1.720	2720.000	2793.440
49	Muy buena	Fino	Mesocúrtico	1.649	2649.000	2720.523
50	Muy buena	Fino	Muy Leptocúrtico	1.685	2685.000	2757.495
51	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.539	2539.000	2607.553
52	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.640	2640.000	2711.280
53	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.649	2649.000	2720.523
54	Muy buena	Grueso	Mesocúrtico	1.749	2749.000	2823.223
55	Muy buena	Fino	Leptocúrtico	1.758	2758.000	2832.466
56	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.740	2740.000	2813.980
57	Muy buena	Fino	Leptocúrtico	1.632	2632.000	2703.064
58	Muy buena	Cerca Sim	Leptocúrtico	1.589	2589.000	2658.903
59	Muy buena	Cerca Sim	Leptocúrtico	1.740	2740.000	2813.980
60	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.614	2614.000	2684.578
61	Muy buena	Cerca Sim	Platicúrtico	1.749	2749.000	2823.223
62	Muy buena	Fino	Leptocúrtico	1.210	2210.000	2269.670
63	Muy buena	Grueso	Mesocúrtico	1.417	2417.000	2482.259
64	Muy buena	Muy fino	Muy Leptocúrtico	1.532	2532.000	2600.364
65	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.694	2694.000	2766.738
66	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.768	2768.000	2842.736
67	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.589	2589.000	2658.903
68	Muy buena	Grueso	Mesocúrtico	1.524	2524.000	2592.148
69	Muy buena	Cerca Sim	Platicúrtico	1.532	2532.000	2600.364
70	Muy buena	Cerca Sim	Platicúrtico	1.508	2508.000	2575.716
71	Muy buena	Muy Fino	Mesocúrtico	1.702	2702.000	2774.954
72	Muy buena	Fino	Leptocúrtico	1.632	2632.000	2703.064
73	Muy buena	Fino	Mesocúrtico	1.312	2312.000	2374.424
74	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.429	2429.000	2494.583
75	Muy buena	Fino	Mesocúrtico	1.555	2555.000	2623.985
76	Muy buena	Muy fino	Leptocúrtico	1.649	2649.000	2720.523
77	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.500	2500.000	2567.500
78	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.614	2614.000	2684.578
79	Muy buena	Cerca Sim	Platicúrtico	1.446	2446.000	2512.042
80	Muy buena	Grueso	Platicúrtico	1.572	2572.000	2641.444
82	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.753	2753.000	2827.331
83	Muy buena	Muy Fino	Muy Leptocúrtico	1.721	2721.000	2794.467
84	Muy buena	Muy Fino	Platicúrtico	1.649	2649.000	2720.523
85	Muy buena	Muy Fino	Leptocúrtico	1.353	2353.000	2416.531
86	Muy buena	Muy grueso	Platicúrtico	1.312	2312.000	2374.424
87	Muy buena	Fino	Muy Leptocúrtico	1.259	2259.000	2319.993
88	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.260	2260.000	2321.020
90	Muy buena	Cerca Sim	Leptocúrtico	1.632	2632.000	2703.064
91	Muy buena	Fino	Leptocúrtico	1.730	2730.000	2803.710
92	Muy buena	Muy fino	Muy Leptocúrtico	1.702	2702.000	2774.954
93	Muy buena	Cerca Sim	Mesocúrtico	1.597	2597.000	2667.119
94	Muy buena	Fino	Leptocúrtico	1.777	2851.979	2777.000
95	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.454	2454.000	2520.258

ANEXOS

96	Muy buena	Muy fino	Muy Leptocúrtico	1.556	2556.000	2625.012
97	Muy buena	Muy fino	Muy Platicúrtico	1.523	2523.000	2591.121
98	Muy buena	Fino	Muy Leptocúrtico	1.580	2580.000	2649.660
99	Muy buena	Fino	Platicúrtico	1.556	2556.000	2625.012
100	Muy buena	Grueso	Leptocúrtico	1.508	2508.000	2575.716
101	Muy buena clasif.	Cerca sim	Mesocurtico	1.632	2631.578	2702.631
102	Muy buena clasif.	Fino	Mesocúrtica	1.653	2652.500	2724.118
103	Muy buena clasif.	Cerca Sim	Mesocúrtica	1.611	2610.984	2681.480
104	Muy buena clasif.	Muy fino	Mesocúrtica	1.577	2577.319	2646.907
105	Muy buena clasif.	Muy fino	Leptocúrtica	1.597	2597.400	2667.530
106	Muy buena clasif.	Muy fino	Mesocúrtica	1.513	2512.600	2580.440
107	Muy buena clasif.	Fino	Mesocúrtica	1.551	2551.020	2619.898
108	Muy buena clasif.	Fino	Mesocúrtica	1.632	2631.570	2702.622
109	Muy buena clasif.	Cerca Sim	Leptocúrtica	1.688	2688.100	2760.679
110	Muy buena clasif.	Cerca Sim	Mesocúrtica	1.639	2638.540	2709.781
111	Muy buena clasif.	Grueso	Mesocúrtica	1.632	2631.570	2702.622
112	Muy buena clasif.	Cerca Sim	Mesocúrtica	1.660	2659.574	2731.383
113	Muy buena clasif.	Muy fino	Leptocúrtica	1.611	2610.900	2681.394
114	Muy buena clasif.	Fino	Mesocúrtica	1.558	2557.560	2626.614
115	Muy buena clasif.	Muy fino	Leptocúrtica	1.604	2604.160	2674.472
116	Muy buena clasif.	Cerca Sim	Mesocúrtica	1.571	2570.710	2640.119
117	Muy buena clasif.	Cerca Sim	Mesocúrtica	1.611	2681.394	2610.900
118	Muy buena clasif.	Fino	Mesocúrtica	1.577	2646.887	2577.300
120	Muy buena clasif.	Fino	Mesocúrtica	1.571	2570.711	2640.120
121	Muy buena clasif.	Grueso	Leptocúrtica	1.584	2583.990	2653.758
122	Muy buena clasif.	Fino	Mesocúrtica	1.597	2597.420	2667.550
123	Muy buena clasif.	Muy Fino	Mesocúrtica	1.696	2695.950	2768.741
151	Muy buena clasif.	Fino	Mesocúrtica	1.710	2710.040	2783.211
152	Muy buena clasif.	Cerca simetrico	Platicurtico	1.717	2717.390	2790.760
153	Muy buena clasif.	Fino	Leptocurtico	1.710	2710.040	2783.211
154	Muy buena clasif.	Fino	Platicurtico	1.653	2652.540	2724.159
155	Muy buena clasif.	Cerca simetrico	Mesocurtico	1.747	2747.250	2821.426
156	Muy buena clasif.	Cerca simetrico	Leptocurtico	1.681	2680.980	2753.367
157	Muy buena clasif.	Grueso	Leptocurtico	1.674	2673.870	2746.065
158	Muy buena clasif.	muy grueso	mesocúrtico	1.622	2622.000	2692.794
159	muy buena clasif	Muy grueso	platicurtica	1.684	2684.000	2756.468

INSTITUTO DE INGENIERÍA

160	muy buena clasif	Grueso	platicurtica	1.721	2721.000	2794.467
161	muy buena clasif	Grueso	Muy Leptocúrtico	1.694	2693.600	2766.327
162	muy buena clasif	Muy grueso	leptocurtico	1.712	2712.000	2785.224
163	muy buena clasif	Cerca sim	platicurtica	1.684	2684.000	2756.468
164	muy buena clasif	muy grueso	mesocurtica	1.693	2693.000	2765.711
165	Muy buena clasif	fino	platicurtica	1.684	2684.000	2756.468
166	Muy buena clasif	fino	platicurtica	1.721	2794.467	2721.000
167	Muy buena clasif	Cerca sim	leptocurtica	1.676	2676.000	2748.252
168	Muy buena clasif	fino	platicurtica	1.666	2666.000	2737.982
169	Muy buena clasif	fino	platicurtica	1.640	2640.000	2711.280
170	muy buena clasif	Cerca sim	leptocurtica	1.540	2540.000	2608.580

Número	e [1]	C [1]	ρ_{cas} (kg/m ³)	P_{or} [1]	ρ_{bus} (kg/m ³)	k_p (m ²)	c_p (m/s)	GP (N/m ³)	W_{mf} (m/s)
1	0.97803	0.50555	1375.89	0.49445	1883.68	9.73E-10	0.00954	8404.0709	0.002552
2	0.80093	0.55527	1572.78	0.44473	2029.52	4.25E-10	0.00417	9834.6929	0.000743
3	0.85553	0.53893	1542.55	0.46107	2016.07	6.80E-10	0.00667	9702.7975	0.001418
4	1.10930	0.47408	1299.01	0.52592	1839.12	1.54E-09	0.01514	7966.9327	0.005183
5	1.03450	0.49152	1373.54	0.50848	1895.75	1.16E-09	0.01142	8522.4091	0.003568
6	1.17840	0.45906	1263.50	0.54094	1819.05	3.26E-10	0.00320	7769.9803	0.001363
7	1.00740	0.49816	1406.40	0.50184	1921.80	4.60E-10	0.00451	8777.9662	0.001401
8	0.89334	0.52817	1475.95	0.47183	1960.52	2.49E-09	0.02438	9157.8119	0.005068
9	1.02890	0.49288	1386.45	0.50712	1907.26	8.78E-10	0.00861	8635.3664	0.002732
10	0.93643	0.51641	1352.41	0.48359	1849.05	5.77E-10	0.00566	8064.3549	0.001308
11	0.91395	0.52248	1440.73	0.47752	1931.15	1.01E-09	0.00994	8869.6915	0.002311
12	0.81547	0.55082	1560.75	0.44918	2022.05	1.27E-09	0.01243	9761.4770	0.002256
13	0.86721	0.53556	1507.05	0.46444	1984.03	2.98E-09	0.02928	9388.4761	0.005592
14	0.95519	0.51146	1391.44	0.48854	1893.17	9.04E-10	0.00887	8497.1181	0.002252
15	1.09580	0.47715	1311.33	0.52285	1848.30	7.78E-10	0.00763	8056.9314	0.002700
16	1.22430	0.44958	1252.65	0.55042	1817.93	3.19E-09	0.03127	7758.9889	0.011477
17	0.84093	0.54320	1468.32	0.45680	1937.45	1.23E-09	0.01210	8931.4707	0.002208
18	1.10560	0.47493	1322.78	0.52507	1862.03	1.11E-09	0.01092	8191.6123	0.003930
19	1.07760	0.48132	1349.48	0.51868	1882.16	2.83E-09	0.02781	8389.1560	0.008395
20	0.98938	0.50267	1409.34	0.49733	1920.10	3.11E-09	0.03055	8761.2778	0.007630
21	1.47180	0.40456	1134.69	0.59544	1746.20	9.22E-10	0.00905	7055.3887	0.005829
22	1.04410	0.48922	1381.17	0.51078	1905.74	3.05E-09	0.02996	8620.4646	0.008444
23	1.13590	0.46818	1304.00	0.53182	1850.17	2.53E-09	0.02482	8075.3161	0.008416
24	1.06960	0.48318	1318.96	0.51682	1849.74	9.72E-10	0.00954	8071.0614	0.003130
25	1.27550	0.43946	1232.11	0.56054	1807.79	4.34E-10	0.00426	7659.5056	0.002186
26	0.93940	0.51562	1379.99	0.48438	1877.45	4.07E-09	0.03989	8342.9092	0.007927
27	1.10110	0.47595	1353.00	0.52405	1891.20	1.95E-09	0.01918	8477.7910	0.006601
28	1.03080	0.49242	1424.60	0.50758	1945.88	1.95E-09	0.01912	9014.2318	0.005896
29	1.12830	0.46986	1322.19	0.53014	1866.64	3.50E-09	0.03435	8236.8523	0.010774
30	0.82626	0.54757	1535.22	0.45243	1999.87	2.48E-09	0.02433	9543.8279	0.004246
31	0.93039	0.51803	1437.51	0.48197	1932.49	5.38E-10	0.00528	8882.8649	0.001321
32	0.82173	0.54893	1539.03	0.45107	2002.28	5.21E-10	0.00511	9567.5415	0.000955

ANEXOS

33	0.94307	0.51465	1409.63	0.48535	1908.09	3.42E-09	0.03354	8643.4473	0.007210
34	0.96282	0.50947	1428.41	0.49053	1932.18	5.66E-09	0.05549	8879.8460	0.011197
35	0.95725	0.51092	1389.97	0.48908	1892.26	8.32E-09	0.08161	8488.1587	0.013655
36	1.06290	0.48476	1327.76	0.51524	1856.91	2.98E-09	0.02923	8141.4653	0.008234
37	0.88598	0.53023	1442.49	0.46977	1924.95	3.80E-09	0.03725	8808.9061	0.006802
38	1.09580	0.47714	1328.94	0.52286	1865.92	4.45E-09	0.04363	8229.7720	0.011943
39	1.15560	0.46391	1296.37	0.53609	1846.94	1.72E-09	0.01685	8043.5811	0.006354
40	0.95796	0.51073	1451.88	0.48927	1954.36	3.20E-09	0.03139	9097.3996	0.007434
41	1.08970	0.47853	1319.55	0.52147	1855.10	3.94E-09	0.03863	8123.6258	0.010724
42	1.05070	0.48763	1272.01	0.51237	1798.22	1.32E-09	0.01293	7565.6721	0.003724
43	1.08650	0.47927	1295.49	0.52073	1830.28	1.67E-09	0.01639	7880.1845	0.005221
44	1.10880	0.47420	1329.52	0.52580	1869.52	1.04E-09	0.01024	8265.1155	0.003764
45	1.12860	0.46978	1291.09	0.53022	1835.62	5.07E-10	0.00498	7932.5348	0.001908
46	0.92021	0.52078	1436.04	0.47922	1928.20	8.41E-10	0.00825	8840.7882	0.001965
47	0.88731	0.52985	1522.01	0.47015	2004.85	6.49E-10	0.00637	9592.7531	0.001492
48	1.11740	0.47227	1319.25	0.52773	1861.23	9.31E-10	0.00913	8183.8423	0.003421
49	0.78538	0.56010	1523.77	0.43990	1975.55	3.96E-10	0.00389	9305.2582	0.000618
50	1.13480	0.46842	1291.67	0.53158	1837.60	2.80E-10	0.00275	7952.0126	0.001085
51	0.99831	0.50042	1304.88	0.49958	1817.94	4.26E-10	0.00418	7759.1555	0.001123
52	0.79487	0.55714	1510.57	0.44286	1965.38	6.21E-10	0.00609	9205.5526	0.000989
53	0.76820	0.56560	1538.74	0.43440	1984.86	6.57E-10	0.00644	9396.6430	0.000960
54	1.20120	0.45430	1282.58	0.54570	1843.02	4.33E-09	0.04245	8005.1096	0.013944
55	0.91376	0.52253	1480.05	0.47747	1970.41	8.91E-10	0.00874	9254.8864	0.002128
56	1.20510	0.45349	1276.12	0.54651	1837.38	2.11E-09	0.02066	7949.8603	0.008235
57	0.63565	0.61138	1652.59	0.38862	2051.71	9.78E-10	0.00959	10052.3667	0.000838
58	0.79542	0.55697	1480.93	0.44303	1935.92	8.05E-10	0.00790	8916.5440	0.001239
59	1.03740	0.49082	1381.17	0.50918	1904.09	1.05E-09	0.01026	8604.2752	0.003284
60	1.24300	0.44584	1196.90	0.55416	1766.02	1.01E-09	0.00994	7249.7505	0.004332
61	1.01620	0.49597	1400.24	0.50403	1917.88	4.44E-10	0.00436	8739.5065	0.001382
62	1.51140	0.39819	903.76	0.60181	1521.82	4.84E-10	0.00475	4854.1727	0.002374
63	0.93183	0.51764	1284.92	0.48236	1780.30	4.46E-08	0.43779	7389.9168	0.026176
64	0.81822	0.54999	1430.17	0.45001	1892.33	1.59E-10	0.00156	8488.9113	0.000257
65	0.82168	0.54894	1518.79	0.45106	1982.02	5.82E-10	0.00571	9368.7465	0.001043
66	1.00790	0.49804	1415.79	0.50196	1931.31	7.85E-10	0.00770	8871.2517	0.002382
67	0.87959	0.53203	1414.62	0.46797	1895.22	2.11E-09	0.02069	8517.2694	0.003937
68	0.95876	0.51053	1323.36	0.48947	1826.05	8.38E-10	0.00822	7838.6914	0.001957
69	1.02930	0.49278	1281.40	0.50722	1802.32	5.17E-10	0.00507	7605.8834	0.001449
70	0.83755	0.54420	1401.71	0.45580	1869.81	6.80E-10	0.00667	8267.9998	0.001138
71	1.30600	0.43365	1203.35	0.56635	1785.00	3.37E-10	0.00331	7435.9316	0.001763
72	1.45200	0.40784	1102.41	0.59216	1710.56	2.89E-10	0.00283	6705.7425	0.001789
73	1.55030	0.39212	931.05	0.60788	1555.35	5.59E-10	0.00548	5183.0749	0.003087
74	1.39950	0.41675	1039.62	0.58325	1638.62	4.19E-10	0.00411	5999.9450	0.002105
75	0.98370	0.50411	1322.78	0.49589	1832.06	5.37E-10	0.00527	7897.5940	0.001375
76	1.12110	0.47144	1282.58	0.52856	1825.40	5.54E-10	0.00543	7832.3288	0.002016
77	0.67914	0.59554	1529.06	0.40446	1944.43	9.36E-10	0.00918	9000.0253	0.000889
78	1.24520	0.44540	1195.72	0.11665	1765.29	7.18E-10	0.00705	7242.6411	0.003155
79	1.27080	0.44037	1106.23	0.55963	1680.97	1.43E-09	0.01398	6415.4127	0.005544
80	0.87152	0.53433	1411.39	0.46567	1889.64	2.72E-09	0.02665	8462.4879	0.004765
82	0.85227	0.53988	1526.42	0.46012	1998.96	8.28E-09	0.08123	9534.9289	0.011512

INSTITUTO DE INGENIERÍA

83	1.65950	0.37602	1050.77	0.62398	1691.60	2.61E-10	0.00256	6519.7067	0.002176
84	1.64600	0.37793	1028.17	0.62207	1667.04	2.56E-10	0.00251	6278.7646	0.002020
85	1.52240	0.39645	958.04	0.60355	1577.89	2.43E-10	0.00238	5404.1882	0.001370
86	0.86925	0.53497	1270.25	0.46503	1747.84	3.68E-09	0.03608	7071.3934	0.005205
87	1.78890	0.35857	831.87	0.64143	1490.62	2.27E-10	0.00223	4548.1415	0.001587
88	1.67680	0.37358	867.08	0.62642	1510.42	1.44E-10	0.00141	4742.3216	0.000902
90	1.03580	0.49121	1327.76	0.50879	1850.29	8.58E-10	0.00842	8076.5198	0.002554
91	1.42080	0.41308	1158.16	0.58692	1760.93	5.31E-09	0.05210	7199.8258	0.020207
92	1.34720	0.42603	1182.22	0.57397	1771.69	4.14E-09	0.04057	7305.3812	0.015901
93	1.28490	0.43765	1167.26	0.56235	1744.79	1.89E-08	0.18501	7041.5643	0.030830
94	0.96791	0.50815	1449.24	0.49185	1954.37	9.22E-10	0.00904	9097.4983	0.002543
95	1.04500	0.48900	1232.40	0.51100	1757.20	6.65E-10	0.00652	7163.2572	0.001820
96	0.93804	0.51598	1354.47	0.48402	1851.55	2.36E-10	0.00231	8088.8345	0.000545
97	1.95530	0.33837	876.76	0.66163	1556.26	6.83E-11	0.00067	5191.9996	0.000673
98	1.15620	0.46379	1228.88	0.53621	1779.57	2.12E-10	0.00208	7382.7041	0.000803
99	1.03270	0.49195	1291.38	0.50805	1813.14	2.60E-09	0.02549	7712.0799	0.006561
100	1.35590	0.42447	1093.31	0.57553	1684.38	1.92E-10	0.00188	6448.9360	0.000968
101	1.04000	0.49020	1324.83	0.50980	1848.39	1.31E-09	0.01287	8057.8792	0.003828
102	0.98753	0.50314	1370.60	0.49686	1880.88	4.89E-09	0.04797	8376.5917	0.010248
103	1.01910	0.49527	1328.06	0.50473	1846.42	7.00E-10	0.00687	8038.4618	0.001998
104	1.13350	0.46870	1240.62	0.53130	1786.26	3.98E-10	0.00390	7448.3100	0.001431
105	1.34180	0.42702	1139.09	0.57298	1727.54	1.53E-09	0.01500	6872.2948	0.007135
106	1.20680	0.45314	1169.31	0.54686	1730.93	1.23E-09	0.01204	6905.5850	0.004577
107	1.19540	0.45550	1193.37	0.54450	1752.57	2.08E-09	0.02043	7117.8546	0.007267
108	0.98931	0.50269	1358.57	0.49731	1869.31	1.11E-09	0.01084	8263.1033	0.002924
109	0.95032	0.51274	1415.50	0.48726	1915.92	3.24E-09	0.03174	8720.3006	0.007089
110	1.13180	0.46909	1271.13	0.53091	1816.38	5.66E-10	0.00555	7743.7838	0.002086
111	1.16360	0.46219	1249.13	0.53781	1801.46	6.79E-10	0.00667	7597.4148	0.002630
112	1.06440	0.48440	1323.07	0.51560	1852.60	1.13E-09	0.01113	8099.0893	0.003580
113	0.97624	0.50601	1356.81	0.49399	1864.14	1.02E-08	0.09962	8212.3524	0.015584
114	1.14200	0.46685	1226.24	0.53315	1773.78	3.30E-10	0.00323	7325.9295	0.001194
115	1.30570	0.43370	1159.92	0.56630	1741.51	2.82E-10	0.00277	7009.3580	0.001398
116	1.10470	0.47513	1254.41	0.52487	1793.45	2.08E-09	0.02037	7518.8331	0.006287
117	0.92544	0.51936	1392.61	0.48064	1886.23	2.94E-09	0.02879	8429.0278	0.005942
118	1.18790	0.45707	1209.81	0.54293	1767.40	4.03E-10	0.00395	7263.3015	0.001602
120	0.96538	0.50881	1343.32	0.49119	1847.77	1.20E-09	0.01181	8051.7489	0.002889
121	0.93619	0.51648	1370.60	0.48352	1867.18	3.67E-09	0.03603	8242.1949	0.007191
122	1.18740	0.45716	1219.49	0.54284	1776.99	4.57E-10	0.00448	7357.3918	0.001834
123	1.24130	0.44617	1235.33	0.55383	1804.12	3.39E-10	0.00333	7623.5054	0.001593
151	0.94169	0.51502	1433.40	0.48498	1931.48	4.70E-10	0.00461	8872.9195	0.001196
152	0.95415	0.51173	1428.12	0.48827	1929.57	2.80E-09	0.02750	8854.2078	0.006462
153	1.39220	0.41802	1163.44	0.58198	1761.14	2.97E-10	0.00292	7201.8682	0.001778
154	1.35930	0.42385	1154.64	0.57615	1746.34	4.39E-10	0.00431	7056.7736	0.002400
155	0.94761	0.51345	1448.66	0.48655	1948.35	2.09E-09	0.02048	9038.3967	0.005040
156	1.08610	0.47936	1319.84	0.52064	1854.54	1.06E-08	0.10380	8118.2016	0.019454
157	1.36390	0.42304	1161.68	0.57696	1754.23	2.23E-10	0.00219	7134.0861	0.001260
158	0.85244	0.53983	1453.65	0.46017	1926.24	3.21E-09	0.03153	8821.5636	0.005377
159	0.42961	0.69949	1928.12	0.30051	2236.74	2.75E-09	0.02702	11867.5877	0.000723
160	0.90813	0.52407	1464.50	0.47593	1953.28	2.57E-09	0.02521	9086.8070	0.005410

ANEXOS

161	0.74812	0.57204	1582.46	0.42796	2021.97	4.39E-09	0.04308	9760.6686	0.005346
162	0.78656	0.55973	1558.99	0.44027	2011.14	3.49E-09	0.03428	9654.4002	0.005027
163	0.82302	0.54854	1512.04	0.45146	1975.69	1.96E-09	0.01920	9306.6016	0.003318
164	0.81889	0.54979	1520.55	0.45021	1982.92	3.48E-09	0.03411	9377.5507	0.005443
165	0.81808	0.55003	1516.15	0.44997	1978.26	1.5541E-09	0.01525	9331.8864	0.002643
166	0.89711	0.52712	1473.01	0.47288	1958.66	1.67E-09	0.01641	9139.6055	0.003604
167	0.67101	0.59844	1644.67	0.40156	2057.07	7.44E-10	0.00730	10104.9677	0.000765
168	0.95865	0.51056	1397.89	0.48944	1900.55	1.42E-09	0.01396	8569.5499	0.003511
169	0.83152	0.54600	1480.35	0.45400	1946.61	1.50E-09	0.01468	9021.3701	0.002589
170	1.09520	0.47728	1245.02	0.52272	1781.85	6.88E-10	0.00675	7405.1088	0.002210

Número	Ángulo (°)	d* [1]	S* [1]	Re [1] exp	Fondo	A[1]	Flujo	Rouse [1] exp	Modo transporte
1	40.10	7.5220	5.1575	7.46	Rizos	425.60	Transitorio	4.53	Saltación
2	34.70	5.0776	2.8604	4.87	Rizos	130.91	Transitorio	4.71	Saltación
3	36.30	6.4591	4.1039	6.71	Rizos	269.47	Transitorio	4.95	Saltación
4	42.70	9.5082	7.3297	14.75	Dunas	859.59	Transitorio	6.58	Saltación
5	39.80	8.3469	6.0288	12.10	Dunas	581.54	Transitorio	6.40	Saltación
6	37.40	4.3830	2.2940	2.42	Rizos	84.20	Transitorio	2.80	Saltación
7	37.40	5.2719	3.0262	4.01	Rizos	146.52	Transitorio	3.71	Saltación
8	39.60	12.1935	10.6446	29.98	Dunas	1812.93	Transitorio	9.61	Rodamiento
9	37.00	7.2713	4.9018	9.01	Rizos	384.45	Transitorio	5.68	Saltación
10	38.70	5.6716	3.3767	3.94	Rizos	182.44	Transitorio	3.35	Saltación
11	36.00	7.7320	5.3750	13.57	Dunas	462.25	Transitorio	7.97	Rodamiento
12	36.20	8.7700	6.4929	13.30	Dunas	674.52	Transitorio	6.65	Saltación
13	38.10	13.4117	12.2791	31.04	Dunas	2412.44	Transitorio	8.66	Rodamiento
14	38.40	7.2496	4.8799	9.01	Rizos	381.02	Transitorio	5.70	Saltación
15	38.20	6.7618	4.3958	7.12	Rizos	309.17	Transitorio	4.90	Saltación
16	38.50	13.7887	12.8005	39.56	Dunas	2621.63	Transitorio	10.64	Rodamiento
17	37.40	8.4407	6.1307	12.06	Dunas	601.36	Transitorio	6.36	Saltación
18	39.50	8.1467	5.8132	11.55	Dunas	540.69	Transitorio	6.33	Saltación
19	39.40	13.0458	11.7800	25.87	Dunas	2220.28	Transitorio	7.54	Rodamiento
20	44.00	13.6723	12.6387	31.81	Dunas	2555.78	Transitorio	8.65	Rodamiento
21	39.00	7.4432	5.0766	8.21	Rizos	412.36	Transitorio	5.05	Saltación
22	38.14	13.5901	12.5249	33.77	Dunas	2509.97	Transitorio	9.27	Rodamiento
23	40.70	12.2820	10.7608	26.54	Dunas	1852.72	Transitorio	8.40	Rodamiento
24	40.10	7.5319	5.1677	11.33	Dunas	427.27	Transitorio	6.85	Saltación
25	34.20	5.1045	2.8831	3.28	Rizos	133.00	Transitorio	3.15	Saltación
26	41.00	15.2415	14.8758	38.95	Dunas	3540.65	Transitorio	9.05	Rodamiento
27	38.70	10.9121	9.0117	21.44	Dunas	1299.36	Transitorio	8.00	Rodamiento
28	37.65	10.9948	9.1142	226.05	Plano	1329.11	Transitorio	83.25	Rodamiento
29	40.00	14.5271	13.8424	30.51	Dunas	3065.78	Transitorio	7.60	Rodamiento
30	37.00	12.2026	10.6566	33.87	Dunas	1817.01	Transitorio	10.85	Rodamiento
31	38.10	5.6544	3.3614	4.26	Rizos	180.78	Transitorio	3.61	Saltación
32	37.30	5.5917	3.3056	5.45	Rizos	174.84	Transitorio	4.75	Saltación
33	39.60	14.1503	13.3072	35.44	Dunas	2833.30	Transitorio	9.17	Rodamiento
34	38.50	18.4275	19.7761	67.24	Dunas	6257.48	Transitorio	11.75	Rodamiento

INSTITUTO DE INGENIERÍA

35	46.00	21.9939	25.7866	83.29	Dunas	10639.18	Turbulento	11.07	Rodamiento
36	39.90	13.2111	12.0046	29.01	Dunas	2305.77	Transitorio	8.27	Rodamiento
37	39.70	14.8589	14.3192	43.73	Dunas	3280.63	Transitorio	10.55	Rodamiento
38	43.00	16.2839	16.4278	38.92	Dunas	4317.95	Transitorio	8.20	Rodamiento
39	39.00	10.1360	8.0676	20.38	Dunas	1041.37	Transitorio	8.38	Rodamiento
40	37.85	13.9601	13.0399	33.24	Dunas	2720.61	Transitorio	8.75	Rodamiento
41	43.00	15.2421	14.8767	36.49	Dunas	3541.07	Transitorio	8.47	Rodamiento
42	39.20	8.5576	6.2585	13.84	Dunas	626.70	Transitorio	7.12	Saltación
43	39.00	9.8234	7.6972	16.62	Dunas	947.94	Transitorio	7.12	Saltación
44	38.10	7.9171	5.5692	11.09	Dunas	496.26	Transitorio	6.29	Saltación
45	37.75	5.4609	3.1904	4.31	Rizos	162.86	Transitorio	3.85	Saltación
46	37.10	7.0432	4.6730	8.44	Rizos	349.39	Transitorio	5.54	Saltación
47	35.00	6.3235	3.9754	7.08	Rizos	252.86	Transitorio	5.34	Saltación
48	39.50	7.4622	5.0962	8.35	Rizos	415.54	Transitorio	5.12	Saltación
49	34.70	4.7992	2.6284	4.72	Rizos	110.54	Transitorio	4.87	Saltación
50	37.40	4.0666	2.0502	2.01	Rizos	67.25	Transitorio	2.49	Suspensión
51	38.20	4.8657	2.6833	4.25	Rizos	115.20	Transitorio	4.28	Saltación
52	40.50	5.9987	3.6730	7.94	Rizos	215.85	Transitorio	6.26	Saltación
53	36.20	6.1791	3.8399	7.04	Rizos	235.92	Transitorio	5.44	Saltación
54	43.40	16.1760	16.2647	51.95	Dunas	4232.67	Transitorio	11.02	Rodamiento
55	37.90	7.3520	4.9836	12.80	Dunas	397.38	Transitorio	7.98	Rodamiento
56	39.90	11.2646	9.4518	24.94	Dunas	1429.40	Transitorio	8.88	Rodamiento
57	37.60	7.5135	5.1487	9.97	Rizos	424.15	Transitorio	6.10	Saltación
58	35.60	6.7594	4.3934	9.38	Rizos	308.84	Transitorio	6.51	Saltación
59	37.20	7.9409	5.5942	11.88	Dunas	500.73	Transitorio	6.72	Saltación
60	39.00	7.6216	5.2603	10.97	Dunas	442.73	Transitorio	6.56	Saltación
61	35.14	5.1819	2.9490	3.86	Rizos	139.14	Transitorio	3.66	Saltación
62	36.50	4.7847	2.6165	2.71	Rizos	109.54	Transitorio	2.80	Saltación
63	40.50	48.4301	84.2584	317.98	Plano	113591.71	Turbulento	11.52	Rodamiento
64	43.00	2.9648	1.2762	1.35	Rizos	26.06	Laminar	2.40	Suspensión
65	35.90	5.8778	3.5625	5.77	Rizos	203.06	Transitorio	4.71	Saltación
66	36.40	6.9142	4.5452	6.43	Rizos	330.54	Transitorio	4.35	Saltación
67	39.30	10.9379	9.0436	29.46	Dunas	1308.58	Transitorio	10.91	Rodamiento
68	37.80	6.8005	4.4335	9.48	Rizos	314.50	Transitorio	6.51	Saltación
69	38.20	5.3485	3.0923	5.13	Rizos	153.00	Transitorio	4.69	Saltación
70	37.70	6.1052	3.7713	4.55	Rizos	227.56	Transitorio	3.57	Saltación
71	39.00	4.4731	2.3651	3.30	Rizos	89.50	Transitorio	3.70	Saltación
72	39.80	4.0845	2.0637	2.14	Rizos	68.14	Transitorio	2.63	Saltación
73	39.77	5.2823	3.0351	3.78	Rizos	147.39	Transitorio	3.51	Saltación
74	39.00	4.7084	2.5541	3.50	Rizos	104.38	Transitorio	3.70	Saltación
75	39.20	5.4783	3.2056	4.27	Rizos	164.41	Transitorio	3.79	Saltación
76	41.70	5.6753	3.3800	5.04	Rizos	182.79	Transitorio	4.31	Saltación
77	39.00	7.1476	4.7773	9.84	Rizos	365.16	Transitorio	6.37	Saltación
78	41.80	6.4173	4.0641	6.09	Rizos	264.27	Transitorio	4.48	Saltación
79	40.10	8.7127	6.4294	8.69	Rizos	661.39	Transitorio	4.39	Saltación
80	38.60	12.3693	10.8757	26.63	Dunas	1892.49	Transitorio	8.35	Rodamiento
82	47.10	22.3950	26.4952	82.64	Dunas	11231.94	Turbulento	10.68	Rodamiento
83	40.10	3.9522	1.9643	2.20	Rizos	61.73	Transitorio	2.82	Saltación
84	39.50	3.8609	1.8966	1.62	Rizos	57.55	Transitorio	2.12	Suspensión

ANEXOS

85	37.90	3.5191	1.6504	1.60	Rizos	43.58	Transitorio	2.32	Suspensión
86	39.20	13.5504	12.4701	9.57	Rizos	2488.05	Transitorio	2.64	Saltación
87	38.20	3.3240	1.5150	1.25	Rizos	36.73	Laminar	1.92	Suspensión
88	38.50	2.6409	1.0729	0.61	Rizos	18.42	Laminar	1.18	Suspensión
90	38.20	7.0409	4.6707	9.01	Rizos	349.05	Transitorio	5.96	Saltación
91	44.70	17.8565	18.8640	48.56	Dunas	5693.62	Transitorio	8.91	Rodamiento
92	42.50	15.6710	15.5090	34.28	Dunas	3848.45	Transitorio	7.63	Rodamiento
93	41.40	32.7640	46.8852	128.39	Plano	35171.50	Turbulento	8.97	Rodamiento
94	39.10	7.5054	5.1404	9.70	Rizos	422.79	Transitorio	5.91	Saltación
95	37.20	5.9609	3.6383	5.06	Rizos	211.80	Transitorio	4.08	Saltación
96	39.00	3.6324	1.7307	0.93	Rizos	47.93	Transitorio	1.31	Suspensión
97	38.00	1.9414	0.6763	0.47	Rizos	7.32	Laminar	1.24	Suspensión
98	38.00	3.4605	1.6093	1.64	Rizos	41.44	Transitorio	2.44	Suspensión
99	42.70	12.0568	10.4662	20.70	Dunas	1752.65	Transitorio	6.72	Saltación
100	38.30	3.2433	1.4603	1.38	Rizos	34.12	Laminar	2.18	Suspensión
101	38.00	8.7018	6.4174	14.07	Dunas	658.92	Transitorio	7.10	Saltación
102	37.28	16.8746	17.3296	51.58	Dunas	4805.07	Transitorio	10.29	Rodamiento
103	36.60	6.3297	3.9812	3.79	Rizos	253.60	Transitorio	2.84	Saltación
104	38.00	4.7378	2.5781	3.14	Rizos	106.35	Transitorio	3.28	Saltación
105	40.20	9.3310	7.1258	12.57	Dunas	812.44	Transitorio	5.78	Saltación
106	40.60	8.2092	5.8802	10.61	Dunas	553.23	Transitorio	5.75	Saltación
107	40.42	10.7813	8.8501	13.28	Dunas	1253.19	Transitorio	5.04	Saltación
108	37.70	7.9886	5.6448	9.82	Rizos	509.82	Transitorio	5.53	Saltación
109	38.50	13.8238	12.8493	31.16	Dunas	2641.69	Transitorio	8.35	Rodamiento
110	38.00	5.7222	3.4221	5.33	Rizos	187.37	Transitorio	4.50	Saltación
111	38.00	6.2633	3.9188	5.24	Rizos	245.71	Transitorio	3.96	Saltación
112	37.00	8.1398	5.8058	10.64	Dunas	539.31	Transitorio	5.83	Saltación
113	40.60	24.1116	29.5991	77.29	Dunas	14017.72	Turbulento	8.88	Rodamiento
114	38.00	4.2952	2.2254	2.67	Rizos	79.24	Transitorio	3.12	Saltación
115	38.00	4.0153	2.0115	4.29	Rizos	64.74	Transitorio	5.40	Saltación
116	37.00	10.8101	8.8856	14.41	Dunas	1263.26	Transitorio	5.46	Saltación
117	37.00	12.9628	11.6678	20.67	Dunas	2178.21	Transitorio	6.06	Saltación
118	37.00	4.7695	2.6040	2.70	Rizos	108.49	Transitorio	2.80	Saltación
120	37.00	8.2334	5.9062	10.34	Dunas	558.13	Transitorio	5.60	Saltación
121	37.28	14.4195	13.6887	34.71	Dunas	2998.11	Transitorio	8.73	Rodamiento
122	39.07	5.1012	2.8804	3.64	Rizos	132.74	Transitorio	3.51	Saltación
123	38.50	4.4813	2.3716	2.82	Rizos	89.99	Transitorio	3.13	Saltación
151	35.00	5.2918	3.0433	5.06	Rizos	148.19	Transitorio	4.69	Saltación
152	40.00	12.9404	11.6376	18.25	Dunas	2166.94	Transitorio	5.37	Saltación
153	35.00	4.2085	2.1584	2.16	Rizos	74.54	Transitorio	2.59	Saltación
154	36.00	5.0579	2.8438	3.76	Rizos	129.40	Transitorio	3.67	Saltación
155	35.00	11.2327	9.4116	17.90	Dunas	1417.26	Transitorio	6.42	Saltación
156	42.00	24.9642	31.1828	74.86	Dunas	15557.92	Turbulento	8.13	Rodamiento
157	35.00	3.6197	1.7217	2.02	Rizos	47.43	Transitorio	2.84	Saltación
158	38.00	13.5959	12.5330	26.76	Dunas	2513.20	Transitorio	7.34	Saltación
159	38.00	12.7432	11.3725	29.78	Dunas	2069.34	Transitorio	8.96	Rodamiento
160	38.00	12.4005	10.9169	24.74	Dunas	1906.85	Transitorio	7.73	Rodamiento
161	38.00	16.1226	16.1842	55.77	Dunas	4190.84	Transitorio	11.92	Rodamiento
162	37.00	14.4334	13.7086	34.05	Dunas	3006.83	Transitorio	8.56	Rodamiento

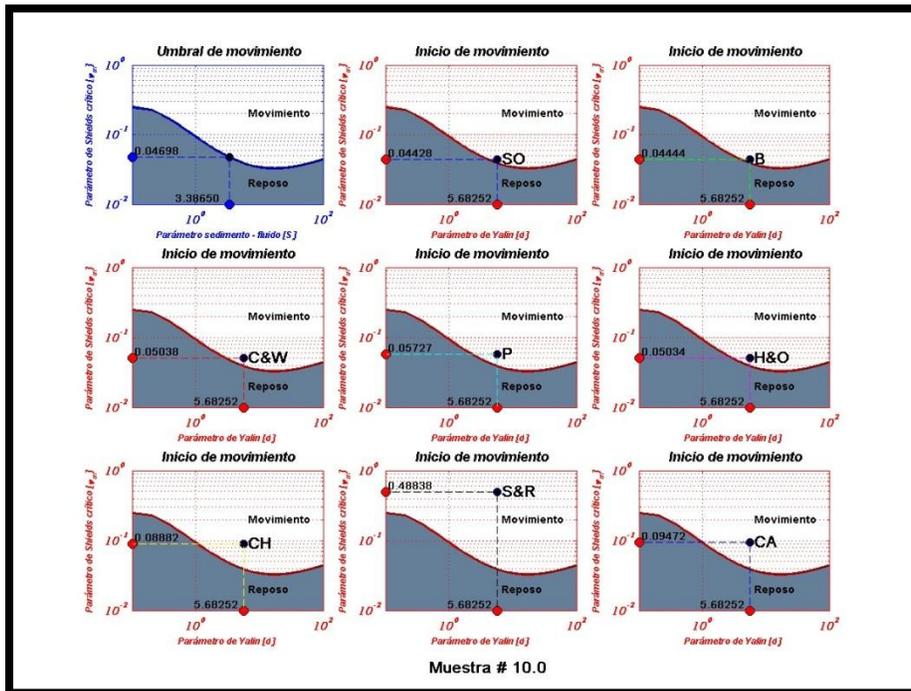
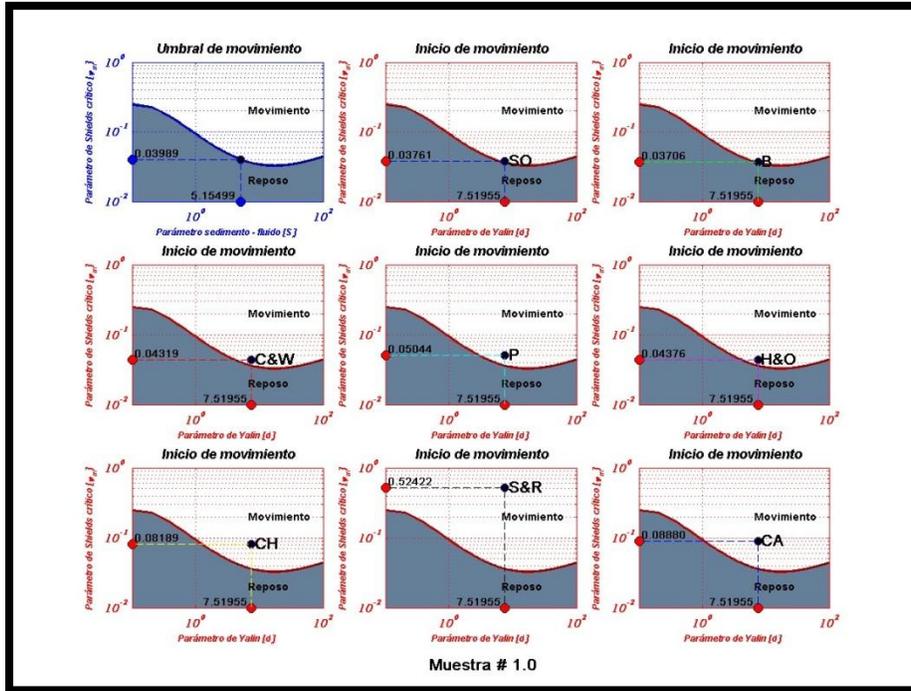
INSTITUTO DE INGENIERÍA

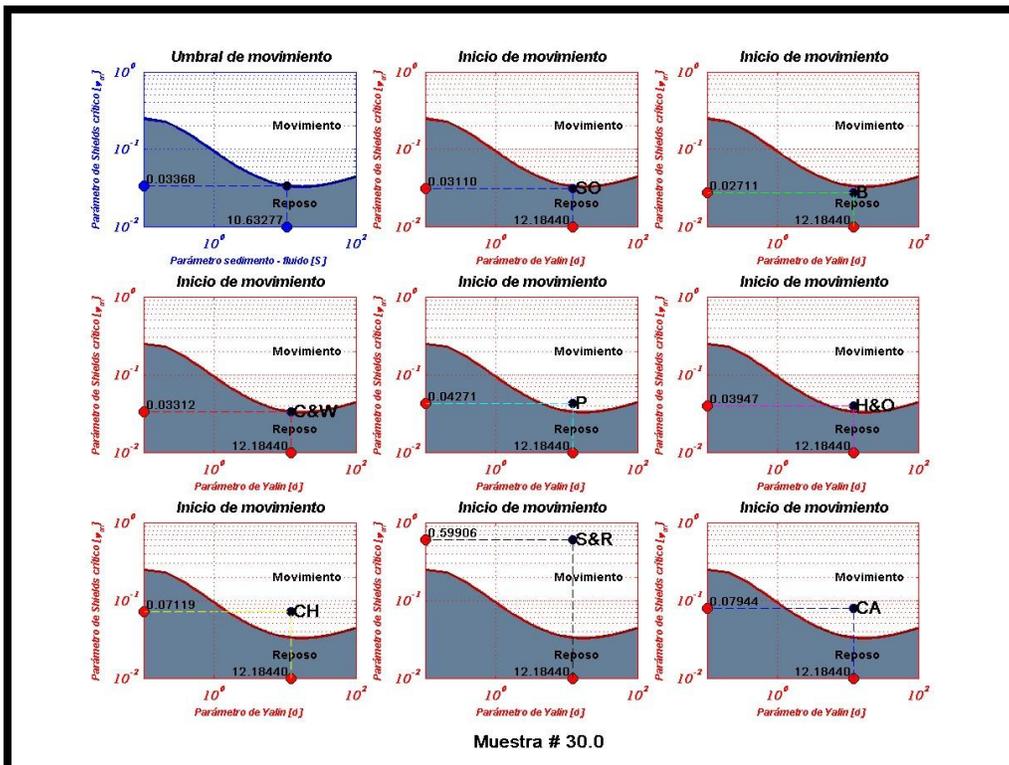
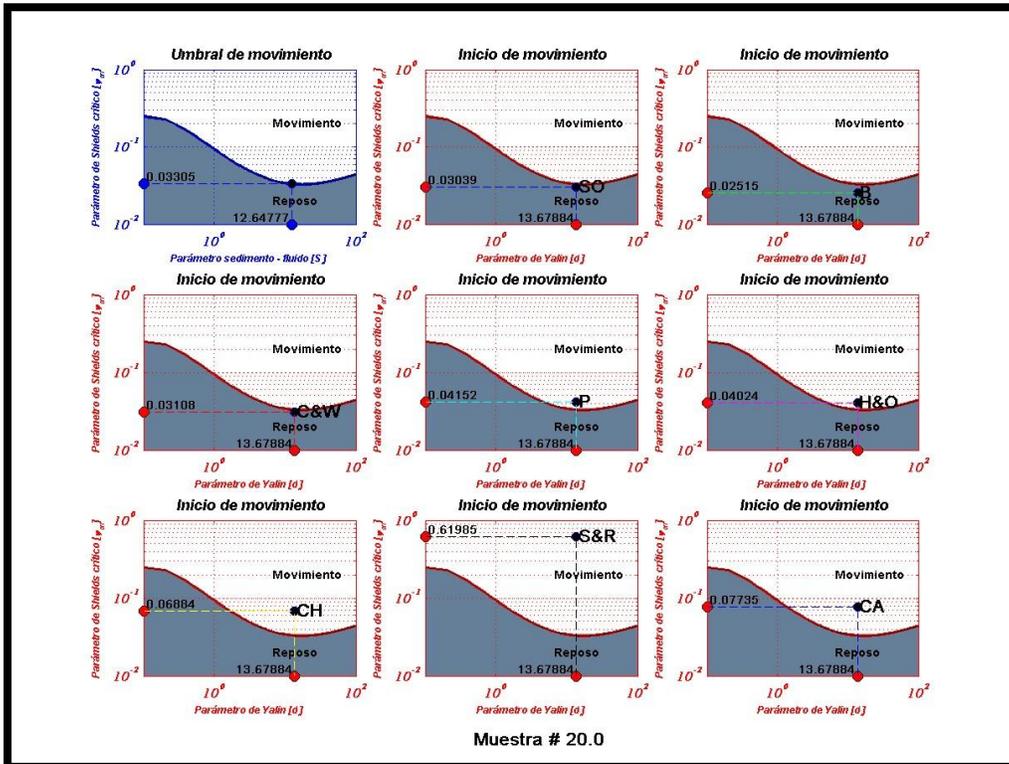
163	38.00	10.7426	8.8025	20.17	Dunas	1239.74	Transitorio	7.69	Rodamiento
164	38.00	14.3449	13.5827	39.37	Dunas	2951.83	Transitorio	10.01	Rodamiento
165	37.00	9.5729	7.4046	20.52	Dunas	877.25	Transitorio	9.13	Rodamiento
166	37.00	10.0052	7.9119	18.01	Dunas	1001.56	Transitorio	7.57	Rodamiento
167	38.00	6.6126	4.2511	9.02	Rizos	289.14	Transitorio	6.41	Saltación
168	38.20	9.1267	6.8931	15.30	Dunas	760.24	Transitorio	7.25	Saltación
169	38.00	9.3100	7.1017	19.40	Dunas	806.96	Transitorio	8.96	Rodamiento
170	39.80	6.1832	3.8438	6.40	Rizos	236.39	Transitorio	4.93	Saltación

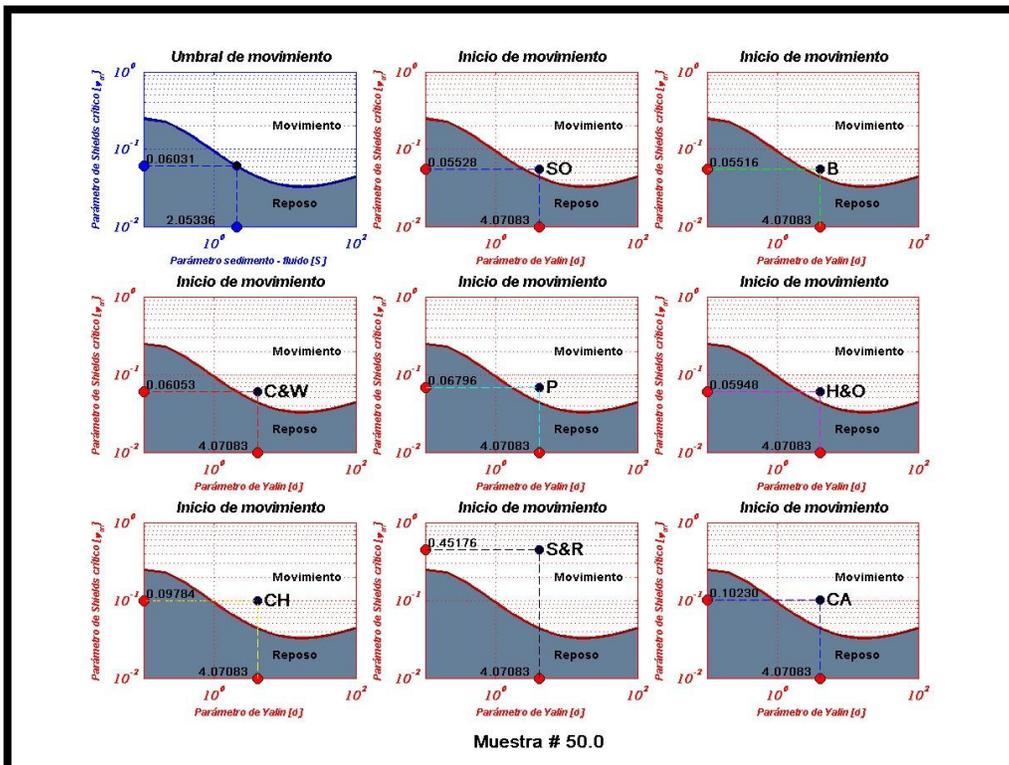
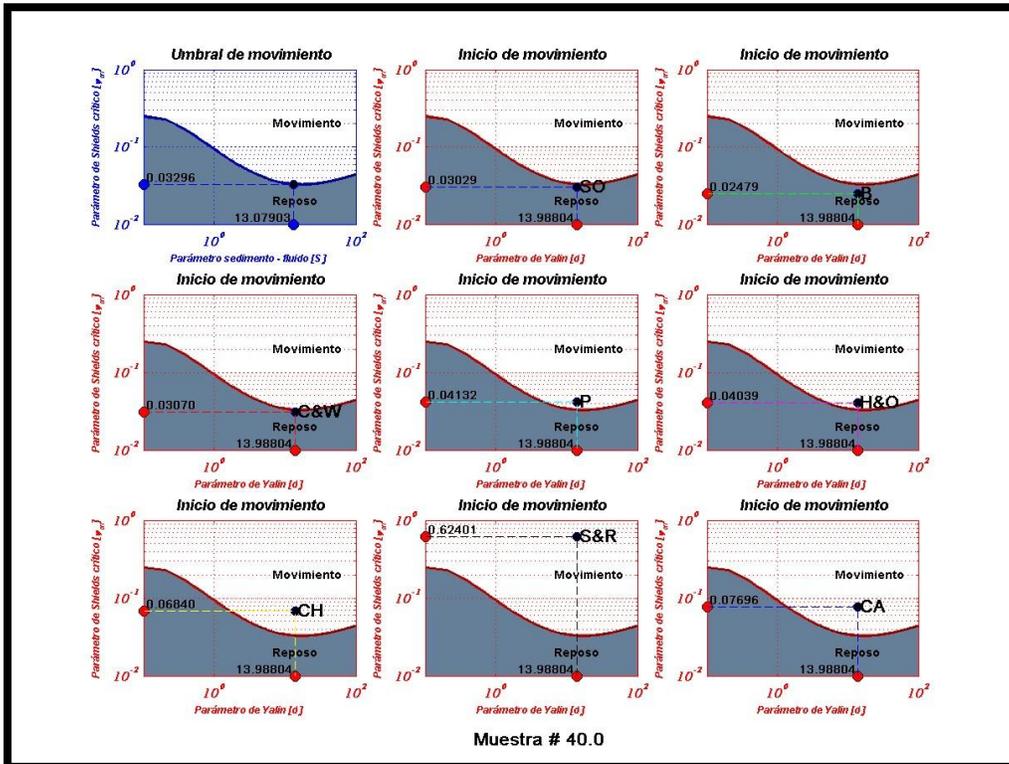
7.2. ANEXO 2: VELOCIDAD DE INICIO DE MOVIMIENTO

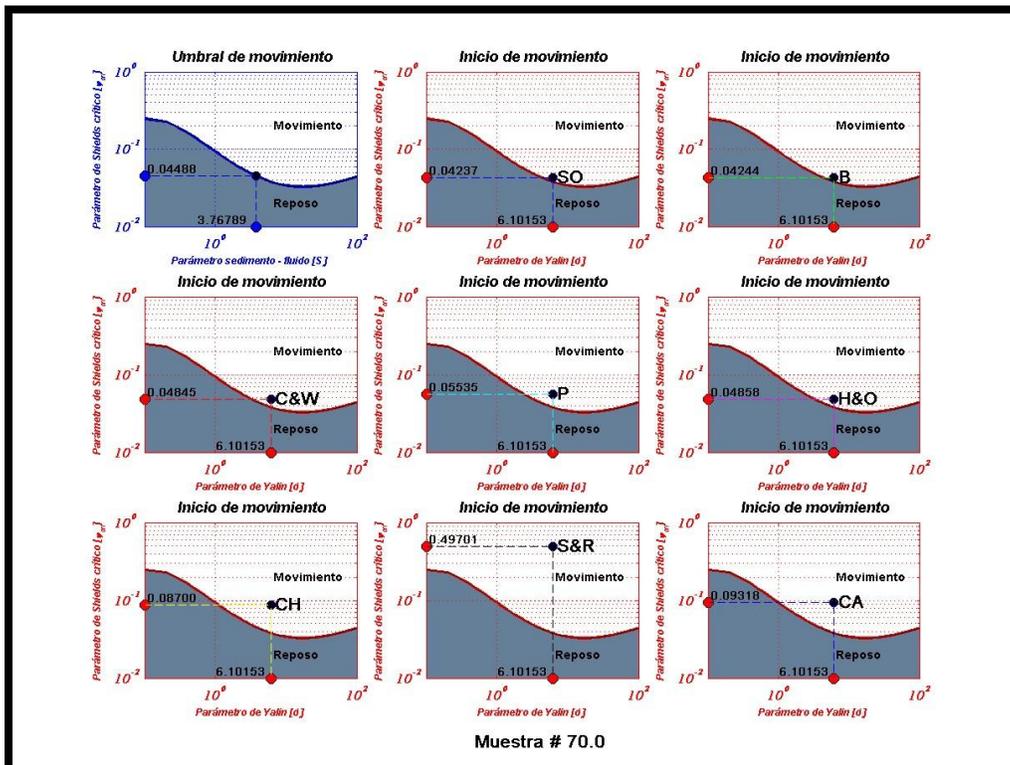
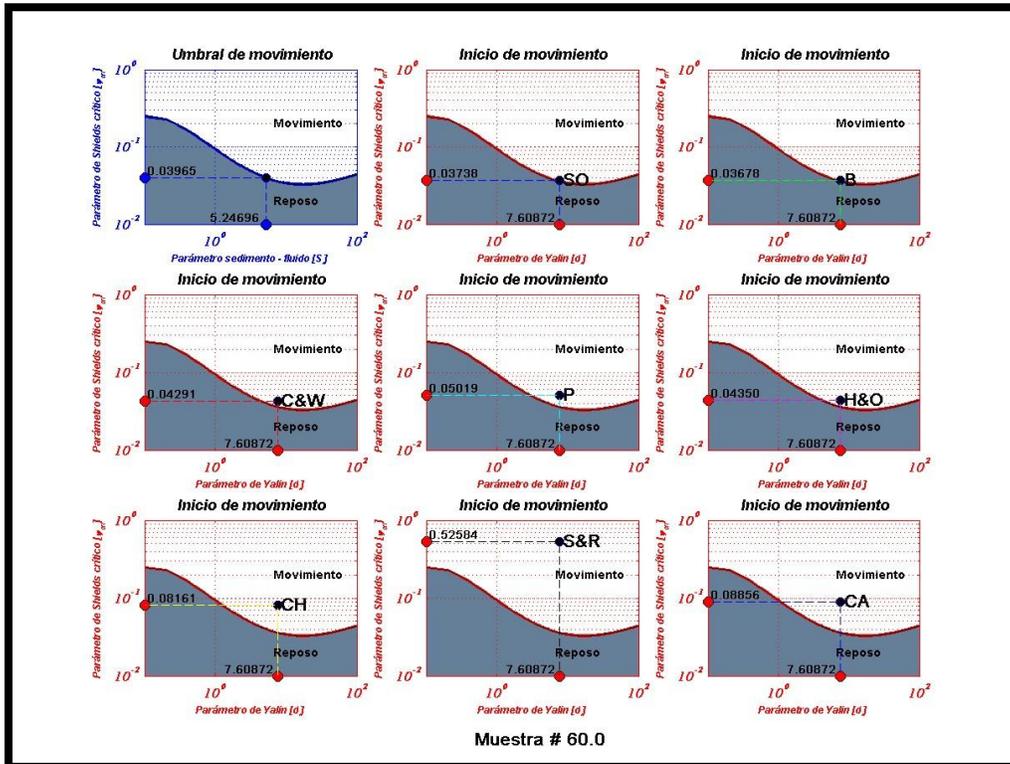
7.2.1. Inicio de movimiento de las muestras de arena del estado de Quintana Roo, México

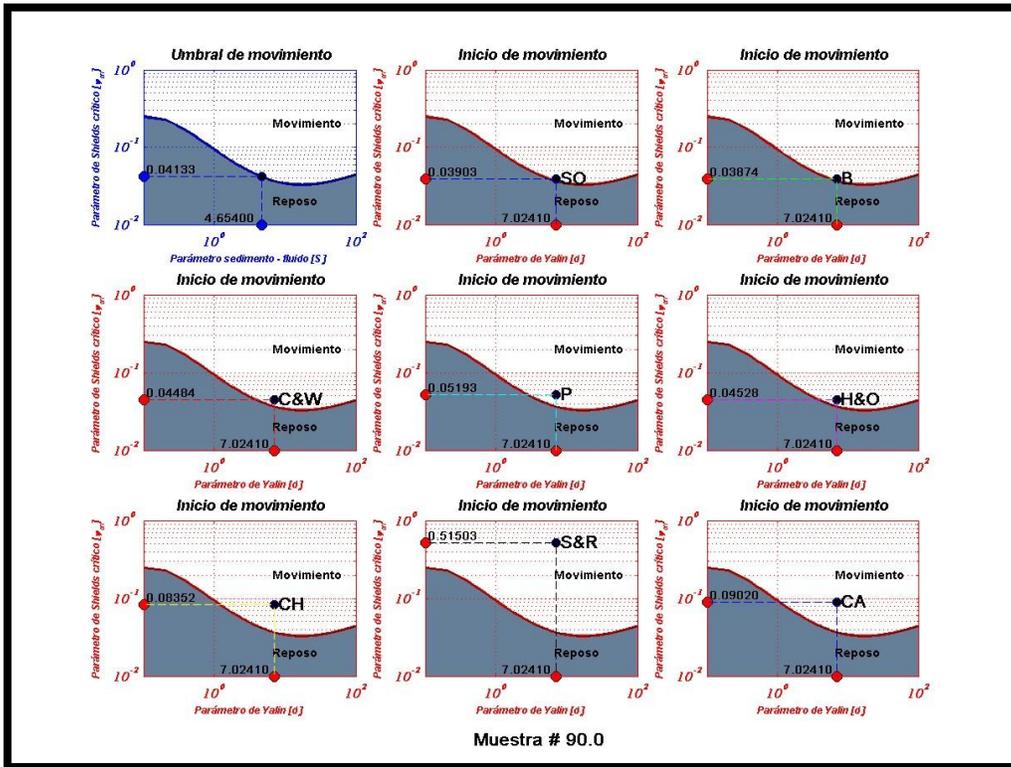
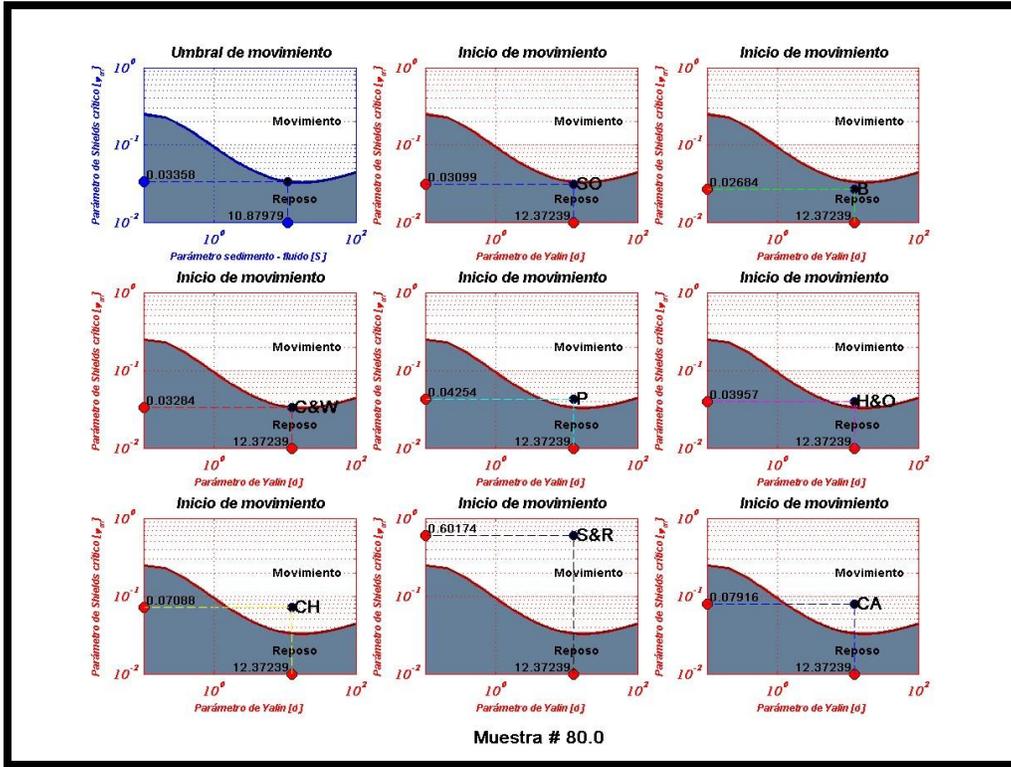
A continuación se muestran las figuras para las muestras de arena que corresponden a la misma información colocada en las tablas del apartado 7.1.3.

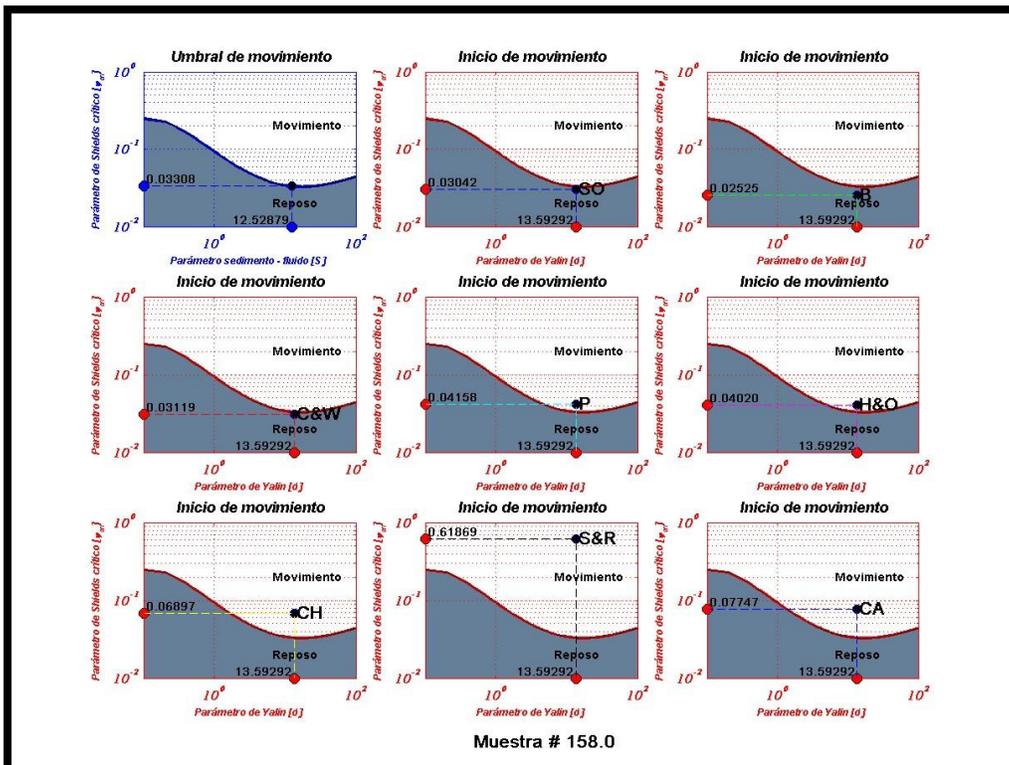
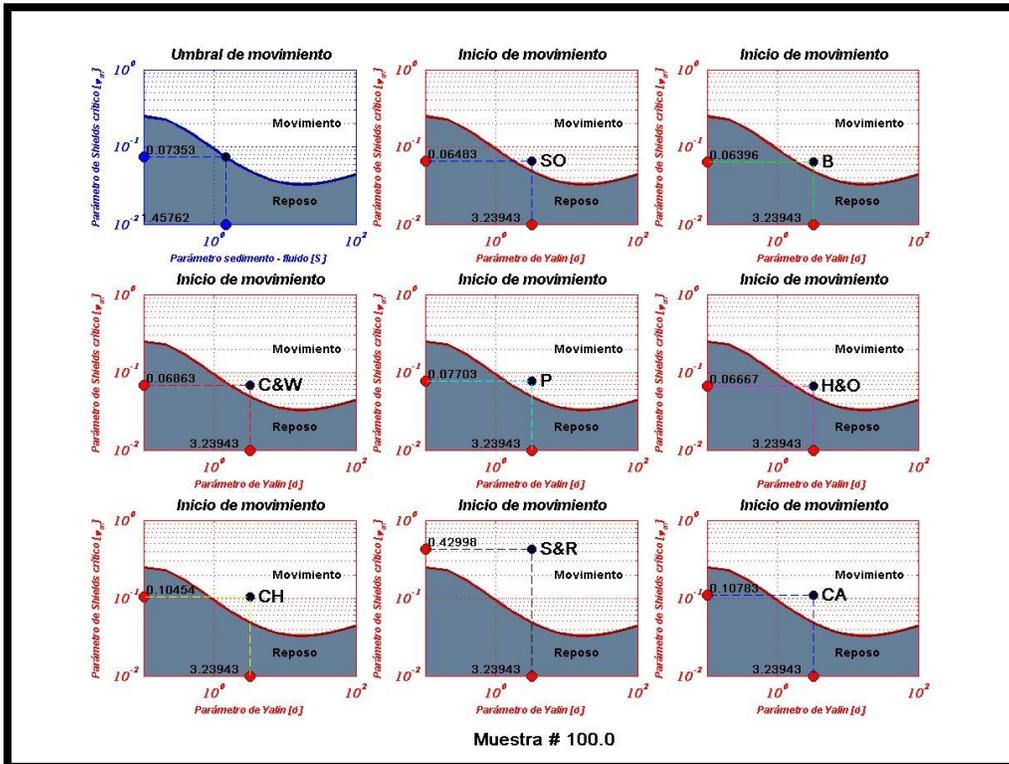


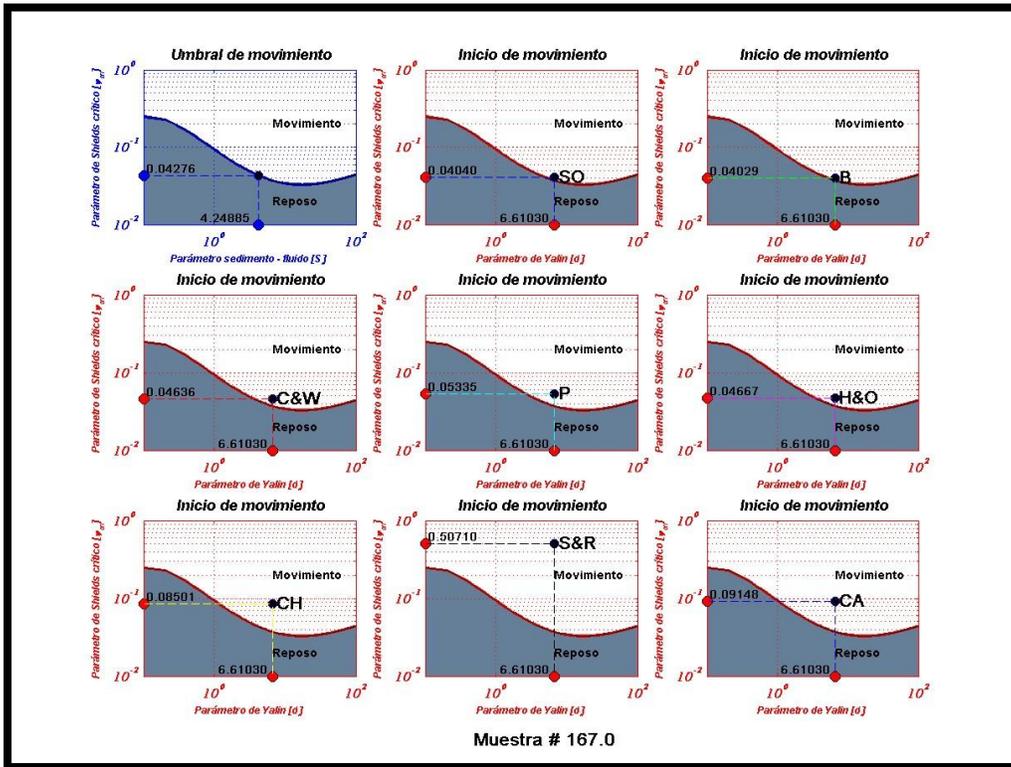
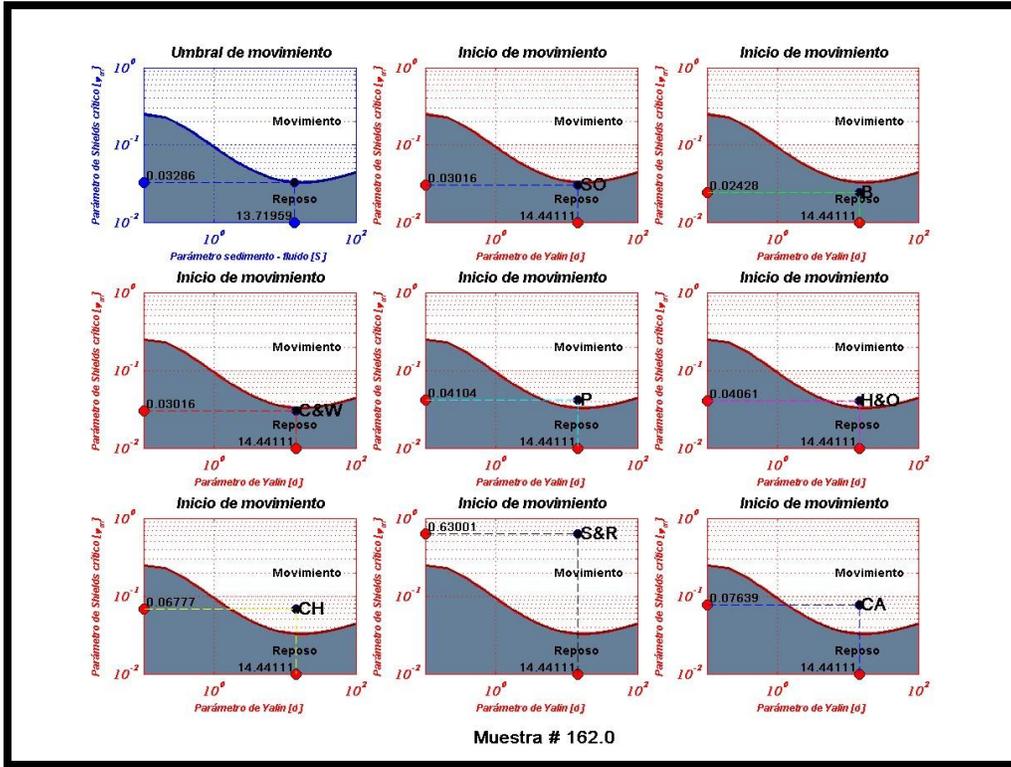


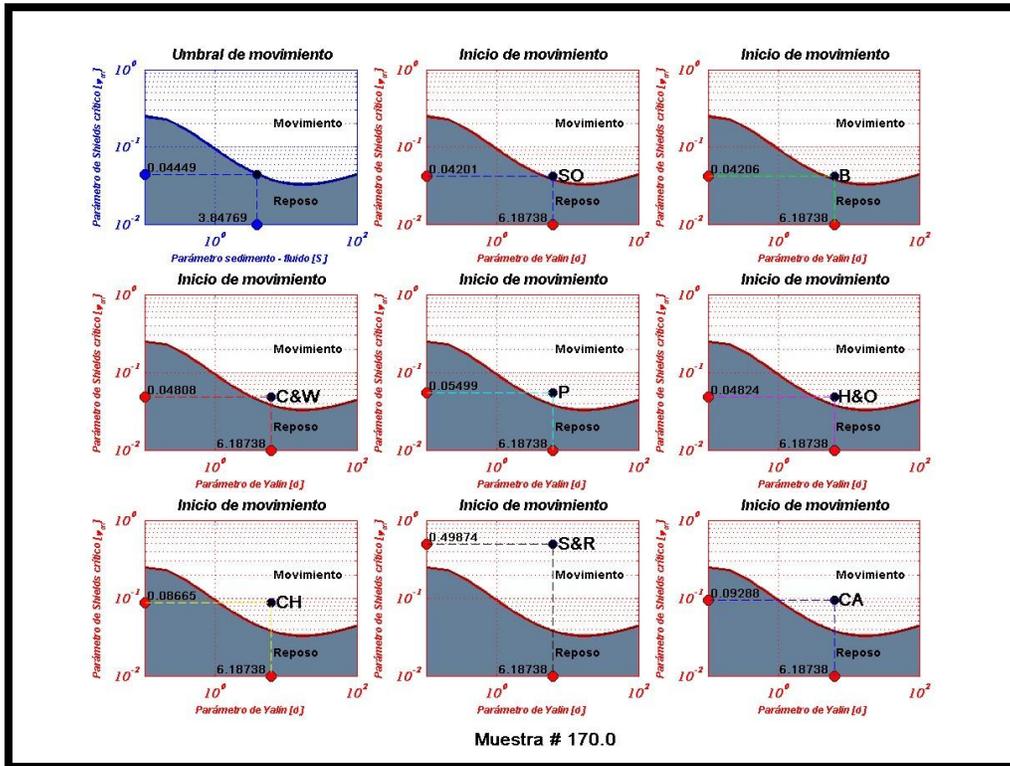




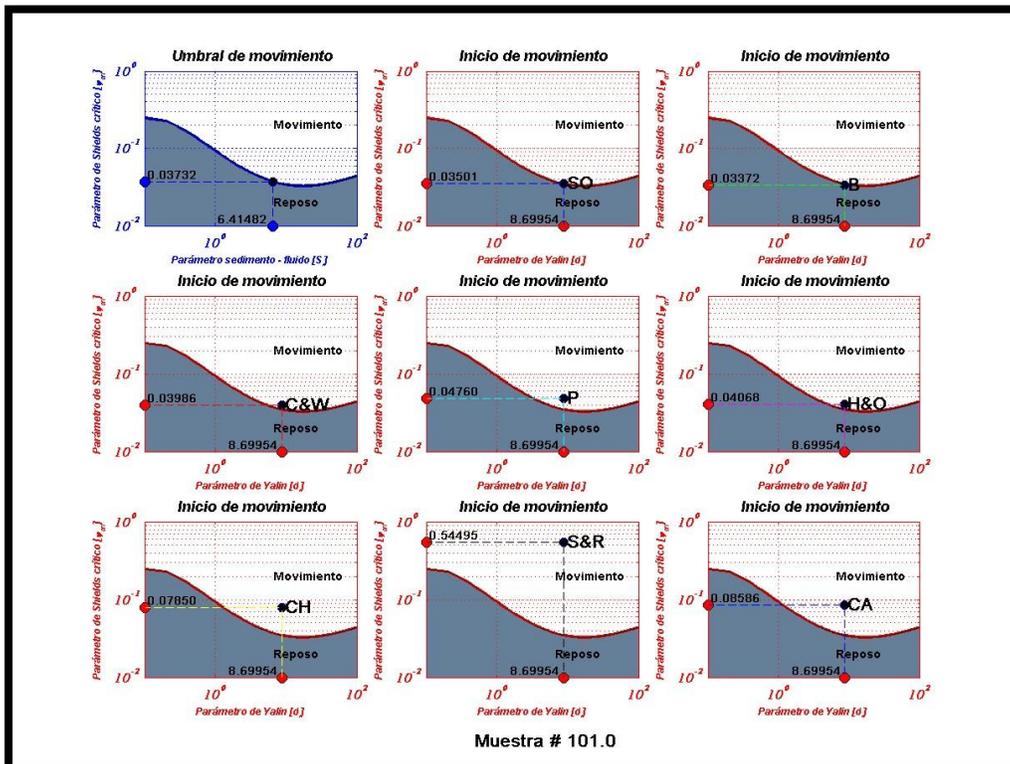


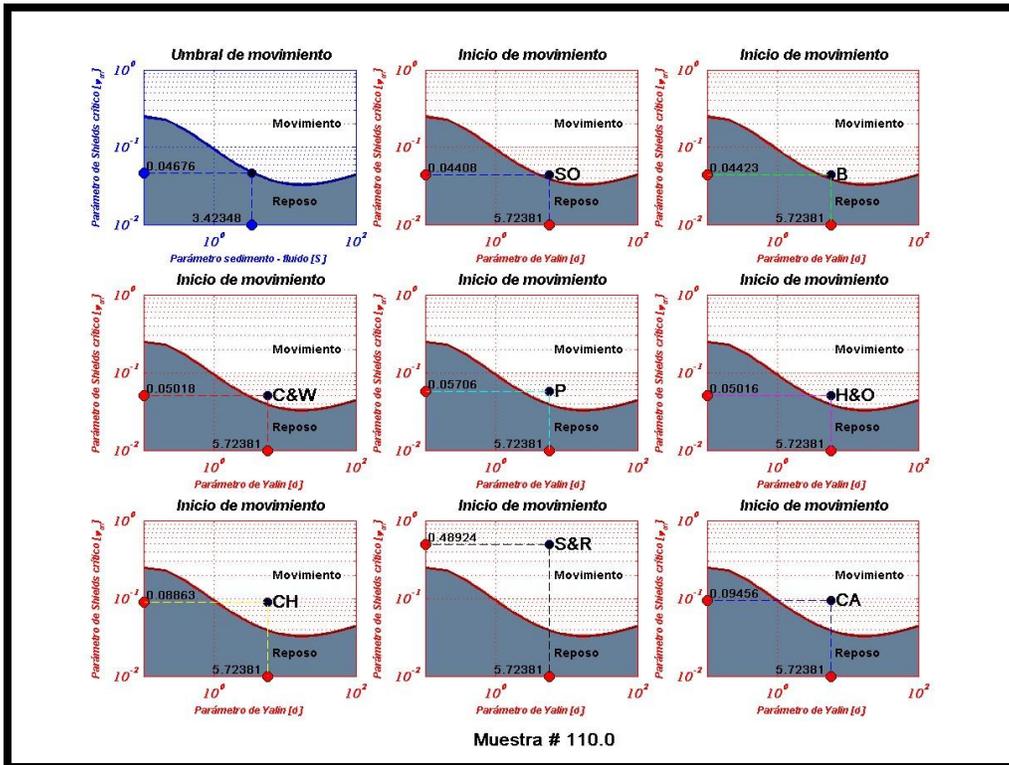
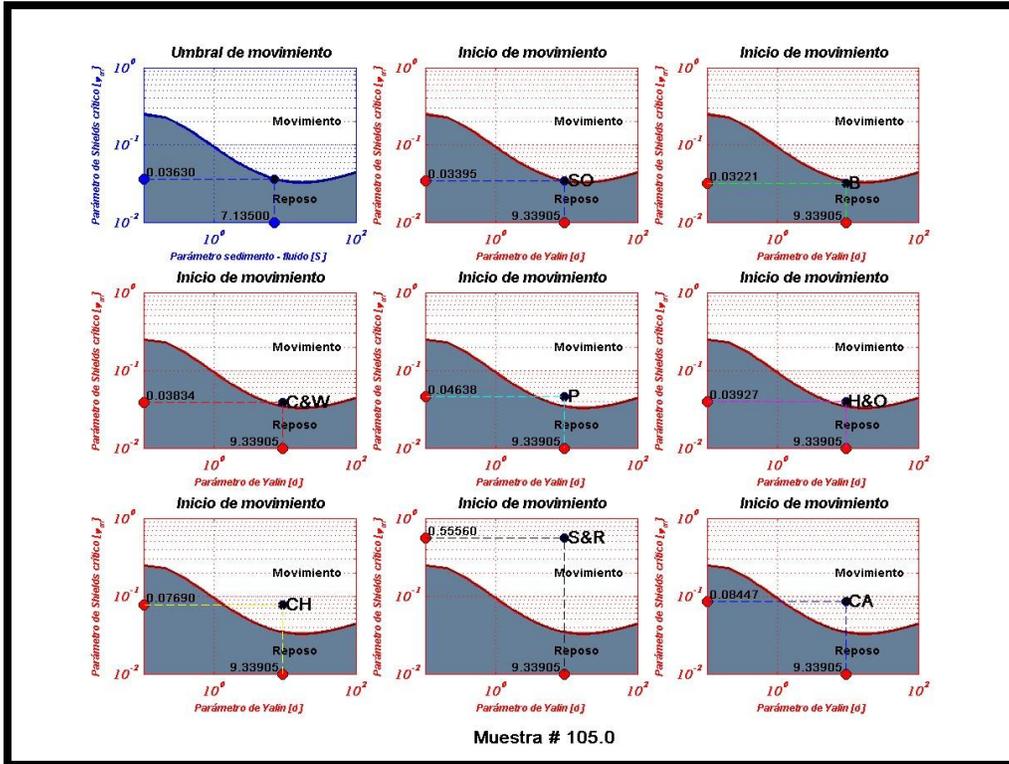


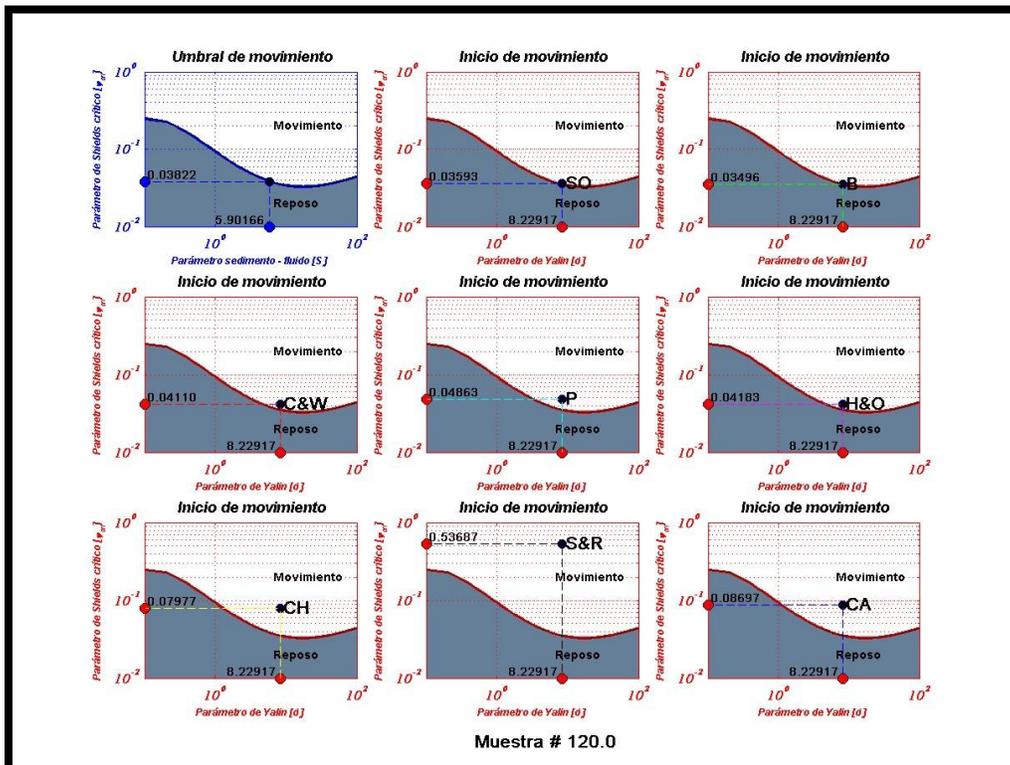
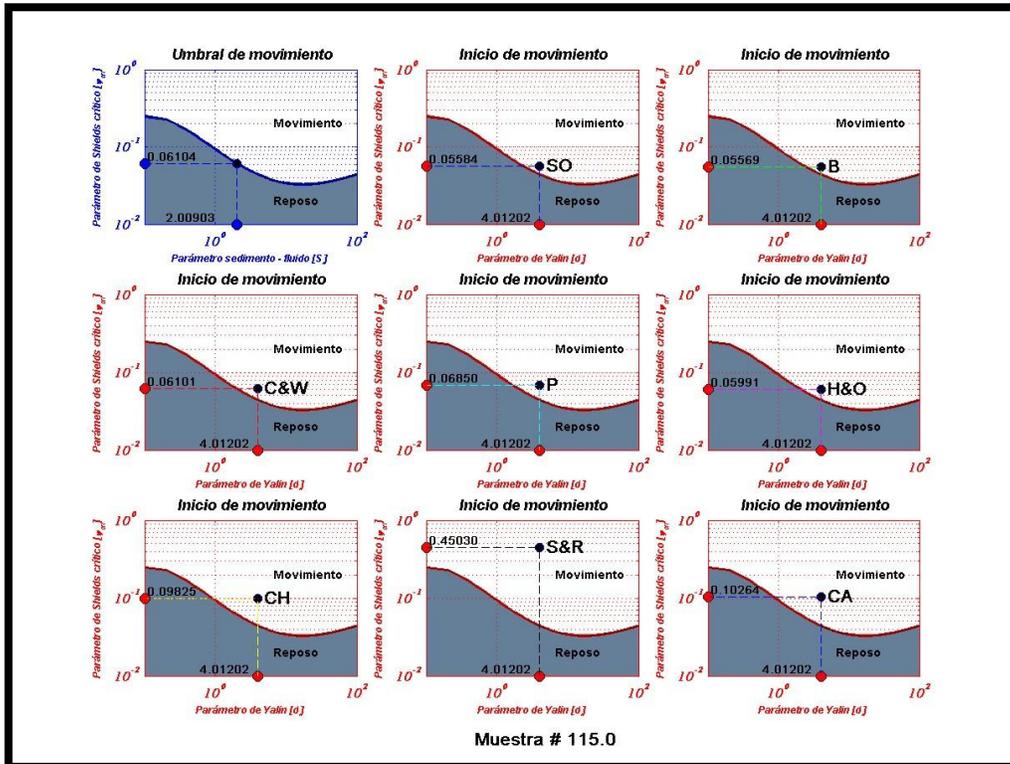


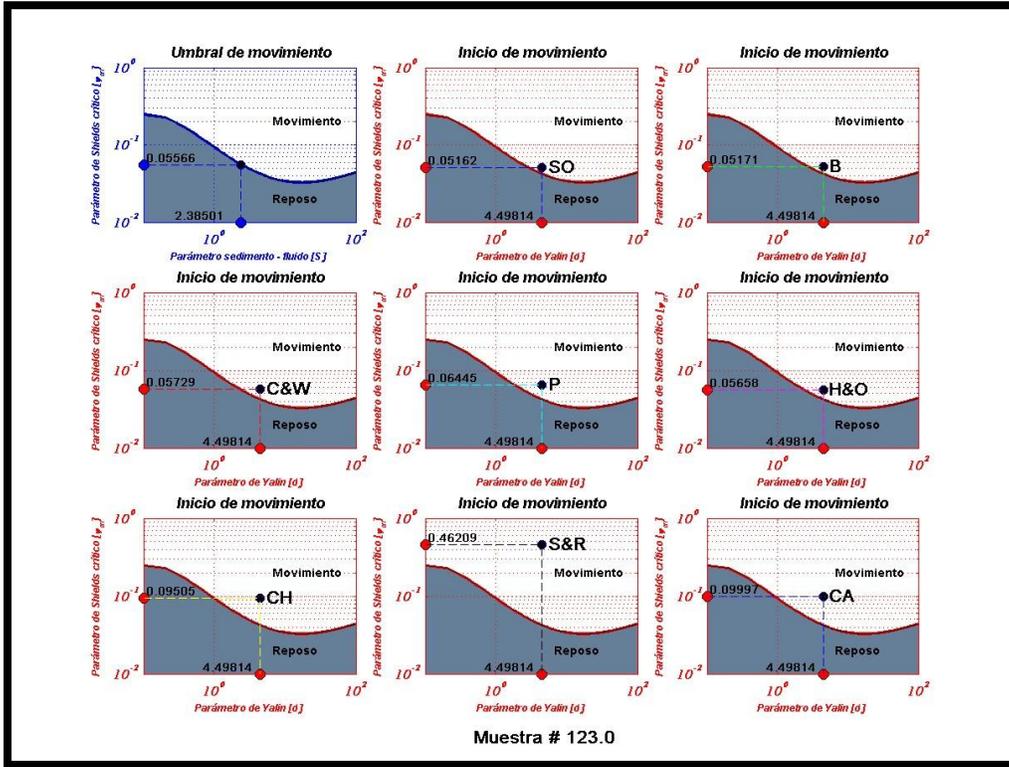


7.2.2. Inicio de movimiento de las muestras de arena del estado de Yucatán, México









7.2.3. Inicio de movimiento de las muestras de arena del estado de Campeche, México

