

SECCIÓN III.- MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE CAÍDA

III.1.- SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS

El total de muestras utilizadas fueron 143 provenientes de los 59 sitios descritos anteriormente. En esta tesis se decidió trabajar con el total de las muestras, a diferencia de Alcérreca (2009), quien utilizó una selección de las mismas. Como parte de los resultados que se mostrarán más adelante en esta tesis, se confirman y se extienden a un rango más amplio los resultados obtenidos por Alcérreca (2009).

Los criterios utilizados en aquel trabajo y que se pretenden confirmar en esta tesis fueron los siguientes:

- Criterio estadístico
- Localización geográfica
- Zona del perfil al que pertenece la muestra
- Geología

Criterio estadístico.

Los parámetros que se utilizaron en esta primera parte para la selección de muestras fueron: d_{50} , densidad relativa de la muestra, promedio del tamaño de los granos, desviación estándar de los granos y modo de la curva de frecuencia (unimodal, bimodal, etc).

Localización geográfica.

En este paso lo que se buscó fue que las muestras seleccionadas abarcaran un área de influencia aceptable de tal manera que estas últimas fueran lo suficientemente representativas de la península de Yucatán (Solo estados de Yucatán y Quintana Roo).

Zona del perfil al que pertenece la muestra.

En este siguiente paso para la selección de muestras, se determinó aquellas muestras que fueran representativas, además de la localización geográfica, la zona del perfil de playa al cual pertenecen dichas muestras seleccionadas, es decir, que cubrieran las tres zonas del perfil de playa: zona seca o backshore, zona de lavado o foreshore y zona sumergida u offshore.

Geología

En esta última etapa se buscó considerar la geología de la región a fin de cubrir las unidades geológicas que afloran actualmente sobre la línea costera de la península de Yucatán. (Formación Carrillo Puerto, depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada, depósitos palustres y depósitos de litoral)

Como parte de los resultados que se mostrarán más adelante en esta tesis, es confirmar aquellos resultados obtenidos en ese trabajo. De ser así, se estaría contando con criterios sólidos con los cuales se obtendrían ventajas notables al aplicarlos. Una de tales ventajas sería no realizar todas las pruebas de velocidad de caída para una

región, con lo cual se tendrían ahorro de tiempo considerable al realizar los ensayos en laboratorio.

III.2.- TRABAJO EXPERIMENTAL

III.2.1.- Descripción del método de trabajo

La naturaleza de la metodología empleada es sencilla, no obstante para ello se requirió de instrumentos y aparatos electrónicos para su ejecución. Los materiales empleados para determinar la velocidad de caída fueron los siguientes:

Instrumentos:

- Recipiente para colocar los granos seleccionados. En este caso se empleó una caja rectangular con fondo negro.
- Papel milimétrico.
- Instrumento con punta aguda para la selección de los granos.
- Lupa.
- Probeta graduada de plástico
- Probeta de cristal sin graduación
- Cinta con graduación
- Dos mamparas de color negro.
- Dos tripies

Aparatos:

- Cámara digital Nikon® D700 con microlentes de 105 mm y enfoque autoajustable.
- Cámara de video con una resolución de 30 cuadros por segundo (10.2 mega pixeles por cuadro).

Los pasos que se siguieron para obtener la velocidad de caída se resumen básicamente en:

- Análisis fotográfico.
- Medición de la velocidad de caída.
- Análisis de videos.

Análisis fotográfico.

Una vez que se contaba con los d_{50} de cada una de las muestras el experimento comienza con tomar al azar una pequeña parte de cada una de las muestra y colocarla sobre la hoja milimétrica. Puesta sobre la hoja el material se dispersaba éste lo suficiente de tal manera que no quedaran pequeños montículos, esto con el fin de facilitar la extracción de las partículas que poseyeran un d_{50} lo más cercano posible al d_{50} estimado con el análisis granulométrico. En seguida se tomó una fotografía del material, la cual fue analizada por medio de una rutina en el programa Matlab®, con la finalidad de estimar cuales partículas poseían un d_{50} similar al teórico.

El número esperado de granos o partículas que se puede obtener es función únicamente de fijar un rango de diámetro en el cual se encuentren precisamente los

diámetros de las partículas seleccionadas. Alcérreca (2009) trabajó con 9 granos por ensayo. Tomando como referencia esto, se realizaron una serie de pruebas previas para poder fijar el rango en el cual se trabajaría. Para fijarlo, se trabajó con 150 granos obteniéndose así tres intervalos, de los cuales se optó por utilizar aquel en el cual se esperaba obtener 12 partículas por ensayo.

Tabla III.1 Intervalos de diámetros

Rango o límites (píxeles)	Número de granos obtenidos con un d_{50} (píxeles) parecido al teórico
$d_{50} \pm 0.2$	8
$d_{50} \pm 0.3$	10
$d_{50} \pm 0.6$	12

La justificación de poder extraer 12 partículas por ensayo fue por el tamaño de las partículas, pues al trabajar con partículas pequeñas, se trató de cubrir la posibilidad de que alguna(s) de las partículas no se pudiera observar en el análisis de los videos debido al efecto de amplificación que ocasiona el agua cuando se observan las fronteras del tubo.

Medición de la velocidad de caída.

La medición de la velocidad de caída se realizó de la siguiente manera: una vez seleccionados los granos, se tomó uno por uno colocándolos en una probeta con agua en reposo total. La probeta previamente se le había colocado una cinta métrica. La caída de los granos se grabó con una cámara de video con una resolución y calidad de las imágenes aceptables. Debido al color de los granos, se optó por colocar un fondo negro para que de esta manera se pudieran distinguir los granos en su recorrido.

A causa de trabajar con diferentes tamaños de partículas, fue necesario determinar el enfoque de la cámara y el intervalo de diámetros correspondiente. Este resultado también se obtuvo de los **150** granos ensayados previamente.

Tabla III.2 Diámetro de partícula y su correspondiente distancia recorrida

Diámetro de partícula (mm)	Distancia recorrida por las partículas
Menor – 0.15	10 cm
0.15 – 0.25	15 cm
0.25 – 0.50	20 cm
0.50 – 0.80	25 cm
0.80 – máximo valor	Abrir totalmente el zoom

Análisis de videos.

Una vez capturado la caída de las partículas de manera digital, fue posible el análisis de los videos cuadro por cuadro para que de esta forma se obtuviera el tiempo de cada una de las partículas, tiempo que le tomó a cada una de ellas recorrer la distancia enfocada.

De esta manera fue como se prosiguió para obtener la velocidad de caída de cada una de las partículas de todos los sitios que hasta el momento se han obtenido muestras de las arenas de sus playas.

III.2.2.- Particularidades del método de trabajo.

El método presentó inconvenientes mínimos, sin embargo, requieren ser mencionados.

El primer inconveniente que se presenta es el tener que usar el ojo como herramienta principal de visión, pues al trabajar con partículas tan pequeñas (menores a 0.1 mm), la precisión en el manejo de éstas se complica.

Después de trabajar con 1711 granos (incluidos los 150 granos previos), es posible dar una referencia en la cual, aún utilizando una lupa como apoyo visual, el manejo de partículas tan pequeñas se vuelve un tanto difícil. En este trabajo y manejando dicha cantidad de granos, aquellos con diámetro mayor o igual a 0.15 mm, no presentan mayor reto para ser observados visualmente; sin embargo, aquellos granos con diámetro menor a 0.15 mm, implicaron un mayor esfuerzo visual, mayor paciencia y mucho cuidado en el manejo de los mismos.

En las 37 primeras pruebas se utilizó un tubo de acrílico de 5 cm de diámetro y 93 cm de altura. A partir de la prueba 38 se empleó una probeta de vidrio sin graduación de 6 cm de diámetro y 44 cm de altura. En ambos casos, la tensión superficial fue un reto que se superó con la práctica.

El segundo inconveniente o reto que se presentó en este trabajo de laboratorio fue el tema de la tensión superficial. Como se mencionó antes, las partículas con un d_{50} menores a 0.15 mm, presentaron cierta dificultad para su manipulación, y especialmente al tratar de romper la tensión superficial para que la partícula empezara su movimiento de caída a través del agua.

En las primeras pruebas la tensión superficial fue determinante para el inicio de movimiento de las partículas, pues aún no se contaba con la suficiente experiencia y práctica para lidiar con el problema. Desde luego este problema fue resuelto después de muchas repeticiones de la siguiente manera: independientemente de la forma que poseyera la partícula, la solución consistió en sumergir por debajo de la superficie de tensión superficial las partículas que así lo permitieron, cuidando que la partícula no se desprendiera del instrumento con el cual se tomaron los granos de manera individual. Posteriormente, lo que siguió fue sacar el instrumento fuera del agua, de tal manera que el contacto de la partícula con la tensión superficial, venciera la adherencia que existía entre el instrumento y la partícula, iniciando la caída de la misma.

Esta solución no aplicó a todos los granos, pues algunos en el instante que hubo contacto con la superficie del agua, se desprendían del instrumento, quedando atrapadas en la tensión superficial. Para dar solución a esto, hubo que imprimirles un

pequeño empuje de tal manera que fuera lo suficiente para romper la tensión superficial para no adicionarle a las partículas una velocidad inicial, alterando con ello las mediciones. Aún cuando suena algo sencillo, la naturaleza de esta solución es muy delicada, pues al depender de este empuje, y este, a su vez, del pulso de la persona, resulta una tarea un tanto complicada. Sin embargo, con el paso de las pruebas fue posible desarrollar la suficiente destreza para lidiar con el problema.

III.3.- VELOCIDAD DE CAÍDA EXPERIMENTAL (W_f).

III.3.1.- Resultados del análisis fotográfico

La importancia de este análisis radica en el hecho de haber seleccionado uno a uno los granos pues se tuvo control del manejo de los datos de diámetros y de velocidad de caída, es decir, al tener ordenadas las partículas y probar una a una se puede verificar la variación de la velocidad de caída dentro de una misma muestra. Este hecho viene desde luego asociado al cambio del diámetro que poseen cada uno de los granos. El control, por tanto, que se tiene de las partículas, así como de los datos que les corresponden, es exacto.

Aún cuando sale del alcance de este trabajo, cabe mencionar que las fotografías tomadas pueden servir para hacer un análisis de la forma de la partícula, pues como se mencionó antes, el factor de forma participa en algunas de las ecuaciones empíricas de velocidad de caída y no sólo el d_{50} , pues para realizar las pruebas el único dato utilizado fue éste último.

Sin embargo, se pudo realizar una caracterización visual a través del ojo de la forma de las partículas con las que se trabajó y además, al observar la caída de las partículas a través de la columna de agua, se determinó que la forma de los granos juegan un papel importante en la caída de las mismas porque al variar la forma de ésta, la velocidad de caída cambia, e inclusive, la trayectoria que se esperaría tuvieran los granos cambiaba. Por ejemplo, al tener partículas casi redondas, ya fuera con aristas agudas o redondeadas, la trayectoria de la caída generalmente era recta; por otro lado, la caída de partículas de forma alargada irregulares o cilíndricas era básicamente recta, pero con la particularidad de giraban alrededor de su centro de masa, por mencionar algunas. Esta caracterización visual se hizo sólo para aquellas partículas que así lo permitían, pues en general, partículas que poseían un d_{50} inferior a los 0.15 mm fue imposible observar la forma que poseían aún con ayuda de una lupa. Sin embargo, para estas partículas tan pequeñas, independientemente de la forma que tuviesen, es posible decir que la trayectoria de caída que seguían fue prácticamente recta. A continuación se muestran algunos ejemplos de ellos.

Tabla III.3 d_{50} teórico y experimental del sitio Puerto Morelos 2 zona backshore

NUMERO GRANO	d_{50} (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	d_{50} MEDIDO (mm)
1	0.17223	155.96	26.8609908	26.74	0.17145
2	0.17223	155.96	26.8609908	26.92	0.17261
3	0.17223	155.96	26.8609908	26.11	0.16741
4	0.17223	155.96	26.8609908	27.06	0.17351
5	0.17223	155.96	26.8609908	26.98	0.17299
6	0.17223	155.96	26.8609908	26.5	0.16992
7	0.17223	155.96	26.8609908	26.92	0.17261
8	0.17223	155.96	26.8609908	26.79	0.17177
9	0.17223	155.96	26.8609908	26.8	0.17184
10	0.17223	155.96	26.8609908	26.33	0.16883
11	0.17223	155.96	26.8609908	26.34	0.16889
12	0.17223	155.96	26.8609908	26.41	0.16934

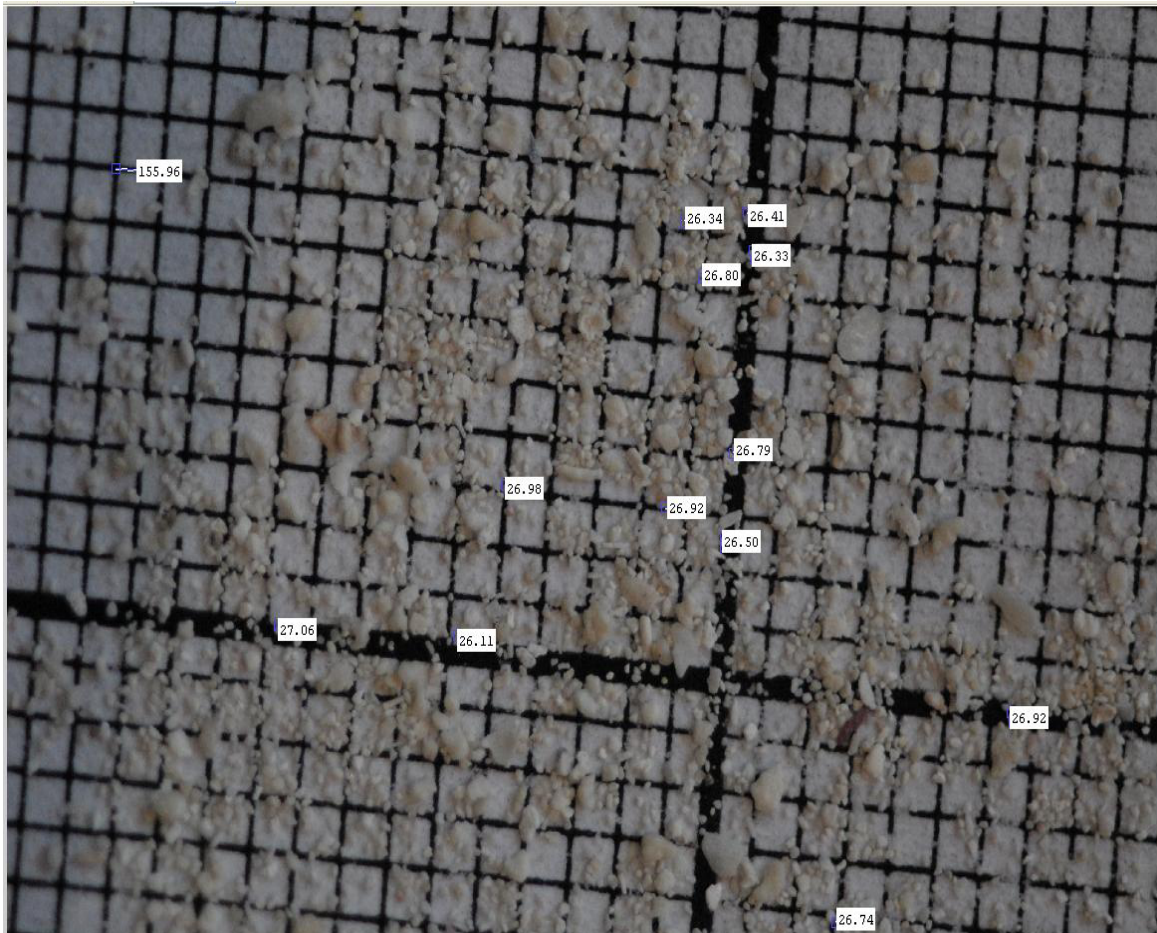


Figura III.1 Arena del sitio Puerto Morelos 2, Quintana Roo, México (zona backshore)

Tabla III.4 d_{50} teórico y experimental del sitio Punto 5 zona offshore

NUMERO GRANO	d_{50} (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	d_{50} MEDIDO (mm)
1	0.56421	146.38	82.5890598	82.73	0.56517
2	0.56421	146.38	82.5890598	82.7	0.56497
3	0.56421	146.38	82.5890598	82.8	0.56565
4	0.56421	146.38	82.5890598	82.86	0.56606
5	0.56421	146.38	82.5890598	82.7	0.56497
6	0.56421	146.38	82.5890598	82.56	0.56401
7	0.56421	146.38	82.5890598	82.46	0.56333
8	0.56421	146.38	82.5890598	82.2	0.56155
9	0.56421	146.38	82.5890598	82.55	0.56394
10	0.56421	146.38	82.5890598	82.6	0.56428
11	0.56421	146.38	82.5890598	82.63	0.56449
12	0.56421	146.38	82.5890598	82.89	0.56627

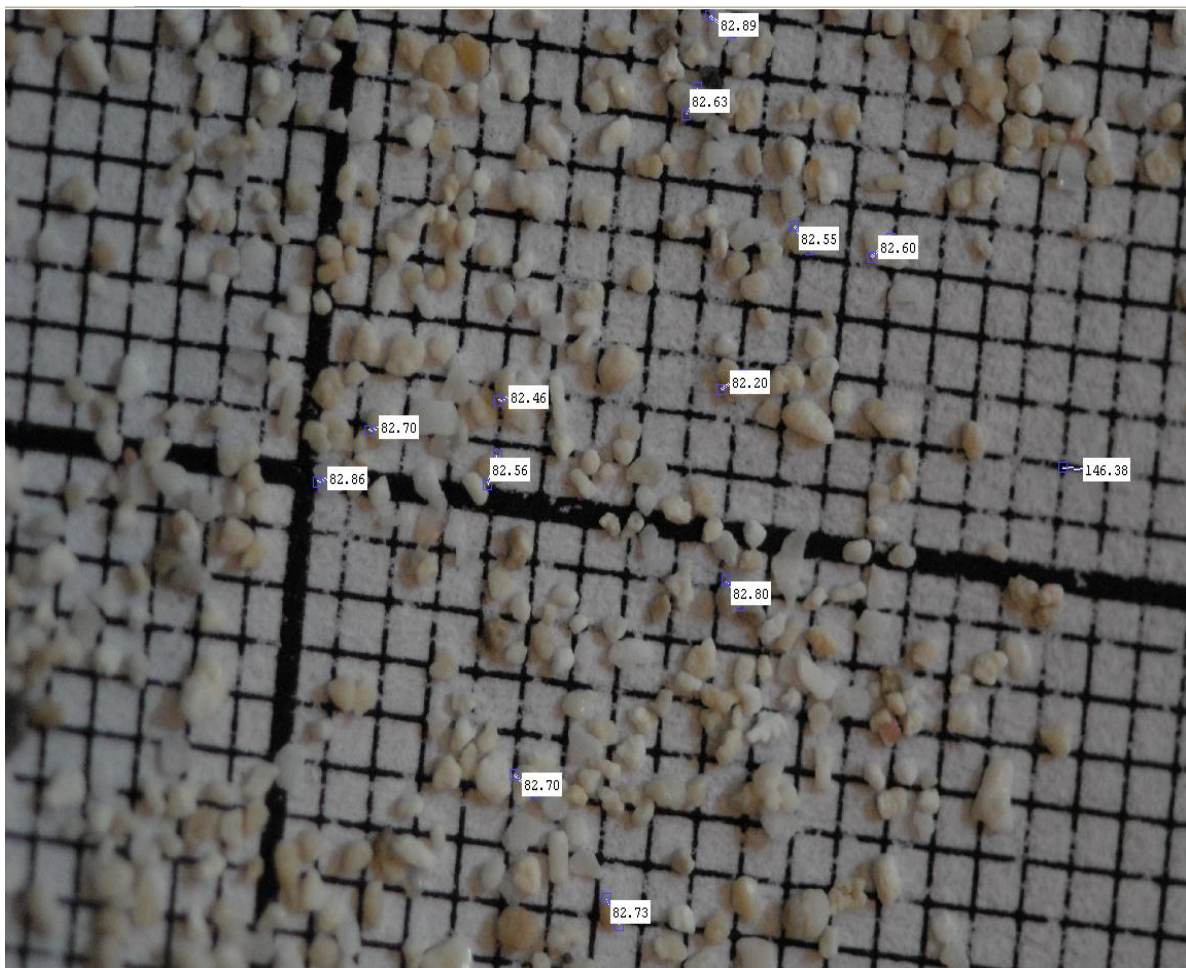


Figura III.2 Arena del sitio Punto 5, Quintana Roo, México (zona offshore)

Tabla III.5 d_{50} teórico y experimental del sitio Punto F zona offshore (rompientes)

NUMERO GRANO	d_{50} (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	d_{50} MEDIDO (mm)
1	2.0142	156.61	315.443862	315.02	2.01149
2	2.0142	156.61	315.443862	315.49	2.01449
3	2.0142	156.61	315.443862	315.37	2.01373
4	2.0142	156.61	315.443862	315.31	2.01335
5	2.0142	158.58	319.411836	319.23	2.01305
6	2.0142	158.58	319.411836	319.47	2.01457
7	2.0142	158.58	319.411836	319.23	2.01305
8	2.0142	156.89	316.007838	316.84	2.01950
9	2.0142	156.89	316.007838	316	2.01415
10	2.0142	156.89	316.007838	315.35	2.01001
11	2.0142	156.89	316.007838	316.31	2.01613
12	2.0142				

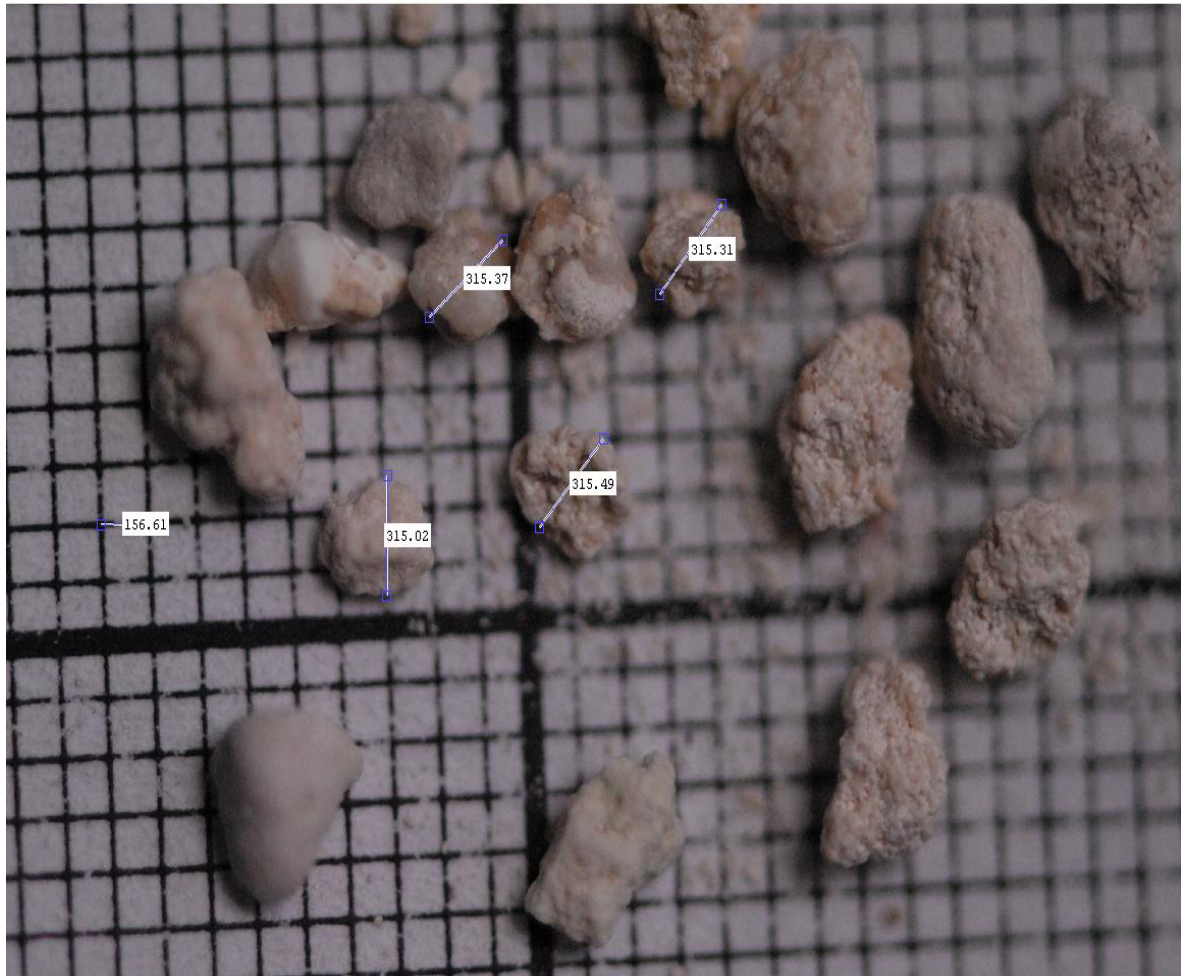


Figura III.3 Arena del sitio Punto F, Quintana Roo, México (zona offshore, rompientes)

Tabla III.6 d_{50} teórico y experimental del sitio Punta Allen zona offshore

NUMERO GRANO	d_{50} (mm) TEORICO	PIX FOT/mm	PIX TEORICO	PIXELES MEDIDOS	d_{50} MEDIDO (mm)
1	0.078826	174.39	13.74646614	13.84	0.07936
2	0.078826	174.39	13.74646614	13.7	0.07856
3	0.078826	174.39	13.74646614	13.87	0.07953
4	0.078826	174.39	13.74646614	13.69	0.07850
5	0.078826	174.39	13.74646614	13.89	0.07965
6	0.078826	174.39	13.74646614	13.68	0.07844
7	0.078826	174.39	13.74646614	13.77	0.07896
8	0.078826	174.39	13.74646614	13.56	0.07776
9	0.078826	174.39	13.74646614	13.97	0.08011
10	0.078826	174.39	13.74646614	13.75	0.07885
11	0.078826	174.39	13.74646614	13.89	0.07965
12	0.078826	174.39	13.74646614	13.56	0.07776

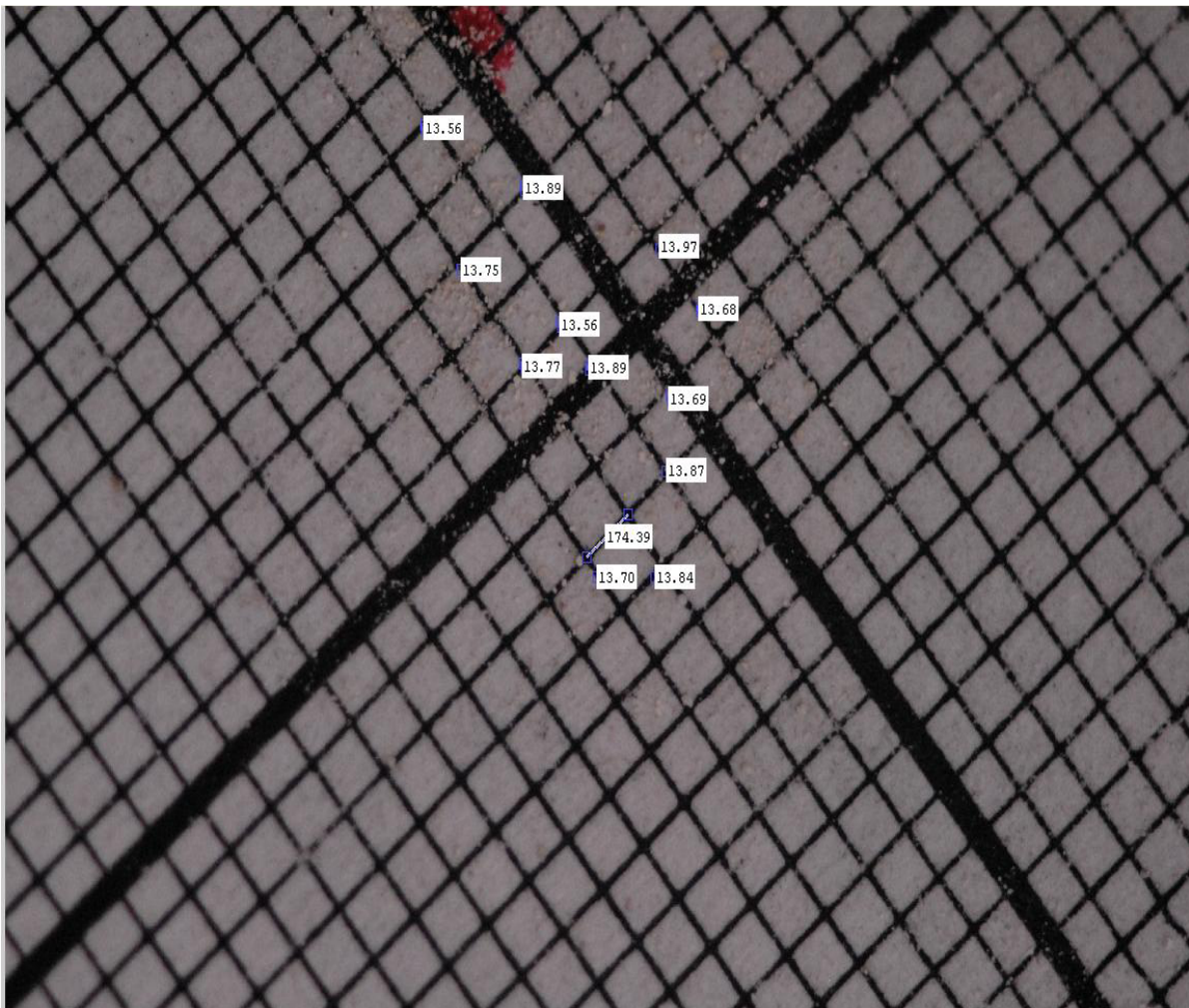


Figura III.4 Arena del sitio Punta Allen, Quintana Roo, México (zona offshore)

III.3.2.- Resultados de las pruebas de velocidad de caída

A partir de los granos seleccionados en cada uno de los ensayos, se inició la prueba de velocidad de caída de éstos, como ya se mencionó en el apartado anterior. A continuación se presentan los resultados de velocidad de caída de algunas muestras que se obtuvieron después de haber analizado los videos.

Tabla III.7 Velocidad de caída de las arenas del sitio Puerto Morelos Estación UNAM, zona foreshore, Quintana Roo

Número grano	d_{50} teórico(mm)	d_{50} medido (mm)	Distancia (cm)	Tiempo (s)	Velocidad experimental (m/s)
1	0.37452	0.37951	20	3.833	0.05218
2	0.37452	0.37645	20	6.567	0.03046
3	0.37452	0.37713	20	4.133	0.04839
4	0.37452	0.37285	20	3.500	0.05714
5	0.37452	0.37414	20	---	---
6	0.37452	0.37727	20	5.100	0.03922
7	0.37452	0.37869	20	6.000	0.03333
8	0.37452	0.37713	20	4.900	0.04082
9	0.37452	0.37387	20	6.200	0.03226
10	0.37452	0.37672	20	4.400	0.04545
11	0.37452	0.37577	20	6.333	0.03158
12	0.37452	0.37278	20	6.100	0.03279

Tabla III.8 Velocidad de caída de las arenas del sitio Punto 9, zona foreshore, Quintana Roo

Número grano	d_{50} teórico(mm)	d_{50} medido (mm)	Distancia (cm)	Tiempo (s)	Velocidad experimental (m/s)
1	0.53931	0.53955	25	3.967	0.06302
2	0.53931	0.54032	25	4.200	0.05952
3	0.53931	0.54070	25	2.800	0.08929
4	0.53931	0.54192	25	3.533	0.07076
5	0.53931	0.53929	25	4.167	0.06000
6	0.53931	0.53961	25	3.200	0.07813
7	0.53931	0.53955	25	4.667	0.05357
8	0.53931	0.53993	25	4.367	0.05725
9	0.53931	0.54109	25	3.300	0.07576
10	0.53931	0.54192	25	4.200	0.05952
11	0.53931			---	---
12	0.53931			---	---

Tabla III.9 Velocidad de caída de las arenas del sitio Tulum A, zona foreshore, Quintana Roo

Número grano	d_{50} teórico (mm)	d_{50} medido (mm)	Distancia (cm)	Tiempo (s)	Velocidad experimental (m/s)
1	0.16206	0.16300	15	15.300	0.00980
2	0.16206	0.16159	15	8.700	0.01724
3	0.16206	0.16259	15	11.400	0.01316
4	0.16206	0.16200	15	11.600	0.01293
5	0.16206	0.16206	15	11.733	0.01278
6	0.16206	0.16141	15	---	---
7	0.16206	0.16323	15	13.233	0.01134
8	0.16206	0.16224	15	8.733	0.01718
9	0.16206	0.16212	15	10.467	0.01433
10	0.16206	0.16288	15	20.100	0.00746
11	0.16206	0.16335	15	7.533	0.01991
12	0.16206	0.16253	15	10.933	0.01372

Tabla III.10 Velocidad de caída de las arenas del sitio Holbox, zona offshore, Quintana Roo

Número grano	d_{50} teórico (mm)	d_{50} medido (mm)	Distancia (cm)	Tiempo (s)	Velocidad experimental (m/s)
1	0.13212	0.13223	10	9.333	0.01071
2	0.13212	0.13119	10	8.800	0.01136
3	0.13212	0.13206	10	9.200	0.01087
4	0.13212	0.13229	10	7.833	0.01277
5	0.13212	0.13223	10	11.700	0.00855
6	0.13212	0.13287	10	11.900	0.00840
7	0.13212	0.13200	10	7.300	0.01370
8	0.13212	0.13148	10	9.200	0.01087
9	0.13212	0.13101	10	11.333	0.00882
10	0.13212	0.13235	10	10.067	0.00993
11	0.13212	0.13124	10	10.667	0.00937
12	0.13212	0.13258	10	9.833	0.01017

Tabla III.11 Velocidad de caída de las arenas del sitio UAY, zona offshore, Yucatán

Número grano	d_{50} teórico (mm)	d_{50} medido (mm)	Distancia (cm)	Tiempo (s)	Velocidad experimental (m/s)
1	0.17554	0.17568	15	9.433	0.01590
2	0.17554	0.17691	15	9.100	0.01648
3	0.17554	0.17667	15	8.067	0.01859
4	0.17554	0.17556	15	9.333	0.01607
5	0.17554	0.17609	15	7.600	0.01974
6	0.17554	0.17591	15	19.833	0.00756
7	0.17554	0.17632	15	10.000	0.01500
8	0.17554	0.17667	15	6.533	0.02296
9	0.17554	0.17527	15	9.633	0.01557
10	0.17554	0.17661	15	9.726	0.01542
11	0.17554	0.17726	15	13.100	0.01145
12	0.17554	0.17533	15	8.233	0.01822



Tabla III.12 Velocidad de caída de las arenas del sitio Isla del Carmen, zona backshore, Campeche

Número grano	d_{50} teórico (mm)	d_{50} medido (mm)	Distancia (cm)	Tiempo (s)	Velocidad experimental (m/s)
1	0.20672	0.20582	15	6.033	0.02486
2	0.20672	0.20642	15	8.100	0.01852
3	0.20672	0.20612	15	6.100	0.02459
4	0.20672	0.20666	15	7.900	0.01899
5	0.20672	0.20612	15	9.500	0.01579
6	0.20672	0.20594	15	7.067	0.02123
7	0.20672	0.20757	15	6.133	0.02446
8	0.20672	0.20521	15	7.400	0.02027
9	0.20672	0.20811	15	5.400	0.02778
10	0.20672	0.20588	15	5.800	0.02586
11	0.20672	0.20745	15	5.533	0.02711
12	0.20672	0.20678	15	5.033	0.02980