

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/305512962>

MEJORAMIENTO DE SUELOS USANDO EXPLOSIVOS

Conference Paper · August 2009

CITATIONS

0

READS

1,533

1 author:



[Gaston Laporte](#)

INSUMA geotechnical consultants

12 PUBLICATIONS 5 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



XIII Congreso Nacional de Geotecnia CONGEO 2018 Costa Rica [View project](#)

MEJORAMIENTO DE SUELOS USANDO EXPLOSIVOS

Gastón Laporte Molina¹

Resumen

En la mayoría de las sitios las condiciones del subsuelo marino, así como, los rellenos sin compactación (rellenos hidráulicos) para habilitar grandes áreas aptas para construcción, exigen realizar un mejoramiento especialmente eficiente para suelos de comportamiento granular (arenas y limos).

Existen dos métodos, la voladura y la vibrocompactación, de los cuales, el primero es mucho más eficiente por aplicar una energía mucho mayor, sin embargo, tiene el problema de afectar mucho más el medio adyacente.

En el caso de rellenos sobre el lecho marino, como se procede en el caso de rompeolas y otras obras marítimas y portuarias, los análisis de licuefacción realizados detectan que usualmente se pueden presentar, bajo los efectos de un sismo, problemas de licuefacción, sin embargo, muchas veces no se considera que la sobrecarga se irá aplicando lentamente conforme se vayan construyendo los rellenos, de modo que, el subsuelo se irá autocompactando y desarrollando resistencia para soportar las sobrecargas siguientes. Al final del proceso constructivo ya los asentamientos se habrán completado, la densidad se habrá aumentado, lo que aumentará el factor de seguridad a la licuefacción.

Un criterio similar se debe seguir para las zonas de recuperación donde se ubican los rellenos que soportan a los edificios de la infraestructura de los desarrollos portuarios. En este caso probablemente los rellenos sean de materiales más finos y livianos, por lo tanto, es más importante considerar un mejoramiento o densificación de las capas arenosas del subsuelo previo a la construcción de los rellenos.

Para el cuerpo de los rellenos contruidos con un suelo arenoso o gravilla fina, es posible investigarlos usando SPT pero si el material incluye mucha cantidad de bloques duros, no es posible usar el SPT, por lo tanto, el control solo se puede realizar sobre el nivel del agua usando ensayos de compactación mediante un anillo de un diámetro mínimo de 0.60m, comparando la densidad de campo con las condiciones suelta y compacta del material, aplicando el criterio de densidad relativa, en lugar del % de compactación de Proctor.

Las condiciones más suelta y más densa del material granular se debe determinar en el laboratorio y considerando que no se cuenta con un valor N_{spt} para prevenir la licuefacción, un criterio alternativo es obtener una densidad relativa igual o mayor a 60%.

El trabajo presenta un resumen del marco teórico para tratar el tema de la compactación de suelos granulares usando explosivos, presentando las ecuaciones correspondientes y comparando con los resultados obtenidos en el sitio, mediante ensayos SPT antes y después del tratamiento.

¹ Socio y consultor INSUMA S A, Catedrático UCR, Apdo 623-2050, e-mail: glaporte@insuma.co.cr

Abstract

In the majority of the sites the conditions of the marine subsoil, as well as, the fillings without compaction (hydraulics fillings) to qualify great areas apt for construction, demand to realise an especially efficient improvement for grounds of granular behavior (sands and silts).

Two methods exist, the blast and the vibrocompaction, of which, the first one is much more efficient because of the much greater energy applied, nevertheless, it has the problem to affect the surroundings a lot more.

In the case of marine fillings, as it is commonly used in cases of breakwater and other marine and harbor works, the realised analyses of liquefaction detect that usually they are possible to appear, under the effects of an earthquake, problems of liquefaction, nevertheless, often is not considered that the overload will be applied slowly as the fillings are constructed, so that, the subsoil will be autocompacting and developing resistance to support the following overloads. At the end of the constructive process already the settlements will have been completed, the density will have been increased, which will increase the factor of safety to the liquefaction. A similar criterion should be follow for the zones of recovery where the fillings are located to support the buildings of the infrastructure of the harbor developments. In this case probably the fillings are of finer and lighter materials, therefore, it is more important to consider an improvement or densification of the sandy layers of the subsoil previous to the construction of the fillings.

For the mass of the fillings constructed with a sandy ground or fine gravel, it is possible also to use the SPT but if the material includes great amount of hard blocks, is not possible to use the SPT, therefore, the control can only be realised on the level of the water using tests of compaction by means of a ring of a minimum diameter of 0.60m, comparing the density of field with the conditions loosen and compacted of the material, applying the criterion of relative density, instead of Proctor's compaction percent. The conditions more loose and more dense of the granular material are must be determine in the laboratory and considering that there is no N_{spt} value to prevent the liquefaction, an alternative criterion is to obtain a relative density equal or greater to 60%. The work presents a summary of the theoretical principles to deal with the topic of compaction of granular soils using explosives, displaying the corresponding equations and comparing with the results obtained in the site, by means of SPT tests before and after the treatment.

INTRODUCCIÓN

PRINCIPIOS TEÓRICOS

Aplicabilidad

La compactación con explosivos tiende a restringirse a suelos granulares poco densos, con menos del 20% de limos o 5 % de arcillas. Los resultados en cuanto a compactación son generalmente muy buenos, por ejemplo la densidad relativa de una arena floja puede ser incrementada en un 15-30%. (Bielza A. 1999).

Sin embargo, la presencia de lentejones finos o pequeños niveles de arcilla blanda en las arenas reducen de forma importante la eficacia del tratamiento con voladuras. Según Uriel, A. (en [2]) en estas situaciones se ha comprobado que se alcanza una mayor uniformidad de resistencias tras el tratamiento, pero no mejoran los valores mínimos de la resistencia.

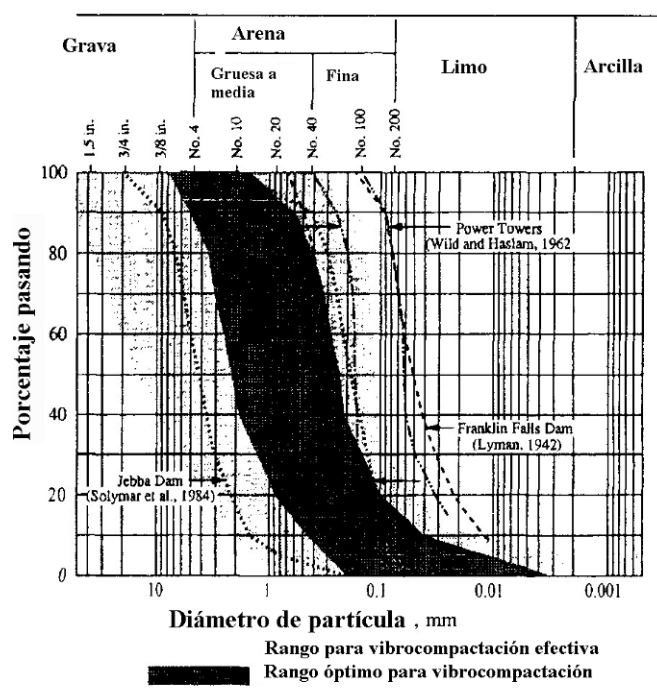


Figura 1. Rangos de graduación del suelo para sitios con compactación explosiva (modificado de Mitchell, J.K. & Narin van Court, W.A.1999)].

Diseño de voladuras

Los resultados de un tratamiento de compactación del terreno por explosivos están enormemente relacionados con el diseño de las voladuras. Por ello, aunque cada proyecto de compactación por explosivos requiere un estudio particular, según las características del terreno y condiciones específicas del emplazamiento, el diseño preliminar debe incluir los siguientes puntos básicos (López en [2]):

- Procedimiento de perforación y carga de los barrenos.
- Tipos de explosivos a utilizar.
- Densidad de carga necesaria (espaciamiento entre barrenos, profundidad, cargas de explosivos, etc.).
- Número de seccionado de cargas dentro de cada barreno y retardos entre cargas.
- Tamaño de las voladuras y tiempo transcurrido entre pegas sucesivas.

- Efecto de las voladuras sobre las estructuras existentes.
- Efectividad de las voladuras y criterios de aceptabilidad de las mismas.
- Efectos de envejecimiento sobre las arenas.

Son realmente útiles ensayos en barrenos con cargas aisladas o en pequeñas mallas con el fin de determinar, además del resto de los parámetros enumerados, la cantidad de energía apropiada necesaria para alcanzar el grado de compactación requerido para la obra específica.

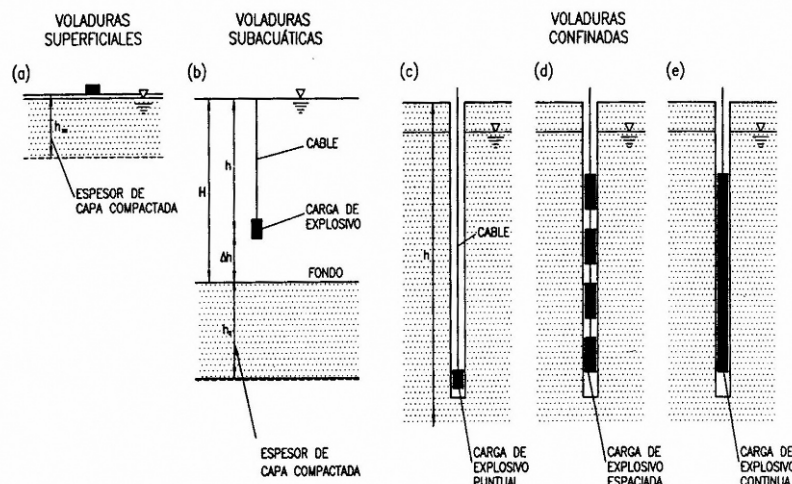


Figura 2. Clasificación de las voladuras en función de la forma de las cargas de explosivo: a) voladuras superficiales; b) voladuras subacuáticas; c) voladuras confinadas, carga de explosivo puntual; d) voladuras confinadas, carga de explosivo espaciada; e) voladuras confinadas, carga de explosivo continua (modificado de [2]).

En el caso de voladuras confinadas, las cargas de explosivo suelen colocarse en barrenos entubados de profundidad hasta donde se quiera colocar las mismas. Estos barrenos se disponen en planta según una malla regular, en general curada o triangular. Como ya se ha visto anteriormente en la figura 2, las cargas pueden colocarse individualmente, seccionadas o de forma continua dentro de cada perforación. En este último caso las cargas no se hacen detonar todas a la vez, sino sucesivamente, con microrretardos. Esto es más eficaz que la detonación de una sola carga o de varias cargas simultáneas (Uriel, A. en [2]).

En la práctica, las formulaciones necesarias para el cálculo y diseño de la cantidad de explosivo, el radio de acción de la carga efectiva, el espesor de la carga efectiva, el espesor de la capa compactada, la altura por encima de la capa a tratar, o profundidad, a la que debe ser suspendida la carga, y el radio del dren de arena creado, se basan en propuestas de Ivanov y experiencias de Dembicki y Zadroga (consultado de [2]):

- Voladuras superficiales (Figura 2 (a))

Radio R_{es} (m) de acción de la carga efectiva

$$R_{es} = (0,5/0,6) \cdot k_{1s} \sqrt[3]{Q}, \quad k_{1s} = 2,5 - 3,0 \text{ (Ivanov, 1983),}$$

siendo Q (kg) la masa de la carga concentrada.

Espesor h_{zs} (m) de la capa compactada

$$h_{zs} = 1,2 \cdot \sqrt[3]{Q}$$

La compactación por voladuras superficiales es menos eficaz que si se emplean voladuras subacuáticas o confinadas (Dembicki y Zadroga en [2]).

- Voladuras subacuáticas (Figura 2 (b))

Masa Q (kg) de la carga concentrada

$$Q = 0,10 \cdot H^{2,46}$$

donde H (m) es la altura de agua.

Radio R_e (m) de acción de la carga efectiva

$$R_e = k_1 \cdot \sqrt[3]{Q} \quad k_1 = 2,5 - 3,0$$

Espesor h_z (m) de la capa compactada

$$h_z = k_2 \cdot \sqrt[3]{Q} \quad k_2 = 4,5 - 5,0$$

Altura Δh (m) a la que la carga debe ser suspendida desde la superficie de la capa de terreno a compactar

$$\Delta h = k_3 \cdot (\sqrt[3]{Q})^{1,95} \quad k_3 = 0,355$$

- Voladuras confinadas y cargas concentradas (Figura 2 (c))

Masa Q_1 (kg) de la carga concentrada

$$Q_1 = 0,055 \cdot h^3$$

siendo h (m) la profundidad bajo la superficie del terreno de la carga concentrada.

Radio R_{e1} (m) de acción de la carga efectiva

$$R_{e1} = k_4 \cdot \sqrt[3]{Q_1} \quad k_4 = 2,5 - 3,0$$

- Voladuras confinadas y cargas continuas (Figura 2 (e))

Radio R_{e2} (m) de acción de la carga efectiva

$$R_{e2} = 0,71 \cdot k_5 \cdot \sqrt{Q_2} \quad k_5 = 2,5 - 3,0$$

donde Q_2 es la masa de explosivo por unidad de longitud unitaria de la carga de explosivo (kg/m).

Radio R_p (m) del dren de arena

$$R_p = k_p \cdot \sqrt{Q_2} \quad k_p = 0,2 - 0,35$$

Los drenes de arena son creados por detonación de cargas confinadas continuas dentro de un suelo arcilloso, previamente cubierto por un relleno de arena, con el fin de acelerar la consolidación del terreno original y mejorar sus características resistentes. En la figura 3 se recogen las distintas fases de esta técnica, descritas por Dembicki y Zadroga (consultado en [2]) en una aplicación para unos depósitos de almacenamiento de mineral en el puerto de Gdansk (Polonia).

Radio R_{ep} (m) de acción de la carga efectiva

$$R_{ep} = k_6 \cdot \sqrt{Q_2} \quad k_6 = 3,5 - 4,5$$

Los valores exactos de los coeficientes k_1 a k_6 pueden determinarse individualmente por medio de ensayos *in situ* en el terreno a tratar.

Considerando como carga esférica aquella en la que la longitud es menor o igual a 6 veces el diámetro de la misma, pueden determinarse el peso de una carga esférica equivalente a una carga cilíndrica o en columna (McLaghlin & Person consultado en [2]). Esta cantidad de carga concentrada equivalente puede introducirse en la fórmula de Ivanov para determinar la profundidad adecuada de enterramiento de la parte superior de la columna (Narin van Court y Mitchell en [2]).

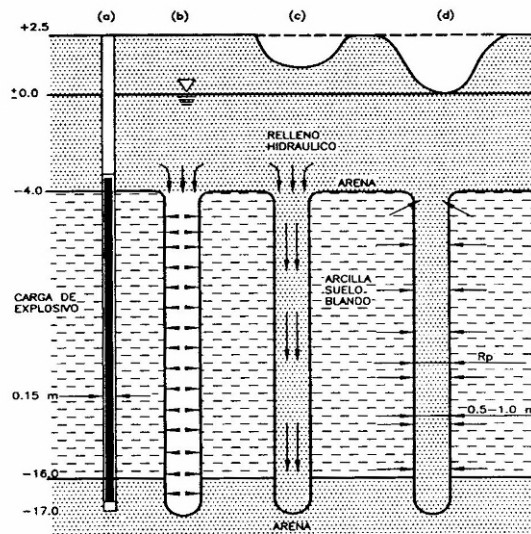


Figura 3. Fases de los drenes de arena formados por la detonación de cargas confinadas continuas (modificado de [2]).

Mitchell, J.K. & Narin van Court, W.A.1999, en la publicación “Soil Improvement by Blasting”, presenta una serie de ecuaciones para determinar la carga a usar para el mejoramiento de los suelos:

$$\left. \begin{aligned} HN &= w^{1/3} / R \text{ (Hueco individual)} \\ HN &= 2w^{1/3} / S \text{ (Patrón)} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{Número de Hopkinson} \\ &kg^{1/3} / m \end{aligned}$$

$NW = w^{1/2} / (Rh_0^{1/2})$ (Hueco individual) $NW = 2w^{1/2} / (Sh_0^{1/2})$ (Patrón)	}	Peso normalizado $kg^{1/2} / m^{3/2}$
$PF = 1000 \cdot w / (\pi h_0 R^2)$ (Hueco individual) $PF = 1000 \cdot w / (S^2 h_0)$ (Patrón cuadrado) $PF = 1000 \cdot w / (0,875 \cdot S^2 h_0)$ (Patrón triangular)	}	Factor de Potencia g/m^3

w = Peso específico en kg

S = espaciamiento final del patrón en m

R = distancia desde el centro de la carga en m

h_0 = Profundidad de colocación de carga en m

Valores recomendados:

PF: $40 < PF < 80 \text{ g/m}^3$ (criterio experimental)

HN: $0,2 < HN < 0,5 \text{ kg}^{1/3} / m$ (criterio experimental)

$0,5 < HN < 1,2 \text{ kg}^{1/3} / m$ (para cargas no concentradas)

NW: $0,3 < NW < 0,6 \text{ kg}^{1/2} / m^{3/2}$

$0,4 < NW < 0,7 \text{ kg}^{1/2} / m^{3/2}$ (mejor rango)

Para evitar formación de cráteres en superficie, se puede utilizar:

$$H_b = 1,48 \cdot Q^{1/2}$$

Con.: H_b = distancia mínima a la superficie en m

Q = carga explosiva en kg/m

$$H_t = 2,63 \cdot C^{1/3}$$

Con: H_t = distancia apropiada para cargas concentradas en m

C = peso de la carga concentrada en kg

Es importante señalar dos aspectos a tener en cuenta en la determinación de la profundidad de colocación de las cargas (Narin van Court y Mitchell, 1994):

- Deben ser colocadas a una profundidad adecuada que asegure la compactación del terreno en todo su espesor.
- Dicha profundidad debe evitar la formación de cráteres.

Uriel, A. (consultado en [2]), basándose en numerosos ensayos en diferentes obras, da una profundidad efectiva para arenas flojas de u 50% superior a la posición de las cargas más profundas. En experiencias publicadas se han llegado a detonar cargas de más de 30 kg a profundidades de más de 40 m. Al aumentar la densidad disminuye la profundidad del efecto de compactación eficaz a un rango entre 1,2 y 1,3 la profundidad de la carga, figura 4.

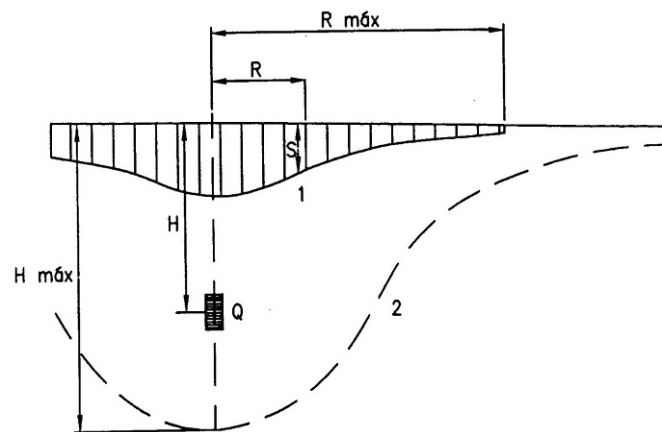


Figura 4. Cubeta de asientos (1) y zona de consolidación (2) al dispararse una carga de explosivo enterrada (modificado de [2]).

Asientos asociados a la compactación

La densificación del terreno, y su consecuente reducción de volumen, da lugar a asientos según una depresión en torno al eje vertical que contiene las cargas. La figura 4 anterior representa la típica curva de asientos (1), con un valor máximo S , la distancia máxima $R_{máx}$ de la zona de influencia del asiento producido, la distancia R hasta el punto de inflexión de la curva de asientos, que se considera como radio de acción de cada una de las cargas o grupo de cargas en una vertical, y la forma y extensión (2) de la zona de compactación efectiva. El espaciamiento entre cargas en planta debe ser igual al doble del radio de acción, de modo que las curvas o perfiles de asiento se solapen de forma conveniente (Uriel, A., en [2]).

En cuanto a las expresiones empíricas, si se define como zona de influencia aquella parte de la superficie cuyo asiento es mayor de 1 cm, se tiene que el radio máximo de esta zona es (López Jimeno en [2]):

$$R_{máx} = K \cdot Q^{1/3}$$

siendo:

Q = Carga de explosivo (kg)

K = Coeficiente adimensional, recogido en el cuadro 1, en función de los distintos tipos de suelos.

Cuadro 1: Coeficientes adimensionales en función del tipo de suelo [2].

TIPO DE SUELO	DENSIDAD	K
Arena fina	0-0,2	25-15
	0,3-0,4	8-7
	>0,4	>7
Arena media	0,3-0,4	8-7
	>0,4	>6

Los asientos que experimentan los terrenos tratados pueden llegar a ser muy importante.

Otras consideraciones para el dimensionado de las cargas

Existen relaciones empíricas entre las presiones de la onda de choque, la carga explosiva y la distancia al punto de detonación, por ejemplo las de Mitchell (en [2]), que permiten realizar estudios comparativos entre diferentes casos. Pero sucede que hay muchas ambigüedades referidas al tamaño de cada carga, su concentración en el barreno, el orden de detonación y la forma de la malla para las perforaciones, y el intervalo de detonaciones sucesivas. Esto impide que, según Romana (en [2]), pueda hablarse de reglas generales.

Desde el punto de vista teórico, Barendsen y Kok (en [2]) realizaron un análisis dimensional y propusieron un *Número de Hopkinson* para la licuefacción, representado en la figura 5, en función del valor del exceso de presión intersticial, y cuyas fórmulas son las siguientes:

- Para licuefacción total:

$$Q^{1/3} / R = 0,17 \text{ ó más}$$

siendo:

Q = Peso equivalente del explosivo (kg)

R = Distancia entre cargas (m)

- Para evitar la licuefacción:

$$Q^{1/3} / R = 0,12 \text{ ó menos}$$

Este número se utiliza como parámetro determinante y en función de él se estudia el coeficiente de movilidad cíclica (que vale 1 para la licuefacción), figura 5 y 6, y el asiento relativo.

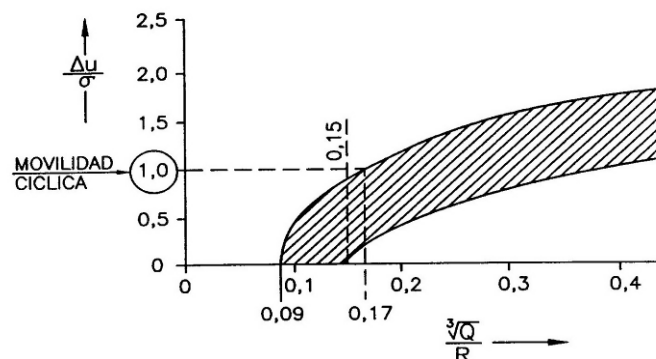


Figura 5. Relación entre la energía escalada o *Número de Hopkinson* (Q peso de explosivo detonado, R distancia al punto de detonación) y el exceso de presión intersticial inducido (modificado de [2]).

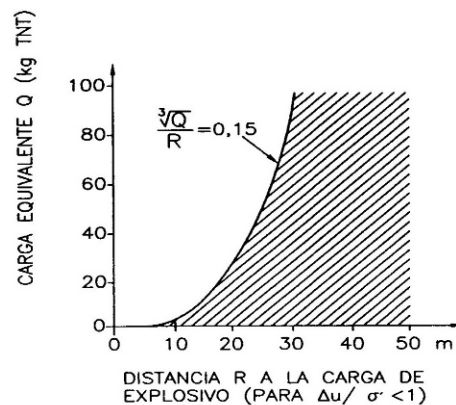


Figura 6. Zona de aplicabilidad segura de explosivos con respecto a la movilidad cíclica. La zona rayada indica las combinaciones de carga y distancia que no inducen licuefacción (modificado de [2]).

Como criterios básicos a tener en cuenta cabe destacar lo siguiente (López Jimeno en [2]):

- Pequeñas voladuras son más eficaces que una sola voladura grande.
- El grado de consolidación decrece en cada una de las voladuras sucesivas, pero el resultado final es mejor que con una única voladura.
- En un esquema prefijado dos cargas de X kg dentro de un mismo barreno producen un mejor resultado que una única carga de 2X kg por barreno, figura 7. Esto implica un menor consumo específico de explosivo por m^3 de terreno objeto de compactación.

El tratamiento del terreno mediante cargas de explosivo dispuestas en filas tiene la ventaja de someter al terreno de las filas adyacentes a diversas cargas cíclicas por el paso sucesivo de las ondas de choque. Según Solymar (en [2]), se puede conseguir una mayor consolidación de los terrenos sometiendo a estos a diversas pasadas de voladuras que con una sola con superior densidad de carga.

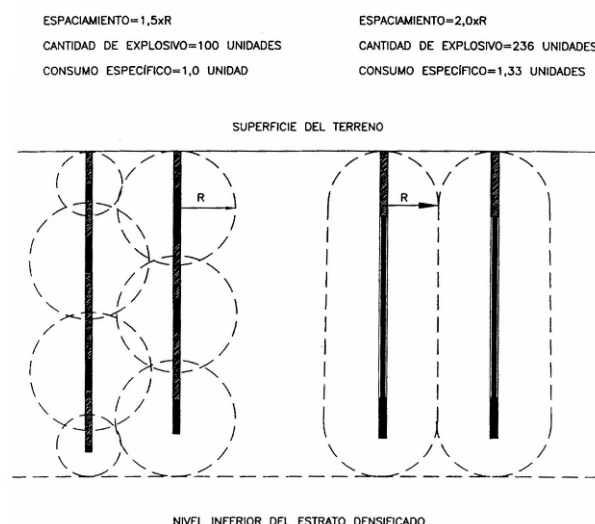


Figura 7. Comparación de esquemas con cargas continuas y seccionadas (modificado de [2]).

Control

Al igual que en cualquier otra técnica de mejora del terreno, en la compactación por explosivos debe llevarse a cabo un control de la efectividad y seguridad del tratamiento, por ejemplo y según Dembicki y Zadroga (en [2]), mediante medidas sísmicas, topográficas y geotécnicas apropiadas.

- Métodos sísmicos, con ayuda de sismógrafos, con el fin de determinar los siguientes factores:
 - a. Velocidad máxima y frecuencia de las vibraciones del suelo a varias distancias desde el centro de la voladura.
 - b. Zona de riesgo para cargas de distinta masa, situadas a diferentes profundidades bajo la superficie del terreno.
 - c. Cantidad (o masa) segura de las cargas para una distancia dada al centro de voladura desde un objeto protegido.
- Métodos topográficos, con nivelaciones de la superficie y puntos de referencia profundos, para la determinación de :
 - a. Asientos de la superficie y de las capas inferiores a distintas profundidades.
 - b. Cambios en el nivel freático.
 - c. Localización en planta de las cargas de explosivo en los barrenos y disposición de la secuencia en la voladura.
 - d. Volumen y forma de los cráteres formados tras las detonaciones.
- Métodos geotécnicos, empleando varios tipos de medidas o ensayos, como SPT en el interior de sondeos, penetrómetros estáticos (CPT), penetrómetros dinámicos continuos (DPT) y presiómetros, destinados a determinar en vertical y horizontal el estado de compactación del suelo, dentro del área compactada.

Además, como medida de control de la disipación del exceso de presión intersticial, pueden instalarse piezómetros en el terreno.

En los casos en que se aporta un relleno granular en el terreno, como en la creación de drenes de arena en suelos arcillosos blandos, deben controlarse también los volúmenes de relleno en cada punto de tratamiento.

Estas medidas de control deben ser realizadas antes de las voladuras (como referencia), inmediatamente después de cada serie de disparos, durante el proceso de consolidación y posteriormente a dicho proceso. Este control del tratamiento usualmente se prolonga en periodo de uno a dos meses.

APLICACIONES EN COSTA RICA**DESCRIPCIÓN GENERAL**

Se presenta el caso del Proyecto de una marina, la cual necesita ganarle terreno al mar, para la construcción de las respectivas instalaciones. Por lo tanto, requiere realizar un mejoramiento de las capas del subsuelo marino, así como del material dragado que se utilizará para ser colocado hasta el alcanzar el nivel del mar.

Previamente, se utilizó el método de mejoramiento vibrocompactación, sin embargo con éste no se dieron los resultados requeridos, de manera que se utilizará entonces el método de mejoramiento por voladura.

PERFIL DEL SUBSUELO Y ÁREA DE MEJORAMIENTO

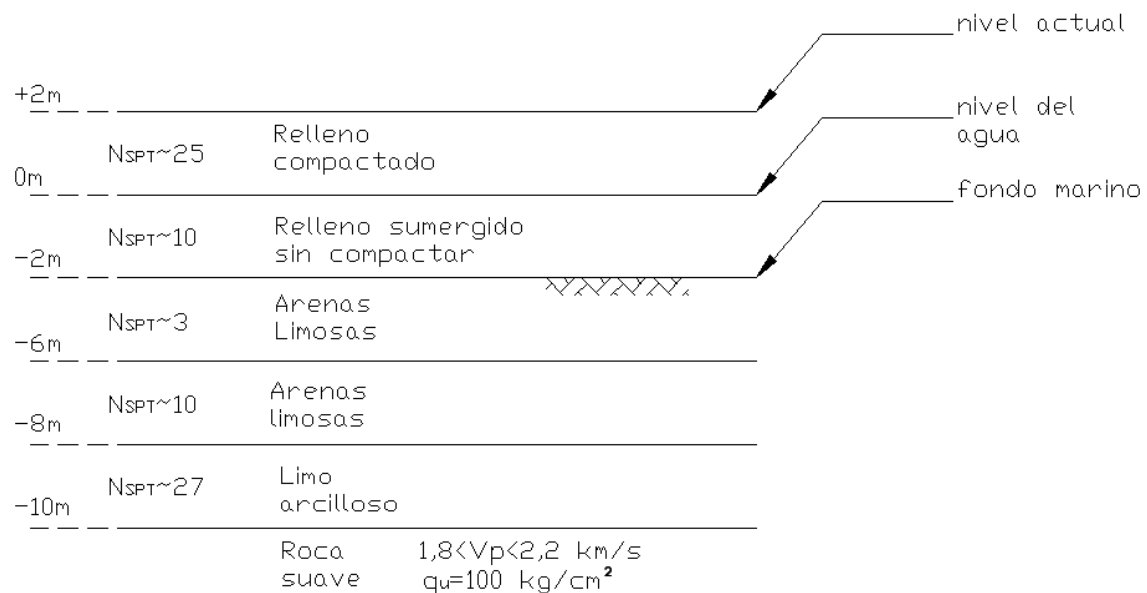


Figura 8. Perfil estratigráfico del subsuelo (elaborado por el autor).

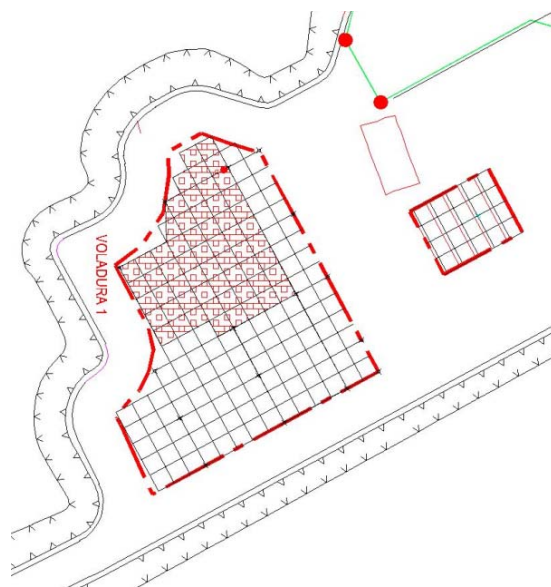


Figura 9. Vista en planta del área mejorar mediante compactación a voladura [5].



Figura 10. Vista general de la zona de trabajo (tomada por el autor).



Figura 11. Proceso del depósito de material en distintas etapas de la obra (tomada por el autor).



Figura 12. Etapa final de la construcción del relleno aproximándose ya al nivel requerido (tomada por el autor).

RESULTADOS

Cargas explosivas utilizadas en las voladuras en rellenos de arena y subsuelo marino

Para caso llamado Voladura 1, resumen de datos preliminares a utilizar en el método:

- Plantilla de 2,5m x 2,5m x 6m
- 4 explosivos por hueco de 280 g
- Equivalente a una cantidad de explosivo de 30 g/m³

Asociada a ésta detonación se tiene el siguiente resultado proveniente de un sismógrafo colocado cerca al área de mejoramiento.

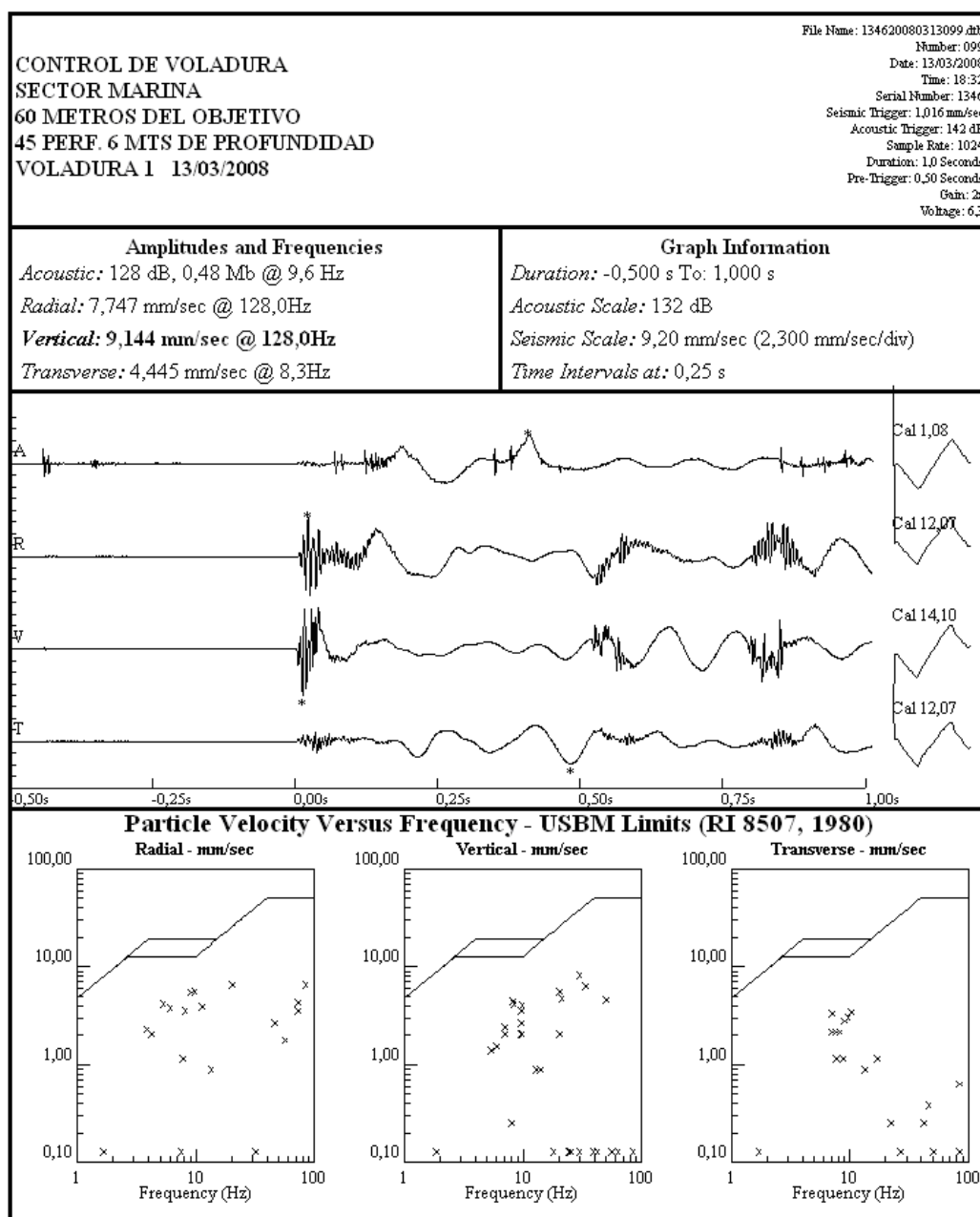


Figura 13: resultados de sismógrafo para el caso Voladura 1 [4].

Por otro lado, para el mismo sitio de voladura, se realizaron pruebas al subsuelo mediante la metodología SPT, estas se pruebas se programaron de la siguiente manera para una serie de puntos, según el orden indicado: antes de la voladura, 1 día después, 2 semanas después y 2 meses después de la voladura.

Los resultados son los siguientes:

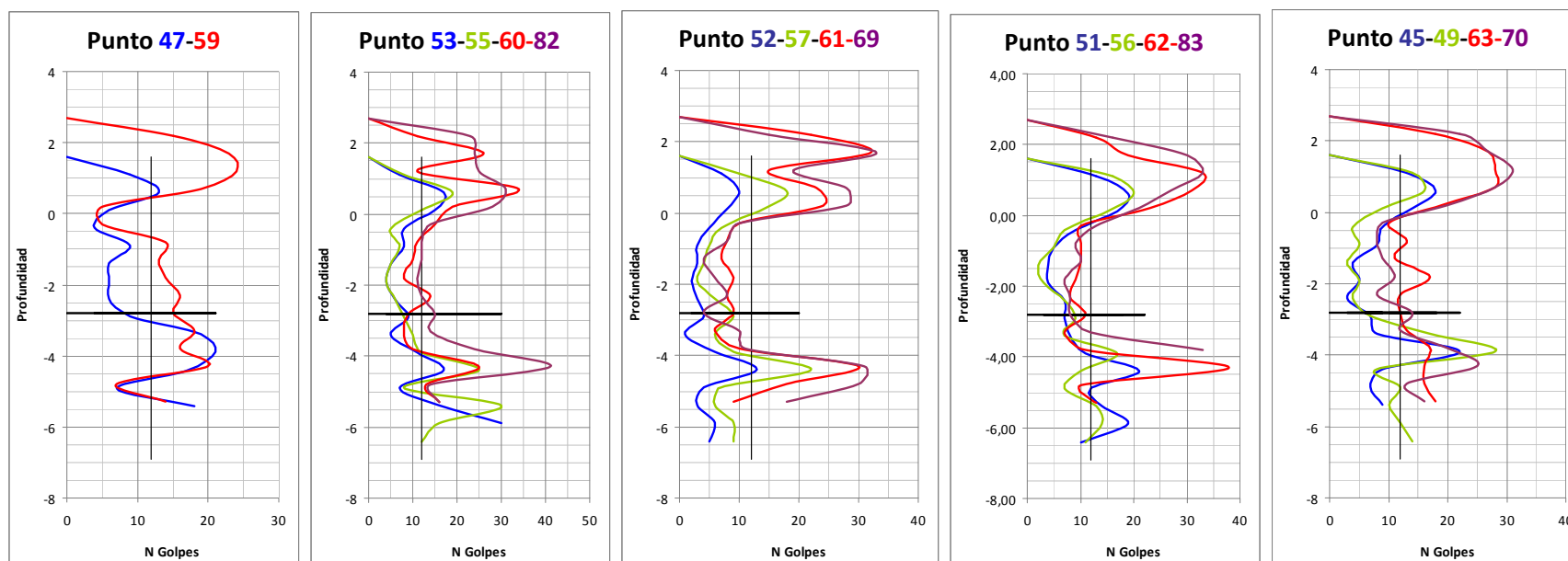


Figura 14. Resultados de pruebas SPT para una serie de puntos a distintos lapsos de tiempo (modificado de [4]).

Además se realizaron ensayos granulométricos para materiales extraídos de tres distintas perforaciones en el sitio y se determinó una serie de parámetros de los mismos:

Granulometrías arenas (capa a mejorar)

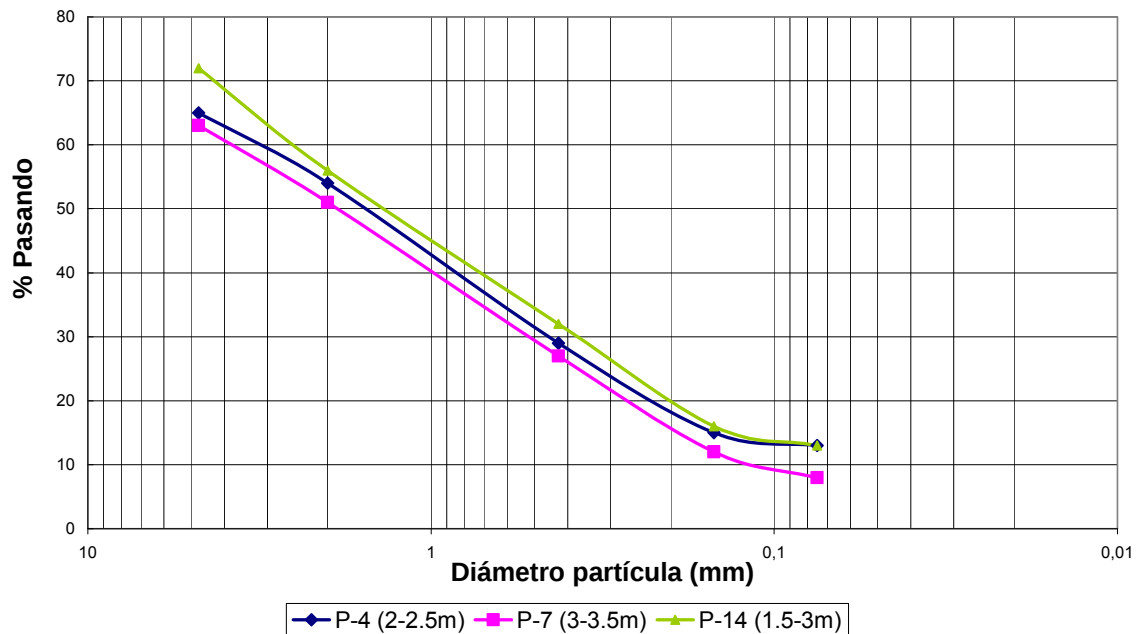


Figura 15. Granulometrías de distintas perforaciones en el sitio de voladura (modificado de [4]).

Cuadro 2. Indicadores granulométricos

D ₁₀		D ₆₀			Cu (D ₆₀ /D ₁₀)			D ₅₀		
P4 y P14	P7	P4	P14	P7	P4	P14	P7	P4	P14	P7
0.03	0.1	3.2	2.5	3.9	107	83	39	1.5	1.4	1.9

D₁₀: diámetro para 10% pasando

D₆₀: diámetro para 60% pasando

D₅₀: diámetro para 50% pasando

C_u: coeficiente de uniformidad

Ejemplo de voladuras con distinta cantidad de explosivos.

Voladura 1.

6 perforaciones de 6 metros de profundidad.

- Barreno con carga de fondo.
- Altura de columna 1.20 mts.
- Peso por Unidad Lodex AP 28 x 400 = 0.300 Kg.
- Cantidad en kilogramos de explosivo Lodex = 0,900
- Retardos x Barreno = Dual Delate 25/500 mm/seg.
- Velocidad de Detonación Lodex 28 x 400 = 5000 m/seg.

Información del Sismógrafo.

Voladura 1	Distancia	V. Radial	V. Transversal	V. Vertical
6 Perforaciones	50 metros	6,731mm/s	3,302	6,985

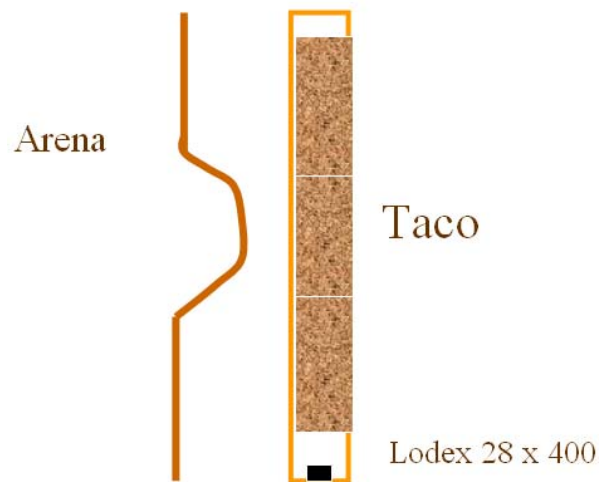


Figura 16. Características de una voladura con una sola carga (modificado de [3]).

Voladura 2

6 perforaciones de 6 metros de profundidad.

- Barreno con carga de fondo e Intermedia.
- Altura de columna 1.20 mts fondo y 1.20 mts. Intermedia.
- Peso por Unidad Lodex AP 28 x 400 = 0.300 Kg fondo y 0,300 Kg Intermedio.
- Cantidad en kilogramos de explosivo Lodex = 1.800
- Retardos x Barreno = 2 Dual Delate 25/500 mm/seg.
- Velocidad de Detonación Lodex AP 28 x 400 = 5000 m/seg.

Información del Sismógrafo.

Voladura 2	Distancia	V. Radial	V.Transversal	V.Vertical
6 Perforaciones	50 metros	5,080 mm/seg.	5,334 mm/seg	4,826 mm/seg

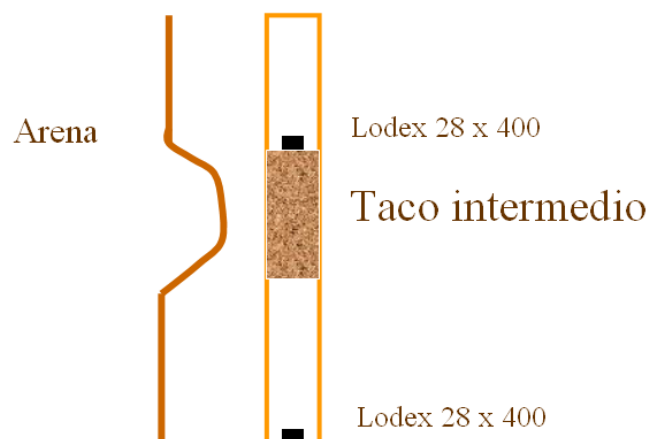


Figura 17. Características de una voladura con dos cargas (modificado de [3]).

CONCLUSIONES

El tratamiento con voladuras se inició usando los tamaños de cargas de explosivos calculadas con las ecuaciones indicadas, sin embargo, conforme se realizaba la investigación para comprobar el mejoramiento, se determinó que la mejoría, representada como un valor promedio sin corregir de N_{spt} de 15 no era suficiente, por lo tanto, se pasó de usar unos 7g/m³ hasta unos 30 g/m³, carga que generaba velocidades de partícula de hasta 9 a 10 mm/s.

Como se sabe, existe una relación entre el tamaño de la carga, la distancia de la voladura y la velocidad de partícula, a través de la expresión llamada “Distancia Escalada”, de modo que, en este caso, dio buenos resultados, además de realizar ensayos SPT antes y después de la voladura, fue medir la velocidad de partícula mediante un sismógrafo, la cual, mientras se mantenga sobre unos 5 mm/s garantiza que la aceleración que se genera, induce el estado de movilidad cíclica en las arenas, aumentando su densidad.

Teniendo la “Distancia Escalada” calibrada para los suelos del sitio, también es posible, obtener la velocidad de partícula requerida, para diferentes combinaciones de carga de explosivos y distancias de voladura, lo cual, ayuda a no tener que medir directamente la velocidad de partícula para todos los sitios.

Una experiencia importante de este mejoramiento fue el efecto del tiempo de espera para que la sobrepresión de poros generada por las explosiones, se disipara y se manifestara la mejoría, a través del aumento de los valores de N_{spt} . Fue necesario que transcurriera más 1 mes para determinar el aumento, que apenas alcanzó los valores mínimos requeridos y no se alcanzaron los valores esperados.

El alcanzar velocidades de partícula con valores como los indicados garantiza que se generen aceleraciones en el subsuelo marino y en los rellenos, tales que, de presentarse un sismo en el futuro con aceleraciones similares, las deformaciones serán mínimas

Finalmente se destaca que las ecuaciones disponibles para calcular las cargas de explosivos son solo una guía inicial y que debe ser, principalmente por prueba y error y para cada tipo de suelo, que se determinen las cargas óptimas, así como, el tamaño de la malla, los tiempos de retardo y la ubicación de las cargas en el hueco.

REFERENCIAS

1. Mitchell, J.K. & Narin van Court, W.A., (1999), “Soil Improvement by Blasting”, *Selected Papers of James K. Mitchell*, p. 822-828.
2. Bielza Feliú, Ana., (1999). “Manual de Técnicas de Mejora del Terreno”, p.83-92. Editorial Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
3. Cavallini, C.C., (2008). “Informe de Voladuras en Arenas”, EXPLOINSA, Costa Rica.
4. Jiménez M., (2008). “Informes de Campo y Estudios de Factibilidad”. AWA Ingeniería, recibido por medios electrónicos, Costa Rica.
5. INSUMA-WATERMARK, (2005). “Informe de Estudio Geotécnico para una Marina”. Costa Rica.