



TESIS DOCTORAL

La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución

Autora: Patricia López García

Directores de la tesis: Dr. Juan José Muñoz Pérez

Dr. Antonio Contreras de Villar

Cádiz, 2024



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA

AGRADECIMIENTOS

El trayecto de esta tesis ha sido largo, con muchas piedras y montañas en el camino, pero de la mano de mis familiares, amigos y directores de tesis, el camino se ha ido haciendo de arena, a veces complicado caminar por él, pero siempre pudiendo ver el mar a lo lejos. Hasta que he llegado, por fin logré la recompensa, ahora puedo bañarme en él. Gracias a todos he podido compaginar mi vida personal, laboral y académica. Sin su constante apoyo, esta Tesis no hubiese sido posible. Así que todo se lo debo a las personas que quiero mencionar. Mi pilar fundamental durante prácticamente 20 años, toda una vida, mi marido, Guille. Mi familia: mi madre M^a Antonia, mi hermana Myriam, mi hermano Antoni, mis sobrinos, cuñados y suegros. Mis mejores amigas, las dos Lauras y Patri. Mis compañeras y compañeros del Departamento de Física Aplicada y de mi Grupo de Investigación de Ingeniería de Costas, a quienes siempre les estaré muy agradecida por su gran ayuda y colaboración. Mi director de tesis D. Antonio Contreras de Villar, por su gran trabajo, dedicación y vocación, que contagia a cualquiera que tenga la suerte de trabajar con él. Por último, y no por ello menos especial, por su apoyo incondicional y sus decenas de sabios consejos, por querer siempre lo mejor para mí, hacerme crecer en lo laboral y en lo personal, mi director de tesis, mi jefe, mi sensei, mi compañero, D. Juan José Muñoz Pérez, gracias de corazón por todos estos años (¡ya van 10 años, y sumando!). Todos han hecho de mí una persona mejor, cada uno con su *granito de arena*. El mar no me puede leer, pero también le quiero dedicar esta Tesis. Gracias por existir. No me rendiré, voy a salir adelante, luchando por seguir en este camino tan bonito que es la investigación y la docencia. No se qué me deparará el futuro, pero se que cuento con todo el apoyo mencionado para lograr lo que me proponga.



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	3
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	10
NOMENCLATURA	12
1. INTRODUCCION y OBJETIVOS	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Razones de la pertinencia de esta investigación.....	16
1.3 Hipótesis planteadas	17
1.4 Objetivos generales	18
1.5 Objetivos específicos.....	19
2. ESTADO DEL ARTE: ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS ANTECEDENTES	22
3. ERRORES EN LA ESTIMACION DE LOS PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS CUANDO SE USAN TAMICES DE DIÁMETRO PEQUEÑO Y SU SOLUCIÓN	26
3.1 Abstract.....	26
3.2 Introducción.....	26
3.3 Zona de estudio.....	30
3.4 Metodología.....	32
3.5 Resultados y Discusión	36
3.5.1 D_{50} (Diámetro de Grano Medio)	39
3.5.1.1 Tiempo de tamizado	39
3.5.2 Sorting	43
3.5.3 Porcentaje de conchas.....	44
3.5.4 Factor de sobrellenado (R_A)	44
4. MÉTODO DE SECADO DE ARENA CON MICROONDAS ANTES DE TAMIZAR PARA OBTENER PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS DE ARENA PRECISOS	48
4.1 Abstract.....	48
4.2 Introducción.....	48

4.3	Zona de estudio.....	52
4.4	Metodología.....	53
4.4.1	Muestreo.....	53
4.4.2	Análisis granulométrico.....	54
4.4.2.1	Procedimiento de secado en mufla.....	55
4.4.2.2	Procedimiento de secado en microondas	56
4.4.2.3	Tamizado.....	62
4.4.2.4	Cálculos para obtener los parámetros granulométricos	64
4.5	Resultados y Discusión	64
4.5.1	Valdelagrana	69
4.5.2	Camposoto	71
4.5.3	La Alcaidesa.....	73
4.5.4	Discusión general.....	75
5.	CONCLUSIONES	78
5.1	Sobre “Errores en la estimacion de los parámetros granulométricos cuando se usan tamices de diámetro pequeño y su solución”.	78
5.2	Sobre “Método de secado de arena con microondas antes de tamizar para obtener parámetros granulométricos de arena precisos”.	80
5.3	Futuras líneas de actuación.	81
	BIBLIOGRAFÍA	83
	ANEXOS	94
	ANEXO I. Ejemplo granulometría.	95
	ANEXO II. Publicaciones y ponencias.....	98



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. El banco de arena “Placer de Meca” situado en el Golfo de Cádiz, cerca del Estrecho de Gibraltar (España, Europa).</i>	31
<i>Figura 2. La cántara de la draga de succión en marcha, donde fueron tomadas las muestras de arena.</i>	32
<i>Figura 3. Ábaco de James donde el R_A puede ser encontrado utilizando los parámetros Media y Sorting para la arena de préstamo ($M_{\phi b}$ y $\sigma_{\phi b}$) y la nativa ($M_{\phi n}$ y $\sigma_{\phi n}$) (U.S. Army Corps of Engineers, 1984).</i>	35
<i>Figura 4. Resultados gráficos de los parámetros granulométricos de las 20 muestras de arena, D50 (mm) y Sorting (ϕ) para los métodos de tamizado mecánico y manual con tamices de 10 cm de diámetro. También se muestran los resultados de porcentaje de conchas de cada muestra.</i>	40
<i>Figura 5. Resultados del D50 de las muestras número 16, 17, 19 y 20, tamizadas durante 10, 15, 20, 25 y 30 minutos respectivamente, con los procedimientos mecánico y manual, y sus respectivos errores (%).</i>	41
<i>Figura 6. Comparación de las curvas granulométricas de la muestra de arena número 17 (tamaño de partícula en mm y en unidades ϕ) para los tamizados mecánico y manual.</i>	43
<i>Figura 7. Localización de las tres playas analizadas en este estudio. Las playas Valdelagrana y Camposoto están situadas en el Golfo de Cádiz (Océano Atlántico), mientras que la playa La Alcadesa se encuentra en la costa del Mar Mediterráneo. Todas ellas se sitúan cerca del Estrecho de Gibraltar en España.</i>	52
<i>Figura 8. Bolsa de muestra con 800 gr de arena con un poco de exceso de agua. Para cada playa se recopilaban 10 bolsas de muestras como la de esta figura. Cada bolsa de muestra se dividió posteriormente en 5 submuestras: 130 gr para secar en mufla, 130 gr para secar a cada una de las potencias del microondas (700w, 595w, 462w, y 300w), y 150 gr extra por si ocurriese una posible pérdida.</i>	53
<i>Figura 9. Ejemplo de un intento de tamizado de una muestra de arena que no está suficientemente seca. Las vibraciones de la máquina tamizadora crean esferas compactas con los granos de arena. También se puede apreciar visualmente cómo la humedad en la arena crea obstrucciones en los poros de la rejilla de cada tamiz.</i>	55
<i>Figura 10. Mufla de laboratorio programada para secar a 110°C.</i>	56
<i>Figura 11. Microondas estándar con niveles de potencia de 700 w, 595w, 462w y 300w.</i>	57
<i>Figura 12. Vista del interior del microondas después de que una muestra de arena explotase durante el proceso de secado en microondas.</i>	58
<i>Figura 13. Muestra de arena húmeda de 130 gr extendida por la base del recipiente.</i> ...	60

Figura 14. La misma muestra de arena de la Figura 13 pero ya completamente seca, pesando finalmente 100 gr. 61

Figura 15. Máquina de tamizado con los 8 tamices, programada para tamizar durante 10 minutos y con una amplitud de vibración de 2 mm. 63

Figura 16. Resultados medios del peso de la muestra a diferentes potencias vs tiempo de secado, para las playas de Valdelagrana, Camposoto y La Alcaldesa. 66

Figura 17. Parámetros D_{50} y sorting (σ), con el error (ϵ) para cada potencia de microondas, tomando como valor de referencia el resultado de la mufla (para las playas de Valdelagrana, Camposoto, y La Alcaldesa). 68

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Fórmulas utilizadas para calcular los principales parámetros granulométricos, de acuerdo con las medidas gráficas de Folk y Ward (Folk and Ward, 1957), donde M_ϕ es el tamaño medio de grano estimado y σ_ϕ es la desviación estándar estimada (o sorting) de la muestra en unidades phi.....</i>	33
<i>Tabla 2. Parámetros granulométricos de 20 muestras de arena incluyendo el D_{50} (mm) y el Sorting (ϕ), y la diferencia (mm) y el error (%) entre las metodologías de tamizado mecánico y manual con tamices de 10 cm de diámetro. El porcentaje de conchas y los valores de la arena nativa también se muestran.</i>	37
<i>Tabla 3. Parámetros granulométricos de las 20 muestras de arena incluyendo D_{95}, D_{84}, D_{16} y D_5 (mm), y la diferencia (mm) y error (%) entre las metodologías de tamizado mecánico y manual con tamices de 10 cm de diámetro.</i>	38
<i>Tabla 4. Resultados de las ecuaciones utilizando los parámetros Media y Sorting de los procedimientos de tamizado mecánico y manual para las muestras de arena de préstamo ($M\phi_b$ y $\sigma\phi_b$) y las de arena nativa ($M\phi_n$ and $\sigma\phi_n$), y los resultados del factor de sobrellenado R_A. La diferencia en tanto por ciento del R_A con los procedimientos mecánico y manual también se muestra.</i>	44
<i>Tabla 5. Resultados medios de los diferentes análisis (fueron 10 tests por cada potencia del microondas) para las muestras de la playa de Valdelagrana: (a) el peso (gr) para cada malla y su porcentaje correspondiente (%) de toda la muestra, y (b) los parámetros D_{50}, σ, D_{95}, D_{84}, D_{75}, D_{25}, D_{16}, y D_5. El error (ϵ) para los resultados de cada potencia representados tomando como referencia los resultados de la mufla.....</i>	70
<i>Tabla 6. Resultados medios de los diferentes análisis (fueron 10 tests por cada potencia del microondas) para las muestras de la playa de Camposoto: (a) el peso (gr) para cada malla y su porcentaje correspondiente (%) de toda la muestra, y (b) los parámetros D_{50}, σ, D_{95}, D_{84}, D_{75}, D_{25}, D_{16}, y D_5. El error (ϵ) para los resultados de cada potencia representados tomando como referencia los resultados de la mufla.....</i>	72
<i>Tabla 7. Resultados medios de los diferentes análisis (fueron 10 tests por cada potencia del microondas) para las muestras de la playa de Valdelagrana: (a) el peso (gr) para cada malla y su porcentaje correspondiente (%) de toda la muestra, y (b) los parámetros D_{50}, σ, D_{95}, D_{84}, D_{75}, D_{25}, D_{16}, y D_5. El error (ϵ) para los resultados de cada potencia representados tomando como referencia los resultados de la mufla.....</i>	74



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA

NOMENCLATURA

D_{50}	Parámetro de tamaño de arena: Tamaño medio de grano (en unidades <i>mm</i>)
D_n	Parámetro de tamaño de arena: n, el número del percentil del tamaño
mm	Unidad de tamaño <i>milímetro</i>
$M_{\phi b}$	Parámetro de tamaño de arena de préstamo (<i>borrow</i>): Media (en unidades <i>phi</i>)
$M_{\phi n}$	Parámetro de tamaño de arena nativa (<i>native</i>): Media (en unidades <i>phi</i>)
O-SO	Oeste - Suroeste
R_A	Factor de sobrellenado
ε	Error relativo
μm	Unidad de tamaño <i>micrómetro</i>
σ	Parámetro de tamaño de arena: Sorting o Desviación Típica (en unidades <i>mm</i>)
$\sigma_{\phi b}$	Parámetro de tamaño de arena de préstamo: Sorting (en unidades <i>phi</i>)
$\sigma_{\phi n}$	Parámetro de tamaño de arena nativa: Sorting (en unidades <i>phi</i>)
ϕ	Unidad de tamaño <i>phi</i>



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz

La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución

LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1. INTRODUCCION y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El estudio de la presente Tesis Doctoral surge de la necesidad de metodologías eficientes para resolver diferentes necesidades científicas, técnicas y económicas, en el ámbito de las actuaciones de regeneración de playas. Entre los estudios que previamente ha abordado el grupo de investigación de Ingeniería Costera (con el que colabora esta doctoranda desde 2015) relacionados con la variabilidad espacio-temporal de las arenas de las playas antes y después de una regeneración, cabe destacar los realizados teniendo en cuenta parámetros como la densidad, el tamaño o la porosidad, y la variabilidad debida a efectos de la marea (de Villar et al., 2019; Muñoz-Perez et al., 2012; Pouillet et al., 2019b; Pranzini et al., 2018; Roman-Sierra et al., 2011; Román-Sierra et al., 2014, 2013; Santos-Vendoiro et al., 2021). El objetivo de este Proyecto de Tesis consiste en un nuevo e imprescindible enfoque: el estudio de la variabilidad de los parámetros granulométricos de la arena de playas, en función de la metodología utilizada para calcularlos. Se parte de la siguiente hipótesis: los resultados obtenidos durante una regeneración de playas difieren del resultado real debido a que los análisis deben llevarse a cabo en un laboratorio a bordo del barco dragador, durante el trayecto desde el punto de extracción al de vertido, con las limitaciones de material, espacio y tiempo que ello conlleva. La metodología actual de secado y tamizado de arenas, que se realiza a bordo de una draga, comete errores en su estimación de los parámetros granulométricos. Una de las motivaciones del presente proyecto de investigación surge a partir de la demostración de Pouillet *et al.* (Pouillet et al., 2019b) sobre los errores cometidos en una parte de la metodología relacionada con el tamizado. Sin embargo, aún no se ha comprobado la diferencia entre tamizar a mano y a máquina usando los mismos tamices de 10 cm de diámetro (que son los usados en el barco) y comprobar la implicación de tamizar a mano durante diferentes tiempos. Por otro lado, la metodología llevada a cabo comúnmente a día de hoy para secar la arena previo al tamizado consiste en utilizar un horno mufla a 100°C durante 12 horas (según las indicaciones del Coastal Engineering Manual de USACE (U.S. Army Corps of Engineers, 2002)). A pesar de estas indicaciones, debido a las limitaciones antes mencionadas de espacio y tiempo a bordo de un barco, el secado en un microondas es el

método utilizado desde siempre en una draga durante las regeneraciones de playa. La variabilidad inducida por el tiempo y potencia programados en el microondas para secar correctamente las muestras no ha sido tampoco estudiada pese a su lógica pero todavía hipotética influencia.

A la hora de ejecutar la realimentación de arena de una playa, es necesario estudiar la idoneidad de la arena de préstamo mediante la comparación de la granulometría de ésta con la original de la playa (o nativa). Para mejorar la eficacia de este tipo de obras, se estudiarán diferentes metodologías para la obtención de esta comparativa. Por tanto, el objetivo de esta tesis es encontrar el método que resulte más eficiente para mejorar los resultados en las regeneraciones de playa, respecto a la idoneidad de las arenas de préstamo. Ello permitirá el optimizar los costes derivados del dragado, transporte, vertido y perfilado de arena.

1.2 Razones de la pertinencia de esta investigación

Tal y como se comprobará en los antecedentes en el *Capítulo 2*, los estudios realizados hasta la fecha para estudiar la variabilidad espacio-temporal de las arenas de las playas antes y después de una regeneración, han tenido en cuenta parámetros como la densidad, el tamaño o la porosidad. Igualmente, su variabilidad debida a efectos de la marea o del oleaje. Pero la metodología utilizada para el estudio de posibles errores en la determinación del tamaño de grano en las arenas de préstamo para regeneraciones de playa, es un factor poco analizado hasta ahora. Los parámetros granulométricos sirven para averiguar la idoneidad en la elección de arenas de préstamo para llevar a cabo regeneraciones de playa, buscando que las arenas duren el mayor tiempo posible antes de una próxima realimentación. Por tanto, durante la realización de este tipo de obras, se realizan estos análisis granulométricos inmediatamente después de que el barco dragador extraiga la arena del banco de préstamo, durante el viaje desde la zona de extracción hasta la de vertido. De esta forma, si los resultados indican que la arena con la que se ha llenado la cántara de la draga no es óptima para ser utilizada en dicha regeneración, se pueden ahorrar costes y tiempo, disponiendo de ella en una ubicación adecuada. Estos análisis son realizados a bordo de la draga, donde las condiciones de trabajo son diferentes a las de un

laboratorio en tierra, debido a las limitaciones de un reducido espacio para utilizar el material necesario, posibles cortes o picos en el suministro eléctrico o movimientos del barco por oleaje con las consiguientes aceleraciones y cambios en los pesos medidos. Todo ello añadido a un tiempo muy escaso para realizar los análisis, ya que el resultado debe comunicarse al ingeniero director de la obra antes de llegar al lugar de vertido. Cabe mencionar también la dificultad de subir a bordo el material requerido. Dichas limitaciones para realizar los análisis granulométricos requieren metodologías diferentes a las que se utilizan en laboratorios en tierra, las cuales son las establecidas como referencia siguiendo el procedimiento estándar descrito por Syvitski (Syvitski, 1991), y ligeramente modificado por Román-Sierra *et al.* (Román-Sierra *et al.*, 2013). Parte de esta metodología de referencia consiste en secar las muestras en un horno mufla a 100°C durante 12 horas y, posteriormente, utilizar una máquina tamizadora con tamices de 20 cm de diámetro.

Actualmente, para llevar a cabo el análisis granulométrico a bordo de una draga, se secan las muestras en un microondas a su máxima potencia, durante un tiempo estimado y no calculado, antes de que cada muestra “estalle” dentro del microondas. Sin estar seca del todo, se procede al pesado de unos 100gr de arena y se vierten en una columna de tamices de 10 cm de diámetro para la agitación y obtención de la granulometría. El tiempo de agitado sí se realiza como en el procedimiento estándar de referencia, sin tener en cuenta que el agitado lo realiza una persona manualmente y con tamices de menor diámetro.

Hasta hoy, no se ha comprobado el error que pueden inducir estas variaciones para así encontrar una metodología óptima. De esta forma, al compararlas entre sí, se espera poder establecer como conclusión la metodología más precisa a bordo de una draga para analizar las arenas durante las regeneraciones de playa.

1.3 Hipótesis planteadas

Como ya comprobaron anteriormente Pouillet *et al.* (Pouillet *et al.*, 2019b), al tamizar agitando a mano se obtienen valores de tamaño medio de grano mayores que al tamizar con la máquina. Pero el valor de referencia utilizado fue el tamizado a máquina con tamices de 20 cm de diámetro y con ambos tamices el tiempo de agitado fue el mismo. Al

usar tamices pequeños, de 10 cm de diámetro, los 100gr de arena que se vierten en la columna de tamices tienen menos superficie por la que repartirse los granos para ir tamizándose con el agitado, y en determinados tamaños de malla donde se encuentre el mayor porcentaje de la muestra, habrá acumulaciones de arena de tamaños más finos que no podrán pasar. Se plantea la hipótesis por tanto de que el método manual de tamices pequeños requiera más tiempo de agitado. Pero para comprobar la fiabilidad de los resultados del tamizado manual con tamices pequeños, se debe utilizar de referencia el tamizado mecánico con esos mismos tamices. De la misma forma, la influencia de la humedad de la arena será más perjudicial en estos tamices pequeños, por el mismo motivo de acumulación de arena. Con el secado en mufla durante 12h ya se ha comprobado que la arena se puede tamizar correctamente (Román-Sierra et al., 2013). El secado comúnmente utilizado a día de hoy a bordo de dragas es con un microondas. Se coloca la muestra en una taza de cerámica, programando a la máxima potencia que tenga el aparato, a un tiempo de entre 3 y 5 minutos, ya que suele empezar a reaccionar antes el agua intersticial de la arena y comienza a “explotar”. En estos casos, se pulsa el botón de parar el calentado y se retira antes la muestra, quedando bloques de arena compactos y granos sueltos. Tampoco conviene separar la compactación con ningún objeto ya que podría alterar la muestra, dependiendo de la existencia de bioclastos en su composición. Al introducir los 100 gr de arena en ese estado en la columna de tamices de 10cm de diámetro, con el agitado a mano, la arena no se tamiza en su totalidad. A parte de la compactación que se pueda formar, la humedad dificulta el paso entre las mallas. La acumulación de agua en una muestra de arena dependerá de la porosidad de esta, directamente relacionada con el tamaño medio de grano según Poizot *et al.* (Poizot et al., 2013). Por tanto, el tiempo y la potencia de secado con el microondas dependerán del tipo de arena de la playa, si está compuesta en su mayoría por tamaño medio de grano más fino o más grueso.

1.4 Objetivos generales

Así pues, el objetivo de la presente Tesis Doctoral consiste en comparar diferentes métodos de obtención de los parámetros granulométricos de las arenas a bordo de una

draga. Tras la obtención de los resultados con los diferentes métodos, se procederá a la valoración de las metodologías utilizadas, para encontrar un procedimiento metodológico de aplicación sencilla pero que permita la minimización del error cometido.

Dado que las granulometrías con propósitos de regeneración de playas se llevan a cabo a bordo de dragas, se usan tamices de 10 cm de diámetro y agitando manualmente. ¿Cuál sería el error cometido por este motivo? ¿Podría solucionarse aumentando el tiempo de tamizado? Como se plantea en las hipótesis, también el método de secado de la arena influye en la estimación de estos parámetros. Por tanto, se estudiarán varios métodos para secar las muestras en el microondas, probando diferentes tiempos y potencias de calentado. Con el fin de conseguir una metodología eficiente y válida para los análisis de la arena de una regeneración, en esta Tesis se evaluarán cuantitativa y cualitativamente esos errores para encontrar una solución a la metodología actual.

1.5 Objetivos específicos

Desarrollo de una adaptación de la metodología de obtención de los parámetros granulométricos de una arena, precisa y adecuada a los trabajos de control de arena dragada a bordo de buques durante regeneraciones de playa.



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA



2. ESTADO DEL ARTE: ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS ANTECEDENTES

2. ESTADO DEL ARTE: ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS ANTECEDENTES

Las actuaciones de regeneración de playas, para mitigar la erosión costera y mantener la actual línea de costa, requieren de atender una serie de necesidades científicas, técnicas y económicas (Negro Valdecantos et al., 2009). Para llevar a cabo una regeneración de playa, lo primero es localizar un banco de arena de préstamo óptimo mediante técnicas geofísicas y estudiar su idoneidad para alimentar la playa (granulometría, composición, estabilidad, tasa de erosión, forma del perfil, rotura del oleaje, etc.). Entre los principales parámetros de diseño para la redacción de un proyecto de regeneración de playas, cabe destacar los granulométricos. La forma del perfil de la playa, junto con el consiguiente cálculo del volumen necesario de arena y la estabilidad de la misma en tiempo y espacio, es función de la comparación de la arena nativa (o natural de la playa) con la extraída mediante dragado del fondo del mar (o de préstamo) (James, 1975; Moreno et al., 2018; Negro Valdecantos and Quecedo Gutierrez, 1988; Pranzini et al., 2018; U.S. Army Corps of Engineers, 2002). La arena extraída del banco de arena es analizada a bordo del propio buque mediante la toma de muestras superficiales de la cántara de la draga, con cuchara Van Veem, al final de cada dragado y antes del consiguiente vertido. El principal parámetro granulométrico requerido para tomar decisiones antes de las actuaciones de vertido, es el diámetro medio de la muestra de arena en milímetros (D_{50}). Del análisis de la granulometría se pueden extraer otros percentiles como los valores D_{16} , D_{84} , D_{05} , D_{95} , y sus correspondientes valores en la escala phi (Φ). Asimismo, además de la media, se pueden calcular estadísticos como la Desviación Estándar o Sorting, el coeficiente de asimetría o Skewness y el coeficiente de aplastamiento o Kurtosis (U.S. Army Corps of Engineers, 2002).

Ya Graton y Fraser (Graton and Fraser, 1935) mostraron que la clasificación del sedimento, la forma del grano y la compacidad son los principales responsables de las variaciones de la porosidad en arenas. Se han realizado numerosos estudios previos para la medición de porosidades de diferentes distribuciones granulométricas y clasificaciones del sedimento (Arulanandan, 1991; Bloom et al., 2010; Curry et al., 2004; Erchul and Nacci, 1972; Gaither, 1953; Jackson, 1975; Jackson et al., 1978; King, 1899; Kolbuszewski, 1948; Terzaghi, 1926; Trask, 1931). Por otro lado, para un mejor

entendimiento de los procesos costeros, se han desarrollado diversos estudios referentes a las propiedades físicas del sedimento de depósitos marinos en zonas someras y profundas, como el tamaño de grano, compactación, porosidad, permeabilidad, etc. (Breslau, 1967; Briggs, 1994; Briggs et al., 2010; Curry et al., 2004; Faas, 2001; Hamilton and Bachman, 1982; Hamilton and Menard, 1956; Kakinoki et al., 2011; Poizot et al., 2013; Reed et al., 2010).

A continuación, se exponen algunos estudios recientes del grupo de investigación en el que participa la autora de la presente Tesis Doctoral, que ya han resuelto algunas problemáticas de estos diferentes aspectos científicos que requiere una eficiente regeneración de playa. Roman-Sierra *et al.* (2011) (Roman-Sierra et al., 2011) estudiaron la turbidez y otros efectos que resultan de un dragado de un banco de arena para una regeneración de playa. Posteriormente Roman-Sierra *et al.* (Román-Sierra et al., 2014) evaluaron los efectos de una regeneración en la variabilidad de la porosidad de la arena en la playa. Otros análisis de la evolución de las playas tras regeneraciones según el tamaño de grano utilizado fueron estudiados por Muñoz-Perez *et al.* y Santos-Vendoiro *et al.* (Muñoz-Perez and Medina, 2010; Santos-Vendoiro et al., 2021). Asimismo, Contreras *et al.* (de Villar et al., 2019) elaboraron nuevos parámetros de diseño que permiten definir perfiles de playas biparábolicos apoyados en lajas rocosas para mares con marea. En cuanto al estudio de las arenas durante los dragados para regeneraciones de playa, Pouillet *et al.* (Pouillet et al., 2019a) explicaron la variabilidad del tamaño de grano de la arena dentro de la cántara de una draga.

No obstante, pese a los estudios anteriormente mencionados y a su importancia, a día de hoy, no se ha considerado todavía la validez de la metodología paso a paso que se realiza a bordo de los barcos dragadores para la obtención de los parámetros granulométricos durante obras de regeneración de playas.

Por tanto, el objetivo general planteado en esta Tesis Doctoral consiste en lograr una mejora en la eficiencia de la metodología actual, respecto a la elección y vertido de arenas de préstamo.



De esta manera, a lo largo de esta Tesis Doctoral, se estudiarán las diferentes técnicas de obtención de parámetros granulométricos que se puedan llevar a cabo en el laboratorio de una draga. Y así llegar a la recomendación de una metodología óptima.

3. ERRORES EN LA ESTIMACION DE LOS PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS CUANDO SE USAN TAMICES DE DIÁMETRO PEQUEÑO Y SU SOLUCIÓN

3. ERRORES EN LA ESTIMACION DE LOS PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS CUANDO SE USAN TAMICES DE DIÁMETRO PEQUEÑO Y SU SOLUCIÓN

3.1 Abstract

Analyses were carried out to determine the main sand size parameters (median grain size D_{50} and sorting σ) for beach nourishment purposes using the sieving method aboard a dredger. Due to a lack of space and the need to carry and use the material with ease, the sieves are commonly small (10 cm diameter), and the shaking procedure is usually performed by hand. However, the influence of shaking, either mechanically or manually, has not yet been studied with 10 cm diameter sieves. Therefore, 20 samples were taken from inside the hopper of a trailing suction dredger and sieved both manually and mechanically for 10 minutes. The results showed that manual sieving yielded higher D_{50} values than the mechanical procedure. The average error arising from using the manual method was 14%, but it can reach 36.5%. The granulometric analysis carried out for different shaking times has shown that this error is $< 5\%$ when at least 20 min of shaking is performed. The mechanical procedure gave always finer sand results. In addition, the overflow ratio calculated for both mechanical and manual results reached differences of up to 48%.

3.2 Introducción

La regeneración de playa es uno de los métodos de protección costera comúnmente utilizados en las costas de todo el mundo. Sin embargo, la investigación en el diseño de estos proyectos de regeneración aún sigue en curso para mejorar la eficiencia de trabajo, que se basa en ecuaciones y reglas empíricas (Armstrong et al., 2016; Choi et al., 2016; Karambas and Samaras, 2014; Pendleton et al., 2012; Pranzini et al., 2018; Román-Sierra et al., 2013). Durante el proceso de trabajo de una regeneración de playa se requiere encontrar una arena adecuada para reemplazar la arena nativa que ha sido erosionada en la playa (Pranzini et al., 2018; Saponieri et al., 2018), y estimar la cantidad de arena que se necesita para la regeneración de la playa (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Los

análisis de la distribución del tamaño de arena dan pistas sobre el origen, el ambiente deposicional, y el histórico de transporte de la arena (Bernabeu Tello et al., 2002; Fenster et al., 2016; Grottoli et al., 2017; Hallin et al., 2019; Remo et al., 2016; Singh et al., 2007). Además, los análisis del tamaño de arena es una metodología esencial utilizada para clasificar los materiales y ambientes sedimentarios (Roman-Sierra et al., 2011; Steidtmann, 1982), y también pueden ser usados para hacer predicciones sobre la longevidad de la arena en la playa y cómo reacciona a las tormentas (Bascom, 1951; de Villar et al., 2019; Grottoli et al., 2017; Larson and Kraus, 1991). Los procesos costeros se estudian llevando a cabo análisis que incluyen la medida de los parámetros principales del tamaño de grano de arena, y son principalmente, el tamaño medio de grano (D_{50}) y la desviación típica o sorting, que es la dispersión de los tamaños respecto a la media (σ) (Blott and Pye, 2001).

La persona encargada del control de regeneración de playa debe llevar a cabo un control de calidad del lugar de vertido de la arena y decidir dónde debe emplazarse la arena. Las metodologías para obtener los parámetros del tamaño de la arena precisan ser realizadas rápidamente a bordo de la draga antes de que la arena sea vertida en la playa. La determinación de los parámetros de tamaño de arena necesita ser precisa para propósitos de regeneración de playa (errores menores del 10%) (Muñoz-Perez et al., 2012). Estos parámetros pueden ser expresados en unidades métricas o phi (escala logarítmica). Su determinación se calcula normalmente utilizando las fórmulas de Folk y Ward basadas en disquisiciones previas de Krumbein (Folk, 1974; Folk and Ward, 1957; Friedman and Johnson, 1982; Krumbein and Pettijohn, 1938). Por tanto, las medidas de precisión podrían ser determinadas a través de análisis de muchas porciones de una muestra, muchos análisis de la misma muestra, o los análisis de muchas muestras tomadas en la misma zona. De entre todos los métodos utilizados para analizar el tamaño de las partículas de arena, hay investigaciones que han estudiado y comparado los métodos con camsizer (Luisa Martínez et al., 2017), granulometría láser y sedigrafía (Celia Magno et al., 2018), microtac (Austin and Shah, 1983), análisis de imagen (Eberhard et al., 2012; Orrú et al., 2013), la difracción láser (Blott and Pye, 2006), comparación de tamaño de grano con láser, pipeta y tamiz (Konert and Vandenberghe, 1997), y tamizado (Eberhard et al., 2012; Pope and Ward, 1998; Shillabeer et al., 1992).

El método de tamizado es el análisis más común utilizado para determinar los principales parámetros de tamaño de arena a bordo de dragas cuando se llevan a cabo las regeneraciones de playa. El análisis del tamaño de arena dentro de un buque dragador tiene algunas limitaciones como el escaso espacio de trabajo, las especificaciones del material que se requiere, fuente de energía inestable, y la disponibilidad del tiempo limitado que comprende el transporte de arena desde el banco de préstamo hasta el lugar de vertido.

Por tanto, el método de tamizado, cuando se lleva a cabo a bordo de una draga, debería ser el elegido de acuerdo a su fácil uso y eficiencia económica. Además, la dificultad de embarcar y desembarcar los materiales por las escaleras del barco en alta mar, junto con la habitual falta de fuente de energía estable, hace difícil el uso de una máquina tamizadora a bordo del barco. Así pues, en su lugar, el agitado manual para el procedimiento de tamizado es el que se utiliza normalmente para analizar el tamaño de grano de arena dentro de una draga. Dados los problemas antes mencionados, junto con el poco espacio, son los principales motivos por los que los tamices de pequeño diámetro (10 cm en lugar de 20 cm) son los que más se utilizan en estas situaciones.

Agregado a lo anterior, es importante obtener valores muy precisos de los resultados de los parámetros de tamaño medio de grano (D_{50}) y sorting (σ) para propósitos de regeneración de playa. La compatibilidad del tamaño de grano de los sedimentos dragados (arena de “préstamo”) con los sedimentos de la playa “nativa” es comúnmente expresado como el factor de sobrellenado (R_A) (James, 1975). Este factor de sobrellenado describe el volumen de arena teórico de préstamo que constituirá el volumen residual de sedimento en la playa después de las pérdidas. Dicho de otra forma, el R_A trata de representar la pérdida natural de una parte del sedimento de préstamo que es más fino que el sedimento de la arena de playa nativa. Es entonces importante evaluar los posibles errores cuando se determinen los parámetros de tamaño de arena (de préstamo y nativa) antes y durante los procesos de regeneración de playa, ya que podría implicar que se drague más volumen de arena de préstamo del necesario.

De hecho, Pouillet *et al.* (Pouillet et al., 2019a) estudiaron un caso particular con el método de James (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) para obtener el R_A , de manera que

demonstraron la importancia en los errores cometidos, cuando se determinan los parámetros de la arena, en los cálculos de volúmenes de arena para regeneración.

En referencia a los diseños de proyectos de regeneración de playa, Grosskopf y Kraus (1993) (Grosskopf and Kraus, 1993) propusieron un error medio de volumen de playa de menos de $11.5 \text{ m}^3/\text{m}$ para estimar el volumen de arena; de otro modo, una precisión comparable a las contingencias del 10% al 20% asociadas a los diseños de proyecto (Muñoz-Perez et al., 2012). Por tanto, algunos autores (Grosskopf and Kraus, 1993; Muñoz-Perez et al., 2012; Pouillet et al., 2019a) indican que se puede asumir errores de hasta el 10% para propósitos de regeneración de playa.

Por todo lo anterior, la precisión cuando se va a determinar los parámetros de la arena es crucial. De acuerdo con Syvitski (Syvitski, 1991), por ejemplo, el tiempo de tamizado puede influir en los resultados de los análisis de tamaño de arena. Estudios anteriores han evaluado la relación entre el tiempo de tamizado y su eficiencia. Una de las hipótesis fue que el material más fino requiere más tiempo de tamizado; de hecho, mientras más fino sea el material, mayor es el número de tamices que tiene que atravesar la arena, y mayor será el tiempo que necesiten los granos para pasar por aperturas de malla más pequeñas (Mizutani, 1963). Por tanto, Syvitski (Syvitski, 1991) y Lund-Hansen y Oehmig (Lund-Hansen and Oehmig, 1992) propusieron un tiempo medio de tamizado de 20 minutos, mientras que el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos (USACE) (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) eligió 15 minutos, y Roman *et al.* (Román-Sierra et al., 2013) establecieron 10 minutos como el tiempo mínimo requerido para obtener resultados precisos para playas con tamaño de grano mediano y arenas de dunas.

Sin embargo, estos estudios se llevaron a cabo utilizando el método de tamizado mecánico y, pese a su gran necesidad, la eficiencia de tamizado con tamices de diámetro pequeño y agitado manual aún no se ha estudiado. Pouillet *et al.* (2019) (Pouillet et al., 2019b) han comparado el tamizado mecánico y manual con tamices de 20 cm de diámetro vs tamizado manual con tamices de 10 cm de diámetro (ambos con 10 minutos de tiempo de agitado). Su conclusión fue que los tamices de pequeño diámetro no deberían utilizarse como método a bordo de dragas para propósitos de regeneración de playas.

Aun así, las diferencias entre agitado manual y mecánico con tamices de pequeño diámetro todavía no se han analizado, y tampoco la influencia del tiempo de tamizado con estos tamices pequeños. Estos estudios fueron contemplados para esta tesis de manera que se pudiese encontrar una solución en lugar de rechazar este método.

Por tanto, el propósito de este estudio es distinguir las diferencias entre los resultados obtenidos de los parámetros de tamaño de arena tamizada a mano (agitado manual) y arena tamizada mecánicamente (agitado con la máquina). En ambos escenarios, se utilizaron los tamices de 10 cm de diámetro. Además, se investigaron los errores relativos para diferentes tiempos de tamizado. La presente tesis muestra el error que alcanza tamizando manualmente y determina si este error es aceptable para los trabajos de regeneración de playa.

3.3 Zona de estudio

Las muestras de arena analizadas son del banco de arena de préstamo Placer de Meca, donde la arena es extraída para llevar a cabo las regeneraciones de playa. El Placer de Meca se encuentra entre 15-20 metros de profundidad en el Golfo de Cádiz, cerca del Estrecho de Gibraltar (*Figura 1*), y contiene aproximadamente 25 millones de m³ de arena que puede ser utilizada para regeneraciones de playa (Muñoz-Perez et al., 2009). Las playas que se encuentran cerca del banco de arena consisten en arenas de tamaño fino-medio, como el sedimento de préstamo, con un D₅₀ medio de 0.25 mm y una composición del 90% de cuarzo y 10% carbonato cálcico (Muñoz-Pérez et al., 2000).

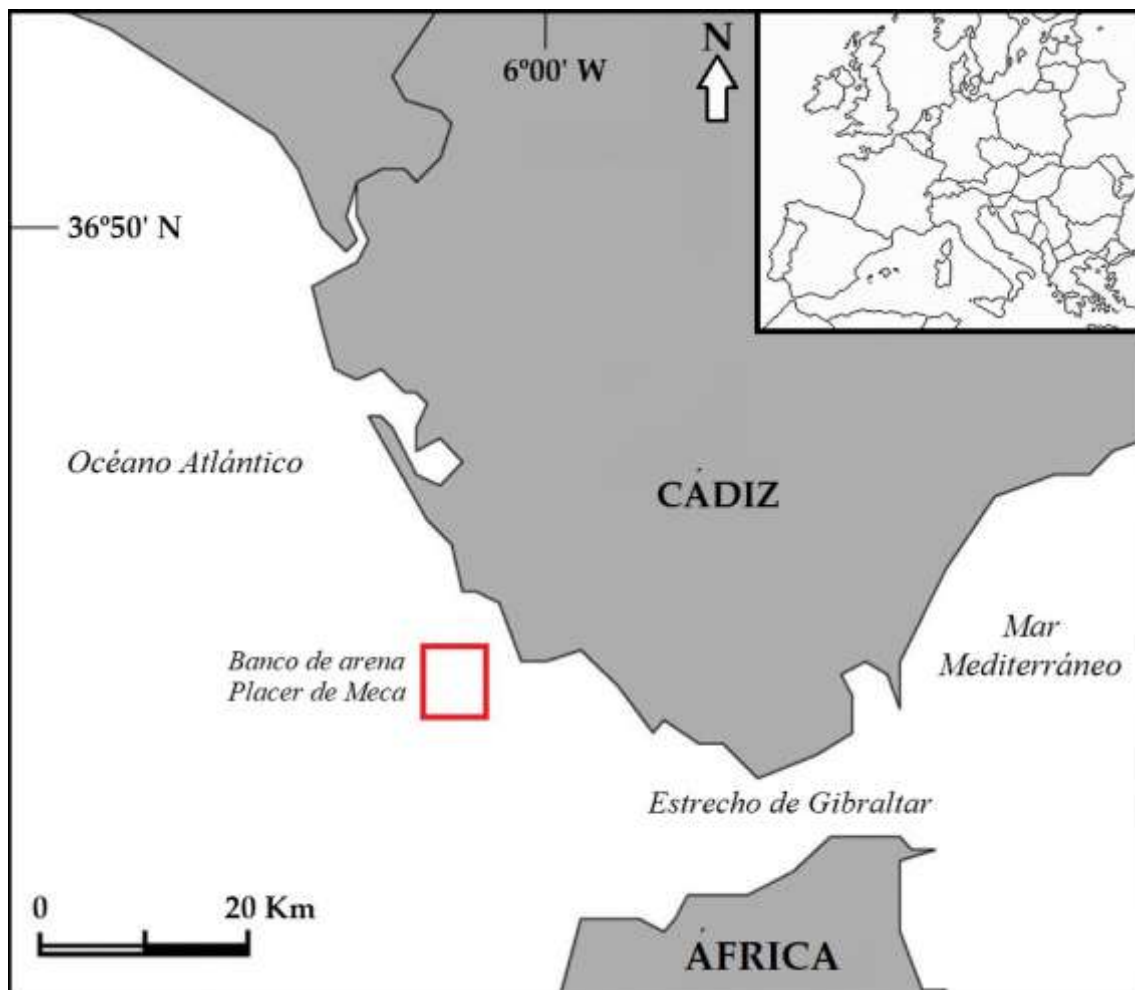


Figura 1. El banco de arena “Placer de Meca” situado en el Golfo de Cádiz, cerca del Estrecho de Gibraltar (España, Europa).

Veinte muestras fueron tomadas en diferentes días de dentro de la cántara de una draga de succión en marcha (**Figura 2**) durante una regeneración de playa en Cádiz (en las playas de Costa Ballena y Punta Candor). Los muestreos se llevaron a cabo cada vez que las operaciones de dragado finalizaban y la cántara estaba llena de arena. Antes de tomar la muestra de arena de la superficie de la cántara, se retiraban los primeros 5 cm de arena de la superficie de un área aleatoria de unos 20 cm², siguiendo las medidas de seguridad apropiadas. Los primeros 5 cm de la superficie normalmente tienen un alto porcentaje de conchas, y esto no es representativa de toda la cántara (Pouillet et al., 2019a).



Figura 2. La cántara de la draga de succión en marcha, donde fueron tomadas las muestras de arena.

3.4 Metodología

Mientras que la draga estaba navegando hacia el área de vertido, los análisis de tamaño de arena se llevaban a cabo siguiendo el procedimiento estándar descrito por Syvitski (Syvitski, 1991), y ligeramente modificado por Roman-Sierra *et al.* (Román-Sierra *et al.*, 2013). Una vez que los análisis finalizaron a bordo, habiendo utilizado la metodología de agitado a mano, cada muestra se guardó en bolsas herméticas para poder hacer los análisis de las mismas muestras después, pero ya en el laboratorio en tierra y con el método de tamizado mecánico. Por tanto, cada muestra fue tamizada dos veces con la columna de tamices de pequeño diámetro (10 cm). Debido a que este caso de estudio se hizo durante una regeneración de playa en España, se utilizaron para el tamizado 8 tamices con unos tamaños de malla específicos: 2 mm, 1 mm, 710 μm , 500 μm , 355 μm , 250 μm , 125 μm ,

y 62.5 μm , ya que la Administración de Costas de España habitualmente lo requiere así. La metodología para los análisis de las muestras de arena se resume a continuación.

Primero, 20 muestras que pesan 100 gr cada una, fueron secadas en la mufla durante 12h en el laboratorio, mientras que el proceso de secado a bordo de la draga fue utilizando un microondas a máxima potencia durante 5 minutos. Este peso en concreto se eligió para facilitar el paso de la muestra a través de las mallas de los tamices, ya que añadir más volumen de sedimentos puede resultar en su acumulación y por tanto un bloqueo. Siguiendo a esto, cada muestra se pesó con una balanza mecánica (triple beam) cuya precisión puede medir hasta 0.1 gr, para simular las condiciones a bordo. Para el siguiente paso después del pesado, la muestra de arena se puso en el tamiz que se encuentra más arriba en primer lugar (tamaño de malla de 2 mm) de la columna de tamices de 10 cm de diámetro. Entonces, la muestra seca se tamizó durante 10 minutos utilizando los dos métodos diferentes: el procedimiento de agitado manual y el mecánico. La arena acumulada en cada tamiz se pesó para obtener los valores requeridos del D_{50} y el sorting.

Estos pasos se llevaron a cabo con las dos metodologías. Los parámetros se calcularon utilizando las ecuaciones correspondientes que se pueden encontrar en Folk y Ward (Folk and Ward, 1957) (*Tabla 1*). Blott and Pye (Blott and Pye, 2001) produjeron un manual detallada de este estudio. Las ecuaciones están basadas en una escala de unidades phi (φ), pero estas pueden ser convertidas a milímetros utilizando la Ecuación [1].

$$D \text{ (mm)} = 2^{-\varphi} \quad [1]$$

Tabla 1. Fórmulas utilizadas para calcular los principales parámetros granulométricos, de acuerdo con las medidas gráficas de Folk y Ward (Folk and Ward, 1957), donde M_φ es el tamaño medio de grano estimado y σ_φ es la desviación estándar estimada (o sorting) de la muestra en unidades phi.

Media	Sorting
$M_\varphi = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3}$	$\sigma_\varphi = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6}$

El procedimiento de tamizado se realizó dos veces por cada muestra para encontrar posibles variaciones en los resultados. Aun así, los resultados fueron exactamente los mismos. Además, las 3 muestras con mayores diferencias para ambos métodos se analizaron y comprobaron una tercera vez.

El factor de sobrellenado (R_A) también se utilizó para calcular el incremento en el volumen de regeneración necesitado para compensar las pérdidas de finos de la arena de préstamo. Por tanto, el factor de sobrellenado (R_A) se determinó aplicando la *Ecuación* [2] y la *Ecuación* [3] en el ábaco de James (*Figura 3*) (U.S. Army Corps of Engineers, 1984). Este factor se obtuvo con los valores de los parámetros de la Media y el Sorting para los procedimientos de tamizado mecánico y manual para ambas arenas, la de préstamo (“borrow”) (M_{φ_b} y σ_{φ_b}) y la nativa (M_{φ_n} y σ_{φ_n}). Esto mostró el error al que se llega por usar el método de tamizado manual, el cual implica una necesaria reducción del volumen.

$$\frac{M_{\varphi_b} - M_{\varphi_n}}{\sigma_{\varphi_n}} \quad [2]$$

$$\frac{\sigma_{\varphi_b}}{\sigma_{\varphi_n}} \quad [3]$$

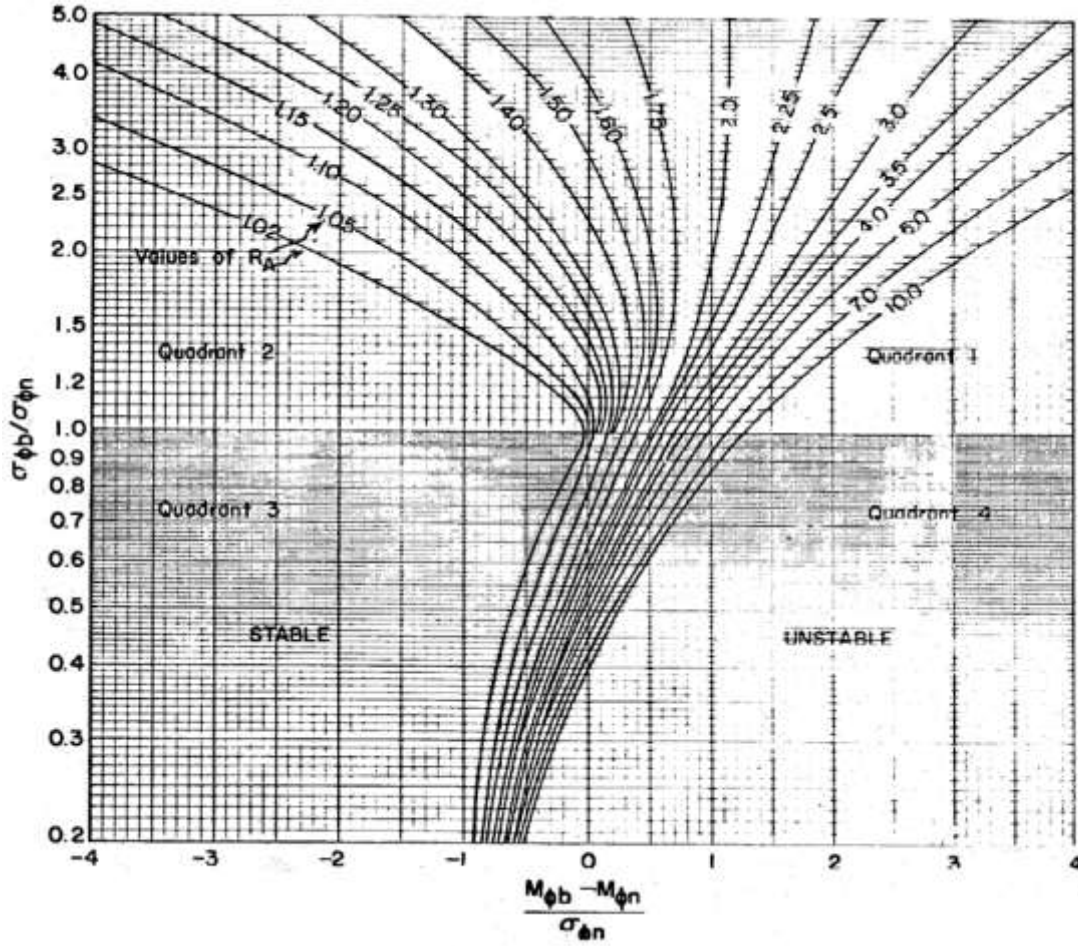


Figura 3. Ábaco de James donde el R_A puede ser encontrado utilizando los parámetros Media y Sorting para la arena de préstamo ($M_{\phi b}$ y $\sigma_{\phi b}$) y la nativa ($M_{\phi n}$ y $\sigma_{\phi n}$) (U.S. Army Corps of Engineers, 1984).

Un estudio previo (Muñoz-Perez et al., 2012) ya ha establecido que el tamizado mecánico es el método preferido para obtener resultados realistas y garantizar homogeneidad. Por tanto, el error relativo (ϵ), teniendo en cuenta el método mecánico como el de referencia, se calculó para los parámetros del D_{50} y el sorting siguiendo la [4] y la [5].

$$\epsilon_{D_{50}} = \left(\frac{D_{50} \text{ manual} - D_{50} \text{ mecánico}}{D_{50} \text{ mecánico}} \right) \cdot 100 \quad [4]$$

$$\epsilon_{\text{sorting}} = \left(\frac{\text{sorting manual} - \text{sorting mecánico}}{\text{sorting mecánico}} \right) \cdot 100 \quad [5]$$

3.5 Resultados y Discusión

Los valores del D_{50} (mm) y el sorting (ϕ) obtenidos a través de los tamizados mecánico y manual de 20 muestras de arena se muestran junto con los valores de la arena nativa en la **Tabla 2**. Por consiguiente, la diferencia entre ambas metodologías para cada parámetro, y el error (ϵ) al que se llega utilizando el método mecánico como referencia, también se puede observar en la tabla. Además, el porcentaje de conchas presente en las muestras también puede verse en la tabla. Otros parámetros granulométricos como el D_{95} , D_{84} , D_{16} y D_5 y sus diferencias también aparecen en la **Tabla 3** de modo que ayude a encontrar qué tamaño de malla de tamiz es la que acumula la arena, el cual podría ser la posible causa del error del agitado manual.

Tabla 2. Parámetros granulométricos de 20 muestras de arena incluyendo el D_{50} (mm) y el Sorting (ϕ), y la diferencia (mm) y el error (%) entre las metodologías de tamizado mecánico y manual con tamices de 10 cm de diámetro. El porcentaje de conchas y los valores de la arena nativa también se muestran.

Muestra	D_{50} (mm)				Sorting (ϕ)				Conchas (%)
Nativa	0.27				0.60				6.2
Préstamo	Mecánico	Manual	Diferencia	Error (%)	Mecánico	Manual	Diferencia	Error (%)	
1	0.283	0.335	0.052	18.4	0.605	0.541	-0.064	10.6	1.39
2	0.309	0.310	0.001	0.3	0.578	0.570	-0.008	1.4	0.40
3	0.342	0.371	0.029	8.5	0.544	0.512	-0.032	5.9	1.31
4	0.307	0.369	0.062	20.2	0.576	0.477	-0.099	17.2	1.11
5	0.294	0.296	0.002	0.7	0.555	0.551	-0.004	0.7	0.25
6	0.309	0.361	0.052	16.8	0.585	0.498	-0.087	14.9	1.55
7	0.268	0.272	0.004	1.5	0.625	0.614	-0.011	1.8	1.21
8	0.277	0.313	0.036	13	0.706	0.660	-0.046	6.5	3.88
9	0.285	0.291	0.006	2.1	0.580	0.574	-0.006	1	0.04
10	0.298	0.302	0.004	1.3	0.943	0.925	-0.018	1.9	6.98
11	0.351	0.373	0.022	6.3	0.573	0.541	-0.032	5.6	3.27
12	0.281	0.347	0.066	23.5	0.640	0.538	-0.102	15.9	1.90
13	0.368	0.375	0.007	1.9	0.911	0.862	-0.049	5.4	11.04
14	0.282	0.324	0.042	14.9	0.662	0.587	-0.075	11.3	1.73
15	0.278	0.344	0.066	23.7	0.585	0.534	-0.051	8.7	0.32
16	0.227	0.282	0.055	24.2	0.555	0.527	-0.028	5	0.04
17	0.230	0.314	0.084	36.5	0.687	0.639	-0.048	7	4.57
18	0.359	0.390	0.031	8.6	0.784	0.746	-0.038	4.8	8.30
19	0.243	0.326	0.083	34.2	0.599	0.527	-0.072	12	1.92
20	0.238	0.296	0.058	24.4	0.697	0.661	-0.036	5.2	0.05
Valor medio	0.291	0.329	0.038	14	0.650	0.604	-0.045	7.1	2.56

Las diferencias y errores en las muestras número 16, 17, 19 y 20 fueron mayores que en las otras muestras y, por tanto, los análisis para estas muestras se repitieron, pero los resultados no cambiaron.

Tabla 3. Parámetros granulométricos de las 20 muestras de arena incluyendo D_{95} , D_{84} , D_{16} y D_5 (mm), y la diferencia (mm) y error (%) entre las metodologías de tamizado mecánico y manual con tamices de 10 cm de diámetro.

Muestra	D_{95}				D_{84}				D_{16}				D_5			
	Manual	Mecánico	Diferencia	Error (%)	Manual	Mecánico	Diferencia	Error (%)	Manual	Mecánico	Diferencia	Error (%)	Manual	Mecánico	Diferencia	Error (%)
1	0.496	0.495	0.001	0.2	0.456	0.433	0.023	5.3	0.209	0.174	0.035	20.1	0.151	0.14	0.011	7.9
2	0.485	0.489	-0.004	0.8	0.435	0.442	-0.007	1.6	0.187	0.187	0.000	0.0	0.144	0.144	0.000	0.0
3	0.499	0.519	-0.020	3.9	0.468	0.462	0.006	1.3	0.228	0.214	0.014	6.5	0.157	0.153	0.004	2.6
4	0.496	0.495	0.001	0.2	0.465	0.443	0.022	5.0	0.244	0.189	0.055	29.1	0.162	0.145	0.017	11.7
5	0.474	0.479	-0.005	1.0	0.397	0.416	-0.019	4.6	0.179	0.185	-0.006	3.2	0.142	0.144	-0.002	1.4
6	0.497	0.498	-0.001	0.2	0.464	0.447	0.017	3.8	0.233	0.187	0.046	24.6	0.159	0.144	0.015	10.4
7	0.495	0.497	-0.002	0.4	0.432	0.437	-0.005	1.1	0.17	0.168	0.002	1.2	0.139	0.138	0.001	0.7
8	0.692	0.703	-0.011	1.6	0.462	0.453	0.009	2.0	0.191	0.171	0.020	11.7	0.145	0.139	0.006	4.3
9	0.477	0.478	-0.001	0.2	0.422	0.419	0.003	0.7	0.179	0.176	0.003	1.7	0.142	0.141	0.001	0.7
10	1.711	1.729	-0.018	1.0	0.51	0.521	-0.011	2.1	0.178	0.175	0.003	1.7	0.141	0.14	0.001	0.7
11	0.664	0.684	-0.020	2.9	0.477	0.476	0.001	0.2	0.249	0.235	0.014	6.0	0.163	0.159	0.004	2.5
12	0.563	0.573	-0.010	1.7	0.465	0.437	0.028	6.4	0.227	0.174	0.053	30.5	0.157	0.14	0.017	12.1
13	1.779	1.761	0.018	1.0	0.599	0.618	-0.019	3.1	0.237	0.217	0.020	9.2	0.159	0.153	0.006	3.9
14	0.574	0.592	-0.018	3.0	0.459	0.45	0.009	2.0	0.204	0.172	0.032	18.6	0.149	0.14	0.009	6.4
15	0.488	0.479	0.009	1.9	0.453	0.416	0.037	8.9	0.21	0.173	0.037	21.4	0.151	0.14	0.011	7.9
16	0.465	0.457	0.008	1.8	0.378	0.351	0.027	7.7	0.18	0.158	0.022	13.9	0.142	0.135	0.007	5.2
17	0.685	0.695	-0.010	1.4	0.456	0.396	0.060	15.2	0.197	0.159	0.038	23.9	0.147	0.135	0.012	8.9
18	1.699	1.716	-0.017	1.0	0.491	0.489	0.002	0.4	0.254	0.235	0.019	8.1	0.166	0.159	0.007	4.4
19	0.498	0.497	0.001	0.2	0.452	0.393	0.059	15.0	0.214	0.163	0.051	31.3	0.153	0.137	0.016	11.7
20	0.68	0.691	-0.011	1.6	0.445	0.415	0.030	7.2	0.183	0.161	0.022	13.7	0.143	0.136	0.007	5.1
Valor medio	0.721	0.726	-0.005	1.3	0.459	0.446	0.014	4.7	0.208	0.184	0.024	13.8	0.151	0.143	0.007	5.4

3.5.1 D₅₀ (Diámetro de Grano Medio)

La **Figura 4** muestra cómo los valores del D₅₀ siempre salían mayores cuando se tamizaba de forma manual, dicho de otro modo, el tamizado mecánico resulta en valores más pequeños del D₅₀. La mayor diferencia fue de 0.084 mm (muestra 17), representando un error máximo del 36.5%, mientras que el error medio fue del 14%. El tamizado mecánico produjo resultados más finos dado que el agitado es más constante y potente que agitar a mano. En el tamizado a mano, la arena se acumulaba en ciertos tamices de tamaño de malla más grandes. Una posible explicación para esto es que agitando a mano se le aplica menos amplitud, fuerza y consistencia en el agitado de la que realmente se necesita para que la arena pase a través de los tamaños de mallas correspondientes. En consecuencia, se puede ver un ejemplo en la **Figura 6** de la muestra 17, donde muestra cómo la arena se acumula en el tamiz de tamaño de malla de 355µm habiendo tamizado manualmente. Sin embargo, para la misma muestra, cuando es tamizada mecánicamente, parte de esa arena sí pasa a través de tamices inferiores con tamaños de malla más pequeños (250 y 125µm).

3.5.1.1 Tiempo de tamizado

Roman *et al.* (Román-Sierra et al., 2013) establecieron que tamizar mecánicamente durante 10 minutos es tiempo suficiente para obtener los mismos resultados que con 20 minutos de duración. No obstante, sus análisis de tamizado se llevaron a cabo usando tamices de 20 cm de diámetro, mientras que en este estudio los tamices eran más pequeños (diámetro de 10 cm). Por esta razón, las muestras con las mayores diferencias se analizaron con los dos métodos, manual y mecánico, tamizando durante 15, 20, 25 y 30 minutos (**Figura 5**), para así poder determinar durante cuánto tiempo una muestra de arena debería ser tamizada de forma manual, utilizando tamices de diámetro pequeño, y así conseguir (si es posible) resultados similares a los obtenidos con el método de tamizado mecánico.

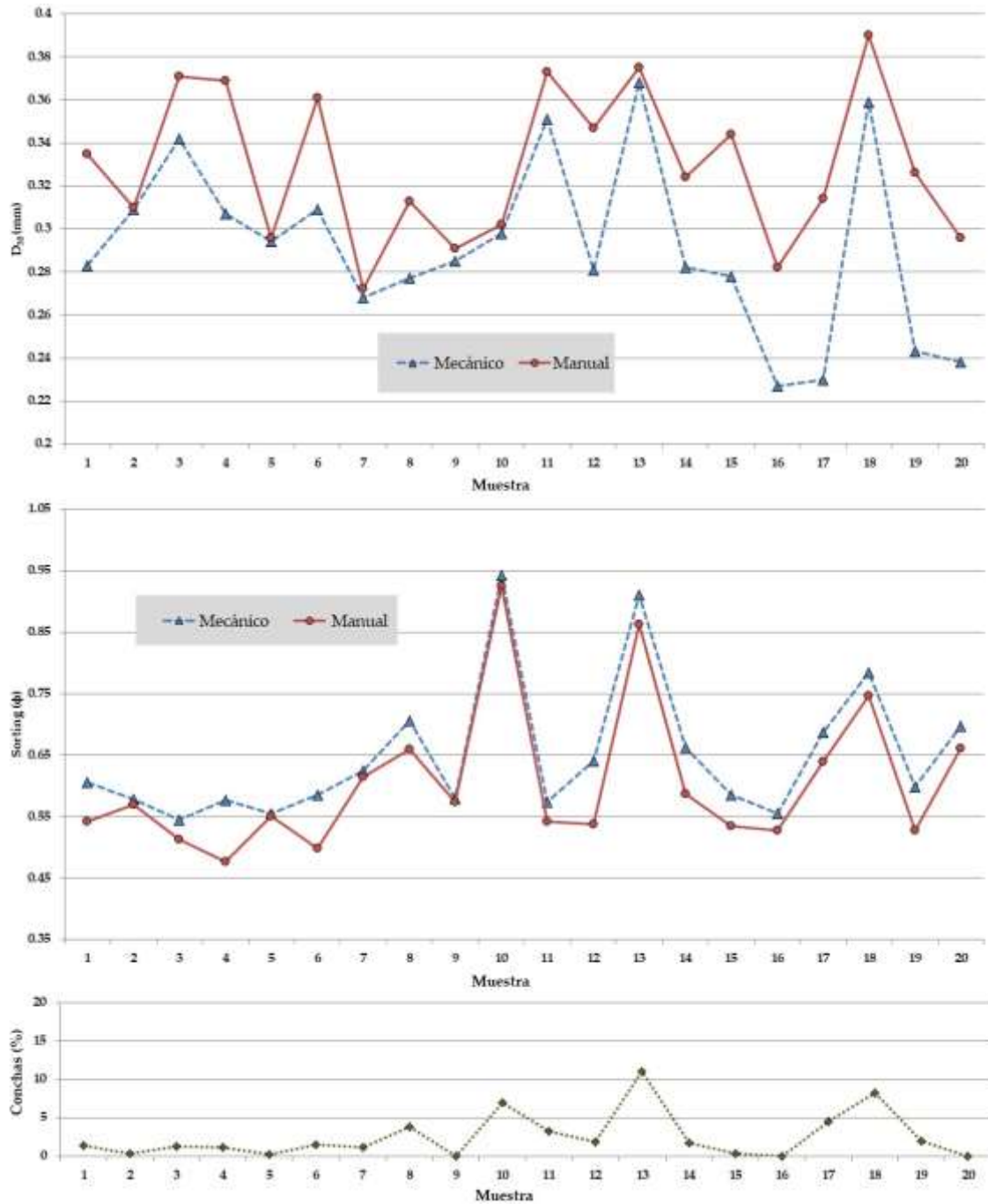


Figura 4. Resultados gráficos de los parámetros granulométricos de las 20 muestras de arena, D₅₀ (mm) y Sorting (φ) para los métodos de tamizado mecánico y manual con tamices de 10 cm de diámetro. También se muestran los resultados de porcentaje de conchas de cada muestra.

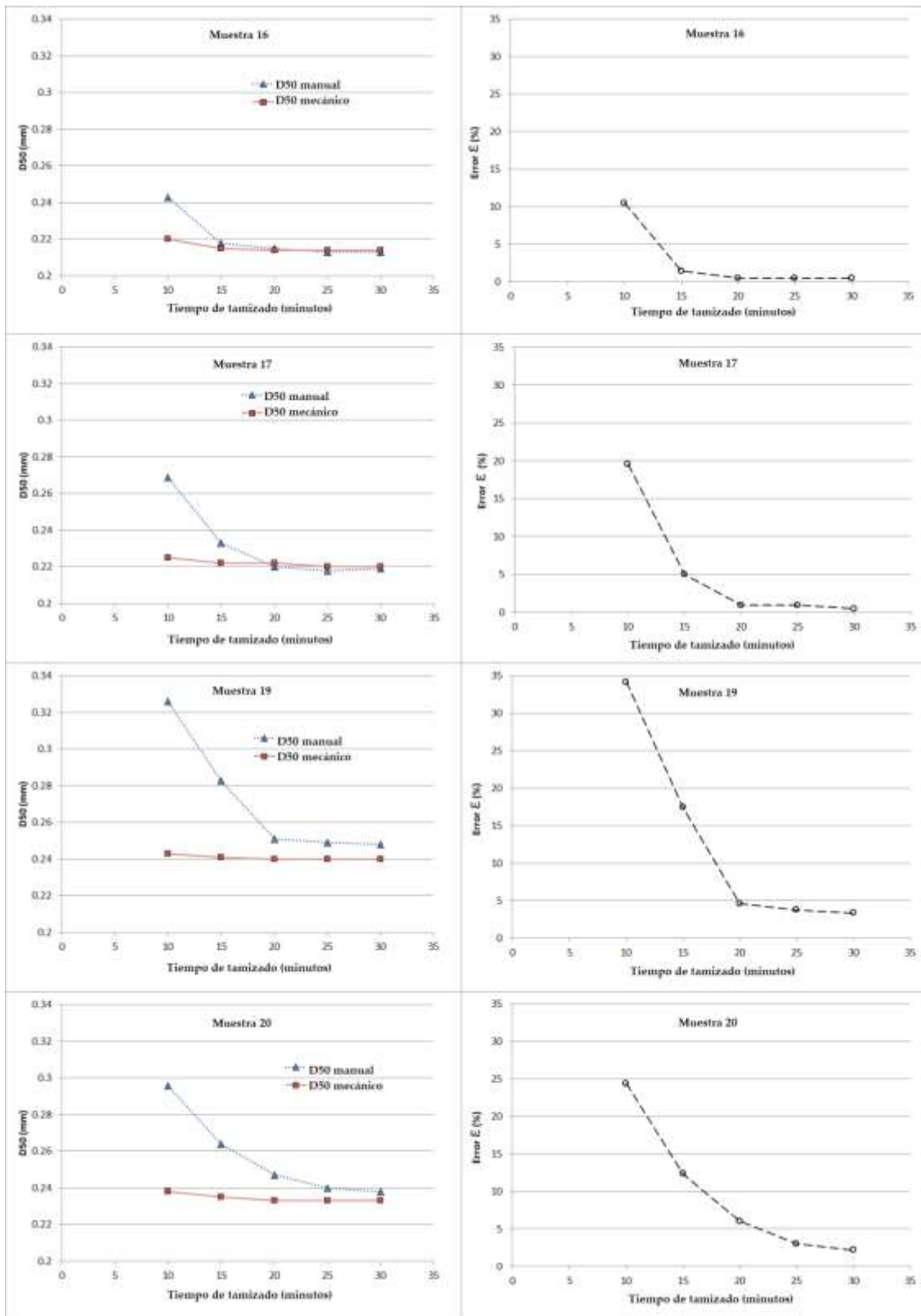


Figura 5. Resultados del D50 de las muestras número 16, 17, 19 y 20, tamizadas durante 10, 15, 20, 25 y 30 minutos respectivamente, con los procedimientos mecánico y manual, y sus respectivos errores (%).

La **Figura 5** representa cómo los valores del D_{50} disminuyen cuando se incrementa el tiempo de tamizado, pero se estabiliza después de los 20 minutos de agitado. Entonces, las muestras de arena deberían ser agitadas manualmente durante 20 minutos para los tamices de diámetro pequeño para obtener buenos resultados, ya que los errores relativos han sido menores al 5% después de los 20 minutos para todos los casos. Si se tamiza más de 20 minutos no se van a mejorar los resultados sustancialmente. Estos resultados demuestran que los 10 minutos de tamizado no eran suficientes para obtener resultados fiables cuando se agitaban manualmente las muestras con tamices de 10 cm de diámetro. Sin embargo, no hay ningún problema siempre y cuando se pueda garantizar que el tamizado manual se haga durante 20 minutos. Por tanto, ya hay una posible solución para no tener que rechazar los tamices pequeños como establecía Poullet *et al.* (2019) (Poullet *et al.*, 2019b).

Agregado a lo anterior, cuando se analizaron las diferencias entre los tamices, la curva granulométrica de la muestra 17 (**Figura 6**) se eligió porque era una muestra representativa que mostraba un claro ejemplo de cómo el procedimiento mecánico obtenía valores de arena más finos con tamaños más variables. De hecho, se observó que las diferencias más grandes se encontraban alrededor de los 0.25 mm de tamaño de grano de arena.

La **Tabla 2** y la **Tabla 3** muestran valores medios del D_{50} y D_{16} , que van desde los 0.184 a los 0.329 mm, con un error medio del 14% para ambos. Estos valores corresponden a los tamices de malla de 355 y 250 μm , donde se pueden encontrar los mayores errores. Los valores medios para el D_5 son 0.143 y 0.151 mm, con un error del 5.4%. Finalmente, los valores medios del D_{84} y D_{95} van desde 0.446 a 0.726 mm, y sus errores asociados son 1.3% y 5.4% respectivamente.

Estos resultados demuestran que los tamices de malla por encima de 355 μm y por debajo de 250 μm no son el problema. Lamentablemente, el D_{50} medio de la arena de la zona de estudio del presente trabajo, está alrededor de los 0.25 mm.

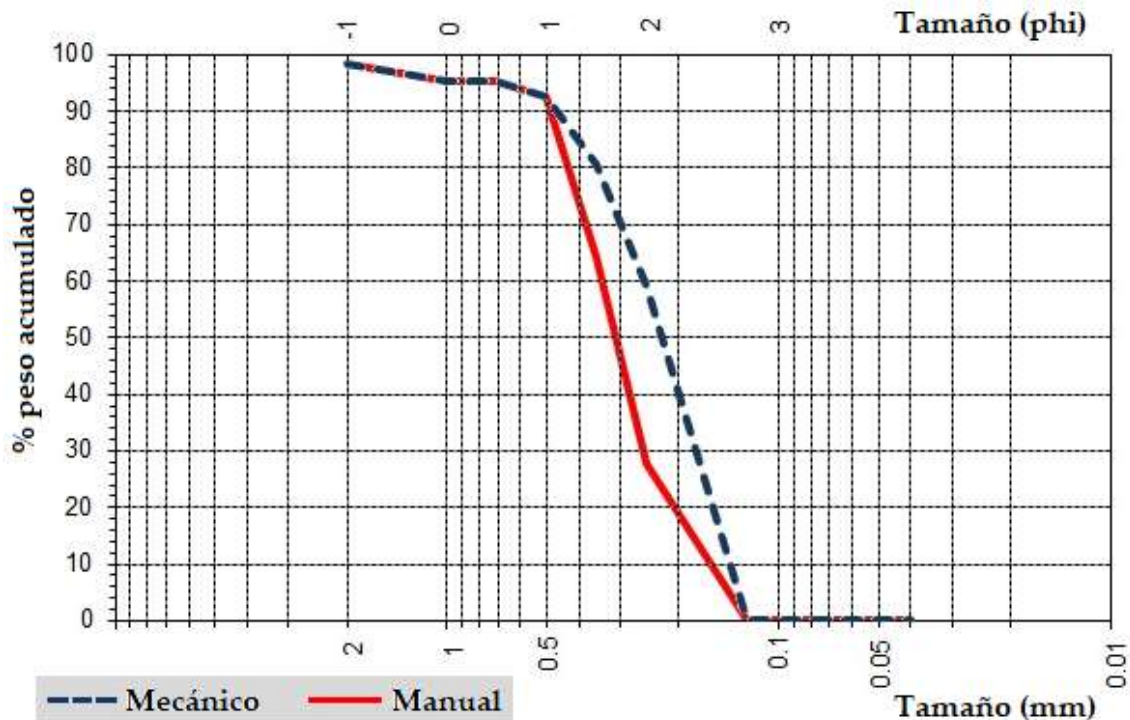


Figura 6. Comparación de las curvas granulométricas de la muestra de arena número 17 (tamaño de partícula en mm y en unidades phi) para los tamizados mecánico y manual.

Las muestras de arena deben ser agitadas manualmente durante 20 minutos en tamices de diámetro pequeño para obtener resultados precisos, en lugar de los 10 minutos que necesita el tamizado mecánico para conseguir el resultado óptimo (Blott and Pye, 2006).

3.5.2 Sorting

Los resultados para el parámetro del sorting (para ambos procedimientos de agitado, el mecánico y el manual) mostraron solo una leve diferencia (resultados casi homogéneos) entre ambos (ver *Figura 4*). A pesar de que las diferencias parecían no ser importantes, los resultados obtenidos manualmente para el sorting siempre eran más pequeños que los adquiridos de forma mecánica. Si el sorting era menor, eso significaba que la muestra no estaba bien seleccionada, porque la acumulación de granos sucedía en un tamaño de malla de tamiz específico, en lugar de una distribución homogénea de la arena alrededor de la media.

3.5.3 Porcentaje de conchas

La cantidad de conchas en cada muestra se obtuvo de forma visual, con ayuda de un microscopio. Los tres primeros tamices de la parte de arriba de la columna (mallas de 2 mm, 1 mm y 710 μ m) contienen la mayoría de las partículas de conchas porque los bioclastos tienen un mayor tamaño que los sedimentos de arena. El porcentaje de conchas no parecía tener ninguna correlación con el sorting ni con el D_{50} (**Figura 4**). Esto podría ser porque los porcentajes no son lo suficientemente grandes para que haya una influencia en el resto de parámetros. Un próximo estudio más a fondo debería solventar esta cuestión, por ejemplo, estudiando diferentes valores de porcentajes de conchas y su posible influencia en los parámetros de tamaño de arena.

3.5.4 Factor de sobrellenado (R_A)

Siguiendo el procedimiento establecido por Poulet *et al.* (Poulet *et al.*, 2019a) y aplicando la [2] y la [3] en el método de James (U.S. Army Corps of Engineers, 1984), se obtuvo el factor de sobrellenado (R_A) para las muestras 16, 17, 19 y 20 (**Tabla 4**). Estas fueron las muestras que tenían los mayores valores de error del D_{50} cuando se compararon los métodos de tamizado mecánico y manual. Estos errores llegaron hasta el 36.5% para el D_{50} .

Tabla 4. Resultados de las ecuaciones utilizando los parámetros Media y Sorting de los procedimientos de tamizado mecánico y manual para las muestras de arena de préstamo (M_{ϕ_b} y σ_{ϕ_b}) y las de arena nativa (M_{ϕ_n} y σ_{ϕ_n}), y los resultados del factor de sobrellenado R_A . La diferencia en tanto por ciento del R_A con los procedimientos mecánico y manual también se muestra.

Muestra	$(M_{\phi_b} - M_{\phi_n})/\sigma_{\phi_n}$		$\sigma_{\phi_b}/\sigma_{\phi_n}$		R_A		Diferencia (%)
	Mecánico	Manual	Mecánico	Manual	Mecánico	Manual	
16	0.23	-0.09	0.93	0.88	1.50	1.02	48
17	0.07	-0.43	1.15	1.07	1.05	1	5
19	0.03	-0.49	1.00	0.88	1.05	1	5
20	-0.01	-0.32	1.16	1.10	1.05	1	5

El R_A calculado con los resultados obtenidos de la media y sorting con los métodos mecánico y manual, alcanzaron diferencias de hasta un 5% en volumen para las muestras 17, 19 y 20, y un 48% para la muestra 16. El R_A para el tamizado mecánico es considerado el más preciso y, por tanto, el valor de referencia (como previamente se estableció con los resultados del D_{50}). Prestándole atención a la muestra 16, cuando se utiliza el método mecánico, un R_A de 1.50 indica que se necesita un aumento del 50% del volumen de arena a verter para llenar la playa. Por otro lado, el R_A obtenido con el método manual, para la misma muestra 16, es de solo 1.02, lo cual implica solo un incremento del volumen en un 2% necesario para la regeneración: un 48% menos de volumen que el cálculo anterior que era el más exacto. En otras palabras, los resultados manuales mostraron que la arena de préstamo era estable y no tendría pérdidas (siendo el caso de tener un $R_A \approx 1$). Sin embargo, los resultados mecánicos que son más precisos mostraban la necesidad de un incremento de volumen de arena de préstamo de entre el 5 y 50%. Si se eligiese el método de tamizado manual agitando solo durante 10 minutos, conllevaría rellenar la playa con menos arena de la que realmente necesita.

A pesar de que los resultados obtenidos en este estudio son para un tipo de arena en concreto, la metodología llevada a cabo podría ser generalizada a cualquier otra playa del mundo. La variación en la estimación del D_{50} podría ser a una función relacionada con el tiempo. Los resultados del presente estudio muestran variaciones de los errores bastante significantes; pero no ha sido posible obtener una función de transferencia directa. Por tanto, un ejemplo de futuras líneas de investigación es desarrollar una función de transferencia o de corrección para mejorar los resultados manuales, y así reducir los errores. Este estudio se llevó a cabo mientras se tenía en mente que otros factores podrían influir en los resultados, como por ejemplo el método de secado. De esta manera, eso condujo a continuar esta tesis con el siguiente estudio: cómo afecta el método de secado a los resultados de los parámetros granulométricos.

Hasta ahora, en esta primera parte se ha llegado a dar una alternativa para obtener mejores resultados con tamices de pequeño diámetro y tamizando de forma manual, que es incrementar el tiempo de tamizado por lo menos durante 20 minutos.



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA

4. MÉTODO DE SECADO DE ARENA CON MICROONDAS ANTES DE TAMIZAR PARA OBTENER PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS DE ARENA PRECISOS

4. MÉTODO DE SECADO DE ARENA CON MICROONDAS ANTES DE TAMIZAR PARA OBTENER PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS DE ARENA PRECISOS

4.1 Abstract

The purpose of this study is to determine the differences between the size parameter findings, comparing the results of a muffle during a 12-h sand-drying process with those of a microwave, because the effectiveness of sand drying with a microwave has not previously been studied. To achieve the best outcomes and assess any inaccuracies, a technique was established. Several power levels and durations were used in the tests. Furthermore, as the median particle size (D_{50}) affects the porosity of sand, samples from three beaches in the south of Spain with varying sand sizes were used in this study. When drying for at least 5 min, the error findings for D_{50} are less than 3.5%, which is perfectly acceptable for beach nourishment purposes. Regarding power, 462 watts was the optimal power; a lower power, approximately 300 watts, did not completely dry the material, even after nearly 15 min. Furthermore, errors in the sorting (σ) parameter were negligible. It is essential to implement the following recommendations in microwave drying methods: the use of a light and wide container for the sand, interruptions during drying, and a minimum duration of 5 min.

4.2 Introducción

Como ya vimos en el capítulo anterior, la regeneración de playa es uno de los métodos más populares de protección del litoral utilizado en todo el mundo. Se debe encontrar la arena idónea para reemplazar la arena natural que se ha perdido por erosión en la playa (Pranzini et al., 2018; Saponieri et al., 2018). Adicionalmente, se debe estimar también la cantidad de arena requerida para la regeneración de playa (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Las investigaciones de la distribución del tamaño de la arena revelan información sobre el origen de la arena, el ambiente deposicional, y el historial de movimientos de transporte (Bernabeu Tello et al., 2002; Fenster et al., 2016; Grottoli et al., 2017; Hallin et al., 2019; Remo et al., 2016; Singh et al., 2007). Además, el análisis del tamaño de arena

es una técnica crucial para categorizar los ambientes sedimentarios y los materiales (de Villar et al., 2019; Roman-Sierra et al., 2011; Steidtmann, 1982). Esta técnica también puede ser utilizada para predecir por cuánto tiempo y cómo la arena de la playa perdura en la playa en respuesta a las tormentas (Aguilera-Vidal et al., 2022; Bascom, 1951; de Villar et al., 2019; Grottoli et al., 2017; Larson and Kraus, 1991; Mendes et al., 2021; Moreno et al., 2018). Las medidas de las principales características del tamaño de arena, primordialmente el tamaño medio de grano (D_{50}) y el sorting o desviación típica (la distribución de los tamaños alrededor de la media, σ), son parte de los análisis llevados a cabo para investigar los procesos costeros (Blott and Pye, 2001; Kuang et al., 2021; Li et al., 2021; Romagnoli et al., 2021).

El coordinador de la regeneración de playa es el responsable de determinar la mejor localización para la arena y llevar el control de calidad en la zona de vertido. Previo al vertido de la arena en la playa, se deben llevar a cabo los procedimientos de obtención de los parámetros de tamaño de arena a bordo de la draga (U.S. Army Corps of Engineers, 1984). Obviamente, los parámetros del tamaño de la arena deben ser determinados con el mayor grado de precisión. Para los cálculos de obtención de los parámetros, se utilizaron, como en el *Capítulo 3*, las fórmulas desarrolladas por Folk y Ward (Folk, 1974; Folk and Ward, 1957), que están basadas en estudios anteriores de Krumbein (Krumbein and Pettijohn, 1938). Por tanto, para conseguir más precisión en la toma de datos, se podrían llevar a cabo análisis de muchas muestras de diferentes zonas, y/o realizar múltiples análisis de una misma muestra. Los investigadores han examinado y contrastado diversos tipos de técnicas de análisis del tamaño de las partículas de arena, enumeradas previamente en el *Capítulo 3*.

Como ya se indicó en el capítulo anterior, cuando se lleva a cabo una regeneración de playa, el método de tamizado es el que más se suele utilizar como análisis para determinar los parámetros esenciales del tamaño de la arena a bordo de una draga. De la misma forma, vuelven a surgir los mismos problemas: las limitaciones para examinar el tamaño de arena dentro de un buque dragador. Recordando estas limitaciones, cabe destacar el espacio de trabajo muy restringido, los materiales concretos que se requieren, la fuente de energía es inestable, y el tiempo de viaje corto entre las localizaciones de extracción de arena de préstamo y el lugar de vertido. Como resultado, cuando hay que llevar a cabo

este análisis a bordo de una draga, la técnica de tamizado manual con tamices pequeños (10 cm diámetro) debería ser la que se utilice normalmente, y la influencia del método de agitado manual ya fue estudiado por Pouillet *et al.* (Pouillet *et al.*, 2019b) y se ha ampliado su estudio en el capítulo anterior en esta Tesis. En este capítulo se tratará otro de los pasos del proceso de obtención de los parámetros granulométricos, que también sufre las consecuencias de ser realizado a bordo de un barco: el secado de la arena previo al tamizado.

La mufla que se utiliza en laboratorio, para secar las muestras de arena antes de tamizarlas, pesa normalmente entre 70 y 90 kg y sus dimensiones son aproximadamente 90 x 70 x 60 cm; mientras que un microondas común pesa unos 6 kg y sus dimensiones pueden ser 25 x 45x 35 cm. Además del escaso espacio en una draga, los problemas antes mencionados también explican por qué se utiliza un microondas para secar las muestras en estas circunstancias, en lugar de una mufla durante 12 horas de secado como se hace en el laboratorio en tierra.

La precisión es vital cuando se determinan las características de la arena para estos trabajos de regeneración de playa (Grosskopf and Kraus, 1993). Numerosos estudios ya han establecido la eficiencia del tamizado en relación con el tiempo de agitación (Lund-Hansen and Oehmig, 1992; Pouillet *et al.*, 2019b; Román-Sierra *et al.*, 2013; Syvitski, 1991; U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Una de las teorías es que para tamizar materiales más finos hace falta que la duración del tiempo de tamizado sea mayor. De hecho, cuanto más fino sea el material, la arena tiene que atravesar más mallas de tamices, así que se necesita más tiempo para que los granos pasen por poros de malla más pequeños (Lopez-Garcia *et al.*, 2021; Mizutani, 1963).

El proceso más importante antes del tamizado para asegurar resultados precisos es el secado de la muestra de arena. La porosidad de la arena depende del tamaño y forma de los granos de arena (Román-Sierra *et al.*, 2013). Si la muestra de arena contiene un poco de agua dentro de los espacios intersticiales, la eficiencia de tamizado podría verse comprometida en términos de filtración ineficaz de la arena a través de las mallas de los tamices. La humedad de la arena podría bloquear los poros de las mallas o crear bolas de arena compactas que se podrían formar debido al proceso de agitado. Por tanto, elegir el

método correcto de secado de la muestra de arena es extremadamente importante ya que podría tener un impacto relevante en la determinación de los parámetros de tamaño de arena.

Cuando los análisis se llevan a cabo en un laboratorio en tierra, las muestras de arena son secadas en una mufla a una temperatura de 110°C durante 12 horas de acuerdo con las metodologías establecidas (Román-Sierra et al., 2013; Syvitski, 1991; U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Este proceso de secado que se acaba de mencionar no se puede usar a bordo del laboratorio de una draga. La metodología que se utiliza comúnmente para obtener la arena seca para tamizarla en una draga consiste en usar un microondas comercial. Las muestras normalmente se calientan durante 5 minutos a la máxima potencia que tenga el microondas (suele ser sobre 700-800w) para intentar secar completamente la arena. A veces, durante el proceso de secado dentro del microondas, la arena empieza a explotar, salpicando arena por todas las paredes y techo del interior, causando pérdida de parte del peso inicial de la muestra de arena.

Al igual que en el capítulo anterior, al tratarse de propósitos de regeneración de playa, algunos investigadores sugieren que se pueden esperar y/o admitir errores de hasta el 10% en los resultados (Karambas and Samaras, 2014; Muñoz-Perez and Medina, 2010). Pero, ¿cómo influyen en los resultados las circunstancias antes mencionadas? ¿Cómo de grande es el error cometido? ¿Es admisible?

Puesto que aún no se han llevado a cabo investigaciones esenciales para ver la efectividad del secado de arena utilizando un microondas, el propósito de esta segunda parte de la Tesis es establecer las diferencias entre los resultados obtenidos de los parámetros de la arena usando para secarla una mufla durante 12 h y los resultados usando un microondas. Por tanto, se desarrolló una metodología que cuantifica los posibles errores y que obtenga los mejores resultados. Los tests se llevaron a cabo con varios niveles de potencia del microondas y duraciones tiempos de secado. Además, como la porosidad de la arena depende del tamaño medio de grano, la presente tesis se llevó a cabo con muestras de arena de tres playas con diferentes tamaños de arena en el sur de España.

4.3 Zona de estudio

Las muestras de arena analizadas son de tres playas diferentes del litoral del sur de España. La razón de la elección de estas playas en particular es por su D_{50} medio. Las elegidas son las playas de Valdelagrana (D_{50} de 0.11 mm), Camposoto (D_{50} de 0.21 mm) y La Alcaidesa (D_{50} de 0.81 mm). Las playas se encuentran cerca del Estrecho de Gibraltar (*Figura 7*), estando La Alcaidesa situada en el lado de la costa del Mar Mediterráneo, mientras que Valdelagrana y Camposoto están localizadas en la costa del Golfo de Cádiz (Océano Atlántico). La costa oeste de Cádiz que da al Océano Atlántico es un area mesomareal, con un rango de marea sobre los 4 metros y olas que vienen del cuadrante O-SO (Laiz et al., 2013; López-García et al., 2019). Se espera más altura de ola significativa en el Golfo de Cádiz que en la costa del Mediterráneo, por tanto estos eventos más energéticos explican por qué las partículas son más finas.



Figura 7. Localización de las tres playas analizadas en este estudio. Las playas Valdelagrana y Camposoto están situadas en el Golfo de Cádiz (Océano Atlántico), mientras que la playa La Alcaidesa se encuentra en la costa del Mar Mediterráneo. Todas ellas se sitúan cerca del Estrecho de Gibraltar en España.

4.4 Metodología

4.4.1 Muestreo

Diez muestras de arena se recolectaron de la zona de bajamar para cada playa. La intención fue simular la arena húmeda que se extrae de la zona de préstamo y se muestrea en la cántara de una draga previo al vertido. Cada una de las muestras contiene una mezcla de arena y agua (ejemplo en *Figura 8*). El peso de cada muestra era de aproximadamente unos 800 gr. Después, cada muestra fue separada en 5 submuestras de unos 130 gr cada una (incluyendo un exceso de 150 gr para prevenir posibles pérdidas durante el estudio).



Figura 8. Bolsa de muestra con 800 gr de arena con un poco de exceso de agua. Para cada playa se recopilaron 10 bolsas de muestras como la de esta figura. Cada bolsa de muestra se dividió posteriormente en 5 submuestras: 130 gr para secar en mufla, 130 gr para secar a cada una de las potencias del microondas (700w, 595w, 462w, y 300w), y 150 gr extra por si ocurriese una posible pérdida.

4.4.2 Análisis granulométrico

El método común descrito por Syvitski (Syvitski, 1991) se usó para analizar el tamaño de la arena, con algunas pequeñas modificaciones por Roman-Sierra *et al.* (Román-Sierra *et al.*, 2013). A continuación, se indica un resumen de la metodología para el análisis de las muestras de arena.

Los pasos para obtener los parámetros de tamaño de arena consisten en el secado de la arena, su tamizado, y el cálculo de los parámetros. Antes de tamizar las muestras, la arena debe estar lo más seca posible de manera que se tamice apropiadamente a través de las mallas de los tamices. Si la arena no está suficientemente seca, parte de la muestra podría compactarse en pequeñas bolas en los tamices (*Figura 9*), lo cual impediría tamizar los granos correctamente. La razón principal de este estudio que se cita a principio de este capítulo es determinar una metodología de secado de microondas que sea precisa y que se pueda usar a bordo de una draga para propósitos de regeneración de playa. Los siguientes procedimientos de secado se llevaron a cabo para identificar el método que diese los resultados más efectivos con un microondas, teniendo en cuenta el secado en mufla como el método estándar y el más preciso con el cual comparar los resultados.



Figura 9. Ejemplo de un intento de tamizado de una muestra de arena que no está suficientemente seca. Las vibraciones de la máquina tamizadora crean esferas compactas con los granos de arena. También se puede apreciar visualmente cómo la humedad en la arena crea obstrucciones en los poros de la rejilla de cada tamiz.

4.4.2.1 Procedimiento de secado en mufla

Las muestras, que pesaban cada una 130 gr de arena húmeda, fueron secadas en la mufla durante 12 horas en el laboratorio (**Figura 10**). Este peso se eligió específicamente para facilitar la pasada de la muestra a través de las mallas, puesto que añadir más volumen de sedimento podría resultar en una acumulación y que no pasara la arena adecuadamente. Siguiendo a esto, cada muestra fue pesada con una balanza de laboratorio cuya sensibilidad es de 0.01 gr.



Figura 10. Mufla de laboratorio programada para secar a 110°C.

4.4.2.2 Procedimiento de secado en microondas

El criterio de selección del recipiente usado para poner la arena y secarla en el microondas es muy importante. El recipiente necesita tener bordes en los todos los laterales, pero no demasiado altos, y debe tener una base suficientemente ancha para esparcir la arena por ella (dependiendo del tamaño del plato del interior del microondas; por tanto, el recipiente debería ser lo más ancho posible, teniendo en cuenta que el plato necesita girar apropiadamente sin tropezar o pararse). El material del que está fabricado el recipiente debe ser plástico debido a su peso ligero y, obviamente, por seguridad del microondas. La precisión del peso utilizado es de 0.01 gr como se mencionó previamente, y el peso máximo que puede medir es de 230 gr. Por ello, es necesario que el recipiente para la arena sea ligero de peso. El proposito era obtener una muestra seca de unos 100 gr para tamizarla, como se ha mencionado previamente en la sección de secado en mufla. Para empezar, la cantidad de arena húmeda que necesita ser secada es calculada en función de la densidad y porosidad de la arena. Considerando que la arena estudiada está principalmente compuesta de cuarzo (densidad específica de $\gamma = 2.7 \text{ g/mL}$) (Muñoz-Pérez et al., 2000; Santos-Vendoiro et al., 2021) y la muestra tiene aproximadamente un 40% de porosidad, con los intersticios rellenos de agua de mar (densidad de $\gamma = 1.025 \text{ g/mL}$), una muestra de arena húmeda que pese 130 gr resultará matemáticamente en unos 100 gr de arena seca. Los resultados de estos cálculos se muestran como ejemplo en la **Figura 13** y

la **Figura 14**. Es crucial tener en cuenta el hecho de que el exceso de agua debe ser eliminado de la muestra antes de pesarla. El exceso de agua puede ser vertido volcando ligeramente el recipiente, o retirando el agua con una cuchara. Una vez que los 130 gr de arena húmeda han sido pesados, la arena se extiende por completo por el recipiente.

El presente estudio ensayó con todas las potencias de un microondas convencional que, en este caso, disponía de los niveles de potencias de 300 w, 462 w, 595 w, and 700 w (**Figura 11**). La intención fue encontrar la manera más rápida de secar la arena al 100% al mismo tiempo que no se perdiese parte de la muestra con la explosión de granos que puede ocurrir durante el procedimiento de secado dentro del microondas.



Figura 11. Microondas estándar con niveles de potencia de 700 w, 595w, 462w y 300w.

El procedimiento y la muestra deben ser descartados si la arena explota dentro del microondas durante el procedimiento de secado (ver ejemplo en la **Figura 12**). Esto puede ocurrir si las condiciones descritas anteriormente no se han seguido.



Figura 12. Vista del interior del microondas después de que una muestra de arena explotase durante el proceso de secado en microondas.

Por tanto, el tiempo de secado es específico para cada nivel de potencia. Mientras más alto la potencia aplicada, menos tiempo de secado hará falta, pero habrá una mayor posibilidad de que la muestra explote. El microondas fue pausado durante el secado cada 1~2 minutos para comprobar los siguiente indicadores del estado de la arena: control del peso (intentando alcanzar los 100 gr de peso de los 130 gr iniciales); ver si los granos de arena se adhieren a una cuchara de metal (si la arena no se queda pegada a la cuchara se asume que la arena está suficientemente seca); y una observación visual del color y la textura (ver ejemplo de los colores de la arena húmeda y seca de una misma muestra en la **Figura 13** y **Figura 14** respectivamente). Obviamente, una porción de la humedad de la arena calentada sale del microondas en forma de vapor cuando la puerta de esta se abre; por tanto, la muestra se seca más rápido si la puerta se abre repetidas veces. De la misma forma, algo de humedad se queda adherida a las paredes del microondas; por tanto, las

paredes se fueron secando con toallas de papel para facilitar el método de secado cada vez que se abrían las puertas para comprobar.

Una vez que estos pasos se han llevado a cabo, la muestra se volvía a meter dentro del microondas y se seguía el procedimiento de secado. Todos los pasos anteriores de comprobación fueron repetidos en tiempos apropiados para cada nivel de potencia, de manera que se logre secar la arena por completo y determinar entonces cuánto tiempo de secado se requiere para cada potencia.



Figura 13. Muestra de arena húmeda de 130 gr extendida por la base del recipiente.



Figura 14. La misma muestra de arena de la Figura 13 pero ya completamente seca, pesando finalmente 100 gr.

4.4.2.3 Tamizado

Ocho mallas de tamices en concreto fueron utilizados para el proceso de tamizado, ya que estos tamaños específicos son los que requieren normalmente la Administración de Costas de España: 2 mm, 1 mm, 710 μm , 500 μm , 355 μm , 250 μm , 125 μm , and 62.5 μm (*Figura 15*).

Después de que se logre que la muestra de arena pese aproximadamente 100 gr seca del todo, la muestra fue puesta en el primer tamiz desde arriba (el de malla de 2 mm) de la columna de tamices de 20 cm de diámetro (*Figura 15*). Entonces, la muestra seca fue tamizada mecánicamente durante 10 minutos (el tiempo necesario propuesto por Lopez-Garcia *et al.* (Lopez-Garcia et al., 2021). La arena acumulada en cada tamiz fue pesada para obtener los valores requeridos del D_{50} y del sorting (σ). Estos pasos fueron llevados a cabo para todos los casos de secado.



Figura 15. Máquina de tamizado con los 8 tamices, programada para tamizar durante 10 minutos y con una amplitud de vibración de 2 mm.

4.4.2.4 Cálculos para obtener los parámetros granulométricos

Las ecuaciones relevantes de Folk and Ward (Folk and Ward, 1957) fueron usadas para computar los parámetros granulométricos (*Tabla 1*), donde M_ϕ representa la media estimada del tamaño de grano y σ_ϕ es la desviación estándar estimada en unidades phi. Blott and Pye (Blott and Pye, 2001) crearon una guía extensa sobre este estudio.

La $[1]$ se puede aplicar para convertir de unidades phi (ϕ) a milímetros, o viceversa. Las ecuaciones fueron desarrolladas en escala de unidades phi.

El procedimiento de secado fue realizado diez veces por playa de manera que se identificasen posibles variaciones en los resultados. Aún así, los resultados siempre fueron los mismos. Un estudio previo (Román-Sierra et al., 2013) ya ha establecido que el secado de la mufla es el método preferido, cuando sea posible, para obtener resultados realistas y garantizar una homogeneidad en los resultados. Por tanto, el error relativo (ϵ), teniendo en cuenta el método de la mufla como referencia, fue calculado para los parámetros del D_{50} y el sorting siguiendo la $[6]$ y la $[7]$.

$$\epsilon_{D_{50}} = \left(\frac{D_{50} \text{ microondas} - D_{50} \text{ mufla}}{D_{50} \text{ mufla}} \right) \cdot 100 \quad [6]$$

$$\epsilon_{\text{sorting}} = \left(\frac{\text{sorting microondas} - \text{sorting mufla}}{\text{sorting mufla}} \right) \cdot 100 \quad [7]$$

4.5 Resultados y Discusión

Los resultados de los diferentes niveles de potencia del microondas, cada uno necesitando diferentes tiempos de secado, se muestran en la *Figura 16*. El recipiente utilizado para este estudio durante el proceso de pesado y secado de la muestra (y recomendado para análisis similares) fue un recipiente de plástico, de 5 cm de alto, con un área de 20×12 cm. Como se ha mencionado previamente, el procedimiento de

secado de las muestras húmedas para las playas de arenas finas comenzó con cantidades de 130 gr de peso (para Valdelagrana y Camposoto). En cuanto a La Alcaidesa, las muestras húmedas pesaban 120 gr inicialmente para obtener 100 gr de arena seca, porque la arena tenía granos más gruesos y, por tanto, un drenaje del agua intersticial más fácil que las otras dos playas. Como se representa en la **Figura 16**, el proceso de secado fue parado varias veces de manera que se iba comprobando cómo de seca estaba la muestra hasta que, finalmente, se podía determinar el tiempo mínimo requerido para obtener la muestra totalmente seca (aproximadamente 100 gr de muestra). Estas interrupciones fueron utilizadas para retirar la humedad de dentro del microondas y para remover y extender la arena por el recipiente nuevamente. Todas las muestras requirieron al menos 5 minutos para estar totalmente secas para todos los niveles de potencia por encima de los 462w. No se pudo conseguir secar la muestra con la potencia de 300w (incluso con intentos de 12 minutos de duración). Por tanto, la potencia de 300w se rechazó en el estudio directamente.

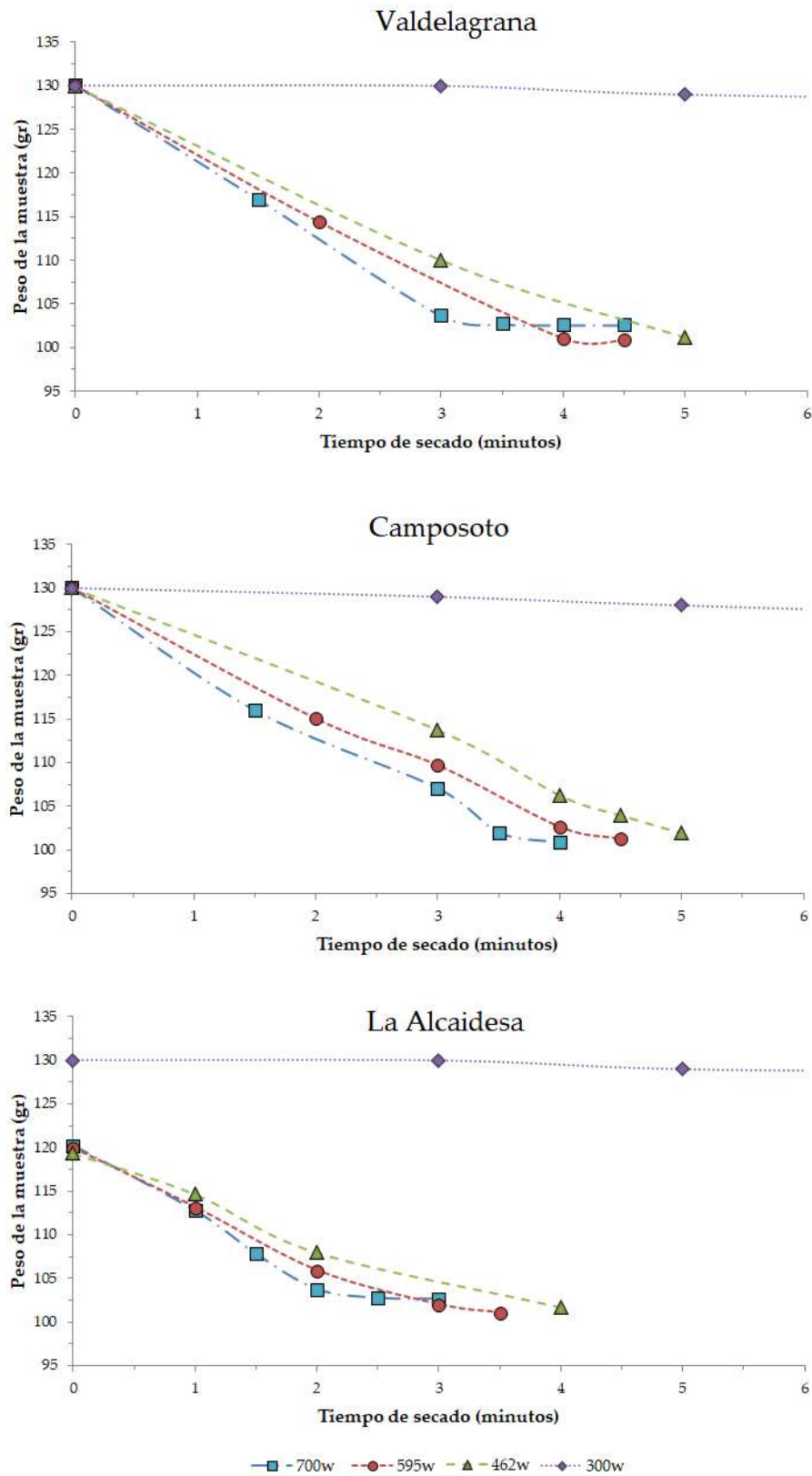


Figura 16. Resultados medios del peso de la muestra a diferentes potencias vs tiempo de secado, para las playas de Valdelagrana, Camposoto y La Alcaidesa.

La **Tabla 5**, la **Tabla 6** y la **Tabla 7** muestran la media de los resultados del D_{50} (mm) y sorting (σ) de las muestras que fueron obtenidos secando cinco muestras de arena: con la mufla y con los cuatro niveles de potencia diferentes. Además, el peso (en gramos) contenido en cada malla de tamiz de la columna de tamices y otros parámetros de la arena también fueron comparados (D_{95} , D_{84} , D_{75} , D_{25} , D_{16} , y D_5).

En consecuencia, también es posible observar cómo cada uno de los métodos difiere en cada parámetro, así como los errores (ϵ) que resultan de utilizar el secado con mufla como método de referencia debido a su probada precisión. Agregando a lo anterior, los resultados del D_{50} , σ y sus errores para cada playa se encuentran representados en la **Figura 17**.

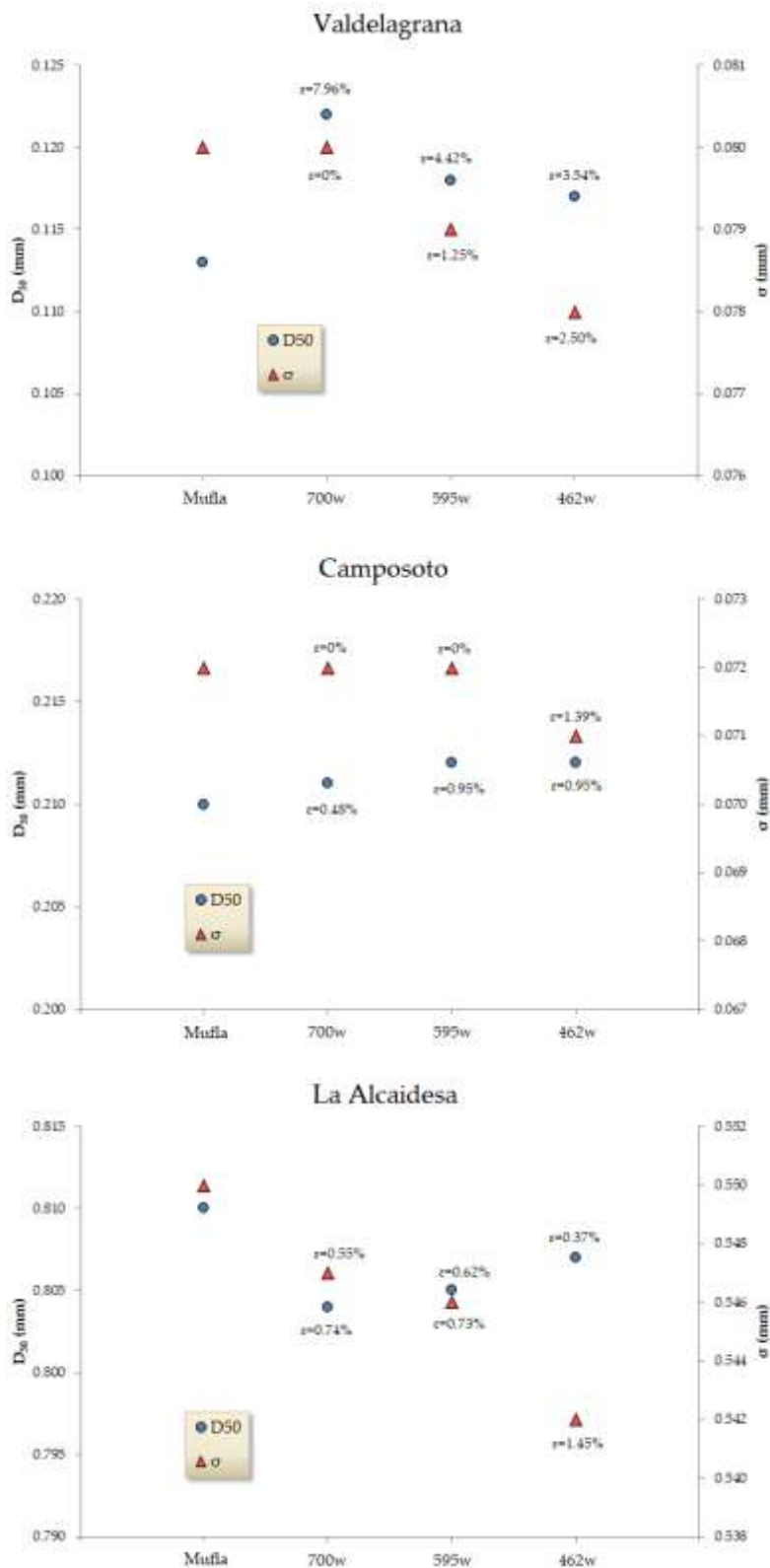


Figura 17. Parámetros D_{50} y sorting (σ), con el error (ϵ) para cada potencia de microondas, tomando como valor de referencia el resultado de la mufla (para las playas de Valdelagrana, Camposoto, y La Alcadesa).

4.5.1 Valdelagrana

Los siguientes resultados fueron obtenidos para la playa de Valdelagrana, con un D_{50} medio de 0.113 mm y un σ de 0.080 mm, de acuerdo con los análisis en la mufla. Cuando se utilizó el nivel de potencia de 700w, la arena húmeda requirió 4 minutos para llegar a estar completamente seca, y los resultados fueron de $D_{50} = 0.122$ mm y $\sigma = 0.080$ mm. La potencia de 595w necesitó 4 minutos y 30 segundos de tiempo de secado, y los resultados fueron $D_{50} = 0.118$ mm y $\sigma = 0.079$ mm. La potencia de 462w precisó de 5 minutos de tiempo de secado y los resultados fueron de $D_{50} = 0.117$ mm y $\sigma = 0.078$ mm.

Como comprobación de lo mencionado en la introducción de este capítulo, hubo un intento de secar la muestra con el nivel de potencia más bajo que tenía el microondas, 300w. Y efectivamente, durante el proceso de comprobación de la arena durante el procedimiento de secado, se determinó que la arena estaba todavía muy húmeda (comprobado a los 12 minutos de secado). Por tanto, la potencia de 300w fue directamente descartada como procedimiento de secado dada la imposibilidad de tamizar arena húmeda.

Tabla 5. Resultados medios de los diferentes análisis (fueron 10 tests por cada potencia del microondas) para las muestras de la playa de Valdelagrana: (a) el peso (gr) para cada malla y su porcentaje correspondiente (%) de toda la muestra, y (b) los parámetros D_{50} , σ , D_{95} , D_{84} , D_{75} , D_{25} , D_{16} , y D_5 . El error (ϵ) para los resultados de cada potencia representados tomando como referencia los resultados de la mufla.

(a) Playa de Valdelagrana												
Tamaño malla	Mufla		700 w (4 min)			595 w (4:30 min)			462 w (5 min)			Valor Medio
(mm)	g	%	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	%
2	0.60	0.60	0.09	0.09	85.0	0.11	0.11	81.7	0.12	0.12	80.0	0.23
1	0.23	0.23	0.14	0.14	39.1	0.16	0.16	30.4	0.23	0.23	0.00	0.19
0.710	0.21	0.21	0.10	0.10	52.4	0.13	0.13	38.1	0.20	0.20	4.8	0.16
0.500	0.67	0.67	0.58	0.57	13.4	0.51	0.51	23.9	0.57	0.56	15.0	0.58
0.355	3.12	3.12	3.73	3.63	19.6	3.22	3.20	3.2	3.04	3.01	2.6	3.28
0.250	4.95	4.95	7.06	6.88	42.6	5.95	5.91	20.2	5.52	5.46	11.5	5.87
0.125	28.86	28.84	36.75	35.81	27.3	34.04	33.83	18.0	33.74	33.35	17.0	33.35
0.063	59.24	59.20	52.11	50.77	12.0	54.32	53.99	8.3	55.56	54.92	6.2	55.31
<0.062	2.18	2.18	2.07	2.02	5.1	2.18	2.17	0.0	2.18	2.16	0.0	2.15
Total	100.06		102.63			100.62			101.16			101.12

(b) Playa de Valdelagrana									
Parámetros	Mufla	700 w (4 min)		595 w (4:30 min)		462 w (5 min)		Valor Medio	
(mm)	mm	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm	mm
D_{50}	0.113	0.122	7.96	0.118	4.42	0.117	3.54	0.118	
σ	0.080	0.080	0.00	0.079	1.25	0.078	2.50	0.079	
D_{95}	0.351	0.343	2.28	0.339	3.42	0.338	3.70	0.343	
D_{84}	0.223	0.233	4.48	0.228	2.24	0.226	1.35	0.228	
D_{75}	0.184	0.202	9.78	0.195	5.98	0.192	4.35	0.193	
D_{50}	0.113	0.122	7.96	0.118	4.42	0.117	3.54	0.118	
D_{25}	0.087	0.091	4.60	0.089	2.30	0.089	2.30	0.089	
D_{16}	0.077	0.08	3.90	0.079	2.60	0.079	2.60	0.079	
D_5	0.066	0.067	1.52	0.066	0.00	0.066	0.00	0.066	

4.5.2 Camposoto

Los siguientes resultados fueron obtenidos para la playa de Camposoto, con un D_{50} medio de 0.210 mm y un σ de 0.072 mm, de acuerdo con los análisis en la mufla. Cuando se utilizó el nivel de potencia de 700w, la arena húmeda necesitó 4 minutos para llegar a estar completamente seca, y los resultados fueron de $D_{50} = 0.211$ mm y $\sigma = 0.072$ mm. La potencia de 595w precisó de 4 minutos y 30 segundos de tiempo de secado, y los resultados fueron $D_{50} = 0.212$ mm y $\sigma = 0.072$ mm. La potencia de 462w requirió 5 minutos de tiempo de secado y los resultados fueron de $D_{50} = 0.212$ mm y $\sigma = 0.071$ mm.

Tabla 6. Resultados medios de los diferentes análisis (fueron 10 tests por cada potencia del microondas) para las muestras de la playa de Camposoto: (a) el peso (gr) para cada malla y su porcentaje correspondiente (%) de toda la muestra, y (b) los parámetros D_{50} , σ , D_{95} , D_{84} , D_{75} , D_{25} , D_{16} , y D_5 . El error (ϵ) para los resultados de cada potencia representados tomando como referencia los resultados de la mufla.

(a) Playa de Camposoto

Tamaño malla (mm)	Mufla		700 w (4 min)			595 w (4:30 min)			462 w (5 min)			Valor Medio
	g	%	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	%
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.710	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.500	0.20	0.20	0.23	0.23	14.14	0.22	0.22	8.68	0.20	0.20	1.96	0.21
0.355	2.61	2.61	2.66	2.64	1.16	2.70	2.67	2.21	2.68	2.63	0.67	2.64
0.250	25.80	25.81	26.02	25.84	0.10	26.88	26.57	2.94	27.13	26.61	3.09	26.21
0.125	67.24	67.27	68.32	67.84	0.85	68.13	67.34	0.11	69.12	67.79	0.78	67.56
0.063	4.08	4.08	3.47	3.45	15.58	3.23	3.19	21.78	2.82	2.77	32.24	3.37
<0.062	0.03	0.03	0.01	0.01	66.91	0.01	0.01	67.07	0.01	0.01	67.32	0.01
Total	99.96		100.71			101.17			101.96			

(b) Playa de Camposoto

Parámetros (mm)	Mufla	700 w (4 min)		595 w (4:30 min)		462 w (5 min)		Valor Medio
	mm	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm
D_{50}	0.210	0.211	0.48	0.212	0.95	0.212	0.95	0.211
σ	0.072	0.072	0.00	0.072	0.00	0.071	1.39	0.072
D_{95}	0.346	0.346	0.00	0.347	0.29	0.346	0.00	0.346
D_{84}	0.301	0.302	0.33	0.303	0.66	0.303	0.66	0.302
D_{75}	0.265	0.265	0.00	0.268	1.13	0.267	0.75	0.266
D_{50}	0.210	0.211	0.48	0.212	0.95	0.212	0.95	0.211
D_{25}	0.164	0.165	0.61	0.165	0.61	0.166	1.22	0.165
D_{16}	0.147	0.148	0.68	0.149	1.36	0.149	1.36	0.148
D_5	0.127	0.128	0.79	0.128	0.79	0.129	1.57	0.128

4.5.3 La Alcaidesa

Los siguientes resultados fueron obtenidos para la playa de La Alcaidesa, con un D_{50} medio de 0.810 mm y un σ de 0.550 mm, de acuerdo con los análisis en la mufla. Cuando se utilizó el nivel de potencia de 700w, la arena húmeda requirió 3 minutos para llegar a estar completamente seca, y los resultados fueron de $D_{50} = 0.804$ mm y $\sigma = 0.547$ mm. La potencia de 595w precisó de 3 minutos y 30 segundos de tiempo de secado, y los resultados fueron $D_{50} = 0.805$ mm y $\sigma = 0.546$ mm. La potencia de 462w necesitó 4 minutos de tiempo de secado y los resultados fueron de $D_{50} = 0.807$ mm y $\sigma = 0.542$ mm.

Tabla 7. Resultados medios de los diferentes análisis (fueron 10 tests por cada potencia del microondas) para las muestras de la playa de Valdelagrana: (a) el peso (gr) para cada malla y su porcentaje correspondiente (%) de toda la muestra, y (b) los parámetros D_{50} , σ , D_{95} , D_{84} , D_{75} , D_{25} , D_{16} , y D_5 . El error (ϵ) para los resultados de cada potencia representados tomando como referencia los resultados de la mufla.

(a) Playa de La Alcaidesa												
Tamaño malla (mm)	Mufla		700 w (3 min)			595 w (3:30 min)			462 w (4 min)			Valor Medio
	g	%	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	%
2	3.90	3.89	3.96	3.85	1.54	3.98	3.94	2.05	3.55	3.50	8.97	3.80
1	30.78	30.68	30.88	30.06	0.32	30.69	30.41	0.29	31.05	30.63	0.88	30.44
0.710	23.65	23.58	24.51	23.86	3.64	23.48	23.26	0.72	24.16	23.83	2.16	23.63
0.500	18.74	18.68	19.64	19.12	4.80	20.52	20.33	9.50	19.83	19.56	5.82	19.42
0.355	13.31	13.27	13.77	13.40	3.46	13.20	13.08	0.83	13.42	13.24	0.83	13.25
0.250	7.44	7.42	7.69	7.48	3.36	7.05	6.99	5.24	7.28	7.18	2.15	7.27
0.125	2.42	2.41	2.29	2.23	5.37	2.01	1.99	16.94	2.08	2.05	14.05	2.17
0.063	0.07	0.07	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	100.0	0.02
<0.062	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.31		102.74			100.93			101.37			

(b) Playa de La Alcaidesa									
Parámetros (mm)	Mufla	700 w (3 min)		595 w (3:30 min)		462 w (4 min)		Valor Medio	
	mm	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm	mm
D_{50}	0.810	0.804	0.74	0.805	0.62	0.807	0.37	0.81	0.81
σ	0.550	0.547	0.55	0.546	0.73	0.542	1.45	0.55	0.55
D_{95}	1.964	1.962	0.10	1.965	0.05	1.951	0.66	1.96	1.96
D_{84}	1.605	1.596	0.56	1.603	0.12	1.592	0.81	1.60	1.60
D_{75}	1.312	1.296	1.22	1.308	0.30	1.298	1.07	1.30	1.30
D_{50}	0.81	0.804	0.74	0.805	0.62	0.807	0.37	0.81	0.81
D_{25}	0.521	0.521	0.00	0.53	1.73	0.527	1.15	0.52	0.52
D_{16}	0.422	0.423	0.24	0.433	2.61	0.429	1.66	0.43	0.43
D_5	0.286	0.289	1.05	0.295	3.15	0.293	2.45	0.29	0.29

4.5.4 Discusión general

Las líneas horizontales en la *Figura 16* indican que el peso de la muestra permanece constante, es decir, está completamente seca (a excepción del secado con 300w). La duración del tiempo de secado no cambia entre las muestras de arena de Valdelagrana y Camposoto, que están en torno a los 4 y 5 minutos para estas playas situadas en el Golfo de Cádiz, con un D_{50} de 0.11 y 0.21 mm, respectivamente. Sin embargo, la duración del secado para las muestras de arena de La Alcaidesa (D_{50} sobre 0.81 mm) fue de 1 minuto menos para cada potencia del microondas (entre los 3 y 4 minutos). Por tanto, se puede deducir que para granos más gruesos (con mayor facilidad de drenaje del agua intersticial) requiere menos tiempo de secado que arenas más finas. De igual manera, el error fue 10 veces mayor para los tamaños de arena menores (un 3.5% para $D_{50} = 0.11$ mm versus un 0.37% para $D_{50} = 0.81$ mm).

También se puede observar que el error se va reduciendo con la duración del secado. Por ejemplo, en el caso de la playa de Valdelagrana, el error al determinar el D_{50} disminuye del 8% al 3.5% cuando se extiende el experimento de 4 a 5 minutos. En cuanto al sorting, las diferencias han sido insignificantes.

Por último, se puede establecer que los resultados obtenidos utilizando el microondas siempre muestran diferencias ligeramente mayores, aunque no significativas, comparados con el secado con el horno mufla. Por tanto, el uso de microondas podría estar permitido a bordo de dragas siempre y cuando se cumpla lo siguiente:

- Usar un recipiente ligero de peso con una base ancha y altura baja.
- La arena se extienda uniformemente por el recipiente.
- Retirar el exceso de agua no intersticial.
- Usar una potencia mayor de 500w pero menor de 800w.
- Interrumpir en mitad del secado para permitir que la humedad generada salga, secar las paredes del microondas con papel absorbente, y remover y extender la arena por el recipiente de nuevo.

La duración del secado debe ser de al menos 5 minutos.



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA



5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

La dinámica costera y los procesos geomorfológicos del litoral se estudian a través de numerosos análisis que incluyen, entre otros, la medida de los principales parámetros de tamaño de arena: el tamaño medio de grano (D_{50}) y el sorting (σ). Además, la precisión en los resultados de estos parámetros del tamaño de la arena es fundamental para determinar la compatibilidad de la arena de préstamo dragada en el banco de arena con la arena de la playa nativa, y así llevar a cabo una regeneración de playa con éxito. Cuando se realiza la regeneración de playa, debe haber un control de la arena a bordo de la draga, justo después de extraer la arena y antes del vertido en playa. Este análisis de comprobación debe llevarse a cabo en un periodo de tiempo limitado, que es la duración del viaje desde la zona de préstamo hasta el lugar del vertido, que suele ser menos de 1 hora. Entonces es cuando surgen los inconvenientes, porque los análisis deben realizarse a bordo de una draga. Debido al limitado espacio de trabajo entre otras dificultades, el método de tamizado para obtener los resultados normalmente trata del agitado manual de tamices pequeños (10 cm de diámetro). Del mismo modo, como un horno mufla no puede ser usado a bordo de un barco debido a sus dimensiones y peso, y la inestabilidad de la tensión eléctrica, se usa normalmente un microondas en su lugar.

En consecuencia, hasta ahora, no se habían determinado los errores ni se habían buscado soluciones para determinar los parámetros granulométricos de esta forma: usando tamices de pequeño diámetro agitando manualmente y secando la arena con microondas.

5.1 Sobre “Errores en la estimación de los parámetros granulométricos cuando se usan tamices de diámetro pequeño y su solución”.

Por esta razón, 20 muestras de arena fueron tomadas a bordo de un buque dragador durante las operaciones de dragado para una regeneración de playa en el Golfo de Cádiz (al suroeste de España), y fueron tamizadas usando dos métodos diferentes: agitado mecánico versus agitado manual.

Este estudio fue llevado a cabo para ayudar a determinar qué error se cometía si el tamizado manual se elegía en lugar del mecánico, y si el error es asumible para los

trabajos de regeneración de playa. Los resultados mostraron valores bajos del D_{50} para el agitado mecánico comparado con los valores manualmente obtenidos. El error medio del D_{50} que se encontró para este caso en particular fue del 14%, con un máximo de un 36.5% de error en la estimación de este parámetro. Las diferencias del D_{50} variaban entre 0 y 0.08 mm, con una media de 0.038 mm. Las curvas granulométricas representativas muestran que las mayores diferencias fueron encontradas en los tamices con mallas de 355 μm y 250 μm . Este es el problema para este caso, porque la arena de préstamo también tenía un D_{50} de 0.25 mm. Además, aunque el parámetro del sorting no parecía mostrar diferencias notables entre los métodos, los resultados del sorting tamizando mecánicamente siempre eran más altos, implicando una homogeneidad mayor en la repartición de la arena alrededor de la media en lugar de una acumulación en ciertos tamaños en particular, como pasó con el tamizado manual.

Por consiguiente, a pesar de que los resultados del tamizado mecánico son la referencia dada su mayor precisión obtenidos con solo 10 minutos de tamizado, el agitado manual se mantendrá como el proceso de tamizado a bordo de buques dragadores y, por tanto, la recomendación para realizar el tamizado es agitar manualmente por al menos 20 minutos.

Agregando a lo anterior, el factor de sobrellenado (R_A) fue calculado para ambos métodos de tamizado, el manual y el mecánico. El R_A alcanzó diferencias de hasta un 5% en volumen para las muestras 17, 19 y 20, y un 48% para la muestra 16. De acuerdo con esto, si el método manual de tamizado fuese realizado para propósitos de regeneración de playa cuando el volumen necesitado de arena de préstamo fuese obtenido y vertido en playa, una pérdida inesperada de arena podría haber ocurrido.

Finalmente, las conclusiones que se han resaltado aquí son específicas para este tipo de arena. Sin embargo, esta metodología podría ser aplicada para las playas de todo el mundo para determinar las diferencias entre los resultados del tamizado mecánico y el manual.

5.2 Sobre “Método de secado de arena con microondas antes de tamizar para obtener parámetros granulométricos de arena precisos”.

El tiempo y potencia necesarios para el procedimiento de secado con microondas todavía no se había determinado. Además, para evitar la explosión dentro del microondas y obtener los parámetros granulométricos lo más precisos posible, aún no se había especificado el procedimiento.

Por tanto, una serie de tests fueron llevados a cabo consistiendo en múltiples análisis con muestras de arena de playas diferentes (y en consecuencia con diferentes tamaños de grano) y secándolas con un microondas con varios niveles de potencia y tiempos. Estos resultados del microondas fueron comparados con los resultados de secado con mufla de las mismas muestras, considerando la metodología de secado con mufla como la referencia para obtener los errores del procedimiento con microondas.

Los errores de los resultados para el D_{50} fueron menores del 3.5% cuando la duración del secado era de al menos 5 minutos, lo que es completamente aceptable para propósitos de regeneración de playa. En cuanto al nivel de potencia, 462 w es la potencia ideal mientras que, con potencias más bajas, sobre los 300 w, las muestras no alcanzaron a secarse por completo incluso tras casi 15 minutos de duración del secado. En lo que respecta al error del parámetro del sorting, fue absolutamente insignificante. Por último, la duración del secado y el error fueron menores para las playas con arenas más gruesas.

Por tanto, una metodología fácil y accesible, generalizable para cualquier otra costa, ha sido diseñada para un secado rápido y preciso.

De entre las pautas que se han dado, merece la pena señalar la importancia del uso de un recipiente ligero de peso y ancho pero con altura baja, interrumpir el secado para extraer humedad y remover la muestra, y que la duración del secado sea de mínimo 5 minutos.

5.3 Futuras líneas de actuación.

Cabe destacar la posible influencia del porcentaje de conchas en la obtención de los parámetros granulométricos. Por tanto, un próximo estudio más a fondo debería solventar esta cuestión, por ejemplo, estudiando diferentes valores de porcentajes de conchas y su posible influencia en los parámetros de tamaño de arena.

Como se ha podido ver a lo largo de este estudio, la variación en la estimación del D_{50} podría estar unida a una función que lo relacione con el tiempo. A pesar de que los resultados mostraron variaciones de los errores bastante significantes, no ha sido posible obtener una función de transferencia directa. Por consiguiente, sería conveniente desarrollar una función de transferencia o de corrección para mejorar los resultados manuales, y así reducir los errores.

Finalmente, para lograr la precisión absoluta, debería estudiarse un conjunto de los dos temas tratados en esta tesis, que sería la obtención de los parámetros granulométricos secando la arena con el microondas y posteriormente tamizarla agitando a mano con tamices pequeños, y así simular por completo los trabajos realizados a bordo de la draga.



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera-Vidal, M., Muñoz-Perez, J.J., Contreras, A., Contreras, F., Lopez-Garcia, P., Jigena, B., 2022. Increase in the Erosion Rate Due to the Impact of Climate Change on Sea Level Rise: Victoria Beach, a Case Study. *J. Mar. Sci. Eng.* 10. <https://doi.org/10.3390/jmse10121912>
- Armstrong, S.B., Lazarus, E.D., Limber, P.W., Goldstein, E.B., Thorpe, C., Ballinger, R.C., 2016. Indications of a positive feedback between coastal development and beach nourishment. *Earth's Futur.* 4, 626–635. <https://doi.org/10.1002/2016EF000425>
- Arulanandan, K., 1991. Dielectric method for prediction of porosity of saturated soil. *J. Geotech. Eng.* 117. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:2\(319\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:2(319))
- Austin, L.G., Shah, I., 1983. A method for inter-conversion of microtrac and sieve size distributions. *Powder Technol.* 35, 271–278. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(83\)87018-1](https://doi.org/10.1016/0032-5910(83)87018-1)
- Bascom, W.N., 1951. The relationship between sand size and beach-face slope. *Trans. Am. Geophys. Union* 32, 866. <https://doi.org/10.1029/TR032i006p00866>
- Bernabeu Tello, A.M., Santamaría, R.M., Pascual, C.V., 2002. An equilibrium profile model for tidal environments. *Sci. Mar.* 66, 325–335. <https://doi.org/10.3989/scimar.2002.66n4325>
- Bloom, M., Russell, M., Kustau, A., Mandayam, S., Sukumaran, B., 2010. Measurement of porosity in granular particle distributions using adaptive thresholding. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 59, 1192–1199. <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2040902>
- Blott, S.J., Pye, K., 2006. Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: An experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. *Sedimentology* 53, 671–685. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00786.x>
- Blott, S.J., Pye, K., 2001. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the

- analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Breslau, L.R., 1967. The normally-incident reflectivity of the sea floor at 12 kc and its correlation with physical and geological properties of naturally-occurring sediments, in: *Technical Report Reference*. Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts. <https://doi.org/https://doi.org/10.1575/1912/25248>
- Briggs, K., 1994. High-frequency Acoustic scattering from sediment interface roughness and volume inhomogeneities. *Diss. Univ. Miami, Coral Gables, Florida*.
- Briggs, K.B., Reed, A.H., Jackson, D.R., Tang, D., 2010. Fine-scale volume heterogeneity in a mixed sand/mud sediment off Fort Walton Beach, FL. *IEEE J. Ocean. Eng.* 35, 471–487. <https://doi.org/10.1109/JOE.2010.2041834>
- Celia Magno, M., Venti, F., Bergamin, L., Pierfranceschi, G., Romano, E., Gaglianone, G., 2018. A comparison between Laser Granulometer and Sedigraph in grain size analysis of marine sediments. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 128, 231–236. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.055>
- Choi, J.-Y., Park, J.-Y., Choi, J.-H., Lee, J.-M., 2016. Effects of Beach Nourishment and the Influence of Irrigation Water Discharge on Byunsan Beach, West Coast, Korea. *Irrig. Drain.* 65, 239–245. <https://doi.org/10.1002/ird.2048>
- Curry, C., Bennett, R., Hulbert, M., Curry, K., Faas, R., 2004. Comparative study of sand porosity and a technique for determining porosity of undisturbed marine sediment. *Mar. Georesources Geotechnol.* 22, 231–252. <https://doi.org/10.1080/10641190490900844>
- de Villar, A.C., Gómez-Pina, G., Muñoz-Pérez, J.J., Contreras, F., López-García, P., Ruiz-Ortiz, V., 2019. New design parameters for bipolar beach profiles (SW Cadiz, Spain). *Rev. la Constr.* 18, 432–444. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.3.432>
- Eberhard, L., Schindler, H.J., Hellmann, D., Schmitter, M., Rammelsberg, P., Giannakopoulos, N.N., 2012. Comparison of particle-size distributions determined by optical scanning and by sieving in the assessment of masticatory performance. *J.*

- Oral Rehabil. 39, 338–348. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2011.02275.x>
- Erchul, R.A., Nacci, V.A., 1972. Electrical resistivity measuring system for porosity determination of marine sediments. *Mar. Technol. Soc. J.* 6, 47–53.
- Faas, R.W., 2001. Report on research concerning sediment porosity. Univ. South. Mississippi, Stennis Sp. Center, MS 39529.
- Fenster, M.S., Dolan, R., Smith, J.J., 2016. Grain-size distributions and coastal morphodynamics along the southern Maryland and Virginia barrier islands. *Sedimentology* 63, 809–823. <https://doi.org/10.1111/sed.12239>
- Folk, R.L., 1974. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill Publishing Company, Austin, Texas.
- Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Res.* 27, 3–26. <https://doi.org/10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Friedman, G.M., Johnson, K.G., 1982. Exercises in Sedimentology. Wiley, New York.
- Gaither, A., 1953. A study of porosity and grain relationships in experimental sands. *J. Sediment. Res.* 23, 180–195. <https://doi.org/10.1306/D4269602-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Graton, L.C., Fraser, H.J., 1935. Systematic Packing of Spheres: With Particular Relation to Porosity and Permeability. *J. Geol.* 43, 785–909.
- Grosskopf, W.G., Kraus, N.C., 1993. Guidelines for surveying beach nourishment projects., CETN II-31. U.S. Army Engineering Water Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA.
- Grottoli, E., Bertoni, D., Ciavola, P., 2017. Short- and medium-term response to storms on three Mediterranean coarse-grained beaches. *Geomorphology* 295, 738–748. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.007>
- Hallin, C., Huisman, B.J.A., Larson, M., Walstra, D.J.R., Hanson, H., 2019. Impact of sediment supply on decadal-scale dune evolution — Analysis and modelling of the

- Kennemer dunes in the Netherlands. *Geomorphology* 337, 94–110.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.003>
- Hamilton, E.L., Bachman, R.T., 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.* 72, 1891–1904. <https://doi.org/10.1121/1.388539>
- Hamilton, E.L., Menard, H.W., 1956. Density and porosity of sea-floor surface sediments off San Diego, California. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 40, 754–761.
- Jackson, P.D., 1975. An electrical resistivity method for evaluating the insitu porosity of clean marine sands. *Mar. Geotechnol.* 1, 91–115.
- Jackson, P.D., Smith, D.T., Stanford, P.N., 1978. Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands. *Geophysics* 43, 1250–1268.
<https://doi.org/10.1190/1.1440891>
- James, W.R., 1975. Techniques in evaluating suitability of borrow material for beach nourishment, Technical Memorandum No. 60. Coastal Engineering Research Center (U.S.).
- Kakinoki, T., Tsujimoto, G., Yamada, F., Sakai, D., Uno, K., 2011. Beach profile and sediment characteristics of a mixed sand beach under diurnal sea level variations. *J. Coast. Res.* 765–770.
- Karambas, T. V., Samaras, A.G., 2014. Soft shore protection methods: The use of advanced numerical models in the evaluation of beach nourishment. *Ocean Eng.* 92, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.09.043>
- King, F.H., 1899. Principles and Conditions of the Movements of Ground Water, United States. Geological survey, 19th annual report, 1897-1898. publisher unknown.
- Kolbuszewski, J.J., 1948. An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands., in: Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam, pp. 158–165.
- Konert, M., Vandenberghe, J., 1997. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: A solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1997.d01-38.x>

- Krumbein, W., Pettijohn, F., 1938. Manual of sedimentary petrography.
- Kuang, C., Han, X., Zhang, J., Zou, Q., Dong, B., 2021. Morphodynamic Evolution of a Nourished Beach with Artificial Sandbars: Field Observations and Numerical Modeling. *J. Mar. Sci. Eng.* 9. <https://doi.org/10.3390/jmse9030245>
- Laiz, I., Gómez-Enri, J., Tejedor, B., Aboitiz, A., Villares, P., 2013. Seasonal sea level variations in the gulf of Cadiz continental shelf from in-situ measurements and satellite altimetry. *Cont. Shelf Res.* 53, 77–88.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.12.008>
- Larson, M., Kraus, N.C., 1991. Mathematical modeling of the fate of beach fill. *Coast. Eng.* 16, 83–114. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(91\)90054-K](https://doi.org/10.1016/0378-3839(91)90054-K)
- Li, Y., Zhang, C., Cai, Y., Xie, M., Qi, H., Wang, Y., 2021. Wave Dissipation and Sediment Transport Patterns during Shoreface Nourishment towards Equilibrium. *J. Mar. Sci. Eng.* 9. <https://doi.org/10.3390/jmse9050535>
- López-García, P., Gómez-Enri, J., Muñoz-Pérez, J.J., 2019. Accuracy assessment of wave data from altimeter near the coast. *Ocean Eng.* 178, 229–232.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.009>
- Lopez-Garcia, P., Muñoz-Perez, J.J., Contreras, A., Vidal, J., Jigena, B., Santos, J.J., Romero, J., Contreras, F., 2021. Error on the Estimation of Sand Size Parameters When Using Small Diameter Sieves and a Solution. *Front. Mar. Sci.* 8.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.738479>
- Luisa Martinez, M., Silva, R., Lithgow, D., Mendoza, E., Flores, P., Martínez, R., Cruz, C., 2017. Human Impact on Coastal Resilience along the Coast of Veracruz, Mexico. *J. Coast. Res.* SI 77, 143–153. <https://doi.org/10.2112/SI77-015.1>
- Lund-Hansen, L.C., Oehmig, R., 1992. Comparing sieve and sedimentation balance analysis of beach, lake and eolian sediments using log-hyperbolic parameters. *Mar. Geol.* 107. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(92\)90072-P](https://doi.org/10.1016/0025-3227(92)90072-P)
- Mendes, D., Pais-Barbosa, J., Baptista, P., Silva, P.A., Bernardes, C., Pinto, C., 2021. Beach Response to a Shoreface Nourishment (Aveiro, Portugal). *J. Mar. Sci. Eng.* 9.

<https://doi.org/10.3390/jmse9101112>

- Mizutani, S., 1963. A theoretical and experimental consideration of accuracy of sieving analysis. *J. Earth Sci.* 11, 1–27.
- Moreno, L., Negro, V., Garrote, L., Muñoz-Pérez, J.J., López, J.S., Esteban, M.D., 2018. An Engineering Method For The Preliminary Functional Design Of Perched Beaches. Theoretical Approach. *J. Coast. Res.* 1261–1265.
<https://doi.org/10.2112/SI85-253.1>
- Muñoz-Perez, J.J., Gomez-Pina, G., Enriquez, J., 2009. Comments on “An approximation to short-term evolution and sediment transport pathways along the littoral of Cadiz Bay (SW Spain)” by Anfuso and et al. (*Environ Geol* 56:69-79). *Environ. Earth Sci.* 59, 477–479. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0031-7>
- Muñoz-Pérez, J.J., Gutierrez-Mas, J.M., Naranjo, J.M., Torres, E., Fages, L., 2000. Position and monitoring of anti-trawling reefs in the Cape of Trafalgar (Gulf of Cadiz, SW Spain). *Bull. Mar. Sci.* 67, 761–772.
- Muñoz-Perez, J.J., Medina, R., 2010. Comparison of long-, medium- and short-term variations of beach profiles with and without submerged geological control. *Coast. Eng.* 57, 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.09.011>
- Muñoz-Perez, J.J., Payo, A., Roman-Sierra, J., Navarro, M., Moreno, L., 2012. Optimization of beach profile spacing: An applicable tool for coastal monitoring. *Sci. Mar.* 76, 791–798. <https://doi.org/10.3989/SCIMAR.03417.15A>
- Negro Valdecantos, V., Diez Gonzalez, J.J., Bricio Garberí, L., López Gutiérrez, J.S., 2009. Coastal erosion. Geometric detached breakwaters indicators for preventing the shoreline erosion. Fringe session, in: *Proceedings of the Coasts, Marine Structures and Breakwaters*. ICE, Institution of Civil Engineers, Edinburgh.
- Negro Valdecantos, V., Quecedo Gutierrez, M., 1988. Barcelona’s Littoral Regeneration Looking Forward to the Olympic Games. Numerical Model, in: *Coastal Engineering*. pp. 1437–1451. <https://doi.org/10.1061/9780872626874.108>
- Orrú, C., Chavarrías, V., Uijtewaal, W.S.J., Blom, A., 2013. Image analysis for

- measuring stratigraphy in sand-gravel laboratory experiments. *Earth Surf. Dyn. Discuss.* 1, 973–1018. <https://doi.org/10.5194/esurfd-1-973-2013>
- Pendleton, L., Mohn, C., Vaughn, R.K., King, P., Zoulas, J.G., 2012. Size matters: The economic value of beach erosion and nourishment in southern california. *Contemp. Econ. Policy* 30, 223–237. <https://doi.org/10.1111/j.1465-7287.2011.00257.x>
- Poizot, E., Anfuso, G., Méar, Y., Bellido, C., 2013. Confirmation of beach accretion by grain-size trend analysis: Camposoto beach, Cádiz, SW Spain. *Geo-Marine Lett.* 33. <https://doi.org/10.1007/s00367-013-0325-3>
- Pope, L., Ward, C., 1998. Manual on Test Sieving Methods, in: Science & Mathematics. ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- Poulet, P., Muñoz-Perez, J.J., Lopez, P., García-Lopez, S., Martell, R., Silva, R., Moreno, L., 2019a. Sand size variability inside the hopper of a trailing suction dredger for beach nourishment purposes. *Geo-Marine Lett.* 39, 513–520. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00615-w>
- Poulet, P., Muñoz-Perez, J.J., Poortvliet, G., Mera, J., Contreras, A., Lopez, P., 2019b. Influence of different sieving methods on estimation of sand size parameters. *Water (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/w11050879>
- Pranzini, E., Anfuso, G., Muñoz-Perez, J.J., 2018. A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coast. Eng.* 139, 32–35. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.05.001>
- Reed, A.H., Thompson, K.E., Briggs, K.B., Willson, C.S., 2010. Physical pore properties and grain interactions of SAX04 sands. *IEEE J. Ocean. Eng.* 35, 488–501. <https://doi.org/10.1109/JOE.2010.2040656>
- Remo, J.W.F., Heine, R.A., Ickes, B.S., 2016. Particle size distribution of main-channel-bed sediments along the upper Mississippi River, USA. *Geomorphology* 264, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.012>
- Romagnoli, C., Sistilli, F., Cantelli, L., Aguzzi, M., De Nigris, N., Morelli, M., Gaeta, M.G., Archetti, R., 2021. Beach Monitoring and Morphological Response in the

- Presence of Coastal Defense Strategies at Riccione (Italy). *J. Mar. Sci. Eng.* 9.
<https://doi.org/10.3390/jmse9080851>
- Román-Sierra, J., Muñoz-perez, J.J., Navarro-Pons, M., 2013. Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands. *Sedimentology* 60, 1484–1497. <https://doi.org/10.1111/sed.12040>
- Román-Sierra, J., Muñoz-Perez, J.J., Navarro-Pons, M., 2014. Beach nourishment effects on sand porosity variability. *Coast. Eng.* 83, 221–232.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.009>
- Roman-Sierra, J., Navarro, M., Muñoz-Perez, J.J., Gomez-Pina, G., 2011. Turbidity and Other Effects Resulting from Trafalgar Sandbank Dredging and Palmar Beach Nourishment. *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.* 137, 332–343.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000098](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000098)
- Santos-Vendoiro, J.J., Muñoz-Perez, J.J., Lopez-García, P., Jodar, J.M., Mera, J., Contreras, A., Contreras, F., Jigena, B., 2021. Evolution of Sediment Parameters after a Beach Nourishment. *Land* 10. <https://doi.org/10.3390/LAND10090914>
- Saponieri, A., Valentini, N., Di Risio, M., Pasquali, D., Damiani, L., 2018. Laboratory investigation on the evolution of a sandy beach nourishment protected by a mixed soft-hard system. *Water (Switzerland)* 10. <https://doi.org/10.3390/w10091171>
- Shillabeer, N., Hart, B., Riddle, A.M., 1992. The use of a mathematical model to compare particle size data derived by dry-sieving and laser analysis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 35, 105–111. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(05\)80059-9](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(05)80059-9)
- Singh, M., Singh, I.B., Müller, G., 2007. Sediment characteristics and transportation dynamics of the Ganga River. *Geomorphology* 86, 144–175.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.08.011>
- Steidtmann, J.R., 1982. Size-density sorting of sand-size spheres during deposition from bedload transport and implications concerning hydraulic equivalence. *Sedimentology* 29, 877–883. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1982.tb00090.x>
- Syvitski, J.P.M., 1991. *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis.*

Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626142>

Terzaghi, K., 1926. Principles of Soil Mechanics: A Summary of Experimental Studies of Clay and Sand. McGraw-Hill.

Trask, P.D., 1931. Compaction of Sediments. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 15, 271–276.
<https://doi.org/10.1306/3D93298A-16B1-11D7-8645000102C1865D>

U.S. Army Corps of Engineers, 2002. Coastal Engineering Manual-Part III.

U.S. Army Corps of Engineers, 1984. Shore Protection Manual, in: Coastal Engineering Research Center. Vicksburg, Mississippi, USA.



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA

ANEXOS



ANEXO I. Ejemplo granulometría.

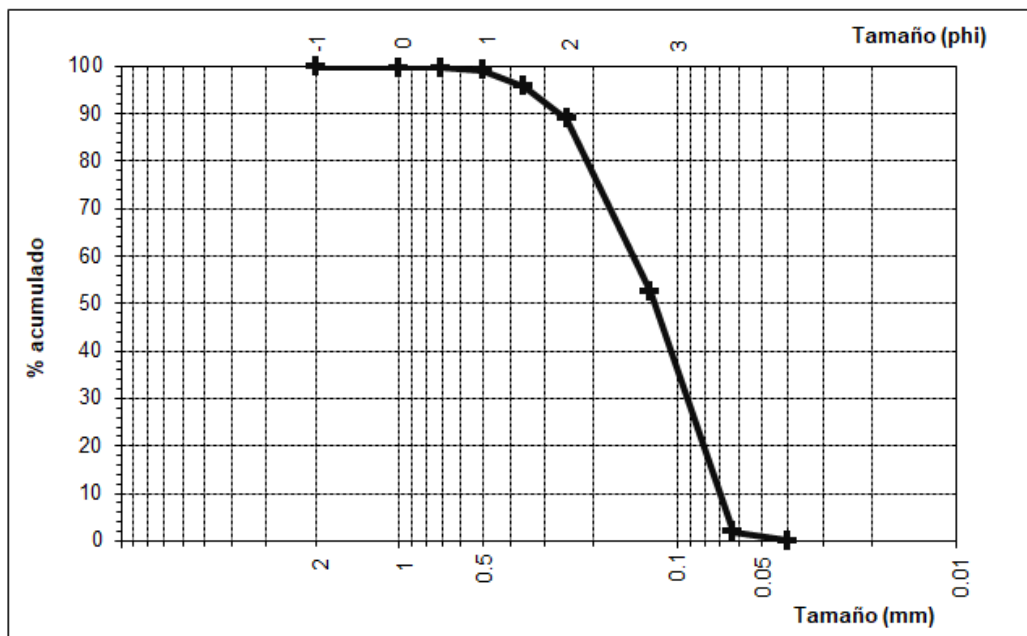
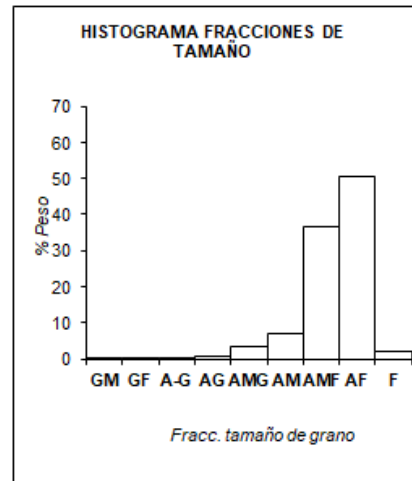
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Lugar: **Playa Valdelagrana**
 Muestra: **Muestra 2_700w_4:00m**

Nº A.S.T.M.	Escala mm	Escala phi	Peso (gr)	Peso (%)	% retenido acumulado	% que pasa acumulado
10	2	-1	0.10	0.10	0.10	99.90
18	1	0	0.13	0.13	0.22	99.78
	0.710	0.5	0.11	0.11	0.33	99.67
35	0.500	1	0.55	0.53	0.86	99.14
	0.355	1.5	3.42	3.32	4.18	95.82
60	0.250	2	7.13	6.92	11.11	88.89
120	0.125	3	37.51	36.42	47.52	52.48
230	0.063	4	52.02	50.50	98.03	1.97
>230	< 0,062	>4	2.03	1.97	100.00	0.00
Peso total:			103.00			

Parámetros Granulométricos

Moda:	F	Moda (Ø):	4
Media (mm):	0.145	Media(Ø)	2.786
Grava (%):	0.10	Sorting(Desv.):	0.080
Arena (%):	97.93	Skewness:	0.238
Finos (%):	1.97	Kurtosis:	0.840
D ₉₅ (mm)=	0.343	Ø ₉₅ =	1.544
D ₈₄ (mm)=	0.233	Ø ₈₄ =	2.102
D ₇₅ (mm)=	0.202	Ø ₇₅ =	2.308
D ₅₀ (mm)=	0.122	Ø ₅₀ =	3.035
D ₂₅ (mm)=	0.091	Ø ₂₅ =	3.458
D ₁₆ (mm)=	0.080	Ø ₁₆ =	3.644
D ₅ (mm)=	0.067	Ø ₅ =	3.900





Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA



Tesis doctoral de la Universidad de Cádiz
La problemática del análisis granulométrico a bordo de dragas y su solución
LÓPEZ GARCÍA, PATRICIA

ANEXO II. Publicaciones y ponencias.



Error on the Estimation of Sand Size Parameters When Using Small Diameter Sieves and a Solution

Patricia Lopez-Garcia^{1*}, Juan J. Muñoz-Perez¹, Antonio Contreras², Juan Vidal¹, Bismarck Jigena¹, Juan J. Santos¹, Jeanette Romero¹ and Francisco Contreras²

¹ CASEM (Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos), University of Cadiz, Cádiz, Spain, ² Polytechnic School of Algeciras, University of Cadiz, Cádiz, Spain

OPEN ACCESS

Edited by:

Rodolfo Silva,
National Autonomous University
of Mexico, Mexico

Reviewed by:

Mireille Escudero,
National Autonomous University
of Mexico, Mexico
Edgar Mendoza,
National Autonomous University
of Mexico, Mexico
Inmaculada Rodríguez-Santalla,
Rey Juan Carlos University, Spain

*Correspondence:

Patricia Lopez-Garcia
patricia.lopezgarcia@uca.es

Specialty section:

This article was submitted to
Coastal Ocean Processes,
a section of the journal
Frontiers in Marine Science

Received: 08 July 2021

Accepted: 26 August 2021

Published: 14 September 2021

Citation:

Lopez-Garcia P, Muñoz-Perez JJ,
Contreras A, Vidal J, Jigena B,
Santos JJ, Romero J and Contreras F
(2021) Error on the Estimation
of Sand Size Parameters When Using
Small Diameter Sieves and a Solution.
Front. Mar. Sci. 8:738479.
doi: 10.3389/fmars.2021.738479

Analyses were carried out to determine the main sand size parameters (median grain size D_{50} and sorting σ) for beach nourishment purposes using the sieving method aboard a dredger. Due to a lack of space and the need to carry and use the material with ease, the sieves are commonly small (10 cm diameter), and the shaking procedure is usually performed by hand. However, the influence of shaking, either mechanically or manually, has not yet been studied with 10 cm diameter sieves. Therefore, 20 samples were taken from inside the hopper of a trailing suction dredger and sieved both manually and mechanically for 10 min. The results showed that manual sieving yielded higher D_{50} values than the mechanical procedure. The average error arising from using the manual method was 14%, but it can reach 36.5%. The granulometric analysis carried out for different shaking times has shown that this error is $< 5\%$ when at least 20 min of shaking is performed. The mechanical procedure gave always finer sand results. In addition, the overflow ratio calculated for both mechanical and manual results reached differences of up to 48%.

Keywords: sieving, sand size, D_{50} , sand parameters, beach nourishment

INTRODUCTION

Beach nourishment is one of the one of the most commonly performed shore protection method on coasts worldwide. However, research into the design of these nourishment projects is ongoing to improve the work efficiency, which is based on empirical equations and rules (Pendleton et al., 2012; Román-Sierra et al., 2013; Karambas and Samaras, 2014; Armstrong et al., 2016; Choi et al., 2016; Pranzini et al., 2018).

The work process for beach nourishment requires finding suitable sand to replace the native sand eroded from the beach (Pranzini et al., 2018; Saponieri et al., 2018), and to estimate the amount of sand needed for beach nourishment (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Analyses of the sand-size distribution provides clues about the origin, depositional environment, and transport history of the sand (Bernabeu Tello et al., 2002; Singh et al., 2007; Fenster et al., 2016; Remo et al., 2016; Grottoli et al., 2017; Hallin et al., 2019). Additionally, sand-size analysis is an essential methodology used to classify materials and sedimentary environments (Steidtmann, 1982;

Roman-Sierra et al., 2011), and it can also be used to make predictions about the longevity of sand on a beach and how it reacts to storms (Bascom, 1951; Larson and Kraus, 1991; Grottoli et al., 2017; de Villar et al., 2019). The analyses carried out to study the coastal processes include measurements of the main sand size parameters, mainly, the median grain size (D_{50}) and the sorting, i.e., the spread of the sizes around the average (σ) (Blott and Pye, 2001).

The beach nourishment manager must carry out a quality control of the sand dumping site and decide where the sand should be placed. Methodologies to obtain the sand-size parameters need to be performed quickly aboard a dredger before the sand is pumped to the beach. The determination of the sand size parameters needs to be accurate for beach nourishment purposes (error less than 10%) (Muñoz-Pérez et al., 2012). These parameters can be expressed in metric or phi (logarithmic) units. Their determination is usually calculated using Folk and Ward formulae based on Krumbein's previous disquisitions (Krumbein and Pettijohn, 1938; Folk and Ward, 1957; Folk, 1974; Friedman and Johnson, 1982). Therefore, measures of accuracy could be determined through the analysis of several portions of a sample, several analyses of the same sample, or the analysis of several samples collected at the same locality. Among the methods used to analyze the sand size particles, researchers have studied and compared laser diffraction (Blott and Pye, 2006), laser granulometry and sedigraph (Celia Magno et al., 2018), camsizer (Luisa Martinez et al., 2017), microtrac (Austin and Shah, 1983), laser grain size with pipette and sieve (Konert and Vandenberghe, 1997), image analysis (Eberhard et al., 2012; Orrú et al., 2013), and sieving (Shillabeer et al., 1992; Pope and Ward, 1998; Eberhard et al., 2012).

The sieving method is the most common analysis used to determine the main sand size parameters aboard a dredger when performing a beach nourishment. The analysis of sand-size inside a dredger ship has some limitations such as limited workspace, specifications of the material that is needed, an unstable energy supply, and the limited time available to transport sand between the borrow and dump sites. Thus, the sieving method, when performed aboard a dredger, should be chosen according to its ease of use and its economic efficiency. Furthermore, the difficulty of embarking and disembarking sand with cat ladders in the high seas, alongside the habitual lack of a stable energy supply makes it difficult to use a mechanical shaker on board the ship. Thus, the manual shaking procedure is usually performed instead to analyze of sand grain sizes inside a dredger. The abovementioned problems together with the shortage of space are also the reason why small sieves (10 cm instead of 20 cm diameter) are mostly used in these situations.

Moreover, it is important to obtain highly precise D_{50} values and sorting results for beach nourishment purposes. The grain size compatibility of dredged ("borrow") sediments and native beach sediments is commonly expressed as the overfill ratio (R_A) (James, 1975). This overfill factor describes the theoretical volume of borrow sand that will comprise the residual volume of sediment on the beach after losses. That is, the R_A attempts to account for the natural loss of some fraction of the borrow sediment that is finer than the native beach sediment. It is

therefore important to evaluate possible errors when determining sand parameters (native and borrow) before and during the beach nourishment process, since these could entail dredging a larger volume of borrow sand than necessary. Indeed, Pouillet et al. (2016) studied a particular case with the James method (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) to obtain the R_A , in order to demonstrate the importance of errors made when performing sand parameter determinations in the calculation of sand nourishment volumes. Regarding the design beach nourishment projects, Grosskopf and Kraus (1993) proposed a mean error of less than $11.5 \text{ m}^3/\text{m}$ of beach volume to estimate the sand volume; otherwise, an accuracy comparable to the 10–20% contingencies is associated with the project designs (Muñoz-Pérez et al., 2012). Thus, some authors (Grosskopf and Kraus, 1993; Muñoz-Pérez et al., 2012; Pouillet et al., 2016) indicate that errors up to 10% can be assumed for beach nourishment purposes.

Precision is crucial when determining sand parameters. According to Syvitski (1991), for example, sieving time can influence the results of sand size analyses. Sifting efficiency in relation to sieving time has been evaluated with several studies. One of the hypotheses was that finer materials require longer sieving times; indeed, the finer the material, the greater the number of sieves that the sand needs to pass through, and the longer the grains will need to pass through smaller apertures (Mizutani, 1963). Thus, Syvitski (1991) and Lund-Hansen and Oehmig (1992) proposed a median sieving time of 20 min, whereas the US Army Corps of Engineers (USACE) (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) chose 15 min, and Román-Sierra et al. (2013) established 10 min as the minimum time required to obtain accurate results for medium-grained beach and dune sands. However, these studies used mechanical sieving as the sieving method, and studies of the sieving efficiency with small diameter sieves shaken manually, though necessary, have not yet been performed. Pouillet et al. (2019b) have compared manual and mechanical sieving with sieves of 20 cm diameter vs. manual sieving with 10 cm diameter sieves (both with 10 min of shaking time). Their conclusion was that the small diameter sieves should be rejected as a method on board for beach nourishment purposes. Nevertheless, the differences between mechanical and manual shaking with small diameter sieves have not yet been tested and neither has the influence of the shaking time with small sieves. These studies were contemplated in order to have a solution instead of the rejection of that method.

Therefore, the aim of this study is to distinguish the differences between the results obtained for the size parameters of sand sieved by hand (shaken manually) and sand that was mechanically sieved (shaken with a machine). In both scenarios, 10 cm diameter sieves were used. In addition, relative errors for different sieving times were investigated. The present paper shows the error arising from manual sieving and determines if this error is acceptable for beach nourishment works.

MATERIALS AND METHODS

The sand samples analyzed are from the Meca sandbank site, where sand was extracted to perform beach nourishments. The

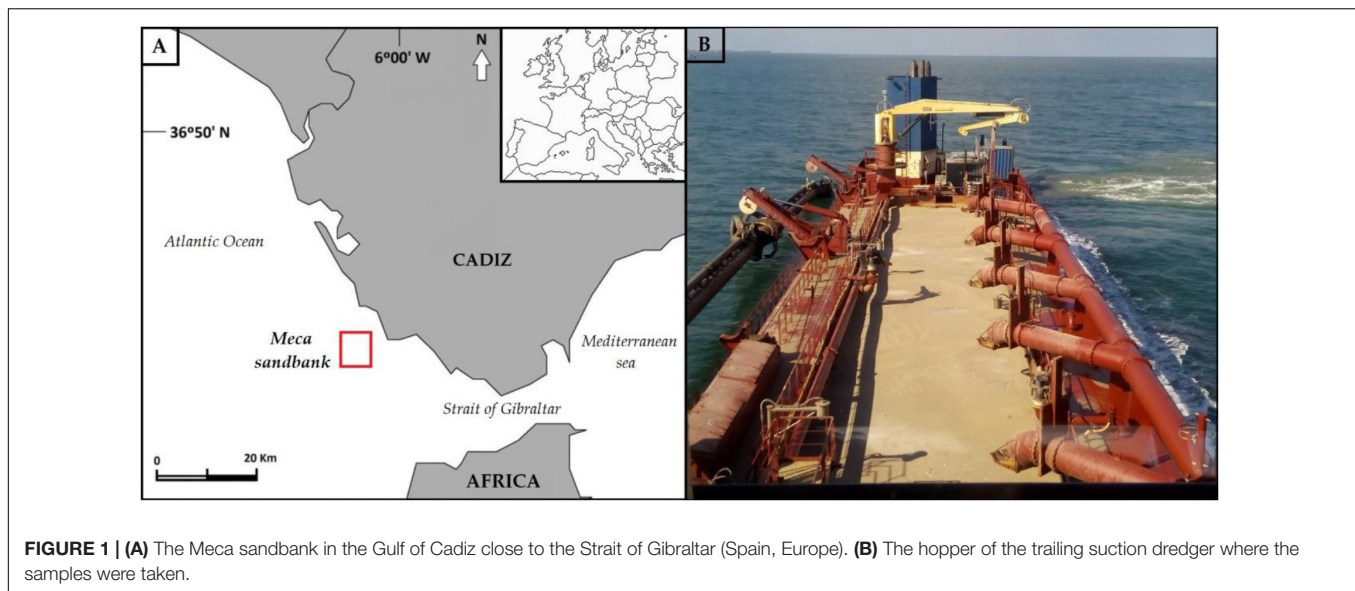


FIGURE 1 | (A) The Meca sandbank in the Gulf of Cadiz close to the Strait of Gibraltar (Spain, Europe). **(B)** The hopper of the trailing suction dredger where the samples were taken.

Meca sandbank is located between 15 and 20 m depths in the Gulf of Cadiz close to the Strait of Gibraltar (**Figure 1A**), and contains approximately 25 million m³ of sand that can be used for beach nourishments (Muñoz-Perez et al., 2009). The beaches on the coast near the sandbank consist of fine-medium sand, like the borrowed sediment, with an average D₅₀ 0.25 mm and a composition of 90% quartz and 10% calcium carbonate (Muñoz-Pérez et al., 2000).

Twenty samples were taken on different days from inside the hopper of a trailing suction dredger (**Figure 1B**) during beach nourishments in Cadiz (Costa Ballena and Punta Candor beaches). The sampling was carried out once the dredging operations were finished and the hopper was full of sand. Prior to removing the sand sample from the hopper surface, the operator took off the first 5 cm in depth from a 20 cm² random sand area from the surface, adhering to the appropriate safety measures. The first 5 cm from the surface usually has a high percentage of shells, and it is not representative of the whole hopper (Pouillet et al., 2019a).

While the dredger was sailing to the pumping area, the sand size analysis was carried out following the standard procedure described by Syvitski (1991), and slightly modified by Román-Sierra et al. (2013). Once the analysis was finalized on board by shaking with bare hands, each sample was saved in a hermetic bag in order to perform the analysis on the same samples afterward at the inland laboratory with the mechanical sieving method. Therefore, each sample was sieved twice with a small diameter sieve size (10 cm). Since this study case was during beach nourishment in Spain, eight specific mesh sizes were used for the sieving, 2 1 mm, 710, 500, 355, 250, 125, and 62.5 μm, because the Spanish Coastal Administration customarily requires it. The methodology for sand sample analysis is summarized below.

First, 20 samples weighing 100 g each were dried in the muffle for 12 h at the laboratory, whereas the drying process aboard was performed in a microwave for 5 min at maximum power. This

specific weight was chosen to facilitate the passage of the samples through the meshes, since adding a larger volume of sediments could result in their accumulation. Following that, each sample was weighed with a triple beam balance scale, whose accuracy can measure within a tenth of a gram, in order to simulate aboard conditions. For the next step after the sample weighing, the sand sample was put into the upper sieve (2 mm mesh size) of the 10 cm diameter sieve column. Then, the dry sample was sieved for 10 min using the two different methods: manual and mechanical shaking procedures. The sand accumulated in each sieve was weighed to obtain the required values of D₅₀ and the sorting. These steps were performed for the two methodologies. The parameters were calculated using the corresponding equations that can be found in Folk and Ward (Folk and Ward, 1957; **Table 1**). Blott and Pye (2001) produced a detailed manual of this study. The equations were based on the phi unit scale and can be converted from phi (φ) units to millimeters using equation 1.

$$D \text{ (mm)} = 2^{-\phi}, \quad (1)$$

The sieving procedure was performed twice per each sample in order to find possible variations in the results. However, the results were exactly the same. In addition, the 3 samples with the highest differences for both methods were analyzed and checked a third time.

Furthermore, the overfill ratio (R_A) was used to calculate the increase in the nourishment volume needed to compensate

TABLE 1 | Formulae used to calculate the main granulometric parameters, according to Folk and Ward graphical measures (Folk and Ward, 1957), where M_φ is the estimated mean grain size and σ_φ is the estimated standard deviation of the sample in phi units.

Mean	Sorting
$M_{\phi} = \frac{\psi_{16} + \psi_{50} + \psi_{84}}{3}$	$\sigma_{\phi} = \frac{\psi_{84} - \psi_{16}}{4} + \frac{\psi_{95} - \psi_5}{6}$

for the losses of fines from the borrow sand. Thus, the overflow ratio R_A was determined by applying Eq. 2 and 3 in the James' graph (Figure 2; U.S. Army Corps of Engineers, 1984). These ratios were obtained with the values of the Mean and Sorting parameters of manual and mechanical sieve procedures for both the borrow (M_{ϕ_b} and σ_{ϕ_b}) and the native sand (M_{ϕ_n} and σ_{ϕ_n}). This revealed the error which arose from using the manual sieving method, and what this implies for the necessary decrease in volume.

$$\frac{M_{\phi_b} - M_{\phi_n}}{\sigma_{\phi_n}} \tag{2}$$

$$\frac{\sigma_{\phi_b}}{\sigma_{\phi_n}} \tag{3}$$

A previous study (Muñoz-Pérez et al., 2012) has already established that mechanical sieving is the preferred method for obtaining realistic results and guaranteeing homogeneity. Therefore, the relative error (ϵ), taking the mechanical method as

the reference, was calculated for D_{50} and the sorting parameters following Eq. 4 and 5.

$$\epsilon_{D_{50}} = \left(\frac{D_{50} \text{ manual} - D_{50} \text{ mechanical}}{D_{50} \text{ mechanical}} \right) \cdot 100 \tag{4}$$

$$\epsilon_{\text{sorting}} = \left(\frac{\text{sorting manual} - \text{sorting mechanical}}{\text{sorting mechanical}} \right) \cdot 100 \tag{5}$$

RESULTS AND DISCUSSION

The values of D_{50} (mm) and sorting (ϕ) obtained through the mechanic and manual sieving of 20 sand samples are shown alongside native sand values in Table 2. Thus, the difference between both methodologies for each parameter, and the error (ϵ) arising from using the mechanical method as a reference can also be observed. In addition, the percentage of shells present in the samples is also shown in the table. Other granulometric parameters like D_{95} , D_{84} , D_{16} , and D_5 and their differences are also shown in Table 3 in order to help find what sieve meshes

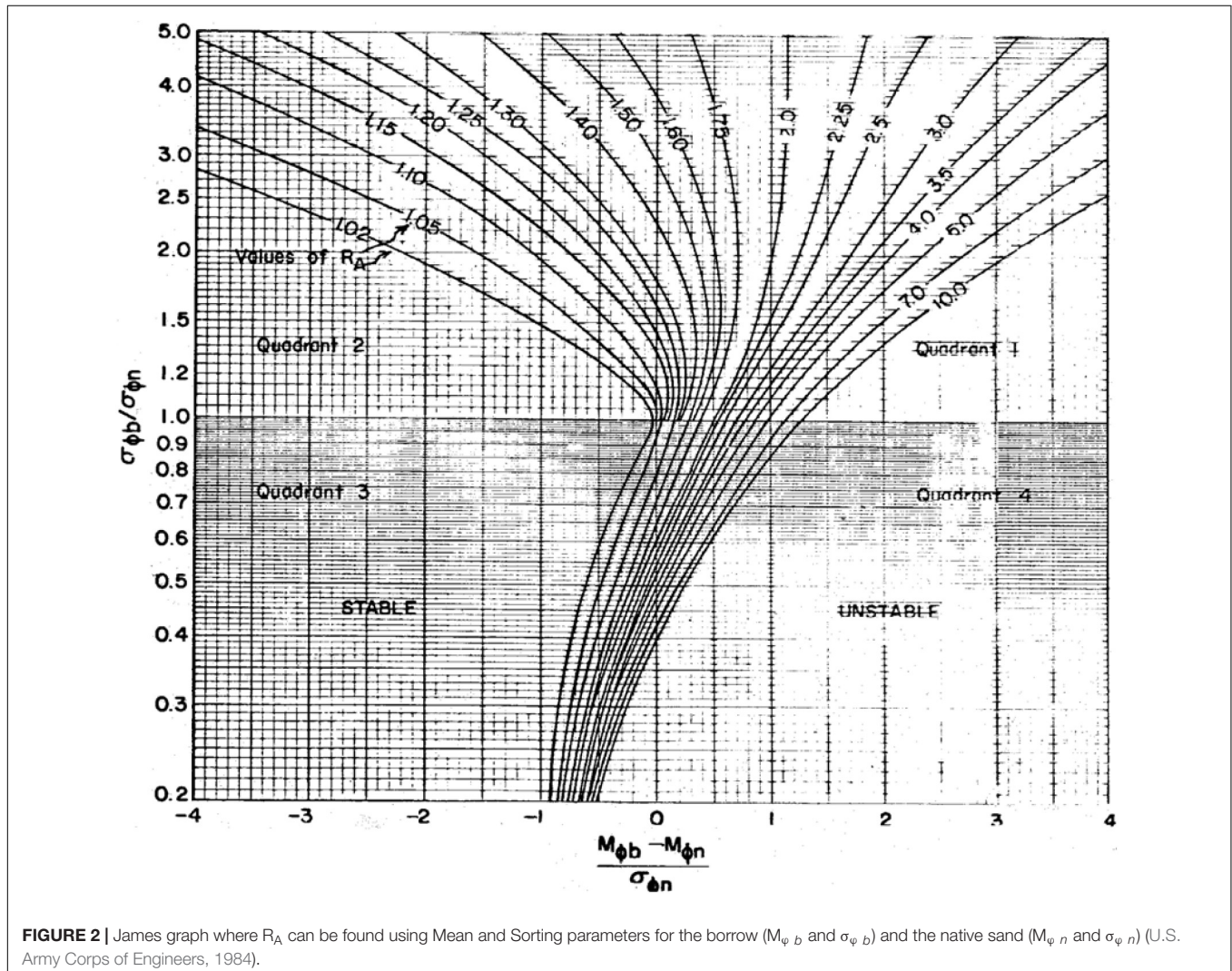


TABLE 2 | Granulometric parameters of 20 sand samples including D_{50} (mm) and sorting (ϕ), and difference (mm) and error (%) between methodologies for mechanical and manual sieving methods with 10 cm diameter sieves.

Sample	D_{50} (mm)				Sorting (ϕ)				Shells (%)
	0.27				0.60				
Native									6.2
Borrow	Mechanical	Manual	Difference	Error (%)	Mechanical	Manual	Difference	Error (%)	
1	0.283	0.335	0.052	18.4	0.605	0.541	-0.064	10.6	1.39
2	0.309	0.310	0.001	0.3	0.578	0.570	-0.008	1.4	0.40
3	0.342	0.371	0.029	8.5	0.544	0.512	-0.032	5.9	1.31
4	0.307	0.369	0.062	20.2	0.576	0.477	-0.099	17.2	1.11
5	0.294	0.296	0.002	0.7	0.555	0.551	-0.004	0.7	0.25
6	0.309	0.361	0.052	16.8	0.585	0.498	-0.087	14.9	1.55
7	0.268	0.272	0.004	1.5	0.625	0.614	-0.011	1.8	1.21
8	0.277	0.313	0.036	13	0.706	0.660	-0.046	6.5	3.88
9	0.285	0.291	0.006	2.1	0.580	0.574	-0.006	1	0.04
10	0.298	0.302	0.004	1.3	0.943	0.925	-0.018	1.9	6.98
11	0.351	0.373	0.022	6.3	0.573	0.541	-0.032	5.6	3.27
12	0.281	0.347	0.066	23.5	0.640	0.538	-0.102	15.9	1.90
13	0.368	0.375	0.007	1.9	0.911	0.862	-0.049	5.4	11.04
14	0.282	0.324	0.042	14.9	0.662	0.587	-0.075	11.3	1.73
15	0.278	0.344	0.066	23.7	0.585	0.534	-0.051	8.7	0.32
16	0.227	0.282	0.055	24.2	0.555	0.527	-0.028	5	0.04
17	0.230	0.314	0.084	36.5	0.687	0.639	-0.048	7	4.57
18	0.359	0.390	0.031	8.6	0.784	0.746	-0.038	4.8	8.30
19	0.243	0.326	0.083	34.2	0.599	0.527	-0.072	12	1.92
20	0.238	0.296	0.058	24.4	0.697	0.661	-0.036	5.2	0.05
Average	0.291	0.329	0.038	14	0.650	0.604	-0.045	7.1	2.56

Percentage of shells and native sand values are also shown.

have the sand accumulation, which could be a possible cause of the error with manual shaking.

The differences and errors in samples 16, 17, 19, and 20 were higher than in the other samples, and thus, tests for these samples were repeated, but the results did not change.

D_{50} (Median Grain Diameter)

Figure 3 shows that the D_{50} values were always higher when sieving was performed manually, i.e., mechanical sieving produces smaller D_{50} values. The maximum difference was 0.084 mm (sample 17), representing a maximum error of 36.5%, whereas the average error was of 14%. The mechanical sieving produced finer results due to the more constant and powerful shaking than shaking by hand. In manual sieving, sand was accumulated on certain larger mesh size sieves. A possible explanation for this is the application of less amplitude, strength, and consistency in the shaking performance that is needed for sand to pass through the corresponding mesh sizes. Moreover, it can be seen (example in Figure 4 of sample 17) that sand accumulated in the 355 μm -sized mesh during manual sieving. Nevertheless, for the same sample, part of this sand passed through to the underlying sieves (250 and 125 μm), when sieved mechanically.

Sieving Time

Román-Sierra et al. (2013) established that a mechanical sieving performance of 10 min is sufficient to obtain the same results as with a 20 min sieving duration. However, their sieving

analysis was performed using 20 cm diameter sieves, whereas in this study the sieves were smaller (10 cm diameter). For this reason, the samples with the highest differences were analyzed by both manual and mechanical shaking during 15, 20, 25, and 30 min (Figure 5), to determine how long a sand sample should be shaken manually for, using small diameter sieves, to acquire (if possible) similar results to those obtained with the mechanical sieving method.

Figure 5 depicts how D_{50} values decrease with increasing sieving time but stabilize after 20 min of shaking. Therefore, sand samples should be shaken manually during 20 min in small diameter sieves to obtain good results, as the relative errors were as little as < 5% after 20 min in all cases. Longer sieving times did not substantially improve the results. These results demonstrate that 10 min of sieving was not enough to obtain reliable results when manually shaking samples with 10 cm diameter sieves. Nevertheless, there was no problem as long as a manual sieving time of 20 min was guaranteed. Thus, here is a possible solution to the rejection of the small sieves according to the statement by Pouillet et al. (2019b).

Furthermore, when analyzing the differences between sieves, the granulometric curve of sample 17 (Figure 4) was chosen because it was a representative sample that showed a clear example of how the mechanical procedure produced finer sand with more variable sizes. Indeed, it was observed that the larger differences were found around the 0.25 mm sized sand grains.

Tables 2, 3 show average values of D_{50} and D_{16} ranging from 0.184 to 0.329 mm, with 14% average error for both. These values

TABLE 3 | Granulometric parameters of 20 sand samples including D_{95} , D_{84} , D_{16} , and D_5 (mm), and difference (mm) and error (%) between methodologies for mechanical and manual sieving methods with 10 cm diameter sieves.

Sample	D_{95}				D_{84}				D_{16}				D_5			
	Manual	Mechanical	Difference	Error (%)	Manual	Mechanical	Difference	Error (%)	Manual	Mechanical	Difference	Error (%)	Manual	Mechanical	Difference	Error (%)
1	0.496	0.495	0.001	0.2	0.456	0.433	0.023	5.3	0.209	0.174	0.035	20.1	0.151	0.14	0.011	7.9
2	0.485	0.489	-0.004	0.8	0.435	0.442	-0.007	1.6	0.187	0.187	0.000	0.0	0.144	0.144	0.000	0.0
3	0.499	0.519	-0.020	3.9	0.468	0.462	0.006	1.3	0.228	0.214	0.014	6.5	0.157	0.153	0.004	2.6
4	0.496	0.495	0.001	0.2	0.465	0.443	0.022	5.0	0.244	0.189	0.055	29.1	0.162	0.145	0.017	11.7
5	0.474	0.479	-0.005	1.0	0.397	0.416	-0.019	4.6	0.179	0.185	-0.006	3.2	0.142	0.144	-0.002	1.4
6	0.497	0.498	-0.001	0.2	0.464	0.447	0.017	3.8	0.233	0.187	0.046	24.6	0.159	0.144	0.015	10.4
7	0.495	0.497	-0.002	0.4	0.432	0.437	-0.005	1.1	0.17	0.168	0.002	1.2	0.139	0.138	0.001	0.7
8	0.692	0.703	-0.011	1.6	0.462	0.453	0.009	2.0	0.191	0.171	0.020	11.7	0.145	0.139	0.006	4.3
9	0.477	0.478	-0.001	0.2	0.422	0.419	0.003	0.7	0.179	0.176	0.003	1.7	0.142	0.141	0.001	0.7
10	1.711	1.729	-0.018	1.0	0.51	0.521	-0.011	2.1	0.178	0.175	0.003	1.7	0.141	0.14	0.001	0.7
11	0.664	0.684	-0.020	2.9	0.477	0.476	0.001	0.2	0.249	0.235	0.014	6.0	0.163	0.159	0.004	2.5
12	0.563	0.573	-0.010	1.7	0.465	0.437	0.028	6.4	0.227	0.174	0.053	30.5	0.157	0.14	0.017	12.1
13	1.779	1.761	0.018	1.0	0.599	0.618	-0.019	3.1	0.237	0.217	0.020	9.2	0.159	0.153	0.006	3.9
14	0.574	0.592	-0.018	3.0	0.459	0.45	0.009	2.0	0.204	0.172	0.032	18.6	0.149	0.14	0.009	6.4
15	0.488	0.479	0.009	1.9	0.453	0.416	0.037	8.9	0.21	0.173	0.037	21.4	0.151	0.14	0.011	7.9
16	0.465	0.457	0.008	1.8	0.378	0.351	0.027	7.7	0.18	0.158	0.022	13.9	0.142	0.135	0.007	5.2
17	0.685	0.695	-0.010	1.4	0.456	0.396	0.060	15.2	0.197	0.159	0.038	23.9	0.147	0.135	0.012	8.9
18	1.699	1.716	-0.017	1.0	0.491	0.489	0.002	0.4	0.254	0.235	0.019	8.1	0.166	0.159	0.007	4.4
19	0.498	0.497	0.001	0.2	0.452	0.393	0.059	15.0	0.214	0.163	0.051	31.3	0.153	0.137	0.016	11.7
20	0.68	0.691	-0.011	1.6	0.445	0.415	0.030	7.2	0.183	0.161	0.022	13.7	0.143	0.136	0.007	5.1
Average	0.721	0.726	-0.005	1.3	0.459	0.446	0.014	4.7	0.208	0.184	0.024	13.8	0.151	0.143	0.007	5.4

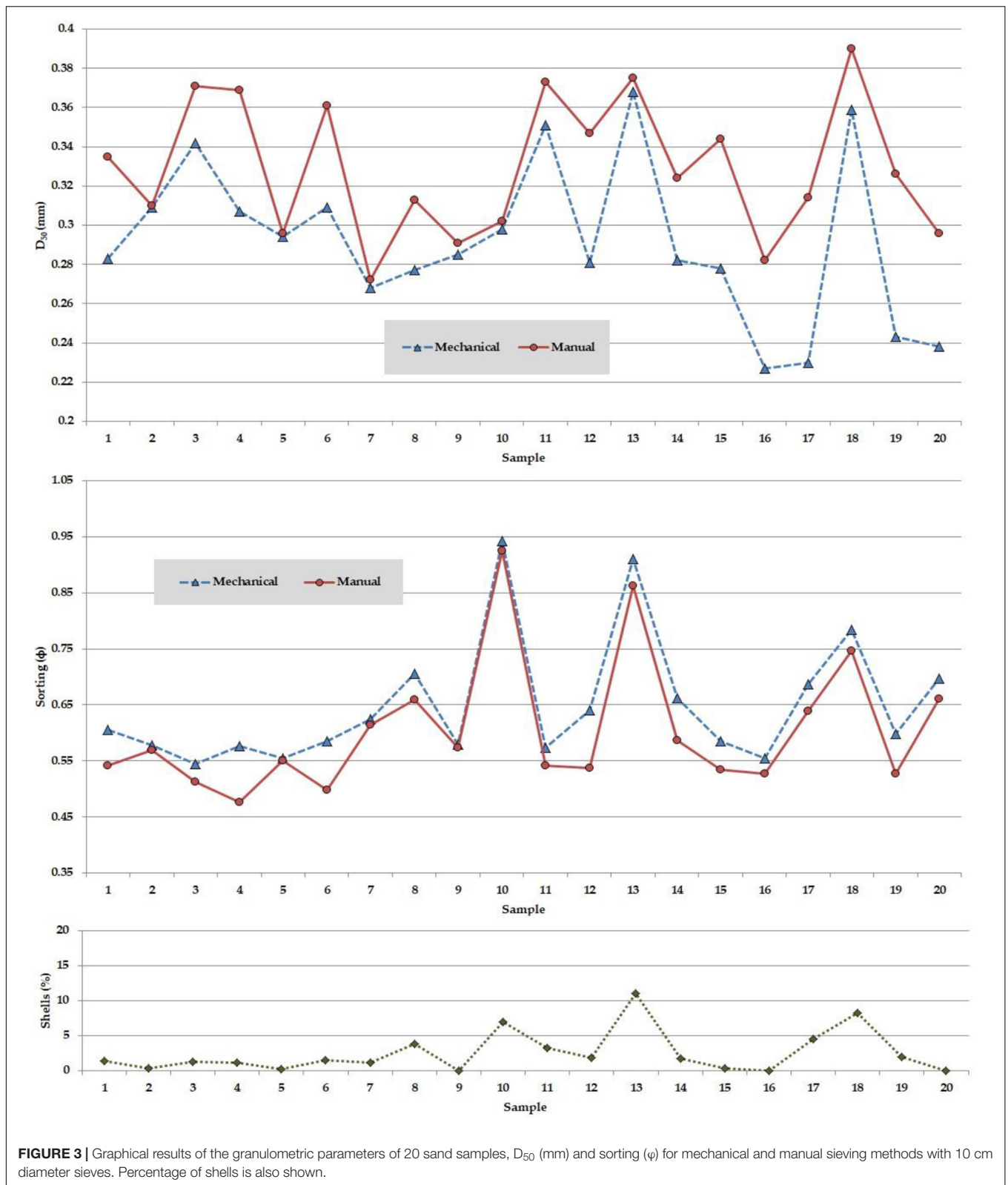


FIGURE 3 | Graphical results of the granulometric parameters of 20 sand samples, D_{50} (mm) and sorting (ϕ) for mechanical and manual sieving methods with 10 cm diameter sieves. Percentage of shells is also shown.

correspond to the sieve meshes of 355 and 250 μm , where the highest errors can be found. The average values for D_5 are 0.143 and 0.151 mm, with an error of 5.4%. Finally, the D_{84} and D_{95}

average values range from 0.446 to 0.726 mm, and their errors are 1.3 and 5.4%, respectively. These results demonstrate that sieve meshes above 355 and under 250 μm are not the issue.

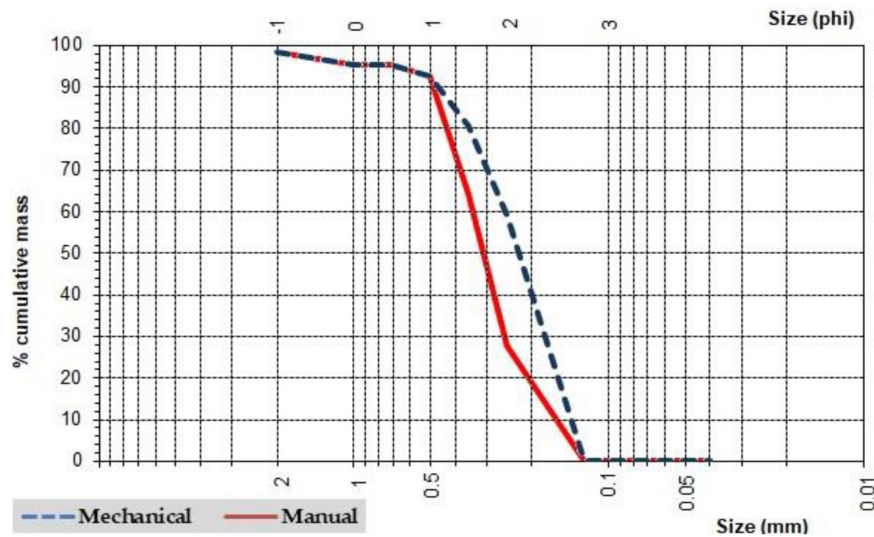


FIGURE 4 | Comparison of the granulometric curves of sand sample 17 (particle size in mm and phi units) for both mechanical and manual sieving.

Regrettably, the average D_{50} was also about 0.25 mm for the sand in the study zone of the present research.

Sand samples must be shaken manually during 20 min in small diameter sieves to get accurate results, in contrast to the 10 min needed with mechanical sieving (Blott and Pye, 2006) to get the optimal result.

Sorting

The results for the sorting parameter (for both mechanical and manual shaking) showed only a slight difference (almost homogeneous) between both methods (see **Figure 3**). Although the differences seemed to be minor, the sorting results obtained manually were always smaller than those acquired mechanically. If the sorting was smaller, it meant that the sample was not well sorted because the accumulation of grains with a specific size occurred instead of a more homogeneous spreading of the sand around the average.

Percentage of Shells

The amount of shells in each sample was visually obtained with the help of a microscope. The three upper sieves contained the most shell particles because bioclasts have a larger size than sand sediments. The percentage of shells did not seem to have any correlation with the sorting nor D_{50} (**Figure 3**). This might be because the percentages were not high enough to have an influence on the rest of the parameters. Further research should solve this question, for example by studying different values of shell percentages and their possible influence on the sand size parameters.

Overfill Ratio (R_A)

Following the procedure established by Poulet et al. (2016) and applying Eq. 2 and 3 in the James method (U.S. Army Corps of Engineers, 1984), the overfill ratio (R_A) was obtained for samples 16, 17, 19, and 20 (**Table 4**). These were the samples with highest

values of D_{50} error when comparing the mechanical and manual sieving methods. These errors reached up to 36.5% in D_{50} .

The R_A calculated for the mechanically and manually obtained results of Mean and Sorting reached differences up to 5% in volume for samples 17, 19, and 20 and 48% for sample 16. The R_A for the mechanical sieving is considered the most accurate and, therefore, the reference value (as previously stated for the D_{50} results). Looking at sample 16, when the mechanical method is used, an R_A of 1.50 indicates the need for an increased volume of dumped sand of 50% to fill the beach. On the other hand, the R_A obtained with manual sieving for the same sample 16 is only 1.02, which implies just an increase of 2% volume sand needed for the nourishment: a 48% less volume than the former and more exact calculation. In other words, the manual results showed that the borrowed sand was stable and would not have losses ($R_A \approx 1$). However, actually, the more accurate mechanical results showed the need for a volume increase of the borrowed sand ranging from 5 to 50%. If the manual sieving for 10 min is chosen, the beach will be filled with less sand than what is really needed.

Although the results presented in this paper are specific to this type of sand, the methodology carried out could be generalized to any other beach worldwide. The variation in the estimation of D_{50} could be attached to a function with the shaking time. The present study results show quite significant error variations; thus, it has not been possible to obtain a direct transfer function. Therefore, an example of future research lines is in developing a transfer or correction function to improve the manual results, thus reducing the errors. This study was carried out while keeping in mind some possible facts that may induce variations in the results, like the sand drying method. Thus, future works will evaluate how the drying process affects the D_{50} results. For now, this study provides an alternative to obtain better results with small diameter sieves and the manual shaking method, which is to increase the sieving time for at least 20 min.

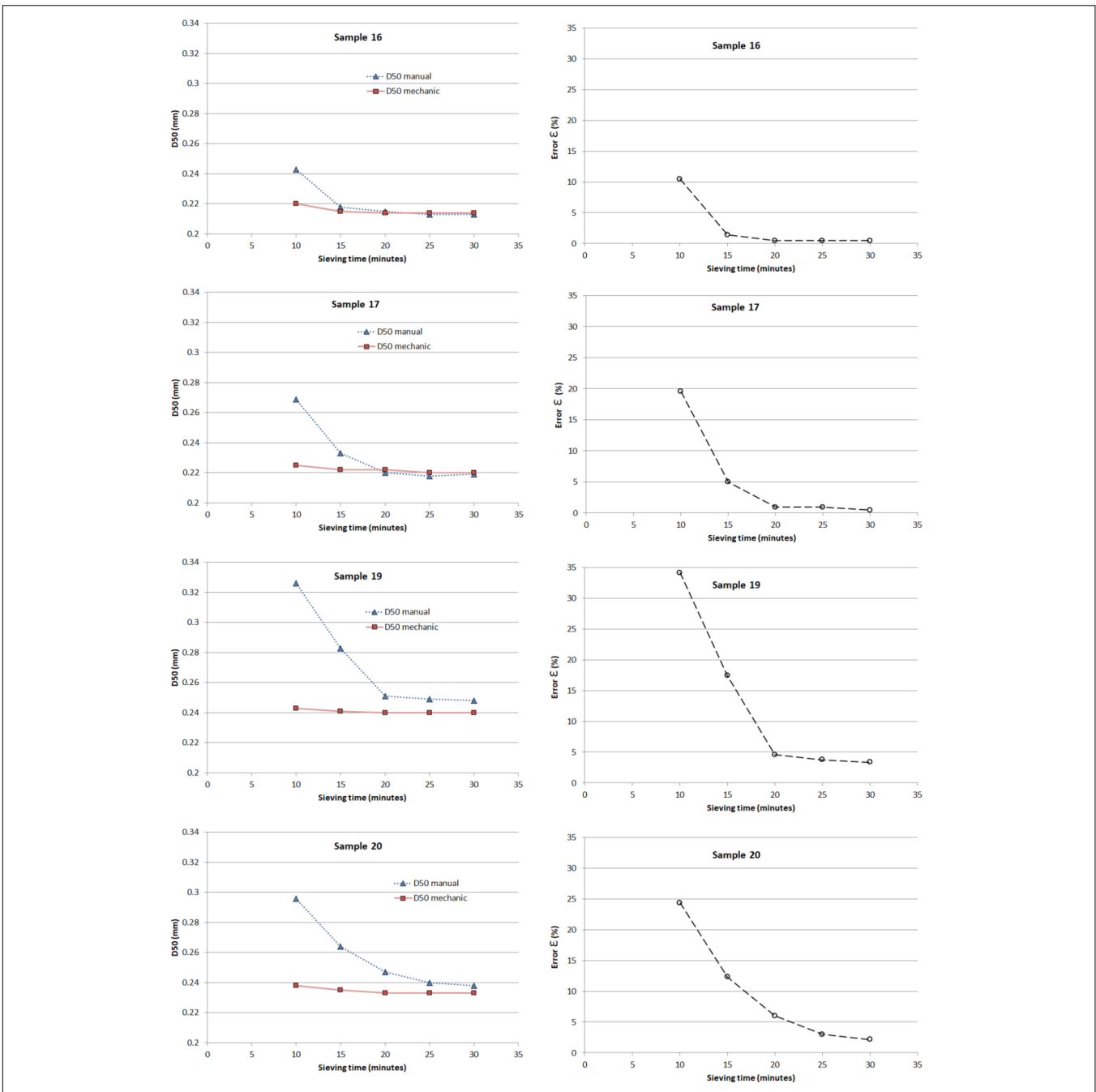


FIGURE 5 | Results of D_{50} from samples 16, 17, 19, and 20 sieved during 10, 15, 20, 25, and 30 min, respectively, with mechanical and manual procedures, and their respective errors (%).

TABLE 4 | Results of equations with the Mean and Sorting parameters of manual and mechanical sieve procedures for the borrowed samples ($M_{\phi b}$ and $\sigma_{\phi b}$) and the native sand ($M_{\phi n}$ and $\sigma_{\phi n}$), and the resulting overfill ratio (R_A).

Sample	$(M_{\theta_b} - M_{\theta_n}) / \sigma_{\theta_n}$		$\sigma_{\theta_b} / \sigma_{\theta_n}$		R_A		Difference (%)
	Mechanical	Manually	Mechanical	Manually	Mechanical	Manually	
16	0.23	-0.09	0.93	0.88	1.50	1.02	48
17	0.07	-0.43	1.15	1.07	1.05	1	5
19	0.03	-0.49	1.00	0.88	1.05	1	5
20	-0.01	-0.32	1.16	1.10	1.05	1	5

The difference in percentage of the R_A with mechanical and manual procedures is also shown.

CONCLUSION

Coastal dynamics and littoral geomorphology processes are studied through several analyses that include (among others) the measurement of the main sand size parameters: median grain size (D_{50}) and sorting. Moreover, the accuracy of the results of these sand size parameters is key for successful beach nourishment. Nevertheless, since the analyses must be performed aboard a dredger, and due to the lack of space amongst other difficulties, the sieving method to obtain the results usually involves the manual shaking of small sieves (10 cm diameter). For this reason, 20 samples were taken on board the dredger ship during dredging operations for beach nourishment in the Gulf of Cadiz (SW of Spain), and were sieved using two different methods: mechanical shaking vs. manual shaking.

This study was carried out to help to determine what error is made if manual sieving is chosen instead of mechanical sieving, and if this error is assumable for beach nourishment works. The results showed lower D_{50} values for the mechanical shaker compared to the manually obtained values. The average D_{50} error found for this particular case was of 14%, with a maximum of 36.5%. The D_{50} differences varied between 0 and 0.08 mm, with a mean of 0.038 mm. The representative granulometric curves show that larger differences were found in the sieves with meshes of 355 and 250 μm . This is a problem for this case because the borrow sand also had a D_{50} of 0.25 mm. Moreover, even though the sorting parameter did not seem to exhibit noteworthy differences between the methods, the mechanical sorting results were always higher, implying a more homogeneous spreading of the sand around the average instead of an accumulation in particular sizes, like with manually sieving.

Hence, despite the mechanical sieving results are the reference due to their higher accuracy obtained with just 10 min of sieving, manual shaking will remain the sieving process on board a

dredger ship, and thus, the recommendation to perform the sieving is shaking manually for at least 20 min.

Furthermore, the overflow ratio (R_A) was calculated for both manual and mechanical sieving methods; R_A reached differences of up to 5% in volume for samples 17, 19, and 20, and 48% for sample 16. Accordingly, if the manual sieving method was performed for beach nourishment purposes when the volume of borrowed sand needed was obtained and dumped on the beach, an unexpected loss of sand may have happened.

Finally, the conclusions highlighted herein are specific for this type of sand. However, this methodology could be applied to beaches worldwide to determine the differences between mechanical and manual sieving results. Next research lines may consist of developing a transfer or correction function with the shaking time and D_{50} to improve the manual results by reducing the errors. In addition, it was found that the sand drying process in a microwave could be a factor that alters the D_{50} estimations; therefore, it should be studied in future works.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The original contributions presented in the study are included in the article/supplementary material, further inquiries can be directed to the corresponding author/s.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

PL-G, JM-P, and AC contributed to conception and design of the study. JS and JR organized the database. PL-G, JV, and BJ performed the statistical analysis. PL-G and JM-P wrote the first draft of the manuscript. AC and FC wrote sections of the manuscript. All authors contributed to manuscript revision, read, and approved the submitted version.

REFERENCES

- Armstrong, S. B., Lazarus, E. D., Limber, P. W., Goldstein, E. B., Thorpe, C., and Ballinger, R. C. (2016). Indications of a positive feedback between coastal development and beach nourishment. *Earths Future* 4, 626–635. doi: 10.1002/2016EF000425
- Austin, L. G., and Shah, I. (1983). 'A method for inter-conversion of microtrac and sieve size distributions'. *Powder Technol.* 35, 271–278. doi: 10.1016/0032-5910(83)87018-1
- Bascom, W. N. (1951). The relationship between sand size and beach-face slope. *Trans. Am. Geophys. Union* 32:866. doi: 10.1029/TR032i006p00866
- Bernabeu Tello, A. M., Santamaría, R. M., and Pascual, C. V. (2002). 'An equilibrium profile model for tidal environments. *Sci. Mar.* 66, 325–335. doi: 10.3989/scimar.2002.66n4325
- Blott, S. J., and Pye, K. (2001). 'Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 1237–1248. doi: 10.1002/esp.261
- Blott, S. J., and Pye, K. (2006). Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. *Sedimentology* 53, 671–685. doi: 10.1111/j.1365-3091.2006.00786.x
- Celia Magno, M., Venti, F., Bergamin, L., Gaglianone, G., Pierfranceschi, G., and Romano, E. (2018). A comparison between Laser granulometer and sedigraph in grain size analysis of marine sediments. *Measurement* 128, 231–236. doi: 10.1016/j.measurement.2018.06.055
- Choi, J., Park, J., Choi, J., and Lee, J. (2016). 'Effects of beach nourishment and the influence of irrigation water discharge on byusan beach, west coast, Korea. *Irrigation Drainage* 65, 239–245. doi: 10.1002/ird.2048
- de Villar, A. C., Gómez-Pina, G., Muñoz-Pérez, J. J., Contreras, F., López-García, P., and Ruiz-Ortiz, V. (2019). 'New design parameters for bipolar beach profiles (SW Cadiz, Spain). *Rev. Construcción* 18, 432–444. doi: 10.7764/RDLC.18.3.432
- Eberhard, L., Schindler, H. J., Hellmann, D., Schmitter, M., Rammelsberg, P., and Giannakopoulos, N. N. (2012). 'Comparison of particle-size distributions determined by optical scanning and by sieving in the assessment of masticatory performance. *J. Oral Rehabil.* 39, 338–348. doi: 10.1111/j.1365-2842.2011.02275.x
- Fenster, M. S., Dolan, R., and Smith, J. J. (2016). Grain-size distributions and coastal morphodynamics along the southern Maryland and Virginia barrier islands. *Sedimentology* 63, 809–823. doi: 10.1111/sed.12239
- Folk, R. L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, TX: Hemphill Publishing Company.
- Folk, R. L., and Ward, W. C. (1957). 'Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters'. *J. Sediment. Res.* 27, 3–26.
- Friedman, G. M., and Johnson, K. G. (1982). *Exercises in Sedimentology*. New York, NY: Wiley.

- Grosskopf, W. G., and Kraus, N. C. (1993). *Guidelines For Surveying Beach Nourishment Projects., CETN II-31*. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineering Water Experiment Station.
- Grottoli, E., Bertoni, D., and Ciavola, P. (2017). Short- and medium-term response to storms on three Mediterranean coarse-grained beaches. *Geomorphology* 295, 738–748. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.08.007
- Hallin, C., Huisman, B. J. A., Larson, M., Walstra, D. J. R., and Hanson, H. (2019). Impact of sediment supply on decadal-scale dune evolution — Analysis and modelling of the Kennemer dunes in the Netherlands. *Geomorphology* 337, 94–110. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.04.003
- James, W. R. (1975). *Techniques In Evaluating Suitability Of Borrow Material For Beach Nourishment, Technical Memorandum No. 60*. Washington DC: Coastal Engineering Research Center (U.S.).
- Karambas, T. V., and Samaras, A. G. (2014). Soft shore protection methods: the use of advanced numerical models in the evaluation of beach nourishment. *Ocean Eng.* 92, 129–136. doi: 10.1016/j.oceaneng.2014.09.043
- Konert, M., and Vandenberghe, J. (1997). Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology* 44, 523–535. doi: 10.1046/j.1365-3091.1997.d01-38.x
- Krumbein, W., and Pettijohn, F. (1938). *Manual of Sedimentary Petrography*. Available online at: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300427427> (Accessed April 18, 2021).
- Larson, M., and Kraus, N. C. (1991). Mathematical modeling of the fate of beach fill. *Coast. Eng.* 16, 83–114. doi: 10.1016/0378-3839(91)90054-K
- Luisa Martinez, M., Silva, R., Lithgow, D., Mendoza, E., Flores, P., Martínez, R., et al. (2017). Human impact on coastal resilience along the coast of Veracruz, Mexico. *J. Coast. Res.* 77, 143–153. doi: 10.2112/SI77-015.1
- Lund-Hansen, L. C., and Oehmig, R. (1992). Comparing sieve and sedimentation balance analysis of beach, lake and eolian sediments using log-hyperbolic parameters. *Mar. Geol.* 107, 139–142, IN17–IN18, 143–147. doi: 10.1016/0025-3227(92)90072-P
- Mizutani, S. (1963). A theoretical and experimental consideration of accuracy of sieving analysis. *J. Earth Sci.* 11, 1–27.
- Muñoz-Perez, J. J., Gomez-Pina, G., and Enriquez, J. (2009). Comments on “An approximation to short-term evolution and sediment transport pathways along the littoral of Cadiz Bay (SW Spain)” by Anfuso and et al. (*Environ Geol* 56:69–79). *Environ. Earth Sci.* 59, 477–479. doi: 10.1007/s12665-009-0031-7
- Muñoz-Pérez, J. J., Mas, J. M., Naranjo, J. M., Torres, E., and Fages, L. (2000). Position and monitoring of anti-trawling reefs in the Cape of Trafalgar (Gulf of Cadiz, SW Spain). *Bull. Mar. Sci.* 67, 761–772.
- Muñoz-Pérez, J. J., Payo, A., Román-Sierra, J., Navarro, M., and Moreno, L. (2012). Optimization of beach profile spacing: An applicable tool for coastal monitoring. *Sci. Mar.* 76, 791–798. doi: 10.3989/SCIMAR.03417.15A
- Orrú, C., Chavarrías, V., Uijtewaal, W. S. J., and Blom, A. (2013). ‘Image analysis for measuring stratigraphy in sand-gravel laboratory experiments’, *Earth Surface Dynamics Discussions. Copernicus GmbH* 1, 973–1018. doi: 10.5194/esurf-d-1-973-2013
- Pendleton, L., Mohn, C., Vaughn, R. K., King, P., and Zoulas, J. G. (2012). Size matters: the economic value of beach erosion and nourishment in southern California. *Contem. Econ. Policy* 30, 223–237. doi: 10.1111/j.1465-7287.2011.00257.x
- Pope, L., and Ward, C. (1998). *Manual on Test Sieving Methods’, in Science & Mathematics*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Poulet, P., Muñoz-Perez, J. J., Poortvliet, G., Mera, J., Contreras, A., and Lopez, P. (2019b). ‘Influence of different sieving methods on estimation of sand size parameters. *Water* 11:876. doi: 10.3390/w11050879
- Poulet, P., Muñoz-Perez, J. J., Lopez, P., García-Lopez, S., Martell, R., Silva, R., et al. (2019a). ‘Sand size variability inside the hopper of a trailing suction dredger for beach nourishment purposes’. *Geo Mar. Lett.* 39, 513–520. doi: 10.1007/s00367-019-00615-w
- Poulet, P., Muñoz-Perez, J. J., Mera, J., and Moreno, L. (2016). “Sand size variability inside the hopper of a trailing suction dredger in regards to beach nourishment projects,” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Coastal Zone Engineering and Management in the Middle East (Arabian Coast 2016)*, Dubai.
- Pranzini, E., Anfuso, G., and Muñoz-Perez, J. J. (2018). A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coast. Eng.* 139, 32–35. doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.05.001
- Remo, J. W. F., Heine, R. A., and Ickes, B. S. (2016). Particle size distribution of main-channel-bed sediments along the upper Mississippi River, USA. *Geomorphology* 264, 118–131. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.04.012
- Román-Sierra, J., Muñoz-perez, J. J., and Navarro-Pons, M. (2013). Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands. *Sedimentology* 60, 1484–1497. doi: 10.1111/sed.12040
- Roman-Sierra, J., Navarro, M., Muñoz-Perez, J. J., and Gomez-Pina, G. (2011). ‘Turbidity and other effects resulting from trawling sandbank dredging and palmar beach nourishment. *J. Waterway Port Coast. Ocean Eng.* 137, 332–343.
- Saponieri, A., Valentini, N., Di Risio, M., Pasquali, D., and Damiani, L. (2018). Laboratory investigation on the evolution of a sandy beach nourishment protected by a mixed soft-hard system. *Water (Switzerland)* 10:1171. doi: 10.3390/w10091171
- Shillabeer, N., Hart, B., and Riddle, A. M. (1992). ‘The use of a mathematical model to compare particle size data derived by dry-sieving and laser analysis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 35, 105–111. doi: 10.1016/S0272-7714(05)80059-9
- Singh, M., Singh, I. B., and Müller, G. (2007). Sediment characteristics and transportation dynamics of the Ganga River. *Geomorphology* 86, 144–175. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.08.011
- Steidtmann, J. R. (1982). Size-density sorting of sand-size spheres during deposition from bedload transport and implications concerning hydraulic equivalence. *Sedimentology* 29, 877–883. doi: 10.1111/j.1365-3091.1982.tb00090.x
- Syvitski, J. P. M. (1991). *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*, ed. J. P. M. Syvitski (Cambridge: Cambridge University Press), doi: 10.1017/CBO9780511626142
- U.S. Army Corps of Engineers (1984). *Shore Protection Manual*. Vicksburg, MS: Coastal Engineering Research Center.
- U.S. Army Corps of Engineers (2002). *Coastal Engineering Manual-Part III*. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher’s Note: All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

Copyright © 2021 Lopez-Garcia, Muñoz-Perez, Contreras, Vidal, Jigena, Santos, Romero and Contreras. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Article

Microwave Drying Method before Sieving to Obtain Accuracy of Sand Size Parameters

Patricia Lopez-Garcia ^{1,*}, Juan J. Muñoz-Perez ¹, Antonio Contreras-de-Villar ², Francisco Contreras-de-Villar ², Jeanette Romero-Cozar ¹, Pilar Diaz-Carrasco ¹ and Bismarck Jigena-Antelo ¹

¹ CASEM (Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos), University of Cadiz, 11510 Puerto Real, Spain; juanjose.munoz@uca.es (J.J.M.-P.); jeanette.romero@uca.es (J.R.-C.); pilar.diaz@uca.es (P.D.-C.); bismarck.jigena@uca.es (B.J.-A.)

² Higher Technical School of Engineering of Algeciras, University of Cadiz, Avda. Ramón Puyol s/n, 11202 Algeciras, Spain; antonio.contreras@uca.es (A.C.-d.-V.); francisco.contreras@uca.es (F.C.-d.-V.)

* Correspondence: patricia.lopezgarcia@uca.es

Abstract: The purpose of this study is to determine the differences between the size parameter findings, comparing the results of a muffle during a 12-h sand-drying process with those of a microwave, because the effectiveness of sand drying with a microwave has not previously been studied. To achieve the best outcomes and assess any inaccuracies, a technique was established. Several power levels and durations were used in the tests. Furthermore, as the median particle size (D_{50}) affects the porosity of sand, samples from three beaches in the south of Spain with varying sand sizes were used in this study. When drying for at least 5 min, the error findings for D_{50} are less than 3.5%, which is perfectly acceptable for beach nourishment purposes. Regarding power, 462 watts was the optimal power; a lower power, approximately 300 watts, did not completely dry the material, even after nearly 15 min. Furthermore, errors in the sorting (σ) parameter were negligible. It is essential to implement the following recommendations in microwave drying methods: the use of a light and wide container for the sand, interruptions during drying, and a minimum duration of 5 min.



Citation: Lopez-Garcia, P.; Muñoz-Perez, J.J.; Contreras-de-Villar, A.; Contreras-de-Villar, F.; Romero-Cozar, J.; Diaz-Carrasco, P.; Jigena-Antelo, B. Microwave Drying Method before Sieving to Obtain Accuracy of Sand Size Parameters. *J. Mar. Sci. Eng.* **2024**, *12*, 370. <https://doi.org/10.3390/jmse12030370>

Academic Editor: João Miguel Dias

Received: 25 January 2024

Revised: 19 February 2024

Accepted: 19 February 2024

Published: 22 February 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: sieving; sand size; D_{50} ; sand parameters; beach nourishment

1. Introduction

Beach nourishment is one of the most popular methods of shore protection used around the world. In order to replenish the natural sand that has been eroded from the beach, suitable sand must be found [1,2]. Additionally, the quantity of sand required for beach nourishment must be estimated [3]. Investigations on the distribution of sand size reveal information about the sand's origin, depositional environment, and transportation background [4–9]. Furthermore, sand size analysis is a crucial technique for categorizing materials and sedimentary environments [10–12]. This technique may also be used to forecast how long beach sand will last and how it will respond to storms [8,12–16]. Measurements of the main sand size characteristics, primarily the median grain size (D_{50}) and the sorting (distribution of sizes around the average, σ), are part of the analysis conducted to investigate coastal processes [17–20].

The beach nourishment coordinator is responsible for determining the best location for the sand and for performing quality control on the dumping site. Prior to the sand being pumped to the beach, procedures to determine the sand size parameters must be performed on board the dredger [21]. Obviously, the sand size parameters must be determined with the highest degree of accuracy. The formulas developed by Folk and Ward [22,23] based on Krumbein's earlier discussions are typically used [24]. Therefore, accuracy surveys could be performed by analyzing several samples from different locations, conducting multiple analyses of samples taken at the same location, or conducting multiple analyses

of the same sample. Researchers have examined and contrasted several kinds of techniques for analyzing sand size particles, including image analysis [25,26], sieving [25,27,28], camsizer [29], microtrac [30], laser granulometry and sedigraph [31], laser diffraction [32], and laser grain size with pipette and sieve [33]. When carrying out beach nourishment, the sieving method is the most often utilized analysis for determining the essential sand size parameters on board a dredger. There are several limitations on the examination of sand size inside a dredger ship: a restricted workspace, material requirements, an unstable energy source, and the travel time between the borrow and dump locations. As a result, when being performed on board a dredger, the sieving technique must usually be selected based on how economical, fast, and accessible it is. For instance, using a mechanical shaker on board the ship is challenging due to the complications of boarding the dredger in the open sea with cat ladders [34]. Consequently, the hand-shaking method with small sieves (10 cm diameter as opposed to the typically employed 20 cm) is generally used on board dredgers to analyze the sand grain size. The influence of the hand-shaking method has already been studied by Poulet et al. [35]. The muffle weight is usually between 70 and 90 kg and its dimensions are approximately $90 \times 70 \times 60$ cm; meanwhile, a common microwave's weight is 6 kg and its dimensions can be $25 \times 45 \times 35$ cm. In addition to the space constraint, the aforementioned issues also explain why a microwave is employed to dry the sand samples in these circumstances instead of a muffle for a 12 h drying period.

When determining sand characteristics, accuracy is vital [36]. Numerous studies have assessed sifting efficiency in relation to sieving time [3,35,37–39]. One of the theories was that longer sieving durations would be necessary for finer materials. In fact, the finer the material, the more sieves the sand has to go through, and the longer the grains must pass through smaller pores [40,41]. The most important process before sieving to ensure accurate results is sand-sample drying. Sand porosity depends on sand size and the shape of sample grains [39]. If the sand sample contains some water inside its interstitial spaces, sieving efficiency would be challenged in terms of the sand ineffectively filtering through the sieve meshes. The humidity from the sand could block the mesh pores or create compact sand balls that would form due to the shaking process. Therefore, choosing the correct method to dry the sand sample as far as possible is extremely important since it may have a relevant impact on the determination of the sand size parameters.

When analyses are carried out in a land laboratory, the sand samples are dried on a muffle at a temperature of $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 12 h according to established methodologies [3,37,39]. This drying process cannot be used on board a dredger laboratory, as mentioned above. The most common methodology for obtaining dry sand to sieve on a dredge is the use of a commercial microwave. The samples usually undergo about 5 min at the highest power level (about 700–800 w) to attempt to completely dry the sand. Sometimes, during that drying process inside the microwave, the sand starts to blow up, causing loss of part of the initial weight of sand by throwing sediment onto the walls and ceiling.

For beach nourishment purposes, some researchers [34,36] suggest that errors of up to 10% can be expected and/or admitted. But, how do all the former circumstances influence the results? How big is the error committed? Is it admissible?

Since essential investigations on sand-drying effectiveness with the use of a microwave have not yet been conducted, the aim of this study was to establish the differences between the size parameter results obtained using a muffle during a 12-h sand-drying process and the results using a microwave. Thus, a methodology was developed to quantify the possible errors and obtain the best results. The tests were carried out with several power levels and durations. Moreover, as the sand porosity depends on the medium grain size, this research was carried out with samples from three beaches with different sand sizes in the south of Spain.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The sand samples analyzed are from three different beaches in the south of Spain. The reason for selecting these particular beaches is their average D_{50} : 0.11 mm for Valdelagrana beach, 0.21 mm for Camposoto beach, and 0.81 mm for La Alcaidesa beach [42]. The beaches are located near the Strait of Gibraltar (Figure 1), with La Alcaidesa situated on the coast of the Mediterranean Sea, whereas Valdelagrana and Camposoto are located on the coast of the Gulf of Cadiz (Atlantic Ocean). The west coast of Cadiz facing the Atlantic Ocean is a mesotidal area, with a tidal range of about 4 m and waves from the W-SW quadrant. A more significant wave (H_s) is expected in the Gulf of Cadiz than on the Mediterranean coast, thus these more energetic events explain why the sand particles are finer.

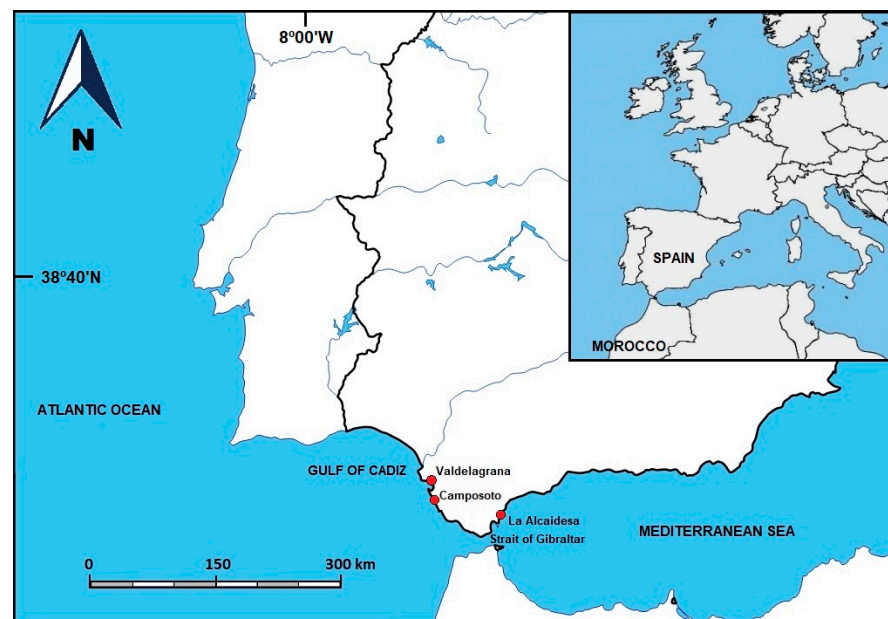


Figure 1. Location of the three beaches analyzed in this study. The Valdelagrana and Camposoto beaches are situated in the Gulf of Cadiz (Atlantic Ocean) and La Alcaidesa beach is located on the coast of the Mediterranean Sea. All of the beaches are located close to the Strait of Gibraltar (Spain, Europe).

2.2. Sampling

Ten samples were collected in the low-tide zone for each beach. The intention was to simulate wet sand extracted from the borrow site, inside a dredge ship. Every one of the samples contained a mix of sand and water (example in Figure 2). The weight of each sample was around 800 g. Afterward, each sample was separated into 5 subsamples of about 130 g each (including an excess of 150 g to prevent loss).



Figure 2. A sample bag (10 bags were collected from each beach) containing 800 g of sand with some excess water. Each sample bag was divided into 5 subsamples: 130 g for muffle, 130 g for each of the four microwave power levels (700 w, 595 w, 462 w, and 300 w), and 150 g extra for possible losses.

2.3. Granulometric Analysis

The usual approach outlined by Syvitski [37] was used to analyze the size of the sand, with some minor modifications stated by Roman-Sierra et al. [39]. Below is a summary of the sand-sample analysis methodology.

The steps to obtain the sand size parameters consist of drying the sand, sieving, and parameter calculation. Before sieving the samples, the sand must be as dry as possible in order to sift it properly through the meshes. If the sand is not dry enough, the sample could end up compacted into small balls in the sieves (Figure 3), which prevents sand grains from being correctly sieved. The aforementioned main reason for this research is to determine an accurate microwave drying methodology that could be used on board a dredger for beach nourishment purposes. The following drying procedures were performed to identify the method that provides the most effective results with a microwave, taking muffle drying as the standard and most accurate methodology against which to compare the results.



Figure 3. An example of a sieved sand sample that was not sufficiently dry. The sieving machine vibrations created compact sand spheres with the grains. Also, it can be seen how humidity in the sand causes obstructions in the mesh pores.

2.3.1. Muffle Drying Procedure

The samples weighing 130 g each were dried in the muffle for 12 h at the laboratory (Figure 4). This specific weight was chosen to facilitate the passage of the samples through the meshes, since adding a larger volume of sediment could result in their accumulation. Following that, each sample was weighed with a laboratory weighing balance, whose accuracy was within 0.01 g.

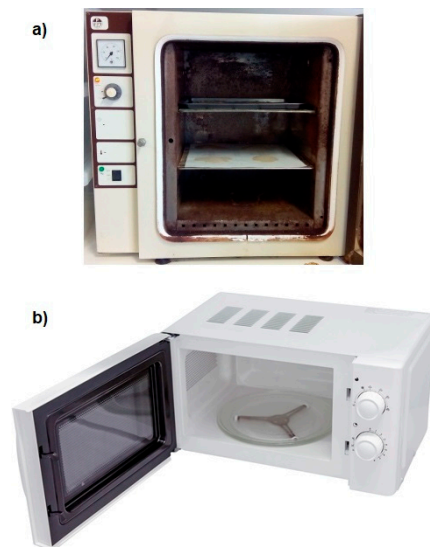


Figure 4. (a) Laboratory muffle programmed to dry at 110 °C; (b) standard microwave with 700 w, 595 w, 462 w, and 300 w power levels.

2.3.2. Microwave Drying Procedure

The selection criteria for the sand container to be used in the microwave are crucial. The container needs to have walls on the edges but not be too tall, and it must have a wide enough base for the sand to be spread sufficiently (depending on the microwave plate interior size; therefore, the container should be as wide as possible, taking into account the need to spin properly). The container material must be plastic due to its lightness and, obviously, microwave safe. The precision of the used scale was 0.01 g and 230 g was its maximum weight. Therefore, a lightweight sand container was necessary.

The aim was to obtain a dried sample of about 100 g weight for sieving, as aforementioned in the muffle drying section. First of all, the amount of wet sand that needs to be dried is calculated according to sand porosity and density. Considering that the studied sand was principally composed of quartz (specific density of $\gamma = 2.7 \text{ g/mL}$) [43] and the sample had a ~40% porosity when filled with seawater (density of $\gamma = 1.025 \text{ g/mL}$), a sample of wet sand weighing 130 g would mathematically result in about 100 g of dry sand. The results of these calculations are shown in Figure 5a,b. It is critical to take into account the fact that the excess water must be removed from the sample prior to weighing. The excess water can be poured out by overturning the container slightly, or it can be removed with a spoon. Once the 130 g wet sand had been weighed, the sand was completely spread out in the container.

This study tested all the power levels of a conventional microwave, e.g., in this case, 300 w, 462 w, 595 w, and 700 w. The intention was to achieve the fastest way to dry sand at 100% while avoiding grain loss due to explosions that can occur during the microwave drying procedure.

The test and the sample must be rejected if the sand explodes inside the microwave during the drying procedure (Figure 6). This could occur if the conditions described above are not adhered to.

Therefore, the drying time is specific for each power level. The higher the power applied, the lower the drying time but the greater the possibility of sample explosion. The microwave was paused every 1–2 min to check the following indicators of sand status: the weight control (trying to achieve a weight of 100 g from the initial 130 g); the adhesion of sand grains to a metal spoon (if sand does not stick to the spoon, it is assumed that the sand is sufficiently dry); and visual observation of the color and texture (see example of colors of wet and dry sand samples in Figure 5a,b). Obviously, a portion of the heated sand's humidity leaves when the microwave door is opened; therefore, the sample dries faster if the door is repeatedly opened. Likewise, some humidity is attached to the microwave walls; thus, the walls were dried with a paper towel to facilitate the drying method. Once these steps had been carried out, the sample was placed back inside the microwave and the drying procedure was continued. The aforementioned indicator checks were repeated at the appropriate times for each power level in order to completely dry the sand and determine how much drying time was required.

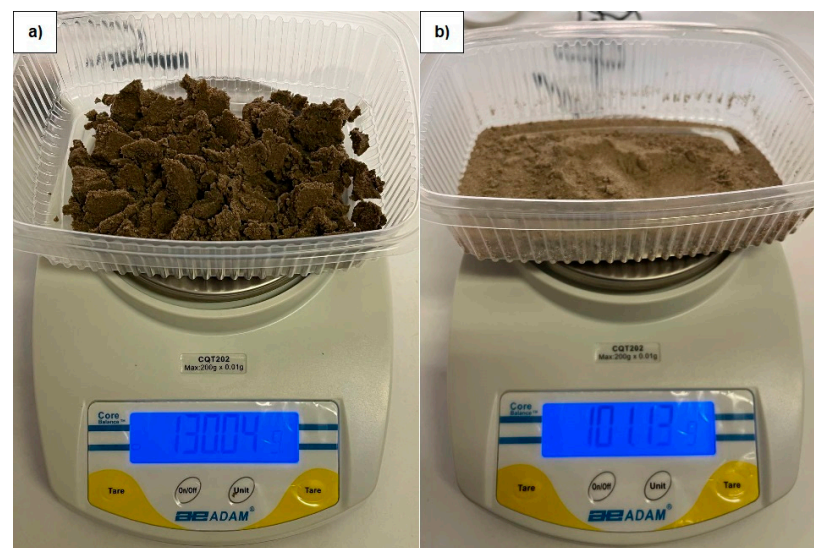


Figure 5. (a) A wet sand sample spread inside the container, weighing 130.00 g. (b) The same sand sample as in Figure 5a but completely dry, weighing about 100.00 g.



Figure 6. View of the inside of a microwave after a sand sample exploded during the drying process.

2.3.3. Sieving Procedure

Eight specific mesh sizes were utilized for the sieving process because these sizes are typically required by the Spanish Coastal Administration: 2 mm, 1 mm, 710 μm , 500 μm , 355 μm , 250 μm , 125 μm , and 62.5 μm (Figure 7).

After a sample weight of approximately 100 g of dried sand was achieved, the sample was put into the upper sieve (2 mm mesh size) of the 20 cm diameter sieve column (Figure 7). Then, the dry sample was mechanically sieved for 10 min (the necessary time proposed by Lopez-Garcia et al. [40]). The sand accumulated in each sieve was weighed to obtain the required values of D_{50} and sorting (σ). These steps were performed for all drying cases.

2.3.4. Calculations to Obtain Sand Size Parameters

The relevant equations from Folk and Ward [22] were used to compute the main granulometric parameters (Equations (1) and (2)), where M_φ represents the estimated mean grain size and σ_φ is the estimated sample standard deviation in phi units. Blott and Pye [17] created an extensive guide for this research. Equation (3) can be applied when converting phi (φ) units to millimeters or vice versa. The equations were developed using the phi unit scale.

$$M_\varphi = \frac{(\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84})}{3}, \quad (1)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{(\varphi_{84} - \varphi_{16})}{4} + \frac{(\varphi_{95} - \varphi_{05})}{6}, \quad (2)$$

$$D(\text{mm}) = 2^{-\varphi}, \quad (3)$$

The drying procedure was performed ten times per beach in order to identify possible variations in the results. However, the results were always the same.

A previous study [39] has already established that muffle drying is the preferred method, when possible, for obtaining realistic results and guaranteeing homogeneity of results. Therefore, the relative error (ϵ), taking the muffle method as the reference, was calculated for D_{50} and the sorting parameters following Equations (4) and (5).

$$\epsilon_{D50} = \left(\frac{D50 \text{ microwave} - D50 \text{ muffle}}{D50 \text{ muffle}} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

$$\epsilon_{\text{sorting}} = \left(\frac{\text{sorting microwave} - \text{sorting muffle}}{\text{sorting muffle}} \right) \cdot 100 \quad (5)$$



Figure 7. Sieving machine with the 8 sieves.

3. Results

The results for the different power levels of the microwave, each one needing different drying times, are shown in Figure 8. The container used for this study during the drying and weighing process (and recommended for similar tests) was a plastic container, 5 cm high, with a 20 × 12 cm area.

As stated previously, the drying procedure for the wet samples from the finer sand beaches commenced with amounts weighing 130 g (Valdelagrana and Camposoto). Regarding La Alcadesa, the wet samples weighed 120 g initially to obtain 100 g of dry sand, because the sand has coarser grains and, thus, easier drainage of interstitial water than in the other two beaches. As shown in Figure 8, the drying process was stopped a few times in order to obtain proof of how dry the sample was and, finally, to determine the minimum time required to obtain a totally dry sample (approximately 100 g of sample). These interruptions were used to remove the humidity inside the microwave and to stir and spread the sand in the container.

All the samples required at most 5 min to be dried at every power level above 462 w. No drying was achieved with 300 w power (even for attempts of 12 min duration). Therefore, this power level was directly rejected.

Tables 1–3 show the average sand sample results of D₅₀ (mm) and sorting (σ) that were obtained by drying five sand samples via muffle and the four different microwave power levels. In addition, the weight (grams) contained in each mesh size of the sieve column and other sand parameters were compared (D₉₅, D₈₄, D₇₅, D₂₅, D₁₆, and D₅).

Table 1. Average results of the different analyses (10 tests for every microwave power) for the Valdelagrana beach samples: (a) the weight (g) for each mesh and its corresponding percentage (%) in the whole sample, and (b) the parameters D₅₀, σ, D₉₅, D₈₄, D₇₅, D₂₅, D₁₆, and D₅. The error (ε) for the results of each power represented takes into account the muffle result as the reference.

(a) Valdelagrana beach												
Mesh size (mm)	Muffle		700 w (4 min)			595 w (4:30 min)			462 w (5 min)			Median value
	g	%	g	%	ε (%)	g	%	ε (%)	g	%	ε (%)	%
2	0.60	0.60	0.09	0.09	85.0	0.11	0.11	81.7	0.12	0.12	80.0	0.23
1	0.23	0.23	0.14	0.14	39.1	0.16	0.16	30.4	0.23	0.23	0.00	0.19
0.710	0.21	0.21	0.10	0.10	52.4	0.13	0.13	38.1	0.20	0.20	4.8	0.16
0.500	0.67	0.67	0.58	0.57	13.4	0.51	0.51	23.9	0.57	0.56	15.0	0.58
0.355	3.12	3.12	3.73	3.63	19.6	3.22	3.20	3.2	3.04	3.01	2.6	3.28
0.250	4.95	4.95	7.06	6.88	42.6	5.95	5.91	20.2	5.52	5.46	11.5	5.87
0.125	28.86	28.84	36.75	35.81	27.3	34.04	33.83	18.0	33.74	33.35	17.0	33.35
0.063	59.24	59.20	52.11	50.77	12.0	54.32	53.99	8.3	55.56	54.92	6.2	55.31
<0.062	2.18	2.18	2.07	2.02	5.1	2.18	2.17	0.0	2.18	2.16	0.0	2.15
Total	100.06		102.63			100.62			101.16			101.12

(b) Valdelagrana beach									
Parameters (mm)	Muffle	700 w (4 min)			595 w (4:30 min)		462 w (5 min)		Median value
	mm	mm	mm	ε (%)	mm	ε (%)	mm	ε (%)	mm
D ₅₀	0.113	0.122		7.96	0.118	4.42	0.117	3.54	0.118
σ	0.080	0.080		0.00	0.079	1.25	0.078	2.50	0.079
D ₉₅	0.351	0.343		2.28	0.339	3.42	0.338	3.70	0.343
D ₈₄	0.223	0.233		4.48	0.228	2.24	0.226	1.35	0.228
D ₇₅	0.184	0.202		9.78	0.195	5.98	0.192	4.35	0.193
D ₅₀	0.113	0.122		7.96	0.118	4.42	0.117	3.54	0.118
D ₂₅	0.087	0.091		4.60	0.089	2.30	0.089	2.30	0.089
D ₁₆	0.077	0.08		3.90	0.079	2.60	0.079	2.60	0.079
D ₅	0.066	0.067		1.52	0.066	0.00	0.066	0.00	0.066

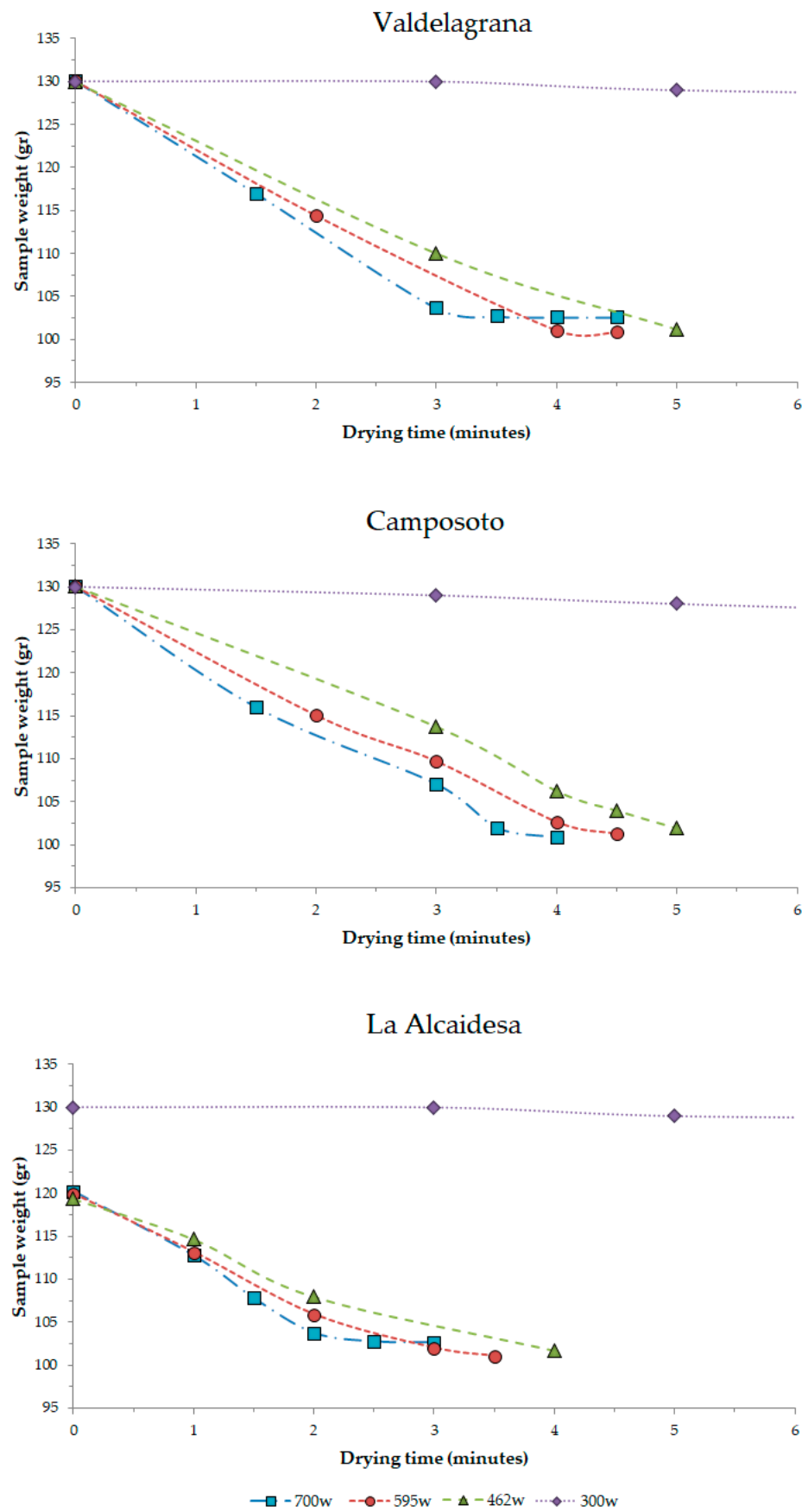


Figure 8. Average results of the sample weight at different power levels versus drying time for Valdelaqrana, Camposoto, and La Alcaidesa beaches.

Table 2. Average results of the different analyses (10 tests for every microwave power) for the Camposoto beach samples: (a) the weight (g) of each mesh and its corresponding % in the whole sample, and (b) the parameters D_{50} , σ , D_{95} , D_{84} , D_{75} , D_{25} , D_{16} , and D_5 . The error (ϵ) for the results of each power represented takes into account the muffle result as the reference.

(a) Camposoto beach												
Mesh size (mm)	Muffle		700 w (4 min)			595 w (4:30 min)			462 w (5 min)			Median value
	g	%	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	%
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.710	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.500	0.20	0.20	0.23	0.23	14.14	0.22	0.22	8.68	0.20	0.20	1.96	0.21
0.355	2.61	2.61	2.66	2.64	1.16	2.70	2.67	2.21	2.68	2.63	0.67	2.64
0.250	25.80	25.81	26.02	25.84	0.10	26.88	26.57	2.94	27.13	26.61	3.09	26.21
0.125	67.24	67.27	68.32	67.84	0.85	68.13	67.34	0.11	69.12	67.79	0.78	67.56
0.063	4.08	4.08	3.47	3.45	15.58	3.23	3.19	21.78	2.82	2.77	32.24	3.37
<0.062	0.03	0.03	0.01	0.01	66.91	0.01	0.01	67.07	0.01	0.01	67.32	0.01
Total	99.96		100.71			101.17			101.96			

(b) Camposoto beach										
Parameters (mm)	Muffle		700 w (4 min)			595 w (4:30 min)		462 w (5 min)		Median value
	mm	mm	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm	
D_{50}	0.210	0.211	0.211	0.48	0.212	0.95	0.212	0.95	0.211	
σ	0.072	0.072	0.072	0.00	0.072	0.00	0.071	1.39	0.072	
D_{95}	0.346	0.346	0.346	0.00	0.347	0.29	0.346	0.00	0.346	
D_{84}	0.301	0.302	0.302	0.33	0.303	0.66	0.303	0.66	0.302	
D_{75}	0.265	0.265	0.265	0.00	0.268	1.13	0.267	0.75	0.266	
D_{50}	0.210	0.211	0.211	0.48	0.212	0.95	0.212	0.95	0.211	
D_{25}	0.164	0.165	0.165	0.61	0.165	0.61	0.166	1.22	0.165	
D_{16}	0.147	0.148	0.148	0.68	0.149	1.36	0.149	1.36	0.148	
D_5	0.127	0.128	0.128	0.79	0.128	0.79	0.129	1.57	0.128	

Table 3. Average results of the different analyses (10 tests for every microwave power) for the La Alcaidesa beach samples: (a) the weight (g) of each mesh and its corresponding % in the whole sample, and (b) the parameters D_{50} , σ , D_{95} , D_{84} , D_{75} , D_{25} , D_{16} , and D_5 . The error (ϵ) for the results of each power represented takes into account the muffle result as the reference.

(a) La Alcaidesa beach												
Mesh size (mm)	Muffle		700 w (4 min)			595 w (4:30 min)			462 w (5 min)			Median value
	g	%	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	%
2	3.90	3.89	3.96	3.85	1.54	3.98	3.94	2.05	3.55	3.50	8.97	3.80
1	30.78	30.68	30.88	30.06	0.32	30.69	30.41	0.29	31.05	30.63	0.88	30.44
0.710	23.65	23.58	24.51	23.86	3.64	23.48	23.26	0.72	24.16	23.83	2.16	23.63
0.500	18.74	18.68	19.64	19.12	4.80	20.52	20.33	9.50	19.83	19.56	5.82	19.42
0.355	13.31	13.27	13.77	13.40	3.46	13.20	13.08	0.83	13.42	13.24	0.83	13.25
0.250	7.44	7.42	7.69	7.48	3.36	7.05	6.99	5.24	7.28	7.18	2.15	7.27
0.125	2.42	2.41	2.29	2.23	5.37	2.01	1.99	16.94	2.08	2.05	14.05	2.17
0.063	0.07	0.07	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	100.0	0.02
<0.062	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.31		102.74			100.93			101.37			

Table 3. Cont.

(b) La Alcaidesa beach								
Parameters	Muffle	700 w (4 min)		595 w (4:30 min)		462 w (5 min)		Median value
(mm)	mm	mm	ε (%)	mm	ε (%)	mm	ε (%)	mm
D ₅₀	0.810	0.804	0.74	0.805	0.62	0.807	0.37	0.81
σ	0.550	0.547	0.55	0.546	0.73	0.542	1.45	0.55
D ₉₅	1.964	1.962	0.10	1.965	0.05	1.951	0.66	1.96
D ₈₄	1.605	1.596	0.56	1.603	0.12	1.592	0.81	1.60
D ₇₅	1.312	1.296	1.22	1.308	0.30	1.298	1.07	1.30
D ₅₀	0.81	0.804	0.74	0.805	0.62	0.807	0.37	0.81
D ₂₅	0.521	0.521	0.00	0.53	1.73	0.527	1.15	0.52
D ₁₆	0.422	0.423	0.24	0.433	2.61	0.429	1.66	0.43
D ₅	0.286	0.289	1.05	0.295	3.15	0.293	2.45	0.29

Consequently, it was also possible to observe how each of the methods differed for each parameter, as well as the errors (ε) that resulted from utilizing the muffle drying method as a reference due to its proven accuracy. In addition, the results of D₅₀, σ and its errors for each beach are represented in Figure 9.

3.1. Valdelagrana Beach Results (Average D₅₀ = 0.11 mm)

The following results were obtained for Valdelagrana beach, with an average D₅₀ of 0.113 mm and σ of 0.080 mm, according to the muffle test. When the 700 w power level was used, the wet sand required 4 min to become completely dry, and the results were D₅₀ = 0.122 mm and σ = 0.080 mm. The power of 595 w required 4 min and 30 s of drying time, and the results were D₅₀ = 0.118 mm and σ = 0.079 mm. The power of 462 w required 5 min of drying time, and the results were D₅₀ = 0.117 mm and σ = 0.078 mm.

Finally, there was an attempt to dry the samples at the lowest level, 300 w. However, during the process of checking the sand during the drying procedure, the sand was determined to be still wet (proved after a drying time of 12 min). Therefore, the 300 w power level was directly rejected as a drying procedure due to the impossibility of sieving wet sand.

3.2. Camposoto Beach Results (Average D₅₀ = 0.21 mm)

The following results were obtained for Camposoto beach, with an average D₅₀ of 0.210 mm and σ = 0.072 mm. When the 700 w power level was used, the wet sand required 4 min to become completely dry, and the results were D₅₀ = 0.211 mm and σ = 0.072 mm. For the 595 w power level, a drying time of 4 min and 30 s was required, and the results were D₅₀ = 0.212 mm and σ = 0.072 mm. The power of 462 w required 5 min of drying time, and the results were D₅₀ = 0.212 mm and σ = 0.071 mm.

3.3. La Alcaidesa Beach Results (Average D₅₀ = 0.81 mm)

The following results were obtained for La Alcaidesa beach, with an average D₅₀ of 0.810 mm and σ = 0.550 mm. When the 700 w power level was used, the wet sand required 3 min to become completely dry, and the results were D₅₀ = 0.804 mm and σ = 0.547 mm. For the 595 w power level, a drying time of 3 min and 30 s was required, and the results were D₅₀ = 0.805 mm and σ = 0.546 mm. The power of 462 w required 4 min of drying time, and the results were D₅₀ = 0.807 mm and σ = 0.542 mm.

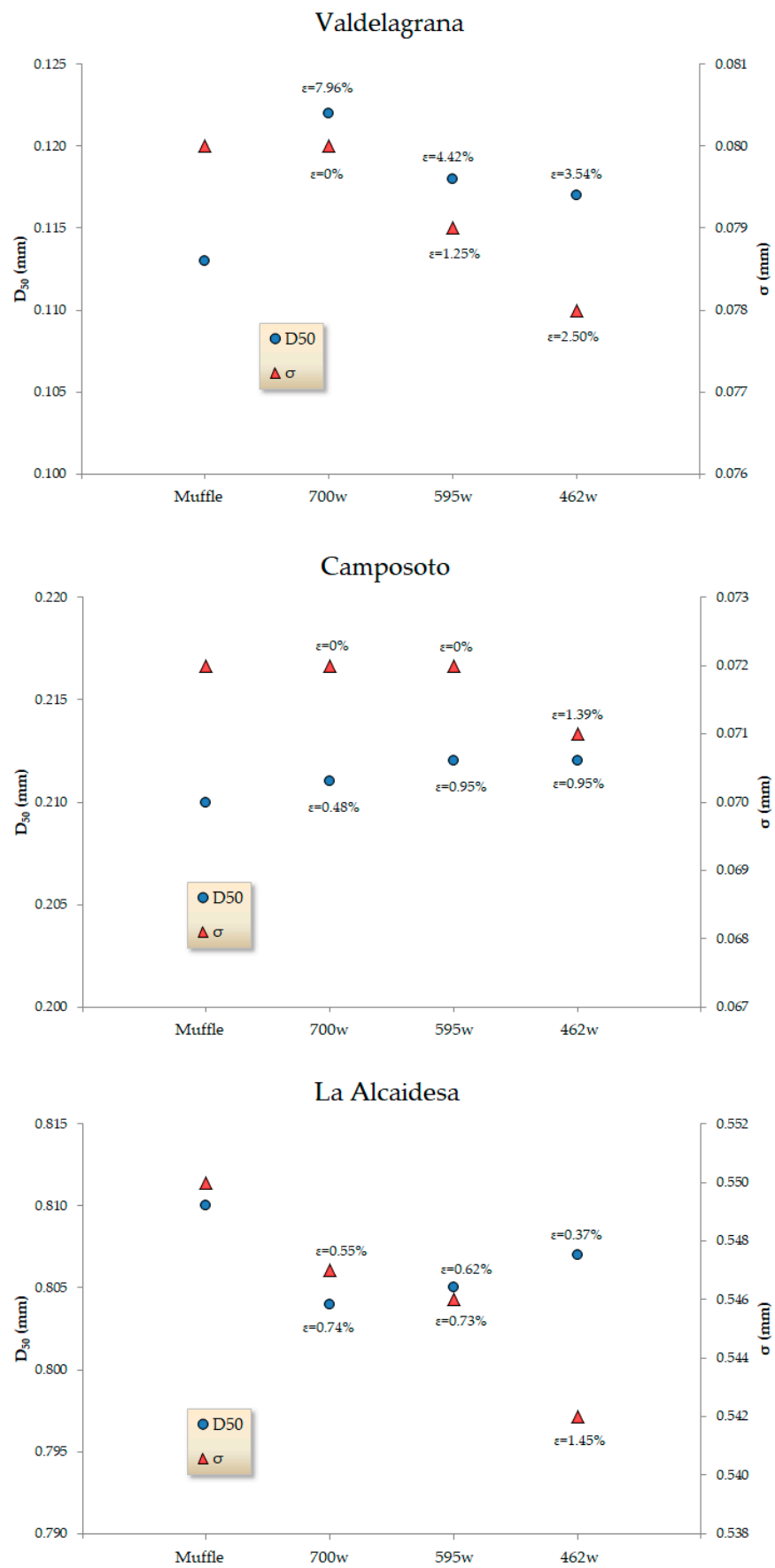


Figure 9. Parameters D_{50} and σ , with the error (ϵ) for each microwave power, taking the muffle result as the reference (for Valdellagrana, Camposoto, and La Alcaidesa beaches).

4. Discussion

The horizontal lines in Figure 8 indicate that the weight of the sample remains constant and, therefore, is already completely dry. The drying duration did not change for the Valdelagrana and Camposoto beaches sand samples, ranging between 4 and 5 min for these beaches in the Gulf of Cadiz, with a D_{50} of 0.11 and 0.21 mm, respectively. However, the drying duration of the La Alcaidesa sand samples (D_{50} about 0.81 mm) was 1 min less for each microwave power (ranging from 3 to 4 min). Therefore, we can deduce that coarser grains (with easier drainage of interstitial water) demand less drying duration than finer sands. Likewise, the error was 10 times larger for small sand sizes (3.5% for $D_{50} = 0.11$ mm versus 0.37% for $D_{50} = 0.81$ mm).

It can also be observed that the error decreases with the duration of sieving. For example, in the case of Valdelagrana beach, the error in the determination of D_{50} decreases from 8% to 3.5% when we extend the experiment from 4 to 5 min. Regarding the sorting, the differences are negligible.

Finally, it can be established that the results obtained using the microwave always show slightly higher differences, although not significant, compared with drying with a muffle oven. Therefore, the use of microwaves may be permitted on board a dredger as long as the following are adhered to:

- A light container with a wide base and low height is used;
- The sand is spread uniformly;
- Excess non-interstitial water is removed;
- The power used is greater than 500 w and less than 800 w;
- An intermediate interruption is made to allow the humidity generated by drying to escape, to dry the interior walls of the microwave with absorbent paper, and to stir and spread the sand;

The drying duration is at least 5 min.

5. Conclusions

The most used parameters for sand size characterization are median (D_{50}) and sorting (σ). When beach nourishment is performed, there must be a sand control on board the dredge, right after the sand extraction is finished and previous to the pouring at the beach. It is crucial that the D_{50} and σ parameters are accurately determined to check if the sand dredged on the sandbank or borrow site is compatible with the native beach.

This checking analysis must be carried out in a limited time period, such as the duration of travel from the borrow site to the pouring zone, which is usually less than 1 h. Moreover, as a muffle oven cannot be used on board a ship because of its dimensions (and weight) and the instability of electric tension, a microwave is usually used instead. However, until now, the necessary time and power of the microwave procedure for drying sand have not been determined. Furthermore, in order to avoid sand explosion inside the microwave and to obtain granulometric parameters as accurately as possible, no procedure had been specified.

Therefore, a series of tests were carried out consisting of multiple analyses with sand samples from different beaches (and consequently different sizes) and microwave drying at various power levels and durations. These microwave results were compared with muffle drying results, considering muffle methodology as the reference to obtain errors in the microwave procedure.

The error results for D_{50} are less than 3.5% when the drying duration is at least 5 min, which is completely acceptable for beach nourishment purposes. Regarding the power level, 462 w is the ideal power while lower powers, around 300 w, did not achieve complete drying despite durations close to 15 min. Moreover, the sorting (σ) parameter error was absolutely negligible. Finally, drying duration and error were lower for beaches with coarser sand.

Thus, an easy-to-use methodology, generalizable to any other coast, was designed for fast and accurate sand drying.

Among the guidelines provided, it would be worth highlighting the use of a light and wide container with a low height, an intermediate interruption, and a minimum duration of 5 min of drying time.

Author Contributions: Conceptualization, P.L.-G. and J.J.M.-P.; methodology, P.L.-G. and J.J.M.-P.; software, A.C.-d.-V. and F.C.-d.-V.; validation, J.J.M.-P. and B.J.-A.; formal analysis, P.L.-G. and P.D.-C.; investigation, P.L.-G., A.C.-d.-V., B.J.-A., F.C.-d.-V., P.D.-C. and J.J.M.-P.; resources, P.D.-C.; data curation, A.C.-d.-V.; writing—original draft preparation, P.L.-G.; writing—review and editing, A.C.-d.-V., F.C.-d.-V., P.D.-C. and J.R.-C.; visualization, J.R.-C. and P.D.-C.; supervision, J.J.M.-P., A.C.-d.-V., F.C.-d.-V. and B.J.-A.; project administration, B.J.-A.; funding acquisition, J.J.M.-P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was partially funded by CEIMAR and by Junta de Andalucía and European Union (Recovery, Transformation and Resilience Plan), grant number PCM_00124.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: All the data are available in the tables included in the article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

References

- Pranzini, E.; Anfuso, G.; Muñoz-Perez, J.J. A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coast. Eng.* **2018**, *139*, 32–35. [CrossRef]
- Saponieri, A.; Valentini, N.; Di Risio, M.; Pasquali, D.; Damiani, L. Laboratory investigation on the evolution of a sandy beach nourishment protected by a mixed soft-hard system. *Water* **2018**, *10*, 1171. [CrossRef]
- U.S. Army Corps of Engineers. *Coastal Engineering Manual-Part III*. 2002. Available online: <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/u43544q/> (accessed on 30 April 2002).
- Bernabeu Tello, A.M.; Santamaría, R.M.; Pascual, C.V. An equilibrium profile model for tidal environments. *Sci. Mar.* **2002**, *66*, 325–335. [CrossRef]
- Singh, M.; Singh, I.B.; Müller, G. Sediment characteristics and transportation dynamics of the Ganga River. *Geomorphology* **2007**, *86*, 144–175. [CrossRef]
- Fenster, M.S.; Dolan, R.; Smith, J.J. Grain-size distributions and coastal morphodynamics along the southern Maryland and Virginia barrier islands. *Sedimentology* **2016**, *63*, 809–823. [CrossRef]
- Remo, J.W.F.; Heine, R.A.; Ickes, B.S. Particle size distribution of main-channel-bed sediments along the upper Mississippi River, USA. *Geomorphology* **2016**, *264*, 118–131. [CrossRef]
- Grottoli, E.; Bertoni, D.; Ciavola, P. Short- and medium-term response to storms on three Mediterranean coarse-grained beaches. *Geomorphology* **2017**, *295*, 738–748. [CrossRef]
- Hallin, C.; Huisman, B.J.A.; Larson, M.; Walstra, D.J.R.; Hanson, H. Impact of sediment supply on decadal-scale dune evolution—Analysis and modelling of the Kennemer dunes in the Netherlands. *Geomorphology* **2019**, *337*, 94–110. [CrossRef]
- Steidtmann, J.R. Size-density sorting of sand-size spheres during deposition from bedload transport and implications concerning hydraulic equivalence. *Sedimentology* **1982**, *29*, 877–883. [CrossRef]
- Roman-Sierra, J.; Navarro, M.; Muñoz-Perez, J.J.; Gomez-Pina, G. Turbidity and Other Effects Resulting from Trafalgar Sandbank Dredging and Palmar Beach Nourishment. *J. Waterw. Port Coast. Ocean. Eng.* **2011**, *137*, 332–343. [CrossRef]
- de Villar, A.C.; Gómez-Pina, G.; Muñoz-Pérez, J.J.; Contreras, F.; López-García, P.; Ruiz-Ortiz, V. New design parameters for biparabolic beach profiles (SW Cadiz, Spain). *Rev. De La Construcción* **2019**, *18*, 432–444. [CrossRef]
- Bascom, W.N. The relationship between sand size and beach-face slope. *Trans. Am. Geophys. Union* **1951**, *32*, 866. [CrossRef]
- Larson, M.; Kraus, N.C. Mathematical modeling of the fate of beach fill. *Coast. Eng.* **1991**, *16*, 83–114. [CrossRef]
- Aguilera-Vidal, M.; Muñoz-Perez, J.J.; Contreras, A.; Contreras, F.; Lopez-Garcia, P.; Jigena, B. Increase in the Erosion Rate Due to the Impact of Climate Change on Sea Level Rise: Victoria Beach, a Case Study. *J. Mar. Sci. Eng.* **2022**, *10*, 1912. [CrossRef]
- Mendes, D.; Pais-Barbosa, J.; Baptista, P.; Silva, P.A.; Bernardes, C.; Pinto, C. Beach Response to a Shoreface Nourishment (Aveiro, Portugal). *J. Mar. Sci. Eng.* **2021**, *9*, 1112. [CrossRef]
- Blott, S.J.; Pye, K. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landf.* **2001**, *26*, 1237–1248. [CrossRef]
- Kuang, C.; Han, X.; Zhang, J.; Zou, Q.; Dong, B. Morphodynamic Evolution of a Nourished Beach with Artificial Sandbars: Field Observations and Numerical Modeling. *J. Mar. Sci. Eng.* **2021**, *9*, 245. [CrossRef]

19. Romagnoli, C.; Sistilli, F.; Cantelli, L.; Aguzzi, M.; De Nigris, N.; Morelli, M.; Gaeta, M.G.; Archetti, R. Beach Monitoring and Morphological Response in the Presence of Coastal Defense Strategies at Riccione (Italy). *J. Mar. Sci. Eng.* **2021**, *9*, 851. [[CrossRef](#)]
20. Li, Y.; Zhang, C.; Cai, Y.; Xie, M.; Qi, H.; Wang, Y. Wave Dissipation and Sediment Transport Patterns during Shoreface Nourishment towards Equilibrium. *J. Mar. Sci. Eng.* **2021**, *9*, 535. [[CrossRef](#)]
21. U.S. Army Corps of Engineers. *Shore Protection Manual*; U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Vicksburg, MI, USA, 1984.
22. Folk, R.L.; Ward, W.C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Res.* **1957**, *27*, 3–26. [[CrossRef](#)]
23. Folk, R.L. *Petrology of Sedimentary Rocks*; Hemphill Publishing Company: Austin, TX, USA, 1974.
24. Krumbein, W.; Pettijohn, F. *Manual of Sedimentary Petrography*; D. Appleton-Century Company, Inc.: New York, NY, USA, 1938; p. 549.
25. Eberhard, L.; Schindler, H.J.; Hellmann, D.; Schmitter, M.; Rammelsberg, P.; Giannakopoulos, N.N. Comparison of particle-size distributions determined by optical scanning and by sieving in the assessment of masticatory performance. *J. Oral Rehabil.* **2012**, *39*, 338–348. [[CrossRef](#)]
26. Orrú, C.; Chavarrías, V.; Uijtewaal, W.S.J.; Blom, A. Image analysis for measuring stratigraphy in sand-gravel laboratory experiments. *Earth Surf. Dyn. Discuss.* **2013**, *1*, 973–1018. [[CrossRef](#)]
27. Shillabeer, N.; Hart, B.; Riddle, A.M. The use of a mathematical model to compare particle size data derived by dry-sieving and laser analysis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **1992**, *35*, 105–111. [[CrossRef](#)]
28. Pope, L.; Ward, C. *Manual on Test Sieving Methods*; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 1998.
29. Luisa Martinez, M.; Silva, R.; Lithgow, D.; Mendoza, E.; Flores, P.; Martínez, R.; Cruz, C. Human Impact on Coastal Resilience along the Coast of Veracruz, Mexico. *J. Coast. Res.* **2017**, *77*, 143–153. [[CrossRef](#)]
30. Austin, L.G.; Shah, I. A method for inter-conversion of microtrac and sieve size distributions. *Powder Technol.* **1983**, *35*, 271–278. [[CrossRef](#)]
31. Celia Magno, M.; Venti, F.; Bergamin, L.; Pierfranceschi, G.; Romano, E.; Gaglianone, G. A comparison between Laser Granulometer and Sedigraph in grain size analysis of marine sediments. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* **2018**, *128*, 231–236. [[CrossRef](#)]
32. Blott, S.J.; Pye, K. Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: An experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. *Sedimentology* **2006**, *53*, 671–685. [[CrossRef](#)]
33. Konert, M.; Vandenberghe, J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: A solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology* **1997**, *44*, 523–535. [[CrossRef](#)]
34. Pouillet, P.; Muñoz-Perez, J.J.; Lopez, P.; García-Lopez, S.; Martell, R.; Silva, R.; Moreno, L. Sand size variability inside the hopper of a trailing suction dredger for beach nourishment purpose. *Geo-Mar. Lett.* **2019**, *39*, 513–520. [[CrossRef](#)]
35. Pouillet, P.; Muñoz-Perez, J.J.; Poortvliet, G.; Mera, J.; Contreras, A.; Lopez, P. Influence of different sieving methods on estimation of sand size parameters. *Water* **2019**, *11*, 879. [[CrossRef](#)]
36. Grosskopf, W.G.; Kraus, N.C. *Guidelines for Surveying Beach Nourishment Projects*; U.S. Army Engineering Water Experiment Station: Vicksburg, MI, USA, 1993.
37. Syvitski, J.P.M. *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1991. [[CrossRef](#)]
38. Lund-Hansen, L.C.; Oehmig, R. Comparing sieve and sedimentation balance analysis of beach, lake and eolian sediments using log-hyperbolic parameters. *Mar. Geol.* **1992**, *107*, 139–147. [[CrossRef](#)]
39. Román-Sierra, J.; Muñoz-perez, J.J.; Navarro-Pons, M. Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands. *Sedimentology* **2013**, *60*, 1484–1497. [[CrossRef](#)]
40. Lopez-Garcia, P.; Muñoz-Perez, J.J.; Contreras, A.; Vidal, J.; Jigena, B.; Santos, J.J.; Romero, J.; Contreras, F. Error on the Estimation of Sand Size Parameters When Using Small Diameter Sieves and a Solution. *Front. Mar. Sci.* **2021**, *8*, 738479. [[CrossRef](#)]
41. Mizutani, S. A theoretical and experimental consideration of accuracy of sieving analysis. *J. Earth Sci.* **1963**, *11*, 1–27.
42. López-García, P.; Gómez-Enri, J.; Muñoz-Pérez, J.J. Accuracy assessment of wave data from altimeter near the coast. *Ocean Eng.* **2019**, *178*, 229–232. [[CrossRef](#)]
43. Santos-Vendoiro, J.J.; Muñoz-Perez, J.J.; Lopez-García, P.; Jodar, J.M.; Mera, J.; Contreras, A.; Contreras, F.; Jigena, B. Evolution of Sediment Parameters after a Beach Nourishment. *Land* **2021**, *10*, 914. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.