

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**  
**VALPARAÍSO - CHILE**



**APLICACIÓN DE GEO ESTADISTICA PARA ANALIZAR LA  
RELACION DE RESISTENCIA DE PUNTA ENTRE LOS  
ENSAYOS PANDA Y CPT EN SUELOS GRANULARES**

**CLAUDIO CASANOVA MUÑOZ**

Memoria para optar al Título de  
**INGENIERO CIVIL**

Profesor Guía  
**MATÍAS SILVA**

2018

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**  
**VALPARAÍSO - CHILE**



**APLICACIÓN DE GEO ESTADISTICA PARA ANALIZAR LA  
RELACION DE RESISTENCIA DE PUNTA ENTRE LOS  
ENSAYOS PANDA Y CPT EN SUELOS GRANULARES**

**CLAUDIO CASANOVA MUÑOZ**

Memoria para optar al Título de  
**INGENIERO CIVIL**

Profesor Guía  
**MATÍAS SILVA**

2018

## **AGRADECIMIENTOS**

## RESUMEN

Los ensayos geotécnicos in situ son de gran importancia en el estudio de la mecánica de suelos, en particular en el rubro minero, permitiendo determinar de forma directa o indirecta diferentes parámetros para caracterizar su respuesta. Dentro de la gran variedad de ensayos que ofrece el mercado, se encuentra el ensayo CPT (Cone Penetration Testing) y el ensayo PANDA (Pénétrométre Autonome Numérique Dynamique Assisté).

En esta memoria se ejecutó un estudio comparativo de los registros de las resistencias de punta entregados por los ensayos CPT y PANDA, en un relleno antrópico homogéneo compuesto de arenas medianamente densas, en un área de Dunkerque, ciudad que se ubica en el norte de Francia. El terreno mencionado ha sido ampliamente estudiado, además de poseer información bibliográfica. Los registros analizados corresponden a 19 ensayos PANDA2 y 6 ensayos CPT, los cuales no se situaban en la misma ubicación, por lo que para realizar una comparación de manera adecuada, se debió estimar un los valores de los ensayos PANDA2 en la ubicaciones de los ensayos CPT. Esta estimación de valores se efectuó, por medio de dos programas: primero el programa Rockworks, que ofrece una gran cantidad de modelos de interpolación y en segundo lugar, por medio del programa SGEMS, que permite la estimación de puntos a través de la herramienta de geoestadística.

Los valores obtenidos con los programas de los ensayos PANDA2, fueron comparados con los obtenidos en terreno por los ensayos CPT, logrando establecer el mejor método para la estimación. Luego de un proceso de normalización, en el cual se estableció una ecuación que evidencia que la diferencia de diámetros entre los ensayos, provoca una diferencia en la obtención de resultados de este parámetro, donde para cada método se definió un parámetro “k” de normalización que establece una mejor relación entre los ensayos. Finalmente los resultados del método escogido, y después de la normalización, se utilizaron para encontrar una relación lineal entre las resistencias de punta de ambos ensayos, que se compararon con la presentada por Barre en el año 2014.

Una vez concluido el estudio, se pudo determinar que el método de geoestadística estima de mejor manera los puntos, donde la obtención de un modelo variografico y posteriormente la herramienta krigin, permiten representar de manera adecuada lo que sucede en un área de estudio.

La relación encontrada permitió demostrar que los valores de resistencia de punta de los ensayos PANDA y CPT, son muy parecidas en suelos granulares, encontrando valores de coeficiente de correlación y determinación altos y un valor de error cuadrático medio bajo entre las variables.

Finalmente se estableció un proceso para determinar los valores de CPT con los obtenidos por el ensayo PANDA y se concluyó, que la relación entre estos dos ensayos permite estudiar de una manera más eficiente y completa un área seleccionada, debido a que el ensayo CPT presenta un gran número de correlaciones con diferentes propiedades del suelo, posibilitando un mejor entendimiento del comportamiento del suelo. Esto finalmente se traduce, que la realización de un ensayo PANDA permitiría analizar de igual modo un suelo, que haciéndolo mediante un ensayo CPT.

## **ABSTRACT**

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>II</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 DESCRIPCION GENERAL.....	1
1.2 DEFINICION DEL PROBLEMA.....	1
1.3 OBJETIVOS .....	2
1.3.1 General.....	2
1.3.2 Específicos.....	2
1.4 METODOLOGÍA Y ALCANCE.....	2
1.5 PROPUESTAS ANTERIORES.....	3
1.5.1 Caracterización geotécnica in-situ de relaves espesados mediante ensayos de penetración (Barre, 2014) .....	3
<b>2 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
2.1 PENETROMETRO AUTÓNOMO PANDA.....	5
2.1.1 Principio de Funcionamiento .....	5
2.1.2 Ventajas y Desventajas.....	6
2.2 ENSAYO DE PENETRACION ESTÁTICA DE CONO (CPT).....	7
2.2.1 Introducción.....	7
2.2.2 Funcionamiento.....	7
2.2.3 Calibración del Ensayo.....	8
2.2.4 Ventajas y Desventajas.....	9
<b>3 ANTECEDENTES Y OBTENCIÓN DE DATOS</b> .....	<b>11</b>
3.1 SITIO EXPERIMENTAL DE DUNKERQUE .....	11
3.1.1 Pruebas CLAROM y BRE .....	11
3.1.2 Proyecto Pisa .....	14
3.2 CAMPAÑAS AÑO 2016 .....	17
3.2.1 Resultados de Caracterización Geotécnica .....	18
<b>4 METODOLOGÍA O DESARROLLO DEL ANÁLISIS</b> .....	<b>22</b>

<b>4.1</b>	<b>MODELOS DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL: ROCKWORKS.....</b>	<b>22</b>
•	Punto más cercano .....	22
•	Distancia al punto.....	22
•	Distancia Inversa.....	22
•	Ponderación Direccional .....	23
<b>4.2</b>	<b>DESARROLLO DE UN MODELO GEOESTADÍSTICO .....</b>	<b>23</b>
4.2.1	Introducción.....	23
4.2.2	Análisis Variográfico.....	24
4.2.3	Stanford Geostatistical Modeling Software: SGEMS .....	25
4.2.4	Krigeage .....	29
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
<b>5.1</b>	<b>ROCKWORKS.....</b>	<b>30</b>
5.1.1	Metodología de Trabajo .....	30
5.1.2	Definición de Grilla .....	30
5.1.3	Resultados de Modelación .....	31
5.1.4	Validación Cruzada .....	33
5.1.5	Resultados .....	35
<b>5.2</b>	<b>MODELO SGEMS (STANFORD GEOSTATISTICAL MODELLING SOFTWARE).....</b>	<b>38</b>
5.2.1	Metodología de Trabajo .....	38
5.2.2	Histograma .....	38
5.2.3	Variograma.....	38
5.2.4	Definición de Grilla de Análisis.....	43
5.2.5	Kriging .....	44
5.2.6	Modelo 3D.....	45
5.2.7	Resultados .....	46
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
<b>6.1</b>	<b>ENSAYO CPT3.....</b>	<b>50</b>
<b>6.2</b>	<b>PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS.....</b>	<b>51</b>
<b>6.3</b>	<b>NORMALIZACIÓN POR PROFUNDIDAD .....</b>	<b>52</b>
<b>6.4</b>	<b>BÚSQUEDA DE REGRESIÓN .....</b>	<b>57</b>
<b>6.5</b>	<b>COMPARACION DE RESULTADOS CON PROPUESTAS ANTERIORES.....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>67</b>
<b>9.1</b>	<b>ANEXO A.....</b>	<b>67</b>
<b>9.2</b>	<b>ANEXO B.....</b>	<b>70</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Plano del depósito de relaves espesados con las plataformas, (Barre,M. 2014) ..... 3

Figura 2: Equipo de Penetrómetro Autónomo Panda, (Villavicencio, G., 2007) ..... 5

Figura 3: Rango de Sondas CPT: De izquierda a derecha: 2 cm<sup>2</sup>, 10 cm<sup>2</sup>, 15 cm<sup>2</sup>, 40 cm<sup>2</sup>, (Robertson, P., 2015) ..... 7

Figura 4: Esquema y Partes del Cono CPT, (Robertson, P. 2015)..... 8

Figura 5: Gráfica del tipo de comportamiento del suelo normalizado (Robertson, P. 2015)..... 10

Figura 6: Localización del sitio de ensayos de CLAROM en Dunkerque, (Chow,F. 1997) ..... 11

Figura 7: Perfiles y estratigrafía obtenidos por CLAROM en Dunkerque, (Chow,F. 1997)..... 12

Figura 8: Perfiles de resistencia obtenidos por BRE y CLAROM, (Chow,F. 1997)..... 13

Figura 9: Distribución del tamaño de partículas en Dunkerque, (Chow,F. 1997) ..... 14

Figura 10: Sitio de realización del proyecto Pisa ..... 15

Figura 11: Resultados ensayo CPT M9 y SE Proyecto Pisa a) Presión de Poros vs Profundidad b) Fricción en el Manto vs Profundidad c) Resistencia de Punta vs Profundidad ..... 16

Figura 12: Ubicación de los ensayos Panda y CPT en Dunkerque ..... 17

Figura 13: Sitio de estudio de Dunkerque año 2016 a) Realización de ensayos Panda b) Realización de ensayo CPT... 18

Figura 14: Perfiles Resistencia de punta vs profundidad de ensayos Panda campaña 2016 a) Zona Oeste b) Zona Centro c) Zona Este..... 19

Figura 15: Perfiles de ensayos CPT realizados en la localidad de Dunkerque 2016 a) Presión de Poros vs Profundidad b) Fricción del Manto vs Profundidad c) Resistencia de Punta vs Profundidad ..... 21

Figura 16: Caracterización variograma teórico, (Henaó, R. 1993)..... 24

Figura 17: Región de tolerancia alrededor del vector h, (Lopez,C. 2016) ..... 26

Figura 18: Gráfica del variograma a la derecha y ejemplo de variable regionalizada (izquierda): a) Modelo esférico b) Modelo exponencial c) Modelo gaussiano (Emery,X. 2013)..... 28

Figura 19: Grilla definida referenciada por Google Earth..... 30

Figura 20: Modelo 3D todos los valores (izquierda), Modelo 3D con valores mayores a 20 (Mpa) (Derecha): a) Modelo anisotropico b) Modelo distancia inversa rápida c) Modelo direccional ..... 32

Figura 21: Presentación de los ensayos Panda con los que se realizara la validación cruzada ..... 33

Figura 22: Gráficos del ensayo de validación de datos: a) Sin el ensayo PANDA2-1 b) Sin el ensayo Panda2-7..... 34

Figura 23: Perfiles de Profundidad vs Resistencia de Punta de los resultados del programa Rockworks: a) CPT1 b) CPT2 c) CPT3 d) CPT4..... 36

Figura 24: Gráfica de la Diferencia vs Profundidad de los resultados del programa Rockworks para los 4 ensayos CPT 37

Figura 25: Histograma de frecuencia resistencias ..... 38

Figura 26: Análisis del azimuth mediante el programa SGEMS, (Lopez, C. 2016) ..... 39

Figura 27: Histograma de frecuencia de la dirección de análisis ..... 39

Figura 28: Variograma en todas las direcciones de análisis.....	40
Figura 29: Representación del modelo de variograma escogido en la dirección 135° .....	43
Figura 30: Representación de los ensayos Panda en la grilla de análisis del programa SGEMS .....	44
Figura 31: Modelo 3D realizado por el método krigin desde una ubicación Sur-Este a) Modelo 3D b) Modelo 3D con valores de resistencia mayor a 20 (Mpa).....	45
Figura 32: Gráfica de la Diferencia vs Profundidad de los resultados del programa SGEMS para los 4 ensayos CPT .....	46
Figura 33: Perfiles de Profundidad vs Resistencia de Punta de los resultados del programa SGEMS: a) CPT1 b) CPT2 c) CPT3 d) CPT4.....	48
Figura 34: Perfiles de resistencia de punta: a) Ensayo CPT3 antes y después de la suavización b) Ensayo CPT3 suavizado con los resultados del programa Rockworks y SGEMS .....	50
Figura 35: Gráfica del Coeficiente de correlación vs Profundidad para los 4 ensayos CPT: a) Resultados programa Rockworks b) Resultados programa SGEMS .....	51
Figura 36: Gráficas de Resistencia de punta CPT vs PANDA2 generada por el programa: a) Rockworks datos sin normalizar b) SGEMS datos sin normalizar c) Rockworks datos normalizados d) SGEMS datos normalizados.....	55
Figura 37: Desplazamientos de perfiles de Resistencia de Punta normalizados mejor caso (Izquierda) y peor caso (derecha) para cada programa: a) y b) Rocoworks c) y d) SGEMS .....	56
Figura 38: Comparación de perfiles de resistencia de punta: a) CPT1 b) CPT2 c) CPT3 d) CPT4 .....	62
Figura 39: Variograma en la dirección 0 grados azimut 0 dip .....	67
Figura 40: Variograma en la dirección 0 grados azimut 90 dip .....	67
Figura 41: Variograma en la dirección 45 grados .....	68
Figura 42: Variograma en la dirección 70 grados .....	68
Figura 43: Variograma en la dirección 90 grados .....	69
Figura 44: Variograma en la dirección 135 grados .....	69
Figura 45: Perfiles de resistencia de punta normalizada programa Rockworks: a) CPT1 b) CPT2 c) CPT3 d) CPT4 .....	70
Figura 46: Perfiles de resistencia de punta normalizada programa SGEMS: a) CPT1 b) CPT2 c) CPT3 d) CPT4 .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características del suelo en las 15 plataformas de los relaves pesados .....	4
Tabla 2: Ventajas y desventajas del Penetrómetro Autónomo Panda .....	6
Tabla 3: Ventajas y desventajas del ensayo CPT.....	10
Tabla 4: Estratigrafía obtenida por CLAROM en Dunkerque.....	11
Tabla 5: Coordenadas de ubicación ensayos PANDA en la campaña año 2016 .....	17
Tabla 6: Resumen de resultados de ensayos Panda año 2016 .....	20
Tabla 7: Grilla de análisis Rockworks .....	30
Tabla 8: Coeficiente de correlación para la exclusión del ensayo PANDA2-1 y Panda2-7 .....	35
Tabla 9: Resumen estadístico de resistencias.....	38
Tabla 10: Parámetros para obtención del variograma con el programa SGEMS .....	40
Tabla 11: Alcance de modelación de variograma .....	41
Tabla 12: Error cuadrático medio modelo Exponencial para cada variograma y modelo propuesto .....	42
Tabla 13: Error cuadrático medio modelo Gaussiano para cada variograma y modelo propuesto .....	42
Tabla 14: Error cuadrático medio modelo Esférico para cada variograma y modelo propuesto .....	42
Tabla 15: Modelo de variograma escogido .....	43
Tabla 16: Grilla de análisis programa SGEMS .....	43
Tabla 17: Valores parametros elipsoide de busqueda .....	44
Tabla 18: Coeficiente de correlación entre los ensayos CPT obtenidos en terreno y los generados en los programas ....	52
Tabla 19: Coeficiente de correlación y p-valor de todos los ensayos CPT generados en los programas .....	52
Tabla 20: Valores del parámetro de relación “k” de normalización para cada programa .....	53
Tabla 21: Coeficiente de correlación entre los ensayos CPT obtenidos en terreno y los generados en los programas con los datos normalizados .....	54
Tabla 22: Coeficiente de correlación de todos los ensayos CPT generados en los programas con los datos normalizados .....	54
Tabla 23: P-valor de todos los ensayos CPT generados en los programas con los datos normalizados .....	54
Tabla 24: Coeficiente de determinación y parámetros con los datos del ensayo CPT4 normalizado .....	57
Tabla 25: Coeficiente de determinación y parámetros con todos los datos de los ensayos CPT .....	58
Tabla 26: ECM de los 4 ensayos CPT .....	58
Tabla 27: Valores máximos de resistencia para cada ensayo CPT obtenido en terreno .....	59
Tabla 28: Valores máximos de resistencia, porcentaje de variación y coeficiente de correlación de cada relación para cada ensayo CPT .....	60



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 DESCRIPCION GENERAL

Los ensayos geotécnicos in situ constituyen una serie de técnicas variadas e independientes con el objetivo común de caracterizar el subsuelo tanto para la definición de un modelo estratigráfico, como para la determinación de las propiedades mecánicas de los distintos estratos. La utilización de ensayos in situ permite determinar de forma directa o indirecta diferentes parámetros para caracterizar la respuesta mecánica del suelo. En el mercado existen una gran cantidad de ensayos, siendo el más utilizado en nuestro país el ensayo SPT (Standard Penetration Tests), el cual es requerido como ensayo para la clasificación de suelos en el decreto supremo número 61. En menor medida el ensayo CPT (Cone Penetration Testing) y el ensayo PANDA (Pénétrómètre Autonome Numérique Dynamique Assisté), utilizado en el control de compactación de tranques de relave, el cual se está introduciendo de manera paulatina en Chile. Hoy en día, el ensayo CPT y Panda se consideran complementarios y, aunque son muy útiles, cuando el ensayo SPT no se puede realizar o no funciona en determinados casos, estos ensayos no lo reemplazan correctamente. Estos tres ensayos se encuentran normados, mientras el ensayo SPT y CPT se rigen por la norma NCh 3364-2014 y ASTM D 3441 respectivamente, el ensayo Panda sigue la norma NCh 3261-2012 Depósitos de relave- Control de compactación con penetrometro dinámico ligero.

Esta memoria se enfocará en el estudio comparativo de los registros obtenidos de ensayos CPT y Panda en un relleno antrópico homogéneo (Relleno Hidráulico) compuesto de arenas medianamente densas, con el fin de encontrar una relación entre el valor de la resistencia de punta de cada uno de los ensayos. El terreno en estudio ha sido ampliamente estudiado en la literatura y se cuenta con el registro de 19 ensayos Panda2 y 6 ensayos CPT, además de información bibliográfica. Dada la especialización de los ensayos, el análisis comparativo se realiza mediante el uso de modelos geoestadísticos para lo cual es necesario estudiar la relación particular entre los distintos ensayos individuales.

## 1.2 DEFINICION DEL PROBLEMA

Debido a la gran importancia que tienen los ensayos geotécnicos in situ, en particular en el rubro minero, es necesario poder encontrar correlaciones entre los distintos ensayos de manera de efectuar un análisis más completo en caso de que en algún sector presente problemas o restricciones de accesibilidad o simplemente por motivos económicos. De acuerdo a esto, la necesidad de entender y analizar los diferentes aspectos geotécnicos, hacen preciso determinar una forma de control o investigación de fácil ejecución en terreno; el ensayo CPT, que desarrolla un estudio completo del suelo donde se aplica, tiene un mayor costo y un difícil emplazamiento en algunos sectores que hacen que no sea el ensayo ideal en algunas ocasiones, mientras que el penetrometro dinámico ligero, PANDA, parece ser una solución a estos problemas.

La presente memoria buscará obtener una relación entre la resistencia de punta de los ensayos CPT y Panda con objeto de poder facilitar y complementar, el estudio de algunos sitios donde el ensayo CPT no sea conveniente. Esto a causa de la gran cantidad de parámetros del suelo que se pueden obtener por medio de la resistencia en punta  $q_c$  que se obtiene del ensayo CPT.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 General

- I. Comparar los perfiles de resistencia de los ensayos PANDA y CPT obtenidos en un estrato de suelo de material granular.
- II. Correlacionar los valores de resistencia de punta del suelo obtenida por el ensayo CPT  $q_c$  y la resistencia de punta del suelo obtenida mediante el ensayo PANDA  $q_d$ .
- III. Utilizar herramientas geoestadísticas para analizar y correlacionar los perfiles de ensayos CPT y PANDA.

### 1.3.2 Específicos

- I. Estudiar y analizar un depósito de arenas (relleno hidráulico) en un sector localizado en el puerto de Dunkerque, Francia.
- II. Utilización de herramientas geoestadísticas para el desarrollo de un modelo tridimensional para caracterizar el depósito de arenas en base a  $q_t$  y  $q_d$ .
- III. Comparar diferentes tipos de modelos de interpolación de datos con el fin de elegir el que represente de mejor manera los valores reales obtenidos en terreno.
- IV. Estimación de una relación entre los ensayos Panda y CPT y cuantificación del error entre los datos.

## 1.4 METODOLOGÍA Y ALCANCE

La realización del estudio contempló las siguientes etapas:

1. Etapa 1- Estudio y recopilación de información: Esta etapa consistió en seleccionar toda la información necesaria y relevante para desarrollar esta memoria. Se necesitó del análisis de investigaciones geotécnicas previas del sector y de los análisis de suelo, estudio de las herramientas y conceptos de geoestadística que se utilizaron en este trabajo y el análisis de los datos de las campañas de terreno realizadas en Francia.
2. Etapa 2- Desarrollo de Modelos: De acuerdo a los datos de resistencia obtenidos en la campaña de terreno, se desarrollan modelos con los programas Rockworks y SGEMS (geoestadística) de acuerdo a una grilla de trabajo definida según la ubicación de los ensayos. Los modelos 3D, desarrollados por ambos programas, permiten representar los valores de los ensayos PANDA en toda el área analizada, con el fin de poder comparar los valores obtenidos por los modelos en la misma ubicación que los obtenidos en terreno por el ensayo CPT.  
El proceso de modelamiento con los programas mencionados, necesitó de la calibración de parámetros y la elección, según criterios que se describirán más adelante, de modelos adecuados para el caso en estudio.

3. Etapa 3- Análisis de Resultados: Una vez obtenidos los resultados de los distintos modelos se realiza, en primera instancia, un análisis cualitativo de los resultados gráficamente. Luego, se determina el modelo que tiene una mayor correlación con los datos que se obtuvieron en terreno, para, finalmente, realizar una regresión con el fin de encontrar una relación que cumpla con el objetivo principal de esta memoria.
4. Etapa 4-Comparación: Finalmente la relación encontrada en la Etapa 3 se compara con relaciones determinadas con anterioridad (Barre, 2014), de manera de concluir la validez de su uso en suelos diferentes al escogido para estudiar.

## 1.5 PROPUESTAS ANTERIORES

### 1.5.1 Caracterización geotécnica in-situ de relaves espesados mediante ensayos de penetración (Barre, 2014)

En el año 2013 se realizó un proyecto de correlaciones PANDA-CPTU en relaves espesados. En el proyecto las correlaciones que relacionan los resultados de los dos ensayos se basaron en la posible dependencia existente entre PANDA-CPTU considerando la cercanía de fecha y distancia. El material en la zona de estudio corresponde a la cubeta de un depósito de relaves compuesto de 15 plataformas (exhibidas en la Figura 1) de un suelo limo arenoso con un alto porcentaje de humedad. A continuación se la Tabla 1 con los valores promedio de las características del suelo.

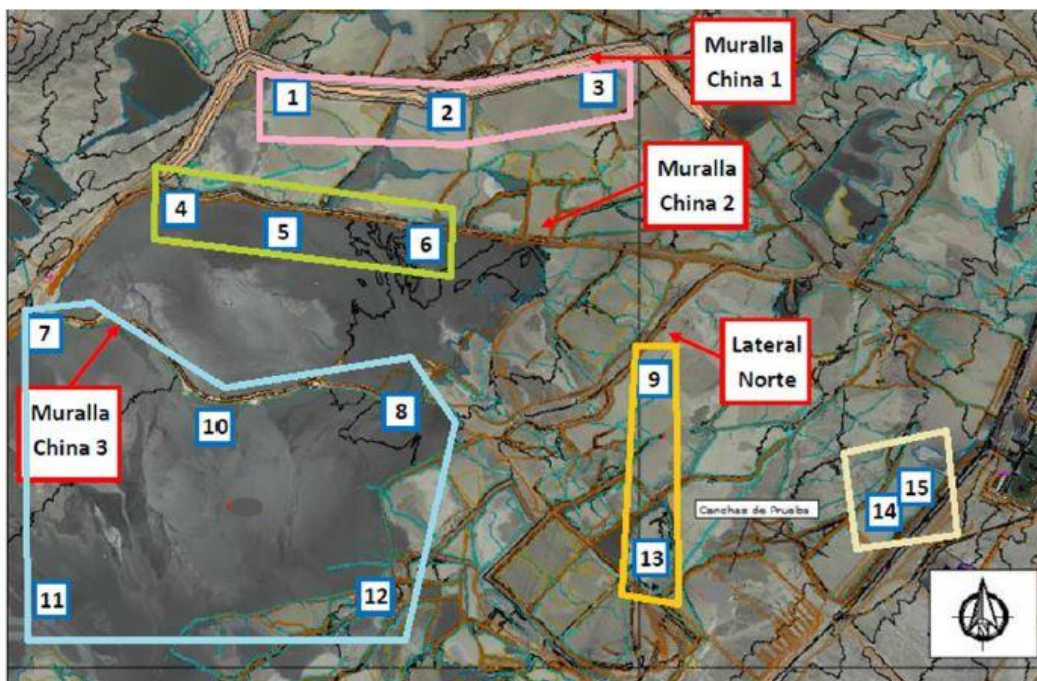


Figura 1: Plano del depósito de relaves espesados con las plataformas, (Barre,M. 2014)

Tabla 1: Características del suelo en las 15 plataformas de los relaves pesados

	<b>G<sub>s</sub></b>	<b>L<sub>L</sub></b>	<b>IP</b>	<b>% finos</b>	<b>%W</b>
<b>Promedio</b>	2,84	21,6	3,8	63,1	23,43

Como metodología en esta investigación primero se separaron las plataformas según su índice de comportamiento, comportamiento líquido o plástico. Luego se ajustaron los penetrogramas para que las resistencias sean según la misma profundidad para encontrar una tendencia lineal y otras dos tendencia que puedas describir la relación  $q_d$  y  $q_c$ .

Para comprobar el grado de correlación entre las variables se determinaron los valores del coeficiente de correlación  $r_p$  y el coeficiente de determinación  $R^2$ . De acuerdo a estos parámetros se determinaron las relaciones y las plataformas que tenían un grado de determinación o correlación bajo a 50 % (que no tienen relación o relación débil), para luego eliminar los valores que parecían ser errores y volver a calcular los coeficientes, estableciendo que las relaciones lineales en cada plataforma cumplieran tener un valor mayor al 50% para  $r_p$  y  $R^2$ .

Finalmente se busca una relación de la forma  $q_c = A * q_d$  que permite determinar que las plataformas con un valor de humedad más bajo cumplen con el valor mayor a 50% de  $R^2$ . Con lo que finalmente se encuentran las siguientes relaciones

- Datos que tienen un comportamiento plástico (con un coeficiente de determinación de 83,5%):  
$$q_c = 1,08 * q_d$$
- Datos que tienen un comportamiento líquido (con un coeficiente de determinación de 58,2%):  
$$q_c = 0,765 * q_d$$

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 PENETROMETRO AUTÓNOMO PANDA

El equipo PANDA (Pénétrómètre Autonome Numérique Dynamique Assisté), es un penetrómetro dinámico ligero a energía variable, con un peso total de 20,0 (kg) como se indica en la Figura 2. El ensayo permite obtener la resistencia de punta del suelo (MPa), en base a la transmisión energética del hincado, hasta aproximadamente 7 metros de profundidad, en todo tipo de material con tamaño máximo menor o igual a 50 mm y para suelos con resistencia menores a 50 (MPa). Entre sus beneficios están el ser un equipo sencillo, portátil no destructivo con resultados inmediatos y correlaciones con ensayos geotécnicos.

El ensayo Panda es ampliamente empleado en Francia como medio de control geotécnico en obras viales y férreas. El ensayo consiste en hincar en el suelo, un tren de barras, el cual se encuentra provisto en su extremo de una punta cónica metálica, mediante el impacto de un martillo de masa estándar, sobre un dispositivo o cabeza de golpeo, como se muestra en la Figura 2.

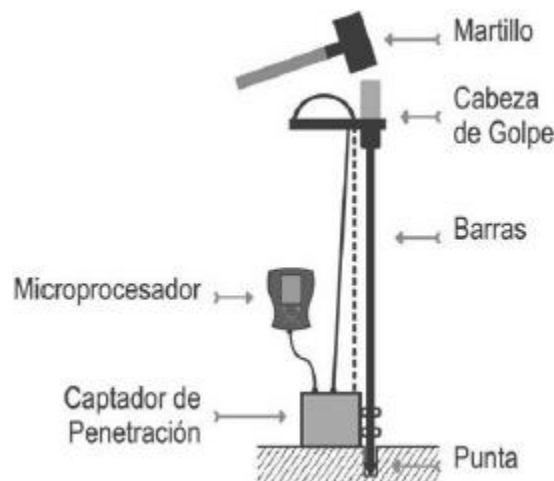


Figura 2: Equipo de Penetrómetro Autónomo Panda, (Villavicencio, G., 2007)

#### 2.1.1 Principio de Funcionamiento

El impacto de martillo genera una onda de esfuerzo en la cabeza de golpeo, la cual se propaga hacia la punta del penetrómetro generando la penetración de la barra. Como se puede notar en la Figura 2, un microprocesador, recibe la señal generada, registrando automáticamente la resistencia del suelo  $q_d$  (MPa) y la penetración (mm) para cada golpe de martillo. De lo mencionado se puede obtener los penetrogramas (gráficos resistencia del suelo vs profundidad)

Cada golpe de martillo, registra de manera continua la penetración alcanzada ( $e$ ) y la resistencia de punta del suelo ( $q_d$ ), ésta mediante una adaptación de la fórmula Holandesa (Deheeger, 2002). La cual bajo el principio de equilibrio de momento, desprende que, según la siguiente ecuación, la resistencia de punta  $q_d$

dependerá de la energía aplicada por cada golpe de martillo, la penetración alcanzada, la masa del martillo y la masa del tren de barras y de la cabeza de golpe.

$$q_d = \left(\frac{1}{A_c}\right) * \left(\frac{E}{e}\right) * \left(\frac{M}{M + P}\right)$$

Donde:

- A<sub>c</sub>: Área de la punta [m<sup>2</sup>]
- E: Energía aplicada [J]
- e: Penetración de la punta en el suelo por cada golpe de martillo [m]
- M: Masa del martillo empleado [Kg]
- P: Masa del tren de barras y de la cabeza de golpe [Kg]

### 2.1.2 Ventajas y Desventajas

El Penetrometro Autónomo Panda es utilizado, por lo general, para realizar un control de compactación, además de permitir evaluar la variabilidad inherente al material, en relación a sus características físicas, y la variabilidad propia del proceso constructivo. El empleo de este equipo es simple y sólo necesita un operario para su ejecución. Además es bastante más rápido que otros ensayos empleados para realizar el control de compactación. Por ejemplo, en el mismo tiempo requerido para realizar un ensayo de cono de arena es posible realizar cuatro ensayos PANDA.

En relación a sus desventajas, la aplicación requiere una formación técnica para su empleo e interpretación de resultados obtenidos. Por otra parte, es necesario contar con información respecto a las características físicas de los suelos y a la metodología de compactación aplicada. Además, su empleo requiere realizar una calibración previa de los materiales a controlar.

El listado de ventajas y desventajas se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Ventajas y desventajas del Penetrómetro Autónomo Panda

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mediciones Continuas</li> <li>• Portable</li> <li>• Mayor rapidez y simplificación en el proceso de control</li> <li>• Resultados más independientes del operador</li> <li>• Más información en menos tiempo</li> <li>• Económico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No mide presión de poros</li> <li>• Relacionamos un valor de impacto dinámico a una medida estática.</li> <li>• Conocimiento de las características físicas del material y de la metodología de compactación empleada</li> <li>• Calibración previa</li> <li>• Límite de profundidad de inspección</li> </ul>

## 2.2 ENSAYO DE PENETRACION ESTÁTICA DE CONO (CPT)

### 2.2.1 Introducción

El ensayo de penetración estático de Cono, conocido como CPT, es un ensayo de penetración, el cual permite estimar la resistencia del suelo al empuje de un cono. Este es empleado para la determinación de las propiedades del suelo, pero que mediante añadidos es capaz de medir la presión del agua subterránea, así como otros parámetros de interés en el área de la Geotecnia. Existen dos tipos que son los más utilizados, el cono mecánico tipo Delft, y el cono de fricción de Begemann. Este ensayo permite obtener 2 parámetros independientes, la resistencia de punta del cono  $q_c$ , la resistencia a la fricción  $f_s$  y adicionalmente la presión de poros  $u$  (CPTU) y/o la velocidad de onda de corte (SCPT).

El CPT y sus versiones mejoradas como CPTU y SCPT tienen aplicaciones para un amplio rango de suelos, aunque el CPT básicamente se centra en suelos más blandos, también se pueden usar en suelos rígidos y rocas blandas.

### 2.2.2 Funcionamiento

El cono de penetración varía por lo general, en rangos de 10 cm<sup>2</sup> y 15 cm<sup>2</sup>, llegando incluso a 40 cm<sup>2</sup>. La Figura 3 muestra un rango de tamaños de conos, desde un mini cono de 2 cm<sup>2</sup> hasta un cono más ancho de 40 cm<sup>2</sup>. Los mini conos son usados para investigaciones superficiales mientras que los conos más anchos pueden ser usados para suelos gravosos.



Figura 3: Rango de Sondas CPT: De izquierda a derecha: 2 cm<sup>2</sup>, 10 cm<sup>2</sup>, 15 cm<sup>2</sup>, 40 cm<sup>2</sup>, (Robertson, P., 2015)

El procedimiento del ensayo CPT consiste en penetrar estáticamente la punta del cono en el suelo a una velocidad constante de 20 mm/s, lo cual, permite medir la reacción que opone el suelo a la penetración del cono  $q_c$  y el roce del manto  $f_s$  por encima del mismo. El esquema y las partes del cono se presentan en la Figura 4. A medida que el cono se va introduciendo en el suelo, va registrando y graficando, de manera continua, los parámetros mencionados con respecto a la profundidad. Es importante destacar que la máquina se mantiene lo más verticalmente posible en la dirección de empuje, con el fin de no tener problemas en la obtención de los datos.

En el caso de utilizar el ensayo CPTU, este adiciona la instalación de un sensor de presión intersticial,  $u$ , lo que permite medir, además de los parámetros indicados en el párrafo anterior, la presión de poros en el suelo. Para entender de mejor manera el funcionamiento del ensayo CPT, explicado anteriormente, se presenta en la Figura 4 un esquema y partes principales del cono.

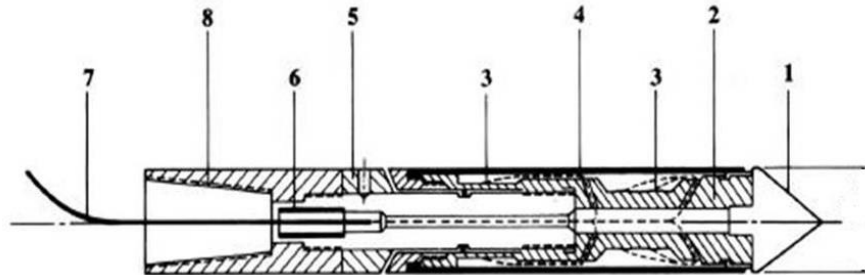


Figura 4: Esquema y Partes del Cono CPT, (Robertson, P. 2015)

1. Punta cónica
2. Celda de carga
3. Extensómetros
4. Manto de fricción
5. Anillo de ajuste
6. Buje impermeable
7. Cable
8. Conexión con barras

Para realizar el ensayo CPT se necesitan los equipos de empuje, que consisten de barras de empuje, mecanismos de empuje y un marco de reacción. Los equipos de empuje para aplicación en tierra generalmente consisten en unidades especialmente construidas para ser montados en camiones. El CPT también puede ser llevado a cabo mediante un sistema de perforación anclado

El tipo de equipos de empuje sobre agua, variará dependiendo la profundidad a la que se necesite. Las barcas flotantes son comunes en aguas poco profundas (menor a 30 metros). En aguas profundas (mayor a 1000 metros) es común colocar, los equipos de empuje en el fondo submarino, utilizando sistemas especialmente diseñados para el fondo del mar.

### 2.2.3 Calibración del Ensayo

En arcillas blandas, limos y lugares con presencia de agua el esfuerzo total se divide en dos esfuerzos; el primero, es generado por la existencia de agua ( $u$ ) en los espacios vacíos y el segundo es producido por los sólidos del suelo en sus puntos de contacto. Por lo tanto, a la medición de  $q_c$ , se debe agregar la presión de poros actuando sobre el cono, para así obtener la resistencia total,  $q_t$ :

$$q_t = q_c + u_2 * (1 - a)$$

Donde "a" es la relación de área neta determinada en laboratorio con valores entre 0,7 y 0,85. En suelos arenosos, se puede considerar  $q_c = q_t$ .

Una corrección similar debe ser aplicada para la fricción del manto:

$$f_t = f_s - (u_2 A_{sb} - u_3 A_{st}) / A_s$$

Donde:

- $f_s$ : Medida de fricción del manto [MPa]
- $u_2$ : Presión de poros en la base del manto [MPa]
- $A_{sb}$ : Área de sección del manto en la cima [m<sup>2</sup>]
- $u_3$ : Presión de poros en la cima del manto [MPa]
- $A_{st}$ : Área de sección del manto en la cima [m<sup>2</sup>]
- $A_s$ : Área de superficie del manto [m<sup>2</sup>]

## 2.2.4 Ventajas y Desventajas

Una de las mayores aplicaciones del ensayo CPT es describir el perfil y el tipo de suelo. El CPT puede ser usado para proveer características mecánicas del suelo, normalmente, los valores de resistencia de punta del cono son altos para arenas pero bajos en suelos arcillosos. Lamentablemente este ensayo no provee las características físicas del suelo, como por ejemplo, la distribución del tamaño del grano. Por lo tanto, la predicción del tipo de suelo, basado en el ensayo CPT, se presenta en una gráfica conocida como El tipo de Comportamiento del Suelo (SBT).

La grafica más común para el tipo de comportamiento de suelo, la propuso Robertson et al (1986). El gráfico puede predecir, de manera razonable, el tipo de comportamiento de un suelo para sondajes de CPT hasta 20 metros.

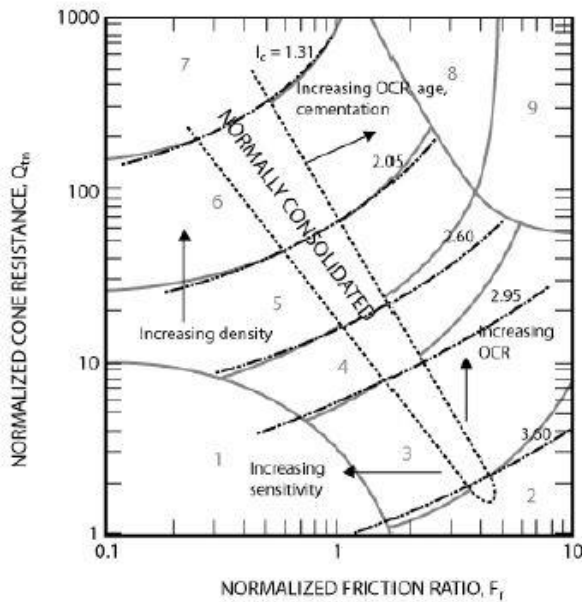
Debido a que la resistencia de penetración del cono y la resistencia del manto aumenta con la profundidad, dado el incremento de la sobrecarga efectiva, los datos de CPT requieren una normalización para sobrecargas en casos de sondaje superficial y/o sondajes muy profundos. La gráfica del tipo de comportamiento del suelo normalizada fue propuesta por Robertson (1990) y se observa en la Figura 5. La gráfica muestra las tendencias generales en la respuesta de los suelos, como el incremento de la densidad, OCR, edad y cementación para suelos arenosos, el incremento de esfuerzo en el tiempo y la sensibilidad para suelos cohesivos.

Una ventaja importante del ensayo CPT, es que existen numerosas correlaciones para estudiar las propiedades del suelo. Algunas de ellas son: la densidad relativa, módulos de Young y corte y el ángulo de fricción (drenado), para suelos granulares y resistencia al corte no drenada, coeficiente de sobreconsolidación, sensibilidad y presión de preconsolidación para arcillas o suelos cohesivos. Además, Robertson, et al. 1983 presentaron una relación con el ensayo SPT como función del tamaño medio de grano  $D_{50}$ .

De acuerdo a lo descrito anteriormente del ensayo de penetración CPT, se pueden definir sus principales ventajas y desventajas presentadas en la Tabla 3

Tabla 3: Ventajas y desventajas del ensayo CPT.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfiles continuos de manera rápida (gran cantidad de perfiles por día)</li> <li>• Permite estimación de parámetros resistentes</li> <li>• Muy bueno para suelos blandos</li> <li>• Datos confiables (no dependen del operador)</li> <li>• Gran profundidad de inspección</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No funciona bien en suelos gravosos</li> <li>• Costo elevado</li> <li>• No se obtienen muestras durante el ensayo</li> </ul>



Zone	Soil Behavior Type	$I_c$
1	Sensitive, fine grained	N/A
2	Organic soils – clay	> 3.6
3	Clays – silty clay to clay	2.95 – 3.6
4	Silt mixtures – clayey silt to silty clay	2.60 – 2.95
5	Sand mixtures – silty sand to sandy silt	2.05 – 2.6
6	Sands – clean sand to silty sand	1.31 – 2.05
7	Gravelly sand to dense sand	< 1.31
8	Very stiff sand to clayey sand*	N/A
9	Very stiff, fine grained*	N/A

Figura 5: Gráfica del tipo de comportamiento del suelo normalizado (Robertson, P. 2015)

### 3 ANTECEDENTES Y OBTENCIÓN DE DATOS

#### 3.1 SITIO EXPERIMENTAL DE DUNKERQUE

La zona de estudio está ubicada en la costa de Francia, cerca de las ciudades de Dunkerque y Gravelines. El suelo es propiedad de la Autoridad Portuaria de Dunkerque (PAD) y limita al este con el puerto exterior del puerto occidental. El nivel promedio del suelo es de aproximadamente 8,5 metros sobre el nivel medio del mar y varía ligeramente en algunos sitios debido a la acción del viento y la formación de pequeñas dunas.

##### 3.1.1 Pruebas CLAROM y BRE

Este sitio fue elegido por el consorcio francés de investigación CLAROM para una prueba de pilotes a gran escala. En 1988 se llevó a cabo una investigación del sitio que comprendía un pozo de 26,4 metros de profundidad y dos ensayos CPT. Se extrajeron muestras usando tubos de muestreo de 0,11 metros de diámetro, para luego usarlas en la clasificación del suelo en el laboratorio. En la Figura 6 se presenta el plano del sitio que muestra las pruebas in situ y la instalación de pilotes.



Figura 6: Localización del sitio de ensayos de CLAROM en Dunkerque, (Chow,F. 1997)

Según los estudios realizados por CLAROM, la estratigrafía del sitio se resume en la Tabla 4 y la Figura 7 muestra el registro obtenido del ensayo CPT, los perfiles  $q_c$  y  $f_s$ . El nivel freático se encontró a los 4 metros.

Tabla 4: Estratigrafía obtenida por CLAROM en Dunkerque

Profundidad aproximada bajo la superficie (m)	Suelo
0-3	Relleno Hidráulico
3-7,6	Arena Upper Flandrian
7,6-8,2	Capa de Suelo Orgánico
8,2-≈30	Arena Middle Flandrian
≈30	Arcilla

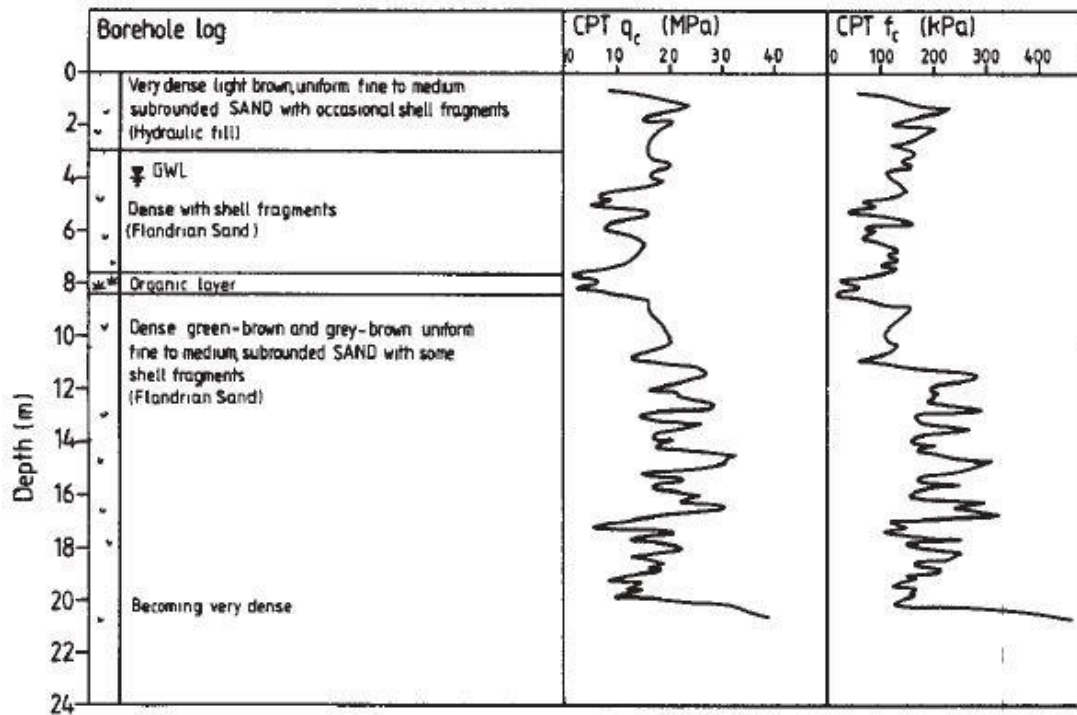


Figura 7: Perfiles y estratigrafía obtenidos por CLAROM en Dunkerque, (Chow,F. 1997)

En la Figura 7 se muestra el relleno de arena que se colocó entre 1972 y 1975 para elevar el nivel suelo en 3 metros. El relleno surgió del dragado del puerto occidental adyacente y tiene el mismo origen geológico que los depósitos naturales que se encuentran debajo del sitio. Después de su colocación, el relleno se dejó drenar naturalmente. Además en la misma figura, se presenta la Arena Flandrian que es una arena marina depositada durante la época holocena. Los substratos a menudo están separados por capas orgánicas, compuestos por restos de vegetación que crecieron cuando el área se ubicaba sobre el nivel del mar. Finalmente se presenta la arcilla marina, que también se conoce como Argile de Flandes, y data del periodo eoceno. Esta se extiende debajo de la parte sur del mar del norte y aflorando en Francia a unos 10 kilómetros tierra adentro de Dunkerque.

En asociación con el programa de pruebas de pilotes IC, el Building Research Establishment (BRE) visitó el sitio en junio de 1994 y realizó ensayos CPT, dilatómetro, cono sísmico, ondas Rayleigh y una prueba de penetración dinámica in situ. Los dos perfiles CPT obtenidos por BRE se comparan con la prueba realizada por CLAROM seis años antes. De acuerdo a lo ilustrado en la Figura 8 se observa lo siguiente:

- En el relleno hidráulico los valores de  $q_c$  obtenidos promediaron aproximadamente 18 (MPa), alrededor de 10 (MPa) más bajos que los registrados por CLAROM, pero aun indicando un tipo de suelo de arena densa
- Ambas pruebas operadas indicaron una reducción de  $q_c$  de 5 (MPa) a los 4,8 metros, sugiriendo la presencia de una capa suelta o limosa. Estas reducciones no se midieron en la prueba CLAROM y no se observaron estratos inusuales en las muestras de perforación a esa profundidad.
- La capa orgánica a 8 metros se identificó en las cuatro pruebas mediante una reducción brusca de  $q_c$  y se confirmó en las muestras obtenidas.

- Bajo los 10 metros, los perfiles de  $q_c$  divergen y muestran una dispersión ( $\pm 20$  Mpa) indicando un depósito de densidad variable.

La densidad de las arenas marinas a menudo varían en virtud de su modo de deposiciones, y se ve muy afectada por la velocidad de deposición, la profundidad del agua y el grado de compactación por acción de las olas. La erosión superficial y la redeposición a través de la acción del viento, dan como resultado dunas sueltas.

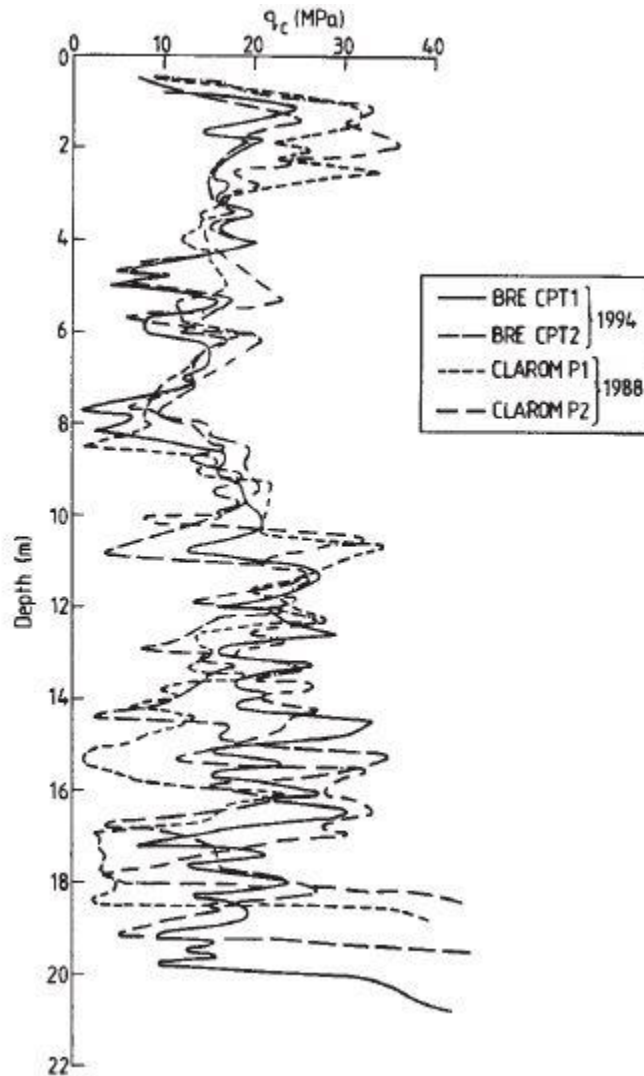


Figura 8: Perfiles de resistencia obtenidos por BRE y CLAROM, (Chow,F. 1997)

### 3.1.1.1 Pruebas de Clasificación

La Figura 9 muestra los resultados de los análisis de los tamices en IC, que generalmente caen dentro de la envolvente de los resultados de las pruebas CLAROM. La Arena Flandrian y el Relleno Hidráulico pueden describirse como arena uniforme, fina a mediana y de tamaño medio de partícula ( $D_{50}$ )  $\approx 0,25$  mm.

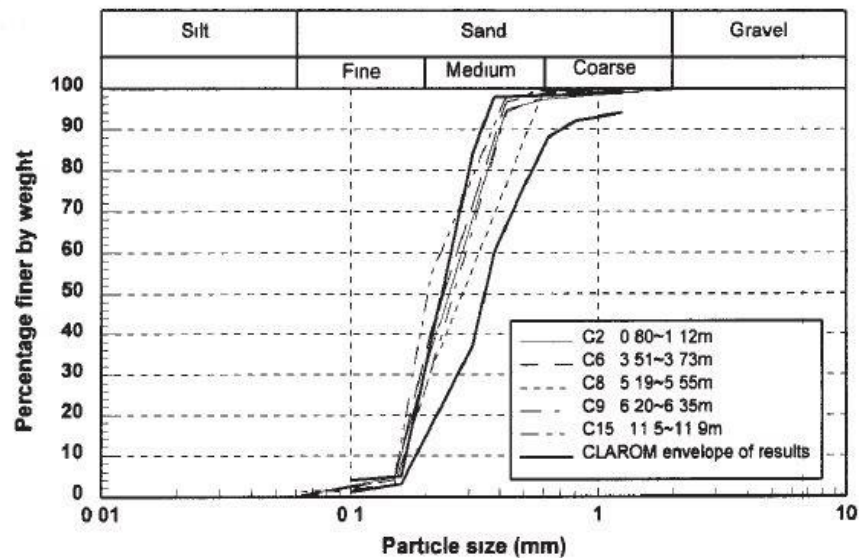


Figura 9: Distribución del tamaño de partículas en Dunkerque, (Chow,F. 1997)

Los granos de arena están rodeados por una forma redondeada, usando la clasificación desarrollada por Pettjohn (1949). Ocho análisis de gravedad específica realizadas siguiendo el procedimiento BS1377, dieron como resultado una gravedad específica media de 2,656 con una desviación máxima de 0,006. Las mediciones de densidad máxima y mínima se realizaron utilizando los métodos descritos en BS1377. Las densidades aparentes y las densidades relativas ( $D_r$ ) se combinan con las del estudio CLAROM. La presencia de la capa orgánica a 8 metros se identifica mediante la reducción de  $D_r$ .

La densidad relativa se puede determinar de manera más fiable usando correlación con las pruebas CPT. Los valores de  $q_c$ , medidos en el relleno hidráulico y confirmado en la prueba CLAROM, son inusualmente altos para valores poco profundos, lo que sugiere que las densidades relativas superan el 100%. La arena no se compactó durante la colocación ni posteriormente se sobrecargó, por lo que han supuesto condiciones normalmente consolidadas.

El coeficiente de empuje en reposo,  $K_0$ , es calculado como 0,4 usando la correlación desarrollada por Jaky (1944) para depósitos normalmente consolidados, donde el ángulo de fricción interna es  $37^\circ$  obtenido del ensayo triaxial.

### 3.1.2 Proyecto Pisa

En el marco del proyecto Pisa, el cual busca desarrollar un nuevo marco de diseño para pilotes cargados lateralmente en base a nuevos desarrollos teóricos, modelos numéricos y una evaluación comparativa frente a un conjunto de pruebas de pilotes de campo a gran escala, se desarrollaron pruebas que incluyen 3 tamaños de pilotes, desde 0,27 (m) de diámetro hasta 2,0 (m) e investigaciones en el sitio para ayudar a la interpretación de las pruebas de campo y pruebas in situ.

Para afrontar estas inquietudes y desarrollar un nuevo método de diseño para turbinas eólicas marinas, se estableció un gran proyecto de industria conjunta, PISA (Pile Soil Analysis). El proyecto involucra tres líneas de trabajo que incluyen: (a) el desarrollo de una nueva metodología de diseño (ver Byrne et al., 2015), (b)

modelo numérico a partir del cual se desarrolla el método de diseño (ver Zdravkovic et al., 2015) y finalmente (c) pruebas de campo para proporcionar datos contra los cuales se pueden evaluar y validar nuevos métodos.

Las pruebas se han desarrollado para un suelo de arena y un suelo arcilloso, ambos representativos de partes del Mar del Norte. Los sitios representativos de estos materiales han sido identificados; (a) Cowden, un sitio de arcilla en el noreste de Inglaterra y, (b) Dunkerque, un sitio de arena densa en el norte de Francia (Figura 10)



**Figura 10: Sitio de realización del proyecto Pisa**

Aunque la arena densa de Dunkerque ha sido caracterizada con anterioridad, a través de programas de prueba previos, fue necesario recopilar nuevos datos. Se llevó a cabo un programa de pruebas in situ que incluyó pruebas CPT, mediciones de presión y SDMT. Los resultados de los ensayos CPT se presentan a continuación en la Figura 11.

De acuerdo a lo obtenido en los resultados presentados en la Figura 11, se establece que los valores de fricción en el manto y presión de poros no son considerables, en comparación a la resistencia de punta, para asumir que se debe normalizar este último parámetro, confirmando nuevamente, la presencia de arena en el sitio. Además, comparando estos resultados con lo presentado en Pruebas CLAROM y BRE en los primeros 10 metros, se puede establecer que en el proyecto PISA, se obtuvieron mayores valores de resistencia de punta que en las pruebas CLAROM y BRE presentadas en la Figura 8, aumentando en aproximadamente 10 (MPa) su valor máximo de resistencia.

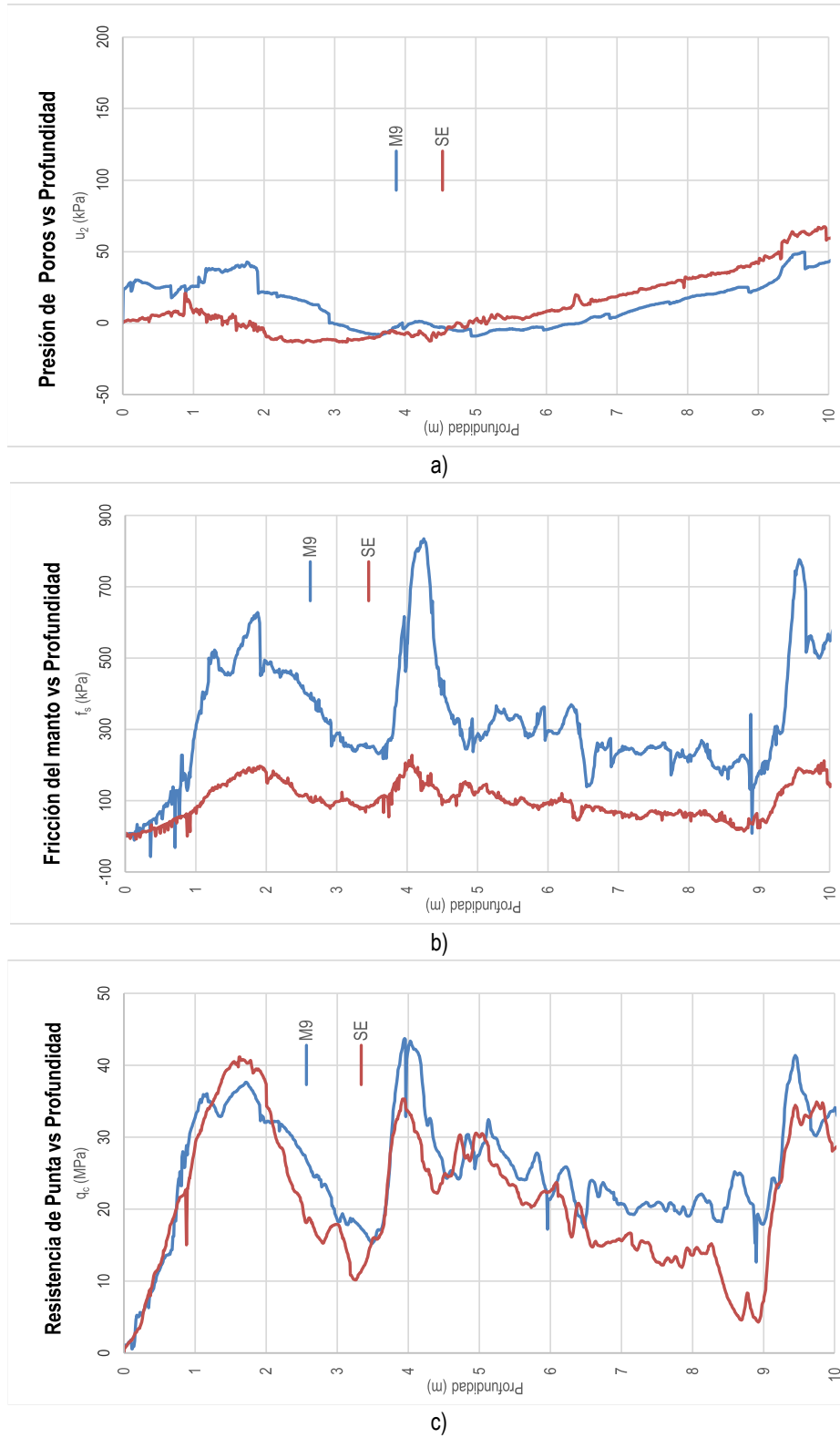


Figura 11: Resultados ensayo CPT M9 y SE Proyecto Pisa a) Presión de Poros vs Profundidad b) Fricción en el Manto vs Profundidad c) Resistencia de Punta vs Profundidad

### 3.2 CAMPAÑAS AÑO 2016

Los datos y resultados de los ensayos PANDA y CPT que se utilizaran en esta memoria, realizados en la localidad de Dunkerque, en el marco de un proyecto internacional de investigación, se presentan a continuación con el fin de lograr cumplir los objetivos presentados anteriormente. La realización de los ensayos PANDA y CPT comenzó el día 26 de enero del año 2016. En la campaña se realizaron 19 ensayos PANDA2 y 4 ensayos CPT. La ubicación de cada ensayo y las coordenadas de estos se pueden apreciar en la Figura 12 y en la Tabla 5. Además se adjuntan imágenes de la campaña de terreno en la Figura 13.

NOTA: Las coordenadas X e Y son medidas desde un punto de referencia (0,0) ubicado en Latitud 51° 1'11,46"N y Longitud 2° 9'8,27"E.

Tabla 5: Coordenadas de ubicación ensayos PANDA en la campaña año 2016

<b>Ensayo</b>	<b>Panda2-1</b>	<b>Panda2-2</b>	<b>Panda2-3</b>	<b>Panda2-4</b>	<b>Panda2-5</b>	<b>Panda2-6</b>
X(m)	-31,1	-10,3	-27,5	-20,3	-12,2	-22,5
Y(m)	3,4	3,7	-5,5	7,8	10,6	7,1
<b>Ensayo</b>	<b>Panda2-7</b>	<b>Panda2-8</b>	<b>Panda2-9</b>	<b>Panda2-10</b>	<b>Panda2-11</b>	<b>Panda2-12</b>
X(m)	-14,8	-14,3	-24,1	-20,2	-21,0	-9,0
Y(m)	2,4	0,3	-3,3	-1,9	0,0	7,8
<b>Ensayo</b>	<b>Panda2-13</b>	<b>Panda2-14</b>	<b>Panda2-15</b>	<b>Panda2-16</b>	<b>Panda2-17</b>	<b>Panda2-18</b>
X(m)	-29,2	-13,5	-14,9	-6	-17,5	-30,2
Y(m)	-0,9	-3,1	8,7	3,5	4,0	-1,7
<b>Ensayo</b>	<b>Panda2-19</b>	<b>CPT1</b>	<b>CPT2</b>	<b>CPT3</b>	<b>CPT4</b>	
X(m)	-10,0	-28,4	-18,3	-8,3	-17,5	
Y(m)	13,5	2,5	5,3	8,3	-1,7	

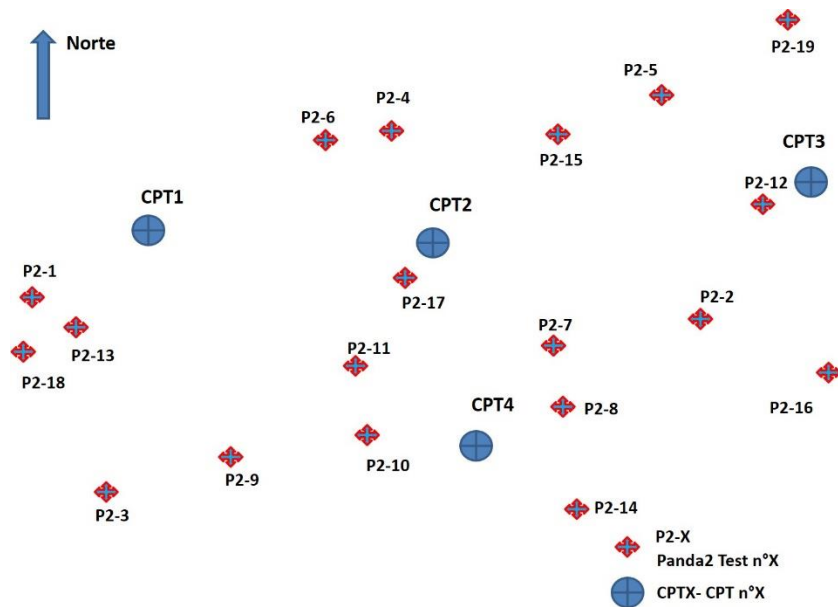


Figura 12: Ubicación de los ensayos Panda y CPT en Dunkerque



a)



b)

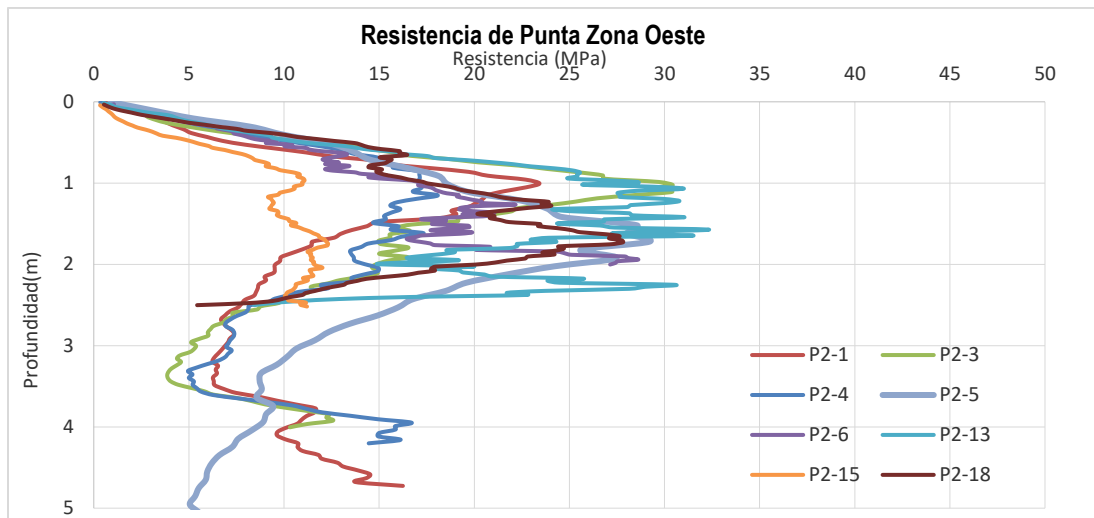
Figura 13: Sitio de estudio de Dunkerque año 2016 a) Realización de ensayos Panda b) Realización de ensayo CPT

### 3.2.1 Resultados de Caracterización Geotécnica

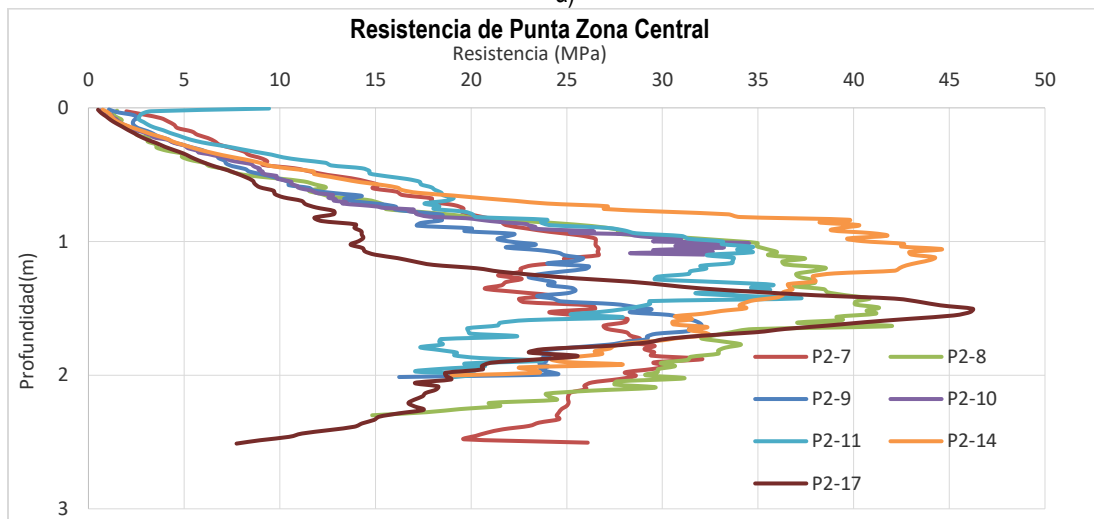
#### 3.2.1.1 PANDA

Realizados los 19 ensayos PANDA2 se obtienen los gráficos profundidad (metros) vs resistencia de punta (MPa), que se presentan en la Figura 14. Para un mejor análisis y exposición de los resultados se divide la zona de estudio, presentada en la Figura 12, en tres; a) Zona Oeste (Baja Resistencia), b) Zona Centro (Alta Resistencia) y c) Zona Este (Baja Resistencia). Donde la zona de alta resistencia se identifica por tener un valor máximo mayor a 32 (MPa) y la zona de baja resistencia menor o igual a 32 (MPa).

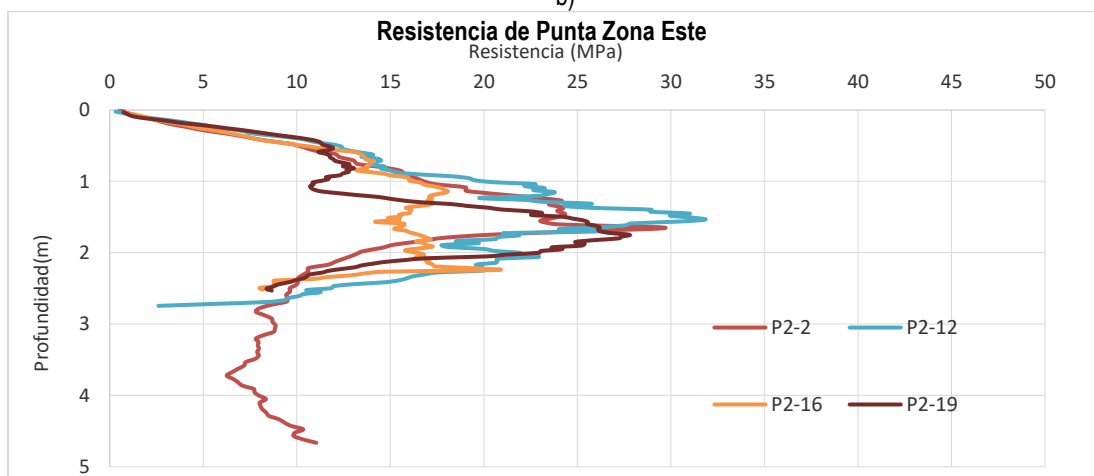
- a) **Zona Oeste (Baja Resistencia):** Panda2-1, Panda2-3, Panda2-4, Panda2-5, Panda2-6, Panda2-13, Panda2-15 y Panda2-18.
- b) **Zona Centro (Alta Resistencia):** Panda2-7, Panda2-8, Panda2-9, Panda2-10, Panda2-11, Panda2-14 y Panda2-17.
- c) **Zona Este (Baja Resistencia):** Panda2-2, Panda2-12, Panda2-16 y Panda2-19.



a)



b)



c)

Figura 14: Perfiles Resistencia de punta vs profundidad de ensayos Panda campaña 2016 a) Zona Oeste b) Zona Centro c) Zona Este

La Tabla 6 presenta un resumen con los resultados de los 19 ensayos PANDA2.

Tabla 6: Resumen de resultados de ensayos Panda año 2016

PANDA2-	Profundidad [m]	Profundidad de Máximo de Resistencia [m]	Máximo de Resistencia [Mpa]
1	4,72	1,01	23,43
2	4,66	1,65	29,70
3	4,01	1,03	30,43
4	4,20	1,15	18,09
5	10,01	1,72	29,22
6	2,00	1,94	28,62
7	2,51	1,88	32,09
8	2,30	1,54	41,98
9	2,01	1,63	32,03
10	1,10	1,01	34,32
11	2,01	1,43	37,17
12	2,75	1,55	31,85
13	2,50	1,53	32,32
14	2,00	1,06	44,62
15	2,52	1,74	12,31
16	2,52	2,24	20,74
17	2,51	1,50	46,22
18	2,50	1,73	27,81
19	2,53	1,75	27,80

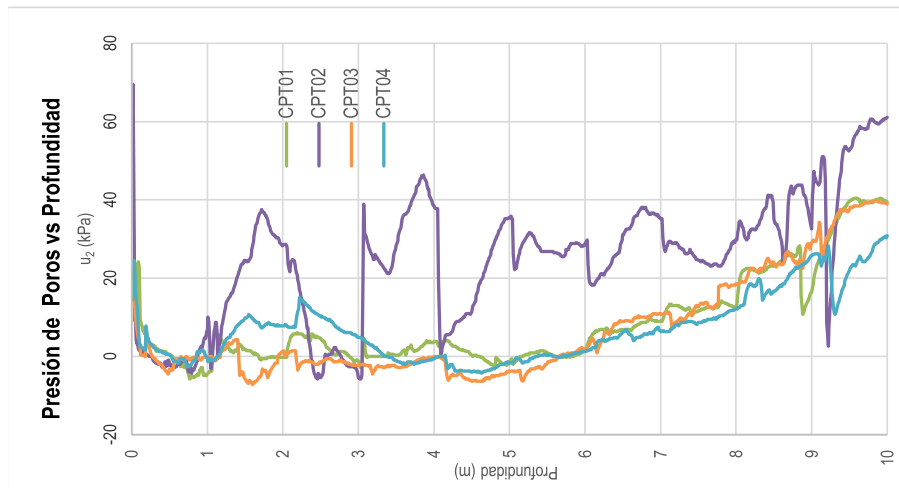
Con respecto a la Figura 14 y la Tabla 6, se puede notar que sólo 5 ensayos PANDA2 superan los 3 metros y el valor máximo de resistencia de punta (46,2 MPa) se obtiene en el ensayo PANDA2-17, que se ubica muy cerca del ensayo CPT2, como se mostró en la Figura 12. Además el único ensayo que llega hasta los 10 metros de profundidad es el ensayo PANDA2-15.

### 3.2.1.2 Ensayos CPT

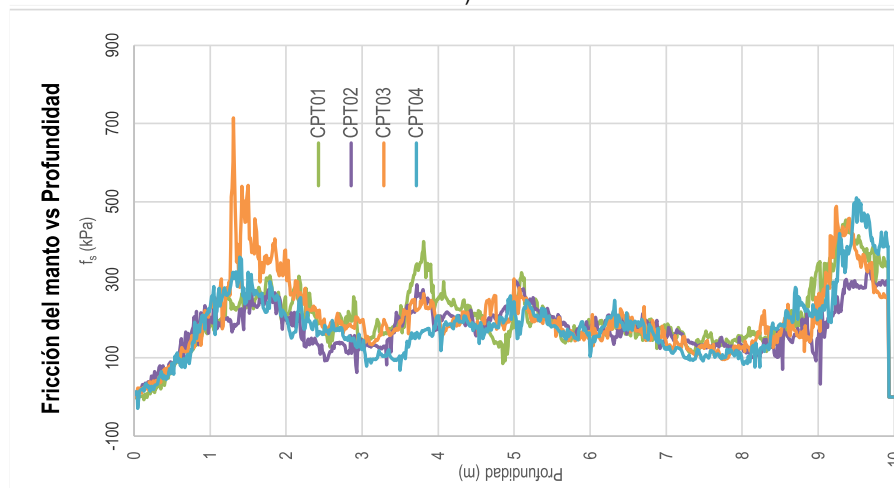
Se presenta los gráficos de Resistencia de punta (MPa), Resistencia a la fricción del manto (kPa) y Presión de poros (kPa) vs Profundidad (m) en la Figura 15 para los 4 ensayos CPT realizados.

En relación a los resultados presentados se puede concluir que, como se mencionó anteriormente, la arena de Dunkerque no presenta un valor de presión de poros importante, por lo que no es necesario corregir el valor de  $q_c$  ni  $f_s$ . Esta afirmación se confirma con lo presentado anteriormente en la sección Proyecto Pisa, donde los valores de presión de poros en ambos ensayos no superan los 80 (kPa), valor considerablemente menor que los 21,4 [MPa] de promedio que se obtuvo para el parámetro  $q_c$ . Además se puede notar una similitud con el proyecto pisa en la medición de resistencia, ya que en ambos casos se presenta un valor máximo de resistencia cercano a los 45 (MPa).

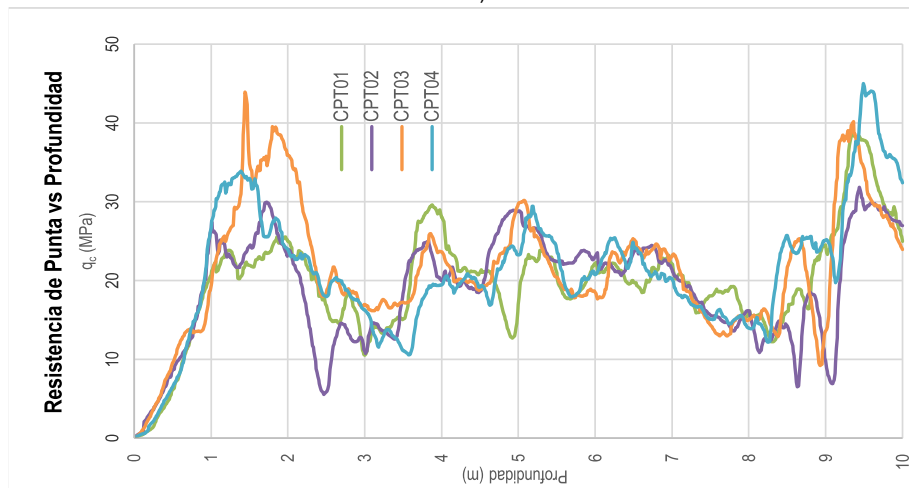
Comparando la Figura 15 con los resultados en la Figura 14, el valor máximo de resistencia (43,92 MPa aproximadamente) presentado por el ensayo CPT3 no coincide con la división de la zona presentada anteriormente, ya que este ensayo se ubica en una zona de baja resistencia Este, lo que no cumple con la característica de la zona de tener un valor máximo de resistencia menor a 32 (MPa). Esto también sucede para el ensayo CPT2, que presenta un valor de resistencia máxima de 29,91 (MPa) pero según la zonificación mediante los resultados de los ensayos PANDA2, este ensayo se encuentra en una zona de alta resistencia y ubicado muy cerca del ensayo PANDA2 que presentó un mayor valor de resistencia de punta.



a)



b)



c)

Figura 15: Perfiles de ensayos CPT realizados en la localidad de Dunkerque 2016 a) Presión de Poros vs Profundidad b) Fricción del Manto vs Profundidad c) Resistencia de Punta vs Profundidad

## 4 METODOLOGÍA O DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Por medio de los datos obtenidos en terreno, se desarrollan 2 modelos 3D que permitan representar la zona de estudio. El primer modelo se realiza mediante el programa Rockworks y el segundo con el programa Stanford Geostatistical Modelling Software (SGEMS)

### 4.1 MODELOS DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL: ROCKWORKS

El programa Rockworks ofrece varios métodos para realizar la interpolación tridimensional de sus datos. Es por esto, que se analiza cada modelo, determinando sus ventajas y desventajas para el presente caso, con el fin de escoger el adecuado para lograr la mejor representación de los datos obtenidos en terreno.

- **Punto más cercano**

Es el método de modelado sólido más básico, en el que el valor de un punto del nodo se establece para que sea igual al valor del punto más cercano. Es fiel a un control de puntos, pero su metodología puede generar modelos con cambios bruscos.

- **Distancia al punto**

Este método asigna a cada nodo del modelo sólido un valor igual a la distancia al punto de control más cercano, generando así un modelo basado en la confianza de la distancia entre puntos. La distancia se encuentra en las unidades de X, Y y Z.

- **Distancia Inversa**

Este método asigna un valor al nodo basado en el promedio ponderado de puntos de datos cercanos o vecinos, ya sea en todos los puntos o aquellos localizados direccionalmente, usando exponentes de ponderación fijos o variables. La ponderación es diferente en función de su posicionamiento horizontal y vertical desde el nodo. Cuanto mayor sea el exponente que ingrese, menor será la influencia de esos puntos de datos. Además permite elegir 2 métodos de búsqueda de datos

- ✓ **Distancia Inversa Rápida**

Opción adecuada para grandes conjuntos de datos. Limita tanto el número de puntos de control generales que se utilizarán para interpolar un valor de voxel como el número de puntos por pozo a utilizar.

- Puntos máximos por Voxel: Utilice esta configuración para definir el número máximo de puntos de control que se van a utilizar para interpolar un voxel.
- Puntos máximos por pozo: Define el número máximo de puntos de control por pozo que se utilizará para la interpolación.

- ✓ **Todos los puntos**

Esta opción permite utilizar todos los puntos de control al asignar valores al nodo. Esta es la opción más rápida, ya que no se realiza una búsqueda de puntos. Se debe tener en cuenta que si se

definen los exponentes horizontal y vertical con el valor 2 y se ha seleccionado todos los puntos, esto es igual que un modelo Isotrópico.

- **Isotrópico**

El programa utilizara todos los datos de puntos disponibles al calcular los valores de los nodos, útil al modelar uniformemente datos distribuidos en perforaciones no estratiformes.

- **Anisotropico**

En lugar de utilizar todos los puntos de control disponibles para el modelo de distancia inversa, el programa buscara el punto más cercano en cada sector de 90 grados alrededor del nodo, útil para modelar datos basados en perforaciones de depósitos estratiformes.

- **Ponderación Direccional**

Funciona como el método de distancia inversa excepto que se puede especificar la dirección de tendencia y la intensidad.

## 4.2 DESARROLLO DE UN MODELO GEOESTADÍSTICO

### 4.2.1 Introducción

La geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales. Su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos, por lo que la definición de geoestadística se presenta como el estudio de fenómenos regionalizados, es decir, que se propagan en el espacio y presentan una cierta continuidad. En contraposición con la estadística clásica o convencional, tales valores no se consideran independientes, por el contrario se suponen de manera implícita que están correlacionados unos con otros, o sea, que existe una dependencia espacial.

El uso de la geoestadística se extiende en varias ramas de la Ingeniería, en especial en la Ingeniería Minera, que involucran variables regionalizadas. A continuación se definen algunos conceptos:

- **Variable Regionalizada:** Las variables regionalizadas son aquellas cuyos valores están relacionadas con ubicaciones precisas en el tiempo y/o espacio, es decir, variables georeferenciadas.  
Se espera que dos valores continuos  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$ , separados por una distancia  $h$ , estén relacionados entre sí, esto es, que sus valores sean dependientes uno del otro. Esto implica que toda la variable tiene un patrón de distribución, ya que nada se considera al azar. Esta distribución espacial es necesario para el análisis de los datos.
- **Histograma:** El histograma representa gráficamente las frecuencias de ocurrencia en función del valor. Consiste en dividir el rango de los valores en intervalos (generalmente, con el mismo ancho) y visualizar la proporción de datos que caben dentro de cada intervalo.

- Covarianza: La covarianza es una medida del grado de asociación entre dos variables. La asociación entre las variables puede ser directa o inversa. El inconveniente de la covarianza es que puede tomar cualquier valor real, lo que dificulta una interpretación más fina.

#### 4.2.2 Análisis Variográfico

Para analizar la distribución espacial de la variable regionalizada se utiliza una de las herramientas más importantes de la geoestadística, el Variograma o Semivariograma. Este corresponde a una gráfica o expresión matemática que cuantifica la diferencia entre los pares de las muestras para una orientación determinada. Además, refleja la distancia máxima y la forma en que un punto tiene influencia sobre otro punto a diferentes distancias.

Su fórmula empírica es la siguiente:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(n-h)} * \sum_{i=1}^{n-h} |Z_{(x+h)} - Z_x|^2$$

Donde:

El variograma teórico clásico se caracteriza como se muestra a continuación:

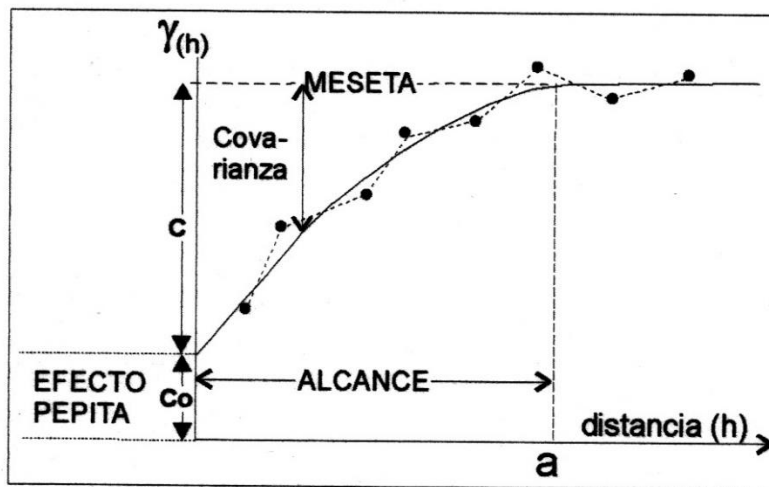


Figura 16: Caracterización variograma teórico, (Henaó, R. 1993)

Donde,

- h: Paso entre las muestras
- $C_0$ : Efecto Pepita
- a: Alcance
- $C + C_0$ : Meseta
- $\sigma^2$ : Varianza estadística

De acuerdo a la Figura 16, dentro de la distancia “a” (alcance), la variable es totalmente estructurada, es decir, depende o está controlada, por la función  $\gamma(h)$ . Más allá de “a”, la variable es aleatoria, o sea independiente de la función del variograma. La curva se transforma en una meseta, cuyo valor teóricamente debe coincidir con la varianza estadística de todos los datos involucrados en el cálculo del variograma, lo cual no siempre es el caso.

El efecto pepita, o nugget effect, presentado en el gráfico, se utiliza cuando la función presenta, principalmente, discontinuidades en el origen debido a cambios bruscos de los valores a pequeña escala. También puede deberse a otros factores, entre los cuales destacan:

- Presencia de una “micro-estructura”
- Soporte de las mediciones
- Errores de medición
- Errores de ubicación de los datos

Otro fenómeno importante de analizar, en un análisis variográfico, es la anisotropía. Las anisotropías se manifiestan cuando el variograma difiere según las direcciones del espacio, es decir, cuando la correlación entre los datos depende en la que ésta se calcule. En ausencia de anisotropía,  $\gamma(h)$  solo depende del módulo del vector de separación  $h$ , no de su orientación. Como los modelos elementales de variograma están definidos para el caso isótropo, se debe examinar las transformaciones que permiten el paso a modelos anisótropos.

En la práctica, las anisotropías se pueden identificar al comparar los variogramas experimentales calculados a lo largo de varias direcciones del espacio.

### 4.2.3 Stanford Geostatistical Modeling Software: SGEMS

SGEMS es un programa desarrollado para la aplicación de la geoestadística. En éste, se pueden realizar, entre otras operaciones, cálculos de variograma experimental, utilización de la herramienta krigin y desarrollos de modelos 3D, por lo que, a continuación se definen parámetros y modelos que permitan efectuar estas tareas.

#### 4.2.3.1 Parámetros

Para calcular un variograma, no se puede esperar que los datos estén separados exactamente por el vector  $h$ . Esto puede ocurrir solamente si se tienen datos en una malla regular. Por esta razón, en el cálculo de un variograma experimental, se utiliza una aproximación. Se consideran los siguientes parámetros (mostrados en la Figura 17) para el cálculo experimental, incluyendo aquellos que permiten aproximar la búsqueda (tolerancias):

- Number of Lags: Corresponde al número de pasos a calcular.
- Lag Separation: Es la distancia a la que se calcularán los puntos del variograma experimental. Comúnmente se elige la separación más pequeña entre los datos.

- Lag Tolerance: Corresponde a la tolerancia en la separación, de manera que los puedan encontrarse a una distancia mayor o menor al paso. Por defecto, este valor es 0.5 veces la distancia de separación.
- Azimuth: Es el ángulo de dirección en la que se calcula el variograma medida en un plano horizontal respecto al norte, en el sentido de los punteros del reloj.
- Dip: Es el ángulo de dirección medida en el plano vertical del azimuth en la que se calcula el variograma. Una inclinación de  $0^\circ$  corresponde a la dirección horizontal, considerándose positiva la dirección “hacia arriba” y negativa la dirección “hacia abajo”
- Tolerance: Este parámetro corresponde al ángulo dentro del cual se considera válido un punto, para el cálculo de la diferencia. En SGEMS es igual la tolerancia angular para el azimuth y dip.
- Bandwidth: Corresponde a una banda dentro de la cual se consideran validos los datos para el cálculo del variograma.

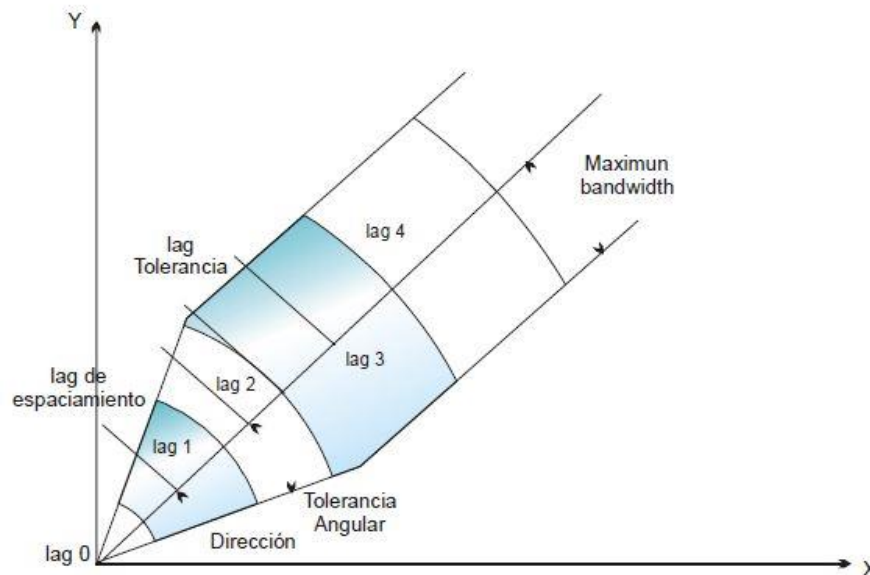


Figura 17: Región de tolerancia alrededor del vector h, (Lopez,C. 2016)

#### 4.2.3.2 Modelos del Variograma

Las fórmulas de los modelos de variograma, incluidos por el programa SGEMS, se observan a continuación, como también sus respectivas gráficas en la Figura 18:

- Modelo Esférico

El variograma esférico de alcance “a” y meseta se define como

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left( \frac{3}{2} * \frac{|h|}{a} - \frac{1}{2} * \left( \frac{|h|}{a} \right)^3 \right) & \text{si } |h| \leq a \\ C & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

- Modelo Exponencial

El variograma exponencial de parámetro “a” y meseta C se define como:

$$\gamma(h) = C * \left[ 1 - e^{\left( -\frac{|h|}{a} \right)} \right]$$

- Modelo Gaussiano

El variograma Gaussiano de parámetro a y meseta C se define como:

$$\gamma(h) = C * \left[ 1 - e^{\left( -\frac{|h|^2}{a^2} \right)} \right]$$

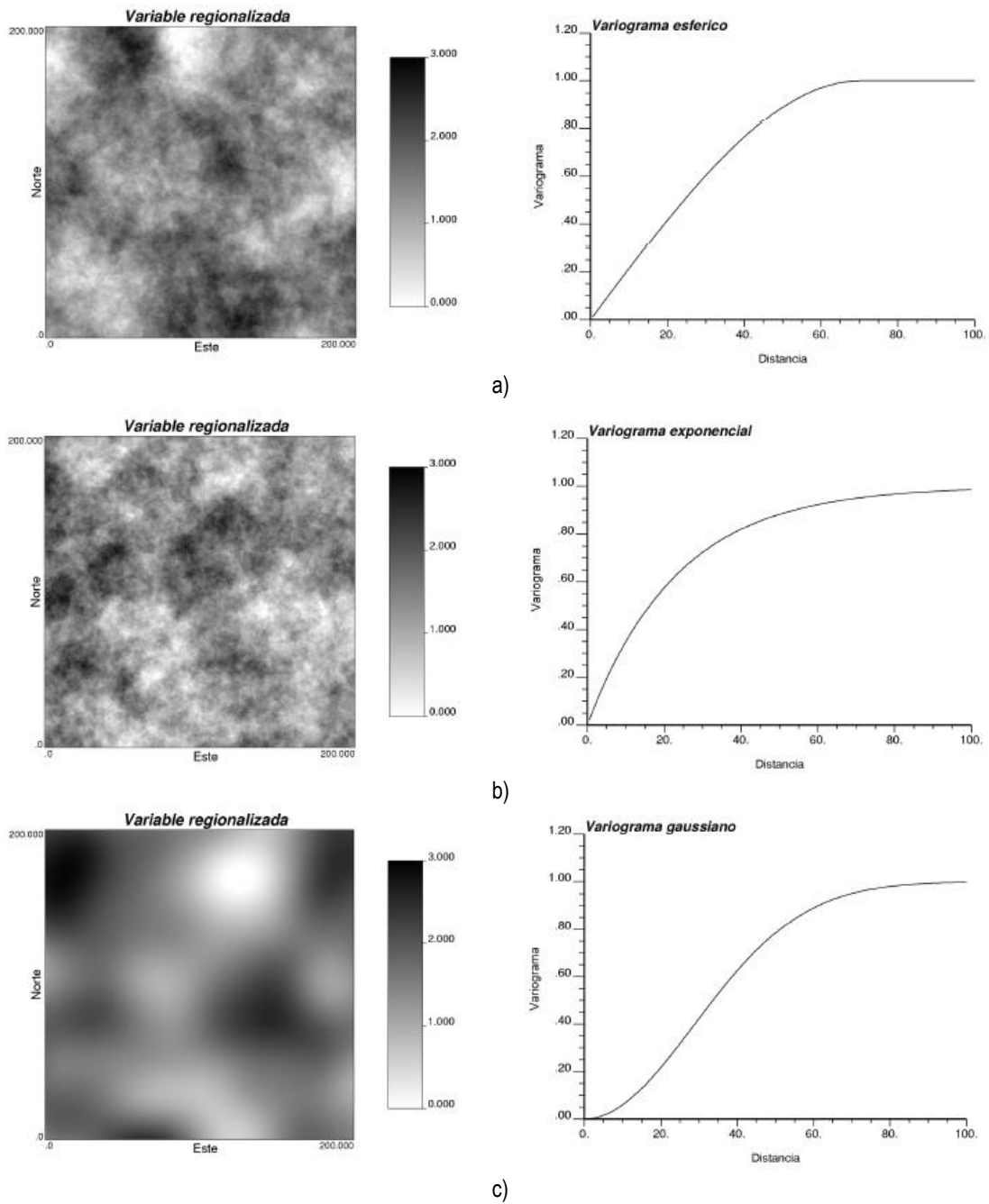


Figura 18: Gráfica del variograma a la derecha y ejemplo de variable regionalizada (izquierda): a) Modelo esférico b) Modelo exponencial c) Modelo gaussiano (Emery,X. 2013)

#### 4.2.4 Krigeage

El krigeaje es un método geoestadístico de estimación de puntos que utiliza un modelo de variograma (teórico) para obtener las ponderaciones que se darán a cada punto de referencia usado en la estimación. Existen varios tipos de Kriging, siendo el ordinario el más empleado. En el Kriging ordinario las medias locales no son necesariamente próximas a la media de la población, por lo que solo se utilizan los puntos vecinos para la estimación. Esto le da ventajas sobre otros métodos que utilizan a media de la población para cada estimación local.

Para el cálculo del Kriging se considera la siguiente formula:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i * f_i$$

Donde,

- n: Número de muestras obtenidas.
- f<sub>i</sub>: Valor obtenido en el punto i.
- w<sub>i</sub>: Peso asignado al punto i.

En el caso del Kriging ordinario, el valor de los pesos en el p-énésimo punto se calcula con la siguiente ecuación:

$$w_1S(d_{11}) + w_2S(d_{12}) + \dots + w_nS(d_{1n}) + \lambda = S(d_{1p})$$

$$w_1S(d_{21}) + w_2S(d_{22}) + \dots + w_nS(d_{2n}) + \lambda = S(d_{2p})$$

$$w_1S(d_{n1}) + w_2S(d_{n2}) + \dots + w_nS(d_{nn}) + \lambda = S(d_{np})$$

$$w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$$

Donde,

- S(d<sub>ij</sub>): Valor de la semivariancia de d<sub>ij</sub>.
- λ: Variable temporaria.
- w<sub>j</sub>: Peso del j-ésimo punto.

Una vez obtenidos los pesos se calculan los valores de los puntos interpolados

$$f_p = w_1 * f_1 + w_2 * f_2 + \dots + w_n * f_n$$

De esta forma es posible estimar, bajo un margen de error aceptable, el valor de la variable en distintos puntos y así realizar un mejor análisis de su distribución en el espacio.

## 5 RESULTADOS

Los datos utilizados en esta sección, son los presentados en el punto 3.2.1. Los cuales, mediante métodos de interpolación y la herramienta geoestadística, permiten realizar una estimación de la resistencia de punta,  $q_d$ , en toda el área de estudio, para compararlas con la resistencia de punta,  $q_c$ , en la ubicación de los ensayos CPT.

### 5.1 ROCKWORKS

#### 5.1.1 Metodología de Trabajo

La metodología a seguir, al utilizar el programa Rockworks, consiste en emplear los resultados de 19 ensayos PANDAS obtenidos en el área de análisis para generar un modelo 3D con algunos de los modelos que el programa posee. Mediante una validación cruzada se procedió a determinar el modelo que representa mejor los resultados determinados en terreno según el valor del coeficiente de correlación. Finalmente, con el modelo escogido, se obtienen los resultados en los puntos en que existen ensayos CPT.

#### 5.1.2 Definición de Grilla

Para definir la grilla de análisis, se define una grilla que permita abarcar todos los puntos, ya sea en el plano X e Y como también en la dirección Z (Profundidad). Es importante mencionar que se establece el valor máximo de 7 (definida en la Tabla 7), en la variable z, debido a que es el valor de elevación del terreno con respecto al nivel del mar. Se generó la grilla presentada en la Tabla 7, geo referenciada utilizando para ello el programa Google Earth como se muestra en la Figura 19

Tabla 7: Grilla de análisis Rockworks

Coordenadas	Máximo (m)	Mínimo (m)	Espaciamiento (m)
X (m)	-2	-32	5
Y(m)	15	-10	5
Z(m)	7	-4,25	0,25

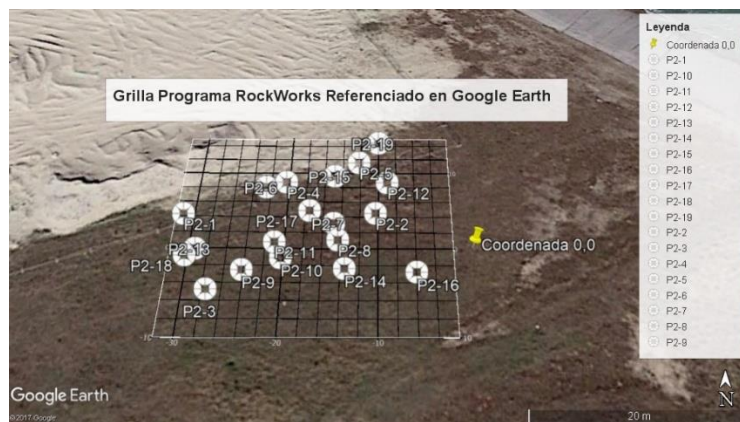


Figura 19: Grilla definida referenciada por Google Earth

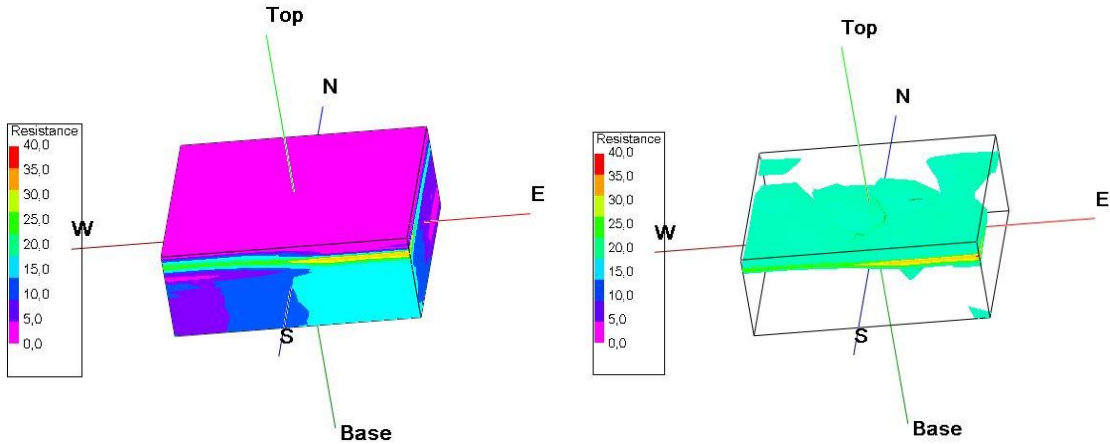
### 5.1.3 Resultados de Modelación

Para la elección del modelo que mejor represente la realidad de la zona de estudio, se genera un modelo 3D del volumen de la grilla definida. En el estudio, diseño y representación del sector analizado se considera un solo estrato (Arena Flandrian), ya que, como se presentó en el punto 3.2, la profundidad máxima de los 19 ensayos PANDA fue de 10 metros. Es importante destacar que se analizaran sólo 3 de los 6 modelos presentados en el punto 4.1, debido a la simplicidad de algunos modelos en el desarrollo de la interpolación de datos. Estos modelos son:

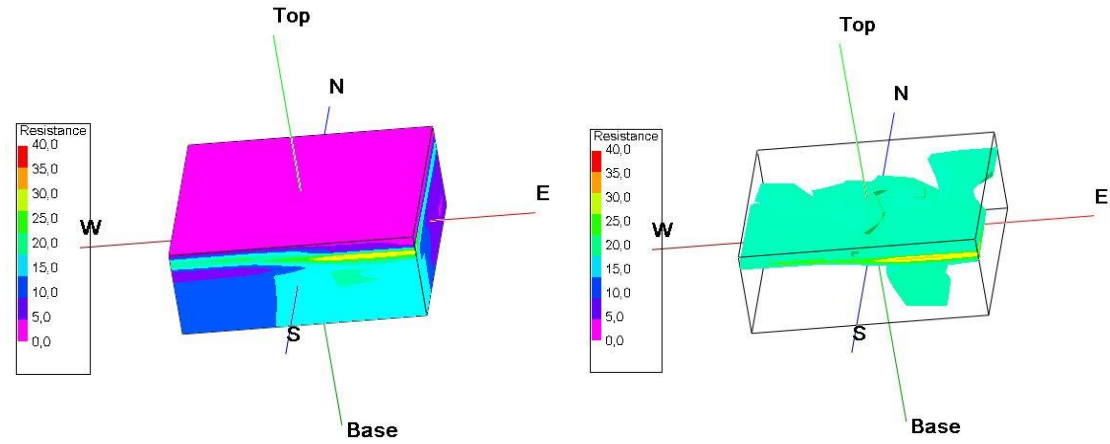
- Modelo Anisotropico
- Modelo Distancia Inversa Rápida
- Modelo Direccional

Los resultados de los distintos modelos se presentan en la Figura 20.

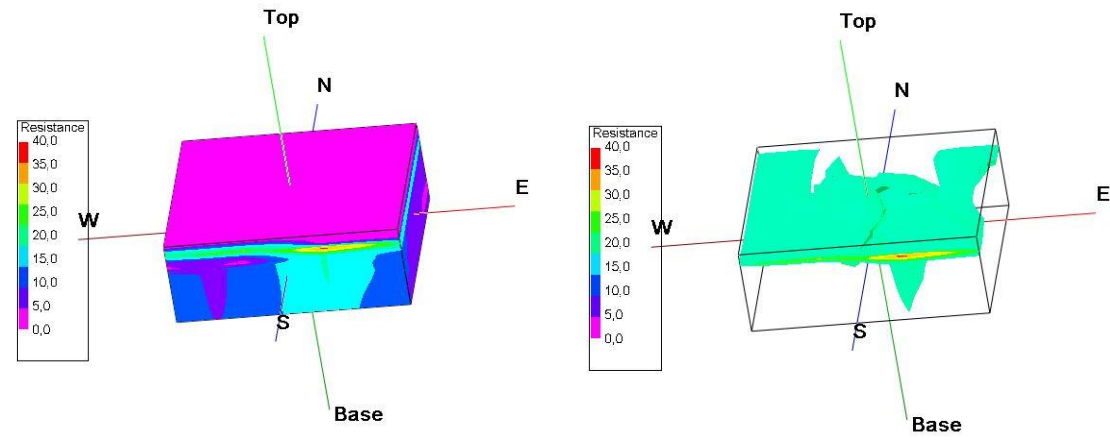
De manera cualitativa, los tres modelos muestran una resistencia menor o igual a 15 (MPa), tanto en la parte superior, como en la parte inferior del terreno (color morado y azul), mientras que una resistencia de 30 (MPa) o más (color amarillo, naranja y rojo) se ubica por debajo de la superficie, aproximadamente a 1 metro de profundidad. Esto demuestra que los modelos presentan un comportamiento similar a lo presentado por los ensayos CPT (en el punto 3.2) en los primeros metros de estudio, pero con mayor diferencia en los metros finales. Comparando sólo las gráficas que muestran los valores mayores a 20 (MPa) de cada modelo, se puede establecer que estos valores se ubican en la zona centro-sur de la grilla, destacando que los valores mayores a 30 (MPa) se encuentran en la zona Sur-Este a una baja profundidad.



a)



b)



c)

Figura 20: Modelo 3D todos los valores (izquierda), Modelo 3D con valores mayores a 20 (Mpa) (Derecha): a) Modelo anisotropico b) Modelo distancia inversa rápida c) Modelo direccional

### 5.1.4 Validación Cruzada

Con el objetivo de estudiar los resultados entregados por los distintos modelos, para determinar cuál es el modelo que mejor representa los datos obtenidos con los ensayos in situ, se procedió a realizar una validación cruzada. Esta técnica que consiste en, de la cantidad total de ensayos, se excluye uno del análisis y generación del modelo para luego, con el modelo ya desarrollado, determinar, en la coordenada donde se excluyó el ensayo, el valor que entrega el modelo sin este ensayo. Finalmente se comparara este valor con el ensayo excluido mediante un coeficiente de correlación. El modelo de interpolación que tenga un mayor coeficiente de correlación será el escogido.

Para realizar la validación cruzada en los 3 modelos utilizados, primero se excluye el ensayo PANDA2-1 que se encuentra en los límites de la grilla y que tiene pocos ensayos cerca de él. Luego, se excluye el ensayo PANDA2-7 que se encuentra en el centro y se halla rodeado por una gran cantidad de ensayos. Esto permite determinar un coeficiente de correlación para cada modelo en 2 casos diferentes, lo que genera una mayor seguridad al momento de escoger el modelo final del problema. La Figura 21 enseña la ubicación espacial de los dos ensayos escogidos

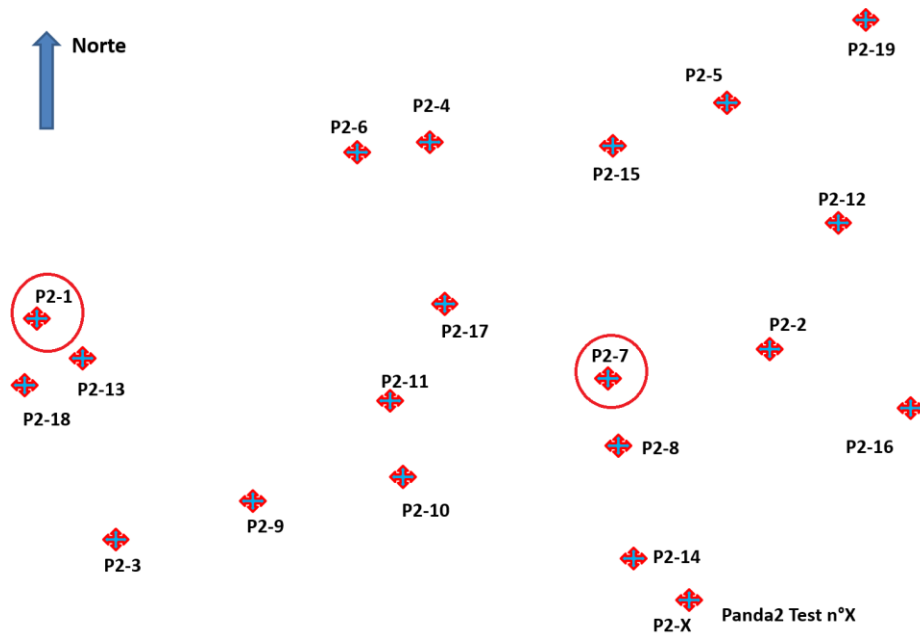


Figura 21: Presentación de los ensayos Panda con los que se realizara la validación cruzada

A continuación, luego de la aplicación de la validación cruzada, en la Figura 22 se presentan los resultados de los tres modelos en la coordenada de ubicación del ensayo Panda2-1 y Panda2-7 respectivamente.

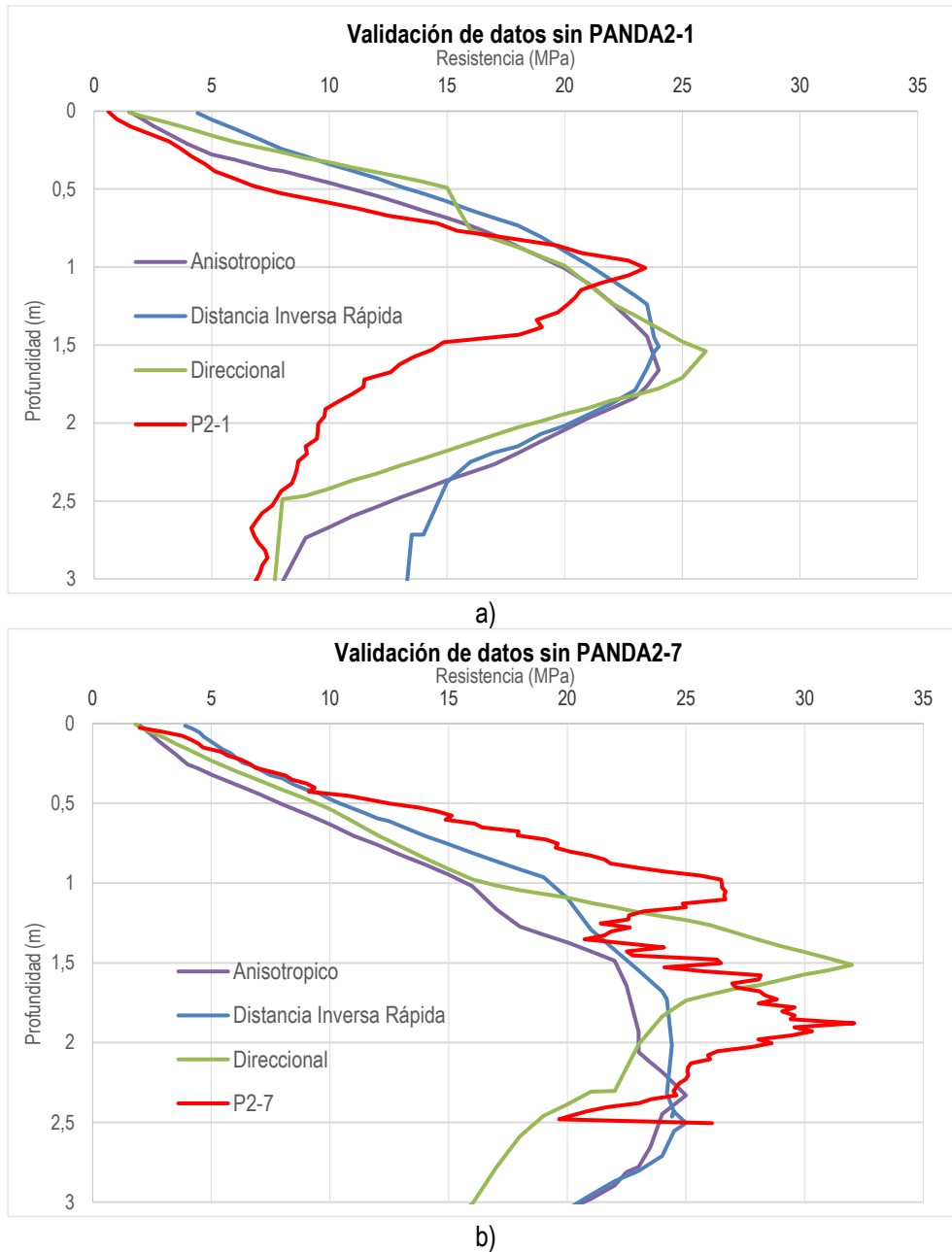


Figura 22: Gráficos del ensayo de validación de datos: a) Sin el ensayo PANDA2-1 b) Sin el ensayo Panda2-7

Analizando la Figura 22 a), se puede notar una menor semejanza entre la curva del ensayo PANDA2-1 y los modelos escogidos, en comparación con lo que se presenta en la Figura 22 b). Esto se puede deber, como se mencionó anteriormente, a que el ensayo PANDA2-7 se encuentra rodeado por una gran cantidad de otros ensayos. También, se puede advertir, que no es posible elegir un modelo que se asimile mejor a la curva obtenida en terreno, por lo que confirma lo establecido en un comienzo de obtener un coeficiente de correlación entre los modelos y las curvas de los PANDA para la elección final del modelo.

Para determinar el coeficiente de correlación, en primer lugar, se obtienen los valores de resistencia de todos los modelos (para los dos casos analizados) en los mismos valores de profundidad que los que se obtuvieron para el ensayo PANDA2-1 y PANDA2-7 en la campaña de terreno. Esto se logra mediante una interpolación en los valores obtenidos del modelo.

Según los resultados que se presentan en la Tabla 8, el modelo que mejor representa la campaña en terreno es el Modelo Distancia Inversa Rápida para ambos casos de la validación de datos. También, en vista de los resultados, se confirma lo descrito en la Figura 22, con respecto a que el ensayo PANDA2-7 presenta un mejor coeficiente correlación.

**Tabla 8: Coeficiente de correlación para la exclusión del ensayo PANDA2-1 y Panda2-7**

<b>Coeficiente de Correlación para exclusión del ensayo PANDA2-1</b>	
Modelo Anisotropico	0,725
Modelo Distancia Inversa	0,755
Modelo Direccional	0,635
<b>Coeficiente de Correlación para exclusión del ensayo PANDA2-7</b>	
Modelo Anisotropico	0,904
Modelo Distancia Inversa	0,924
Modelo Direccional	0,865

### 5.1.5 Resultados

Con la elección del modelo, se presenta el perfil de resistencia de punta, entregada por el programa Rockworks, para el modelo Distancia Inversa Rápida en las coordenadas donde se realizaron los cuatro ensayos CPT. A continuación se presentan los 4 gráficos en la Figura 23 y también, se adjunta en la Figura 24 un gráfico de la diferencia entre los resultados del modelo y los obtenidos en terreno, con respecto a la profundidad, para cada ensayo CPT. La diferencia es definida en la siguiente formula:

$$Diferencia = Resistencia_{Terreno} - Resistencia_{Programa}$$

Analizando, de manera cualitativa, los gráficos presentados en la Figura 23 se determina que el modelo 3D creado por el programa Rockworks presenta similitud con los valores reales hasta los 3 metros aproximadamente. Esto, se puede deber, a que de los 19 ensayos PANDA2, 14 tienen una profundidad de medición menor a los 3 metros (datos presentados en Tabla 6) por lo que el programa no representa de manera adecuada lo que pasa a mayor profundidad. Esto se puede confirmar, al observar que los 4 gráficos, desde aproximadamente los 3,5 metros de profundidad hasta los 10 metros, el programa genera un línea recta de valor casi constante, que en algunos casos se presenta como un valor cercano a los obtenidos en terreno (CPT1, CPT2 y CPT4) y en otros muy por debajo de la realidad (CPT3), no representando el comportamiento de los ensayos CPT en terreno. Bajo los 9 metros, ningún ensayo se acerca al valor obtenido en terreno.

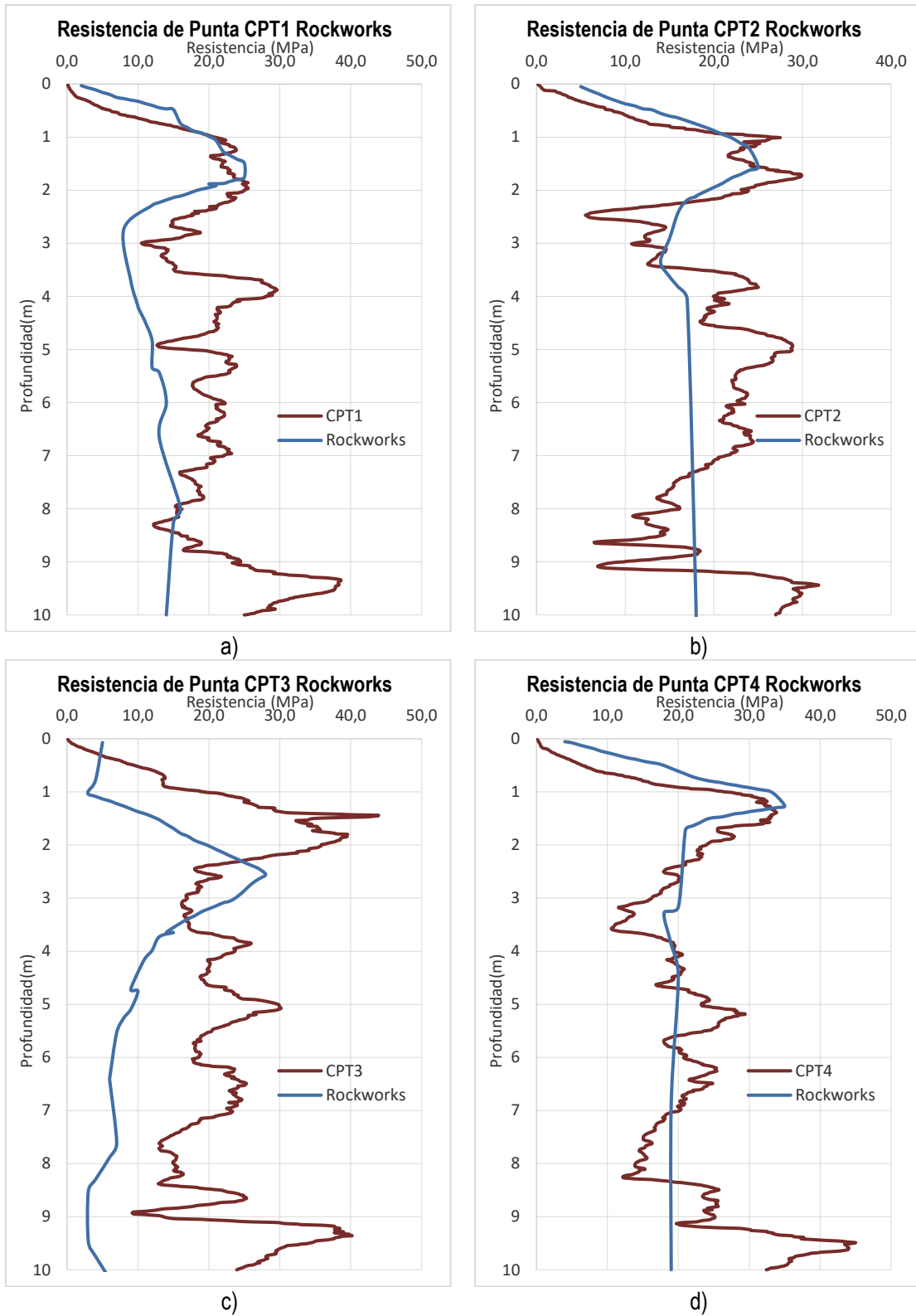
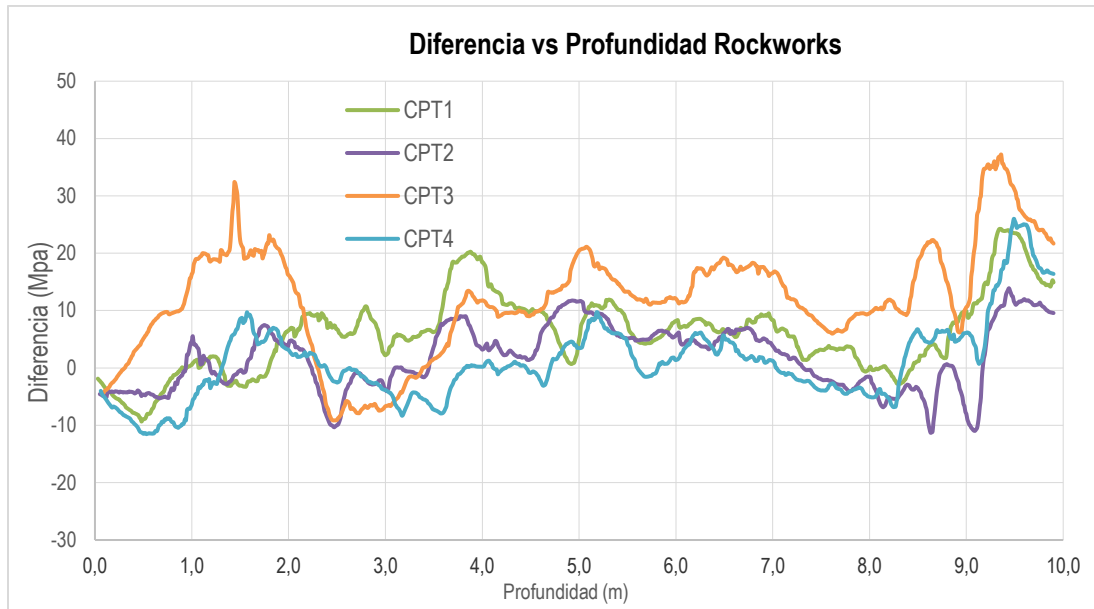


Figura 23: Perfiles de Profundidad vs Resistencia de Punta de los resultados del programa Rockworks: a) CPT1 b) CPT2 c) CPT3 d) CPT4



**Figura 24: Gráfica de la Diferencia vs Profundidad de los resultados del programa Rockworks para los 4 ensayos CPT**

Dirigiendo el estudio y análisis a cada gráfico por separado, hasta la profundidad de 3 metros, se determina que en la Figura 23 a), b) y d) presentan una semejanza importante con los ensayos de terreno. Existe una similitud en el valor máximo de resistencia entre los valores estimados y medidos, pero con un desfase en cuanto a la profundidad. Finalmente, la gráfica del ensayo CPT3 presenta una similitud en la forma de las curvas pero desfasadas en la profundidad y con los valores de resistencia menores que los obtenidos en terreno. Cercano al ensayo CPT3 se realizaron ensayos PANDA2, con un valor máximo de resistencia bastante menor a los 43,92 (MPa) presentado por este ensayo CPT, siendo el ensayo PANDA2-12 el que presenta una mayor resistencia de los ensayos cercanos (31,85 MPa).

La Figura 24, muestra que para los ensayos CPT1, CPT2 y CPT4 la diferencia, en el primer metro, entre las resistencias de terreno y las generadas por el programa, tienen un valor máximo de -10, describiendo que los valores generados son mayores que los obtenidos en terreno. El ensayo CPT3, en el primer metro, presenta valores de terreno mayores que los valores generados. Entre el primer y los 3 metros de profundidad, los valores presentados por los ensayos CPT1, CPT2 y CPT4 fluctúan entre los 10 y -10 (MPa), pero en el ensayo CPT3 se muestra un máximo de 30 (MPa) aproximadamente al metro y medio de profundidad. Posterior a los 3 metros de profundidad, se puede notar que los 4 ensayos comienzan a aumentar su diferencia de manera considerable, lo que tiene relación con lo mencionado en el párrafo anterior en cuanto a la cantidad de información disponible. Entre los 4 y 9 metros, los 4 ensayos presentan un crecimiento de la diferencia, siendo el ensayo CPT3 el que muestra un valor mayor en este tramo. Finalmente, después de los 9 metros de profundidad se observa un gran aumento en la diferencia entre valores para los 4 ensayos. Todo lo mostrado por esta figura, coincide con lo concluido de acuerdo a los gráficos de los ensayos.

## 5.2 MODELO SGEMS (STANFORD GEOSTATISTICAL MODELLING SOFTWARE)

### 5.2.1 Metodología de Trabajo

Para el desarrollo del modelo geoestadístico SGEMS, la metodología es utilizar los resultados de los 19 ensayos PANDA2 obtenidos en el área de análisis para generar un modelo 3D mediante las herramientas de la geoestadística. Primero, se obtiene el histograma de los datos de resistencia de los 19 ensayos, luego se obtiene el variograma, escogiendo el modelo adecuado mediante el error cuadrático medio. Finalmente, después de crear la grilla de análisis, se modela la resistencia mediante la herramienta kriging para generar el modelo 3D y exportar los datos en las ubicaciones de los cuatro CPT de la campaña de terreno.

### 5.2.2 Histograma

Luego de ingresar los valores de resistencia de los 19 pandas, en la siguiente Tabla 9 y Figura 25 se presenta el resumen estadístico y su histograma de frecuencia. Esta figura permite observar, que los valores de resistencia de punta obtenidos por los 19 ensayos PANDA2 en su mayoría son menores a 20 (MPa), obteniendo la mayor frecuencia entre los valores 10 y 12 (MPa), y que a medida que va aumentando el valor de la resistencia la frecuencia va disminuyendo considerablemente.

Tabla 9: Resumen estadístico de resistencias

Resumen estadístico	
Valor máximo	46,21 MPa
Valor mínimo	0,31 MPa
Promedio	15,61 Mpa
Varianza	92,65

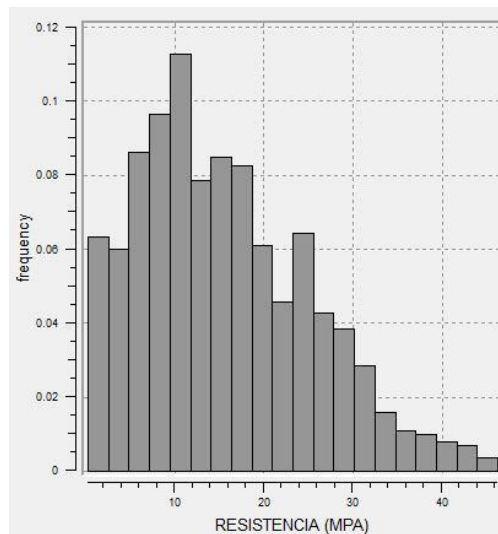


Figura 25: Histograma de frecuencia resistencias

### 5.2.3 Variograma

En el variograma que se obtendrá en esta sección, se asume un comportamiento isotrópico de la variable resistencia de punta, ya que, para determinar y definir anisotropía se recomienda que el número de datos a analizar sea mayor a 30 y, como se describió anteriormente, en la sección 3.2 solo se realizaron 19

ensayos pandas. Por lo tanto, la definición de los parámetros y modelo final del variograma se determinará a través del error cuadrático medio.

**5.2.3.1 Definición de Parámetros**

Para determinar el variograma primero se deben definir una serie de parámetros mencionados en la sección 4.2.3.1 de este documento. Entre esos parámetros, se encuentra la dirección de análisis. Para definir las direcciones de análisis del variograma se utilizaron los valores recomendados 0, 45, 90 y 135 grados y un dip de 90 grados por ser un análisis en tres dimensiones. Además, se agregaron al análisis la o las direcciones más comunes entre los ensayos, es decir, se obtendrán el azimuth entre cada ensayo y se determinaran el o los dos ángulos con mayor frecuencia.

Es importante mencionar, que los ángulos o la dirección de análisis se determina hasta 180 grados, ya que, el programa genera una exploración en toda la dirección del ángulo como se muestra en la Figura 26. A continuación se presenta el histograma (Figura 27) del azimuth entre cada ensayo

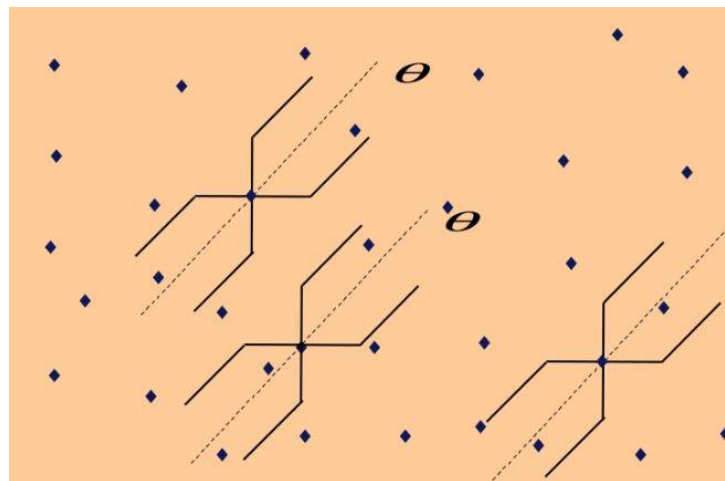


Figura 26: Análisis del azimuth mediante el programa SGEMS, (Lopez, C. 2016)

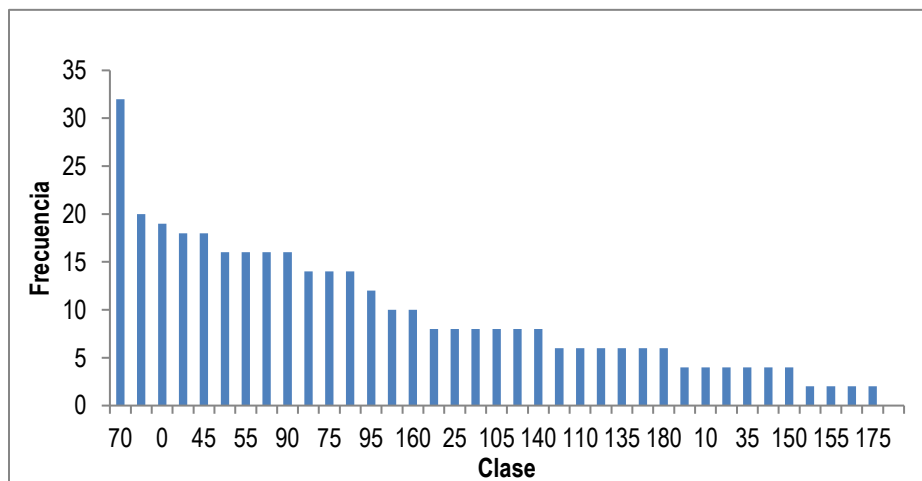


Figura 27: Histograma de frecuencia de la dirección de análisis

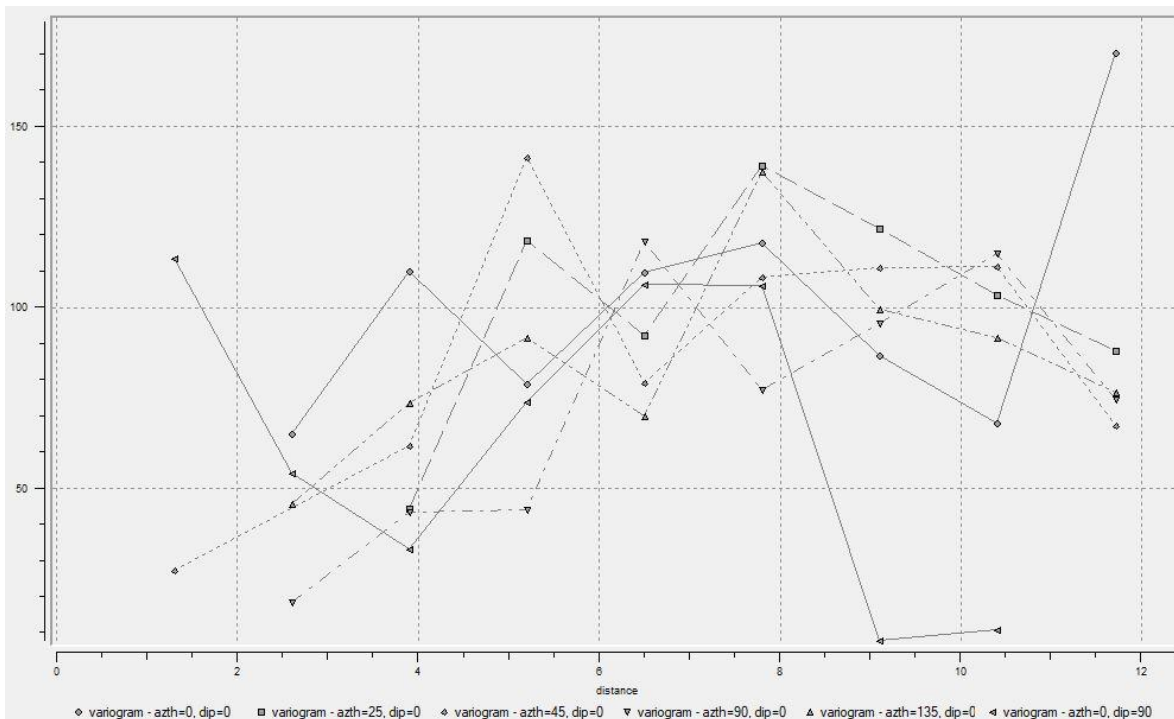
De acuerdo al resultado del histograma, los parámetros para la obtención del variograma se presentan en la Tabla 10:

**Tabla 10: Parámetros para obtención del variograma con el programa SGEMS**

Parámetros	
Number of Lags	9
Lag Separation (Distancia mínima entre ensayos)	1,3
Lag Tolerance (0,5 veces Lag Separation)	0,65
Azimuth o Direcciones de Analisis (grados)	0, 45, 70, 90 y 135
Dip (grados)	90

Se define el valor de 9, para la variable number of lags, debido a la recomendación de que la sumatoria de las distancia de los tramos sea menor o igual a la mitad del dominio.

Una vez ingresados los parámetros descritos en el punto anterior, el programa nos genera el variograma para cada dirección de análisis y también un variograma que analiza todas las direcciones. A continuación se presenta el variograma en todas las direcciones de análisis en la Figura 28, mientras que lo variogramas por cada dirección de análisis se pueden observar en el Anexo A. Esta figura muestra una semejanza en el comportamiento de los variogramas experimentales de las direcciones 25, 45, 90 y 135 grados, en cambio en los variogramas con azimuth 0 grados (principalmente con dip 90 grados) tienen un comportamiento distinto, obteniendo valores ampliamente diferentes, especialmente a mayores distancias. Las fluctuaciones constantes en todos los variogramas se pueden deber a la poca información que se tiene.



**Figura 28: Variograma en todas las direcciones de análisis**

Una vez obtenido los variogramas, se procede a encontrar un modelo que se adecue mejor manera a la distribución de los variogramas recién presentados, modificando el valor del alcance en cada modelo. En este paso se elegirán 12 valores de alcance de la curva, que a su vez se analizarán para los 3 modelos que trae el programa, es decir, se comprobarán 36 modelos para ver cuál es el que mejor representa los variogramas. La Tabla 11 presenta los 12 modelos escogidos.

Tabla 11: Alcance de modelación de variograma

Modelos	Alcance: a (m)
1	4,00
2	4,68
3	5,03
4	5,76
5	6,20
6	6,90
7	7,61
8	8,07
9	8,57
10	9,01
11	9,71
12	11,70

En los modelos propuestos no se consideró el efecto pepita, ya que ninguno de los variogramas obtenidos, en las direcciones propuestas, presenta discontinuidades cerca del origen.

### 5.2.3.2 Elección del Modelo

Posteriormente, para cada uno de los modelos indicados en la Tabla 11, se obtuvo el error cuadrático medio para los 3 modelos de variograma que trae el programa (Exponencial, Gaussiano, Exponencial), donde se compararan todos los resultados y se definirá el modelo que mejor representa los datos analizados. A continuación se presentan las tablas 12, 13 y 14 con los resultados del modelo Exponencial, Gaussiano y Esférico respectivamente.

En el caso del error cuadrático medio, este consiste en encontrar el cuadrado de la diferencia de varianza (eje vertical) entre los puntos definidos en los variogramas y el modelo propuesto para una distancia dada. Los valores de distancia en las que se analiza el error cuadrático medio, dependen del valor "Lag Separation" definido en la Tabla 10. En la ecuación que se muestra a continuación se representa lo descrito anteriormente.

$$Error = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{im})^2 * \frac{1}{n}$$

Donde

$y_i$ : Valor de varianza obtenido por el variograma a la distancia i

$y_{im}$ : Valor de varianza obtenido por el modelo propuesto a la distancia i

n: Cantidad de datos

Tabla 12: Error cuadrático medio modelo Exponencial para cada variograma y modelo propuesto

Modelo	0°	0°;Dip=90°	45°	70°	90°	135°
1	1666	2685	1021	621	571	575
2	1923	2698	1211	723	585	721
3	2061	2710	1315	785	608	805
4	2352	2741	1538	927	683	991
5	2529	2764	1676	1018	741	1108
6	2807	2808	1879	1168	847	1298
7	3078	2857	2108	1320	964	1488
8	3255	2891	2249	1421	1046	1614
9	3436	2930	2394	1528	1135	1745
10	3594	2964	2520	1621	1216	1860
11	3835	3020	2715	1766	1343	2038
12	4460	3180	3223	2152	1697	2508

Tabla 13: Error cuadrático medio modelo Gaussiano para cada variograma y modelo propuesto

Modelo	0°	0°;Dip=90°	45°	70°	90°	135°
1	1509	3306	796	520	432	429
2	1821	3387	1029	668	379	600
3	1998	3434	1174	765	390	715
4	2393	3527	1514	998	482	998
5	2644	3576	1736	1152	573	1189
6	3061	3655	2105	1413	761	1513
7	3490	3727	2482	1683	985	1850
8	3779	3776	2733	1866	1149	2077
9	4084	3828	2995	2059	1330	2317
10	4354	3876	3226	2230	1496	2529
11	4773	3953	3582	2497	1762	2858
12	5870	4178	4502	3202	2496	3719

Tabla 14: Error cuadrático medio modelo Esférico para cada variograma y modelo propuesto

Modelo	0°	0°;Dip=90°	45°	70°	90°	135°
1	1048	2957	667	711	1265	508
2	1049	2974	621	620	1107	436
3	1063	2971	597	561	1028	406
4	1109	2958	573	498	872	364
5	1142	2949	583	472	779	351
6	1204	2944	624	450	649	348
7	1284	2958	680	461	557	353
8	1345	2977	723	481	513	365
9	1419	3006	777	509	478	391
10	1492	3039	830	537	454	425
11	1614	3091	924	589	433	494
12	1974	3164	1253	780	468	758

Según los resultados exhibidos, el menor error lo presenta el modelo número 6 en el modelo esférico en el variograma de 135° (Tabla 14). En consecuencia los valores del variograma que se ocuparan en el método krigin se presentan en la Tabla 15 y su modelación en la Figura 29.

Tabla 15: Modelo de variograma escogido

Modelo	Alcance: a (m)	Meseta: C (-)
Esférico	6,90	92,65

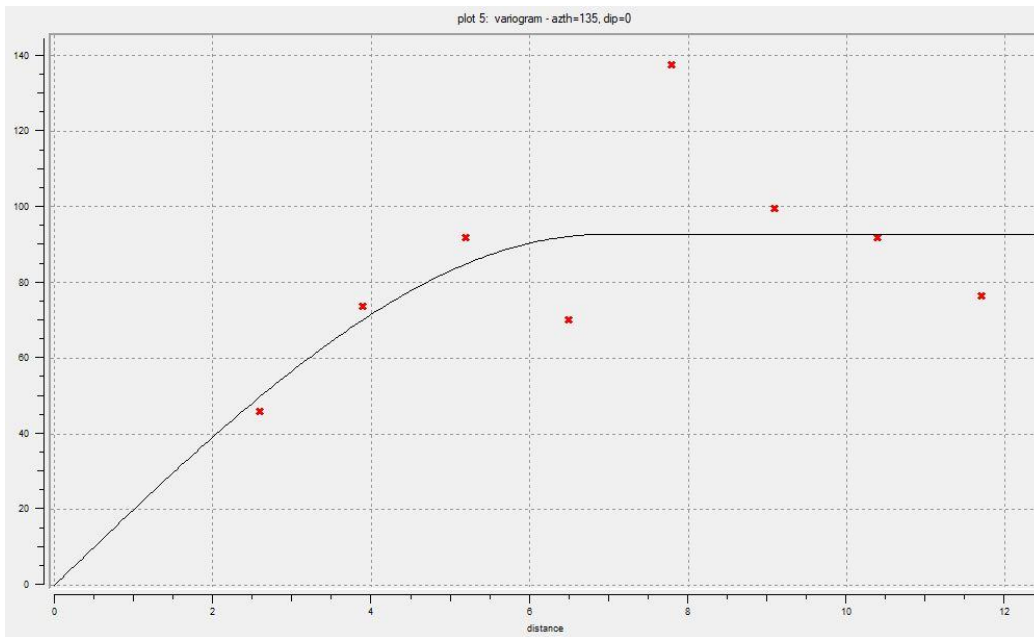


Figura 29: Representación del modelo de variograma escogido en la dirección 135°

### 5.2.4 Definición de Grilla de Análisis

Luego de determinar el modelo que mejor representa el variograma de la variable resistencia de punta, se necesita crear una grilla de trabajo que abarque a todos los ensayos en las 3 direcciones. Esta grilla permitirá realizar, con el modelo elegido, la estimación de los valores en los puntos donde se realizaron los ensayos CPT. La Tabla 16 presenta las coordenadas de la grilla para el programa SGEMS.

Tabla 16: Grilla de análisis programa SGEMS

Coordenadas	Máximo	Mínimo	Cantidad de Celdas
X (m)	-5,3	-31,7	66
Y(m)	13,6	-5,8	97
Z(m)	0	-10	52

Además se adjunta la Figura 30, que presenta la simulación del programa SGEMS de los ensayos en la grilla de análisis y con su respectivo mapa de calor de resistencia de punta. Donde el color azul representa los valores más bajos de resistencias y el color rojo los valores más altos de resistencia.

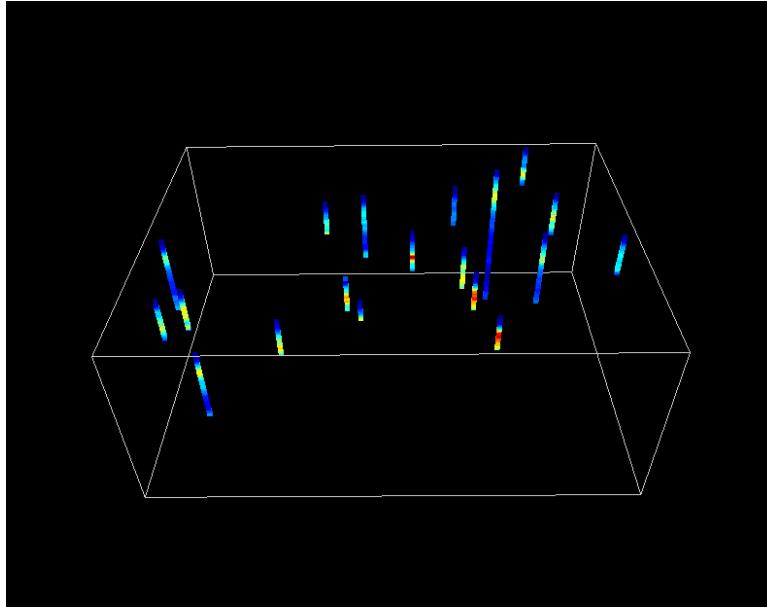


Figura 30: Representación de los ensayos Panda en la grilla de análisis del programa SGEMS

### 5.2.5 Kriging

Luego de haber definido la grilla de análisis de los ensayos panda y de determinar el modelo de variograma que mejor se ajusta a los datos de la resistencia  $q_d$ , se debe realizar el método kriging para generar el modelo 3D que represente la resistencia de punta de todo el área de análisis que se está estudiando. Al realizar este método, primero se define un elipsoide de búsqueda que permite relacionar los datos en el espacio de análisis. Los rangos de los parámetros del elipsoide se establecen según un criterio recomendado por el programa, el cual indica que el rango máximo (eje Y o Norte-Sur) y el rango mediano (eje X u Oeste -Este) sean aproximadamente la mitad del valor del dominio en esa dirección. Además expresan que los ángulos azimuth y dip tengan un valor de 0 grados, de manera que el elipsoide quede en simetría con su respectivo eje. A continuación se presenta la Tabla 17 con los valores del elipsoide de búsqueda.

Tabla 17: Valores parametros elipsoide de busqueda

	<b>Máximo</b>	<b>Mediano</b>	<b>Mínimo</b>
Rango (m)	13	10	10
	<b>Azimuth</b>	<b>Dip</b>	<b>Rake</b>
Ángulos	0	0	0

Conjuntamente se utilizan los valores del variograma presentado en la Tabla 15 para aplicar el método kriging. Además se utiliza el método de kriging ordinario para la estimación de puntos.

### 5.2.6 Modelo 3D

Una vez aplicado el método kriging, se obtiene el modelo 3D que se ha descrito anteriormente. Este modelo se presenta en la Figura 31 desde una ubicación Sur-Este.

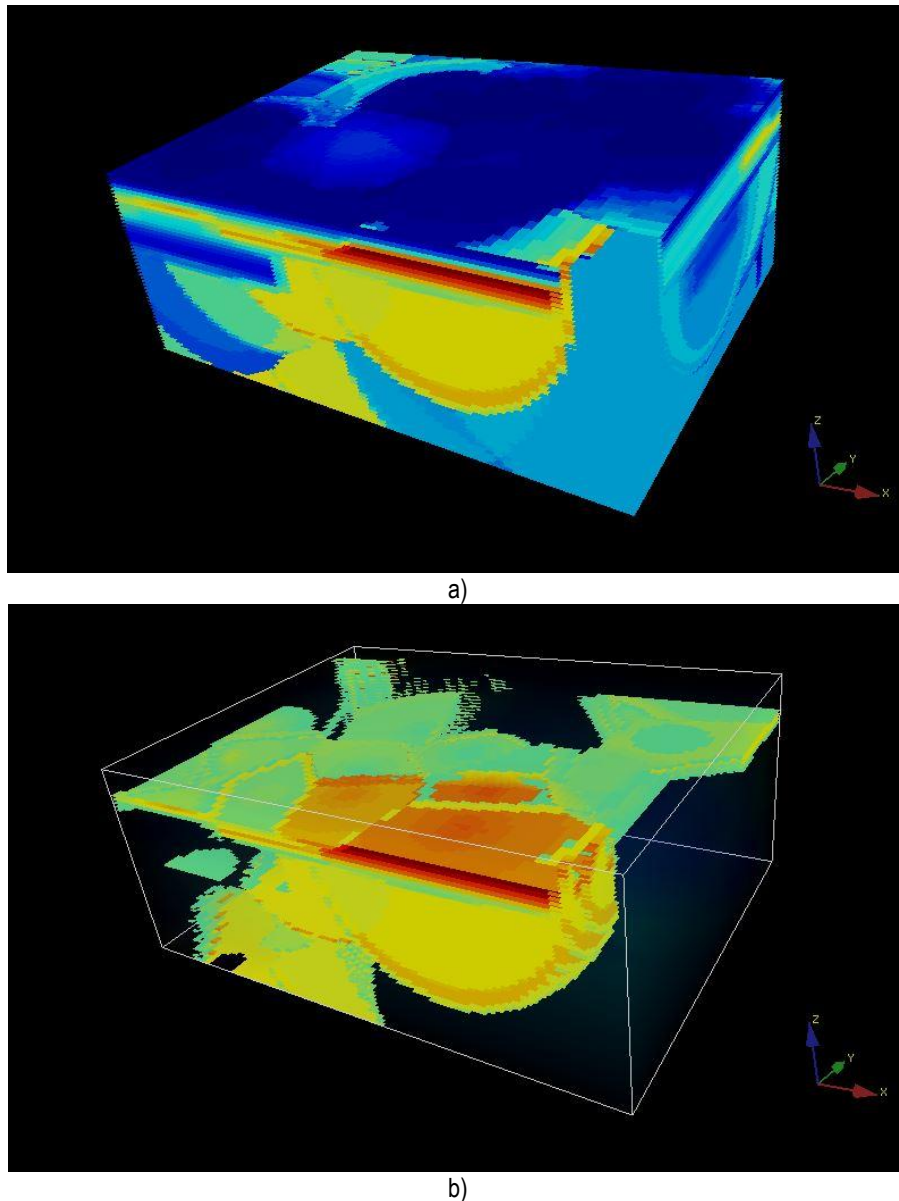


Figura 31: Modelo 3D realizado por el método kriging desde una ubicación Sur-Este a) Modelo 3D b) Modelo 3D con valores de resistencia mayor a 20 (Mpa)

En la Figura 31 a) se muestra el modelo creado mediante geoestadística, en el que el color azul simboliza los valores de resistencia bajos (cerca de 0 MPa), el color celeste valores cercanos a 20 MPa y el color rojo los valores de resistencia altos (igual o mayores a 40 MPa). La Figura 31 b) muestra el mismo modelo, pero presentando las zonas donde la resistencia es mayor a 20 (MPa). De acuerdo a lo último mencionado, se puede notar que los valores con mayor resistencia se encuentran en la zona Centro-Sur, especialmente al Este del área estudiada, coincidiendo con lo presentado en la Figura 21.

### 5.2.7 Resultados

Con el modelo 3D desarrollado, se procede a obtener los perfiles generados por el modelo en la ubicación donde se realizaron los ensayos CPT, con el fin de compararlos con los obtenidos en terreno. Además, se adjunta en la Figura 32 un gráfico de diferencia de resistencia de punta, entre los resultados del modelo y los obtenidos en terreno, con respecto a la profundidad, para cada ensayo CPT. Los resultados obtenidos mediante el método kriging se presentan a continuación en la Figura 33

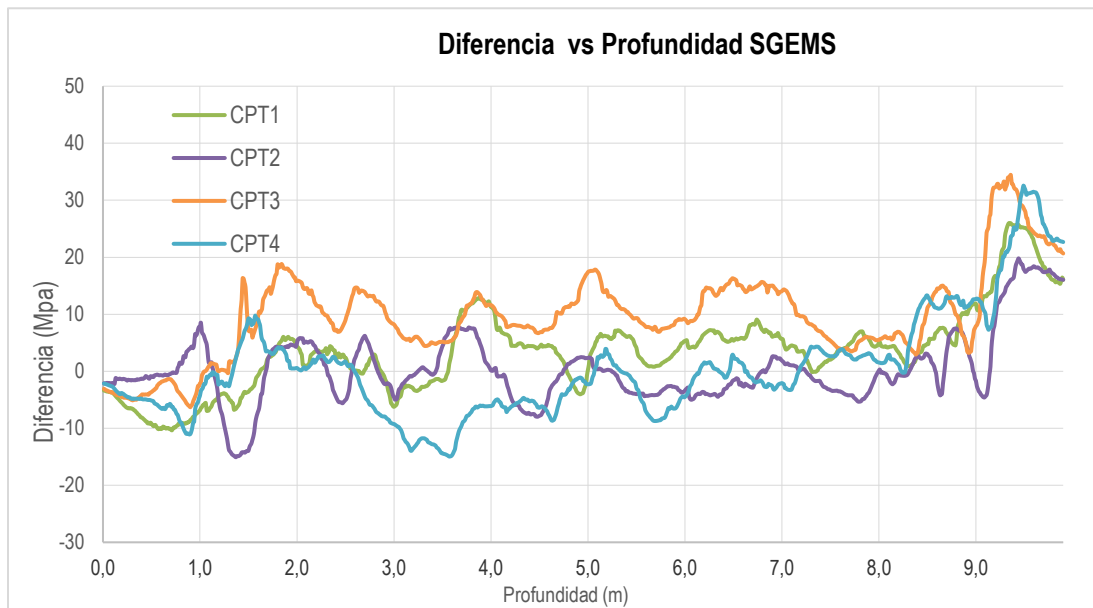


Figura 32: Gráfica de la Diferencia vs Profundidad de los resultados del programa SGEMS para los 4 ensayos CPT

El gráfico de la diferencia entre resultados obtenidos con los resultados generados, presentado en la Figura 32, muestra que la curva generada para el ensayo CPT3 tiene un error en la estimación mucho mayor que las otras 3 curvas generadas, con una máxima diferencia cercana a 20 (MPa) en los primeros 9 metros. También se puede notar, que los ensayos CPT1, CPT2 y CPT4, exhiben una diferencia de magnitud similar en los primeros 4 metros de profundidad, oscilando sus valores entre 10 y -10 (MPa). Entre los 4 y 9 metros se observa un crecimiento de la diferencia para todos los ensayos y, finalmente, ésta se hace muy grande después de los 9 metros. Con lo descrito se puede concluir que los perfiles obtenidos mediante el programa SGEMS muestran una mayor similitud con los perfiles conseguidos en terreno, que los perfiles obtenidos mediante el programa Rockworks, debido a que presentan un menor error (Figura 24) en todos los ensayos CPT.

Según lo presentado, en general en la Figura 33 los perfiles de resistencia del modelo SGEMS cualitativamente son similares a los obtenidos en terreno, pero cuantitativamente se generan algunas desigualdades, con valores estimados menores en casi toda su profundidad, pero con valores máximos mayores. Se enseña una semejanza cualitativa y también cuantitativa entre los perfiles hasta aproximadamente los 3 metros de profundidad. Entre los 3 y 9 metros los perfiles estimados presentan una línea casi constante que no representa las fluctuaciones que se obtienen en terreno, pero que presenta una similitud en el valor de la resistencia. En último lugar, después de los 9 metros los perfiles obtenidos por el programa SGEMS no se asemejan cualitativa ni cuantitativamente a los ensayos CPT.

Analizando lo definido en los párrafos anteriores, se puede determinar lo siguiente:

- Las diferencias bajo los 3 metros de profundidad pueden ser causadas por la poca profundidad de los ensayos PANDA (14 ensayos no superan los 3 metros).
- Las diferencias, mostradas en la Figura 33 a) y Figura 33 c), se pueden deber a la poca cantidad ensayos PANDA en las cercanías de los ensayos CPT1 y CPT3. Esto queda en evidencia, principalmente, al analizar el gráfico del ensayo CPT3 donde las diferencias son mayores, ya que los ensayos PANDA2 cercanos a este ensayo CPT, no presentan un valor máximo similar del parámetro de resistencia de punta.
- La Figura 33 b) y d) permiten exponer que con una cantidad de ensayos considerable en las cercanías de una ubicación a analizar, la herramienta geoestadística representa de manera adecuada lo que sucede en terreno.
- Entre los 3 y 9 metros los ensayos CPT1, CPT3 y CPT4 según el programa SGEMS, presentan una curva constante que no representa el comportamiento real de los ensayos. En ensayo CPT2 es el único que se exhibe una similitud con el ensayo real.
- La diferencia en el parámetro del valor máximo de resistencia de punta, en la gráfica del ensayo CPT2, se puede deber la influencia de los ensayos PANDA2 11 y 17 que presentan un valor máximo de 37,17 (Mpa) y 46,62 (Mpa) respectivamente, muy diferente a la resistencia de 29,91 (MPa) obtenida en el ensayo CPT2. Gráficamente esto se puede observar en la Figura 32 y la Figura 33 b) a la profundidad de un metro y medio aproximadamente.
- Bajo los 9 metros ninguna curva generada representa o se acerca al comportamiento en terreno.
- Hasta una profundidad de aproximadamente 3 metros se puede observar que la diferencia se presenta considerablemente baja y, que después de esa profundidad, en los 4 ensayos, se produce un aumento que permite concluir que hasta esa profundidad, la relación entre resultados generados por el programa SGEMS y los datos obtenidos en terreno, demuestran una mejor relación.

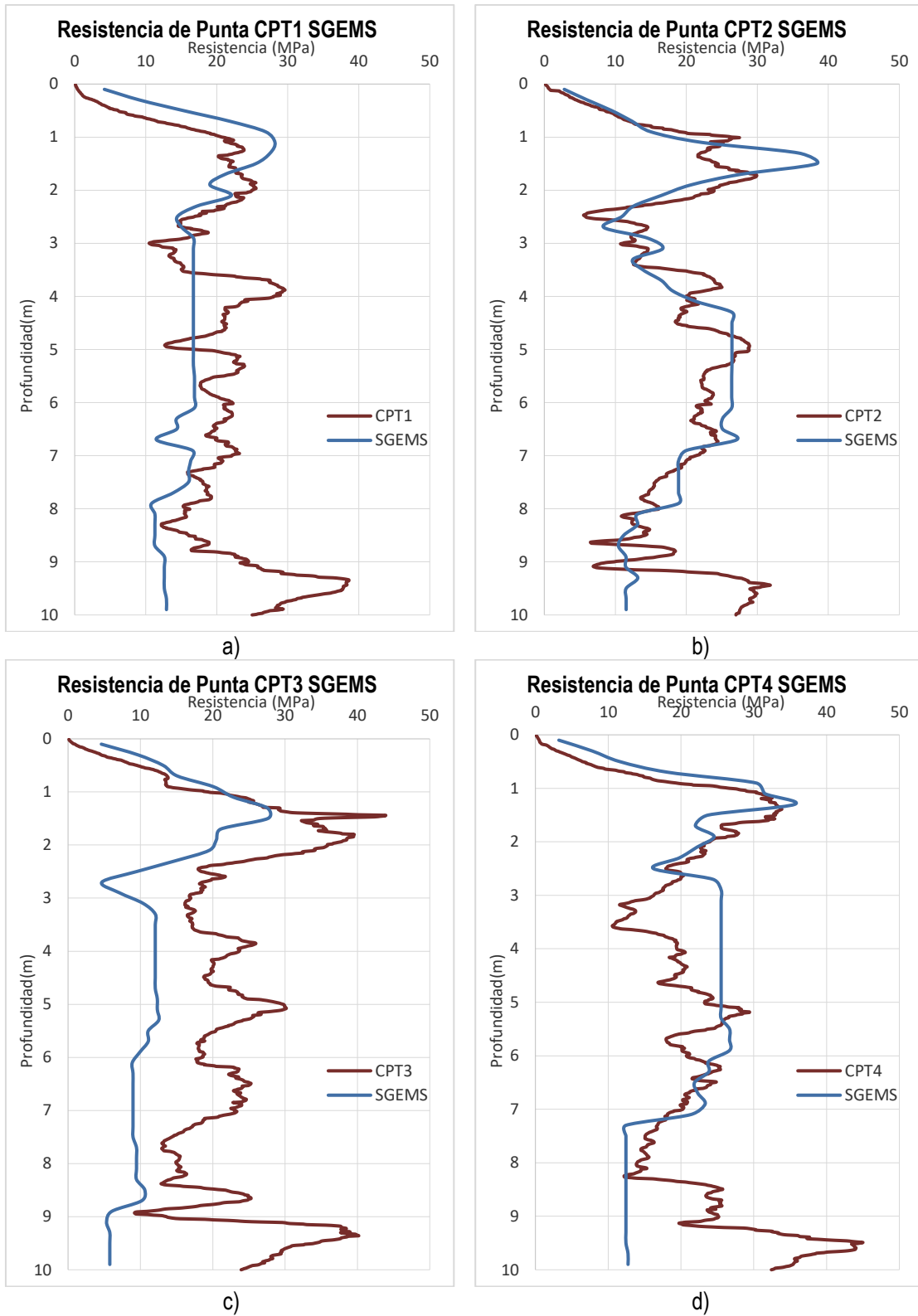


Figura 33: Perfiles de Profundidad vs Resistencia de Punta de los resultados del programa SGEMS: a) CPT1 b) CPT2 c) CPT3 d) CPT4

## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El procedimiento, que se realiza con los cuatro resultados de cada método, consiste en una interpolación de los datos generados en los programas, con el fin de hallar los valores de resistencia de punta en las profundidades en las que el ensayo CPT entrega sus datos, es decir, cada 1 centímetro. Esto permitirá comparar de manera más apropiada los valores generados con los valores reales.

Con los modelos de resistencia a las profundidades pretendidas, se procede a comparar los resultados de los dos métodos con el objetivo de elegir el más adecuado. Esto, se ejecuta, por medio de una gráfica de todos los pares de puntos (Resistencia CPT Modelo, Resistencia CPT Terreno), con la obtención del coeficiente de correlación entre esas mismas variables, y con la determinación del nivel de significancia o significación estadística. Los pares de puntos graficados se muestran de distinto color según el ensayo CPT que se esté analizando, para visualizar de mejor manera que sucede en cada caso.

El coeficiente de correlación  $r_p$ , varía entre 1 y -1 y está definido por  $r_p = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y}$ , donde  $\sigma_{xy}$  representa la covarianza y,  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son las desviaciones típicas. La correlación es fuerte cuando valor esta entre 0,5 y 1, o -0,5 y -1. Si el coeficiente esta entre -0,5 y 0,5, entonces la correlación entre las variables es débil.

El concepto “significación estadística” se relaciona con la necesidad de saber si existe asociación entre dos variables. Sin embargo, esta asociación puede ser real o ficticia, ya sea producto del azar, la existencias de sesgos, etc. Este proceso se realiza utilizando “pruebas de hipótesis” las que permiten cuantificar hasta qué punto la variabilidad de la muestra en estudio es responsable de los resultados obtenidos en el estudio. Es así como la hipótesis nula, representa la afirmación de que no hay asociación entre las dos variables y la hipótesis alternativa, afirma que existe asociación entre las dos variables.

La significación estadística se mide mediante el p-valor. Este es un valor que va del 0 al 1 e indica que la asociación es estadísticamente significativa si su valor es igual o menor a 0,05 (representa una seguridad del 95% que la asociación no sea por el azar).

Los valores  $r_p$  y p se calculan mediante el programa R.

## 6.1 ENSAYO CPT3

Antes de comenzar con el proceso de relación de los datos, se realiza la suavización de la curva CPT3 obtenida en terreno, debido a lo presentado y concluido de acuerdo a las gráficas de resultados para los programas Rockworks y SGEMS. En estos puntos, se advirtió la diferencia considerable entre el valor máximo de resistencia de punta entre los datos generados y obtenidos en terreno. La gráfica de resistencia de punta del ensayo CPT en terreno, presenta un aumento brusco de su valor a la profundidad de 1,4 metros, donde el valor varía desde los 32,8 (MPa) hasta los 43,91 (MPa) en 0,04 metros, volviendo a su valor esperado a la profundidad de 1,6 metros. La causa de este cambio brusco en los registros del ensayo, se pudo deber a la presencia de algún elemento que alterara el curso normal de la toma de datos, ya que, durante las mediciones se hallaron rocas y/o metales en el sector.

La suavización de la curva, se efectúa por medio del valor de la mediana. Se elige este parámetro en desmedro de la media, puesto que la media le da una gran ponderación a los valores máximos, mientras que la mediana representa el valor de la variable central. El proceso se realiza cada 20 centímetros, debido a que es la distancia total en la que se desarrolla este cambio brusco.

En la Figura 34, se observa la gráfica entre el ensayo CPT3 antes y después de la suavización, al mismo tiempo que la gráfica del ensayo CPT3 suavizado con los resultados de los ensayos Rockworks y SGEMS.

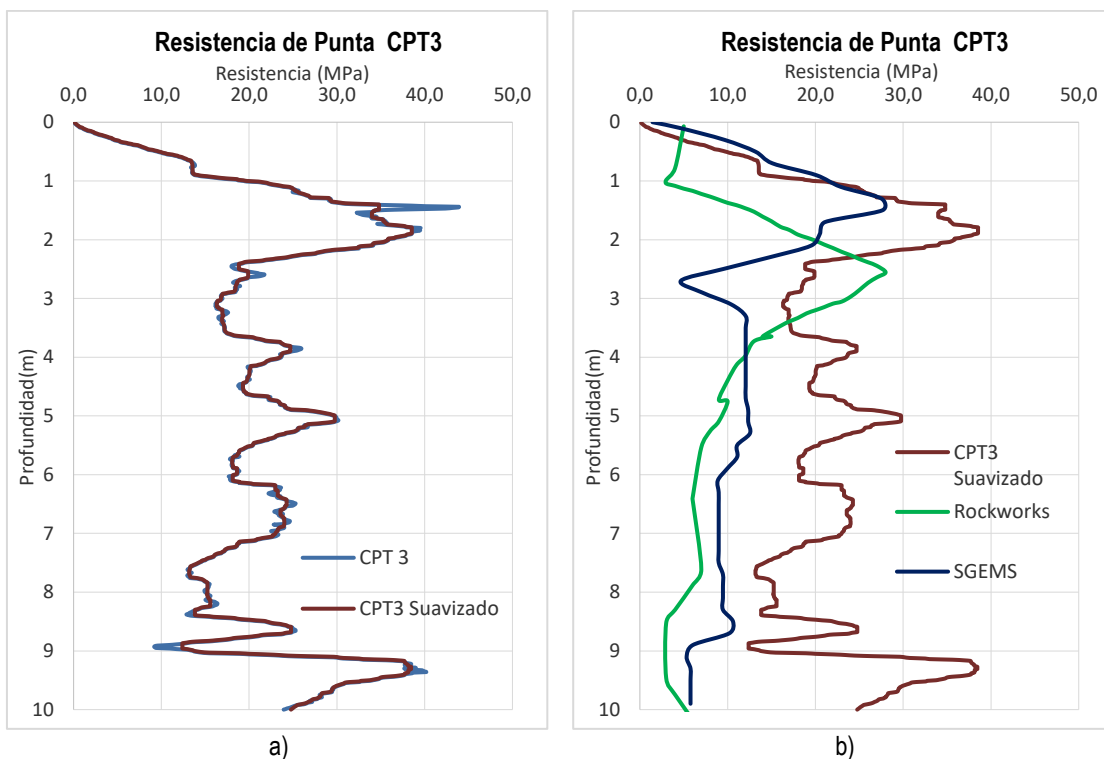


Figura 34: Perfiles de resistencia de punta: a) Ensayo CPT3 antes y después de la suavización b) Ensayo CPT3 suavizado con los resultados del programa Rockworks y SGEMS

En la Figura 34, se advierte como la curva suavizada mantiene la forma de la curva obtenida en terreno, pero disminuye la fluctuación que se generaba entre las profundidades 1,4 y 1,6 metros.

## 6.2 PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS

Para estudiar de mejor manera los resultados desarrollados con los obtenidos en terreno, se debe determinar hasta que profundidad el análisis sería válido, es decir, hasta que profundidad los datos encontrados son representativos de lo que sucede en terreno. Esto se realiza considerando las profundidades de los 19 ensayos PANDA2, lo observado en las figuras 24 y 32, donde se presenta la diferencia de la resistencia de punta entre los datos obtenidos y los generados con respecto a la profundidad y de cómo varía el coeficiente de correlación. Los coeficientes de correlación se obtienen hasta 9 metros de profundidad, debido, a que como se mencionó anteriormente, después de esa profundidad los valores reales con los generados son muy distintos. La Figura 35 muestra la gráfica de los  $r_p$  para cada CPT vs la profundidad.

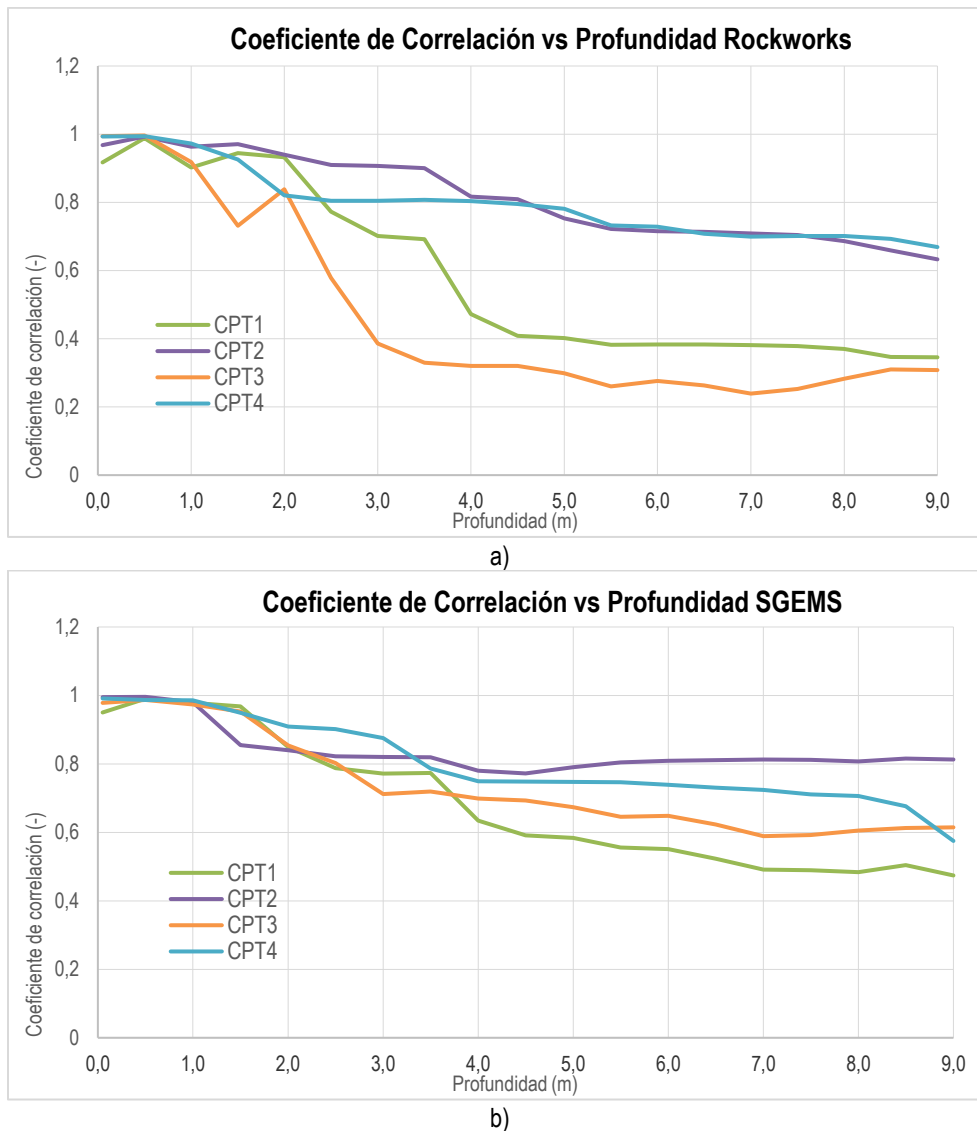


Figura 35: Gráfica del Coeficiente de correlación vs Profundidad para los 4 ensayos CPT: a) Resultados programa Rockworks  
b) Resultados programa SGEMS

De acuerdo a los factores mencionados a analizar y los gráficos de la Figura 35 se puede definir que la profundidad de análisis será hasta 3,0 metros, ya que después de esta profundidad la diferencia entre datos generados y obtenidos en terreno sube de manera significativa y el coeficiente de correlación disminuye de manera considerable para los dos programas, en los 4 ensayos.

Por otro lado, se puede notar, que los resultados obtenidos por el programa SGEMS tienen un coeficiente de correlación alto, es decir, una relación fuerte en sus 4 ensayos hasta la profundidad de 3 metros, mientras que los generados por el programa Rockworks también presentan una relación fuerte en sus ensayos, exceptuando el ensayo CPT 3, en el que se genera una correlación débil entre las variables.

### 6.3 NORMALIZACIÓN POR PROFUNDIDAD

Primero, se comparan los datos sin ninguna modificación, es decir los datos exportados de los programas y los datos obtenidos en terreno. La Figura 36 a) y b) muestra las gráficas entre las variables resistencia,  $q_d$ , estimada en la posición de los ensayos CPT, por los programas Rockworks y SGEMS respectivamente, versus la resistencia obtenida en terreno, hasta los 3 metros de profundidad.

En esta figura se observa, que mediante la herramienta de geoestadística, se obtienen resultados con una mayor similitud que con programa el Rockworks. En cada caso, se obtiene el coeficiente de correlación de cada ensayo CPT, presentados en la Tabla 18. Donde se ve que en todos los ensayos existe una relación fuerte entre las variables, exceptuando el ensayo CPT3 para el programa Rockworks.

Tabla 18: Coeficiente de correlación entre los ensayos CPT obtenidos en terreno y los generados en los programas

Programa	Ensayo	Coefficiente de Correlación
Rockworks	CPT1	0,70
	CPT2	0,89
	CPT3	0,38
	CPT4	0,80
SGEMS	CPT1	0,77
	CPT2	0,82
	CPT3	0,72
	CPT4	0,89

Finalmente el coeficiente de correlación y el valor "p" para todos los datos de cada programa se muestra en la Tabla 19

Tabla 19: Coeficiente de correlación y p-valor de todos los ensayos CPT generados en los programas

Programa	Coefficiente de Correlación	p
Rockworks	0,55	$2,2 \cdot 10^{-16}$
SGEMS	0,73	$2,2 \cdot 10^{-16}$

Según lo exhibido en la Tabla 19, los resultados de ambos programas muestran una relación fuerte, pero el modelo de geoestadística presenta una mejor correlación. En el modelo de dirección inversa rápida el valor es muy cercano a 0,5. Además el valor de p presenta que existe una relación entre los datos para los dos programas, siendo el mismo valor para ambos métodos.

Se decide a determinar si existe una normalización de la profundidad por el diámetro de la punta de cada ensayo, que pueda estar afectando los resultados, debido a que visualmente se puede observar, en las figuras 23 y 33, un desfase, algo constante, entre las curvas generadas y de terreno. Esto, puede suceder por que el diámetro de la punta del ensayo CPT (36mm) es mayor que el diámetro de la punta del ensayo PANDA2 (20mm). Por lo que se exhiben distintas zonas de influencia durante la penetración de la sonda.

La normalización se realiza de manera iterativa, obteniendo un parámetro “k” que relacione los diámetros de punta de ambos ensayos y que permita llevar el perfil de resistencia de punta PANDA2 a un perfil de resistencia de punta CPT en términos de la profundidad, consiguiendo un mejor coeficiente de correlación entre éstos. La forma de la relación propuesta es la siguiente:

$$Z'_p = \sqrt[k]{\frac{\phi_{CPT}}{\phi_P}} * Z_p$$

Donde:

- Z'<sub>p</sub>: Profundidad del ensayo PANDA normalizada [m]
- ϕ<sub>CPT</sub>: Diámetro de punta del ensayo CPT [mm]
- ϕ<sub>P</sub>: Diámetro de punta del ensayo PANDA [mm]
- k: Parámetro de relación
- Z<sub>p</sub>: Profundidad del ensayo PANDA [m]

Para determinar cuál es el parámetro de relación, se definen los siguientes criterios: a) El coeficiente de correlación de cada ensayo debe mostrar una relación fuerte entre las variables b) El coeficiente de correlación debe ser mayor o igual, en cada ensayo, que el coeficiente de correlación del ensayo sin haberle aplicado la normalización. y/o c) El coeficiente de correlación de todos los datos normalizados debe ser mayor o igual que el coeficiente de correlación del ensayo sin haberle aplicado la normalización, además de tener un valor igual o mayor a 0,5.

Los valores del parámetro de relación “k” para cada programa se muestran en la Tabla 20:

**Tabla 20: Valores del parámetro de relación “k” de normalización para cada programa**

Parámetro de Relación	
Rockworks	-7,34
SGEMS	3,22

De acuerdo a los valores de “k”, se presentan, en la Figura 36 c) y d), las gráficas de las variables entre la resistencia obtenidas en terreno con la resistencia determinada en cada programa. Además, se complementa el análisis exhibiendo el desplazamiento de los perfiles CPT normalizados, para el peor y mejor caso de cada programa en la Figura 37. Finalmente, en el Anexo B se adjuntan las gráficas de los 4 ensayos CPT para los programas Rockworks y SGEMS luego de aplicada la normalización.

Al igual que en el caso sin normalizar, la Figura 36 c) y d) muestra, que mediante el programa SGEMS, los resultados son más similares que con el programa Rockworks. También se puede notar que en el programa SGEMS se exhibe una tendencia más lineal entre las variables que lo observado en la Figura 36 d) después de la normalización. Esta última diferencia no se observa de manera clara para el programa Rockworks.

La Figura 37 a) y b) presenta el desplazamiento de los perfiles de resistencia de punta del programa Rockworks para los ensayos CPT2 y CPT3 (mejor y peor caso respectivamente), en la cual, según el valor de “k”, se observa un desplazamiento “hacia arriba” de ambos perfiles que permite un mejor coeficiente de correlación para el ensayo CPT3, pero una disminución en el valor de  $r_p$  para el ensayo CPT2, como se muestra en la Tabla 21. En las letras c) y d) de la misma figura, se exhiben los perfiles de resistencia de punta, mediante el método de geoestadística, de los ensayos CPT4 y CPT3 (mejor y peor caso respectivamente), donde, según el valor de “k”, se observa un desplazamiento “hacia abajo” de ambos perfiles, que logra un mayor coeficiente de correlación para los dos ensayos (Tabla 21), consiguiendo un perfil CPT4 muy similar al obtenido en terreno. En los dos métodos, el ensayo con menor coeficiente de correlación, es el ensayo CPT3.

En cada caso se obtiene el coeficiente de correlación de cada ensayo CPT, presentados en la Tabla 21 donde se comparan los resultados con los obtenidos en el caso sin normalizar.

**Tabla 21: Coeficiente de correlación entre los ensayos CPT obtenidos en terreno y los generados en los programas con los datos normalizados**

Programa	Ensayo	Coeficiente de Correlación sin normalizar	Coeficiente de Correlación normalizado
Rockworks	CPT1	0,70	0,56
	CPT2	0,89	0,84
	CPT3	0,38	0,50
	CPT4	0,80	0,67
SGEMS	CPT1	0,77	0,91
	CPT2	0,82	0,83
	CPT3	0,72	0,94
	CPT4	0,89	0,98

Finalmente el valor del coeficiente de correlación para todos los datos y su porcentaje de variación con respecto al caso sin normalizar, de cada programa, se muestran en la Tabla 22, mientras en la Tabla 23 se presenta el nivel de significancia.

**Tabla 22: Coeficiente de correlación de todos los ensayos CPT generados en los programas con los datos normalizados**

Programa	Coeficiente de Correlación	Porcentaje de variación
Rockworks	0,55	0,01%
SGEMS	0,85	16,27%

**Tabla 23: P-valor de todos los ensayos CPT generados en los programas con los datos normalizados**

Programa	p
Rockworks	$2,2 \cdot 10^{-16}$
SGEMS	$2,2 \cdot 10^{-16}$

De manera general, según los resultados exhibidos en la Tabla 22, la mejor correlación se presenta con el método geoestadístico. Además, se puede advertir que el programa Rockworks no presenta un aumento significativo en su coeficiente de correlación. El valor de p presenta que existe una relación entre los datos para los dos programas y es el mismo que para el escenario sin normalizar.

En el caso del programa SGEMS, se demuestra, que para cada ensayo CPT y para el caso total de datos, el coeficiente de correlación mejora con la normalización cumpliendo con los 3 criterios antes propuestos presentando siempre una relación fuerte entre sus variables. Por su parte, el programa Rockworks, no cumple con el criterio b), ya que, en tres de los ensayos CPT, la normalización disminuye el coeficiente de correlación entre los datos del programa con los obtenidos en terreno, pero cumple con el criterio a) y c) presentando un

mejor coeficiente de correlación para la totalidad de los datos, es decir, teniendo resultados que representan de manera más adecuada lo que sucede en toda el área de estudio. Esta disminución de  $r_p$  en 3 de los ensayos, se debe a que los ensayos CPT1 CPT2 y CPT4 se encuentran desfasados, presentando los valores semejantes a los obtenidos en terreno a una profundidad menor, mientras que el ensayo CPT3 está desfasado a una profundidad mayor, lo que provoca que no se pueda normalizar los resultados obtenidos por el programa Rockworks, de modo de mejorar el valor de  $r_p$  en los 4 CPT. Los 4 resultados obtenidos por el programa SGEMS se encuentran desfasados a una profundidad menor.

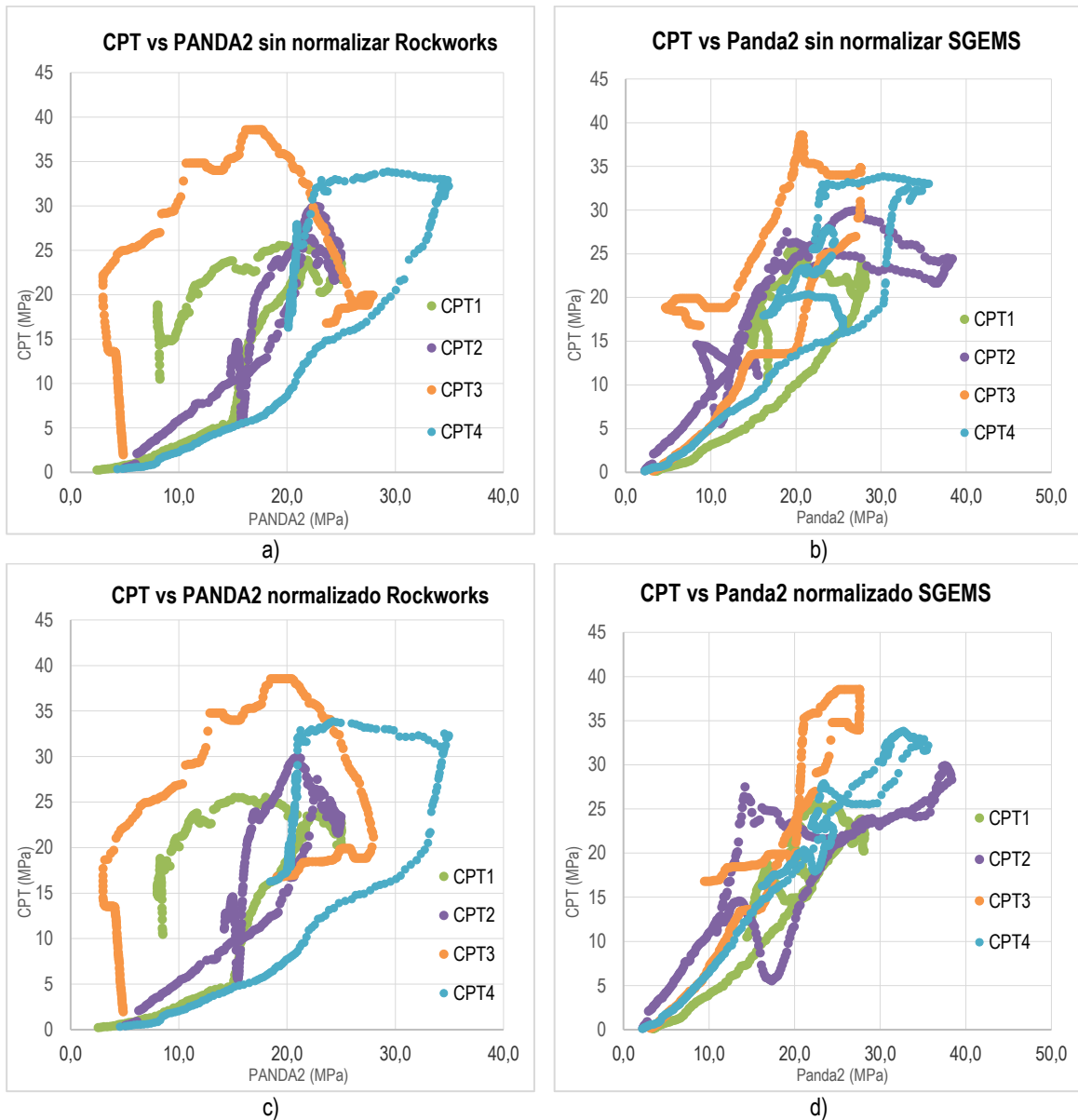


Figura 36: Gráficas de Resistencia de punta CPT vs PANDA2 generada por el programa: a) Rockworks datos sin normalizar b) SGEMS datos sin normalizar c) Rockworks datos normalizados d) SGEMS datos normalizados

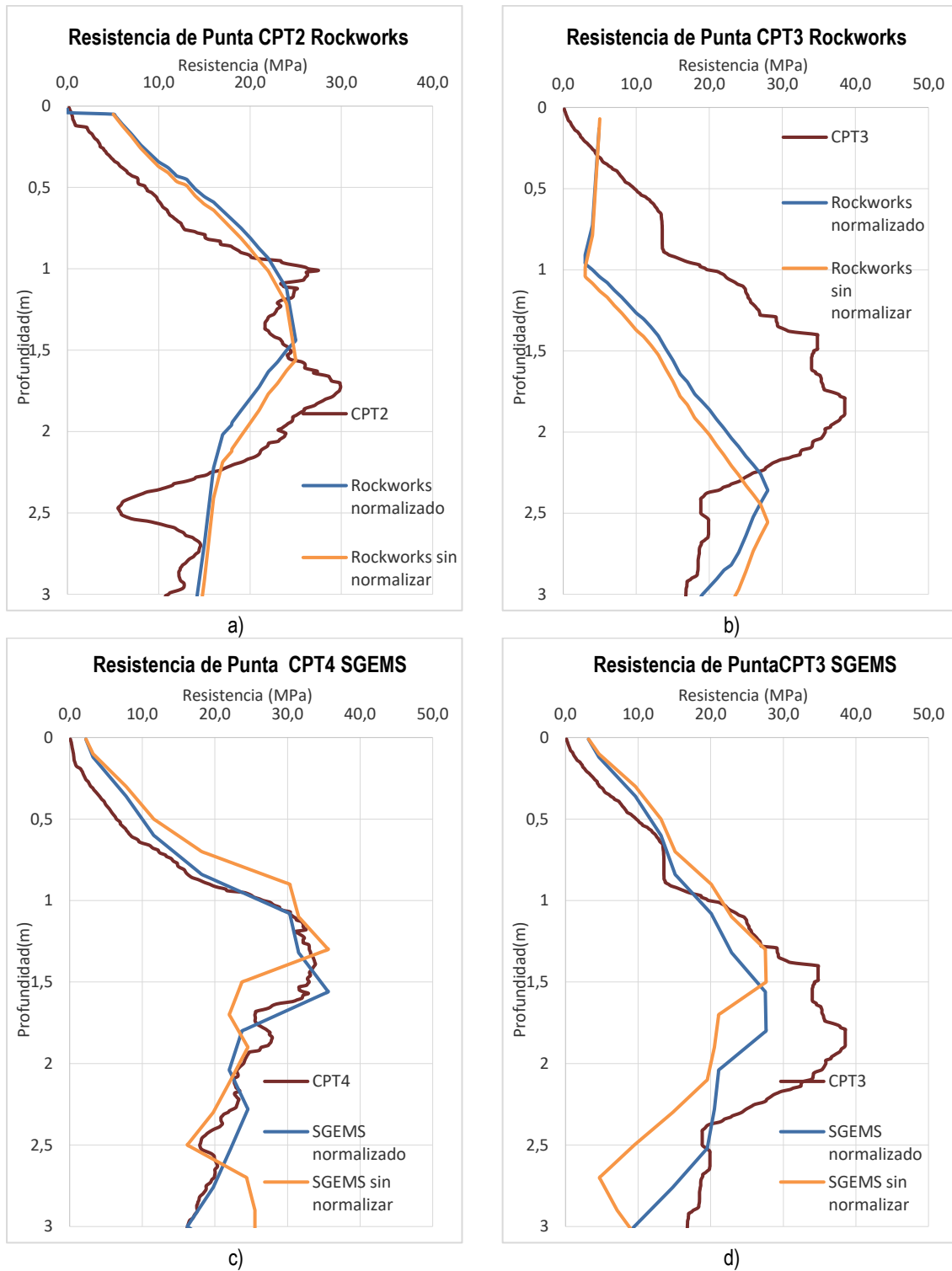


Figura 37: Desplazamientos de perfiles de Resistencia de Punta normalizados mejor caso (Izquierda) y peor caso (derecha) para cada programa: a) y b) Rockworks c) y d) SGEMS

## 6.4 BÚSQUEDA DE REGRESIÓN

Según lo determinado en el punto 6.3 se escoge el método de geoestadística, debido a que en ambos casos presenta un coeficiente de correlación mayor. Esto permite trabajar sólo con los datos obtenidos en el programa SGEMS, con el fin encontrar la relación final entre los ensayos CPT y PANDA2.

En esta sección, se utilizan los resultados obtenidos por los datos normalizados por la profundidad. Esto debido a que en cada ensayo CPT y en el caso donde se agruparon todos los datos a analizar, el coeficiente de correlación,  $r_p$ , fue mayor que en los datos sin normalizar.

La búsqueda de las relaciones se realiza con el ensayo que presenta un mayor coeficiente de correlación y para la situación de todos los datos agrupados. La decisión de realizar las regresiones por estos dos métodos, radica en que en la primera opción, el ensayo que presenta un mayor coeficiente CPT, es el ensayo CPT4, que se encuentra en el centro del área de estudio, lo que lo hace más concluyente al estar rodeado e influenciado de más ensayos PANDA2. La segunda opción, presenta una mayor cantidad de datos, lo que permite que se consideren todos los casos, ensayos CPT con muchos y con pocos ensayos PANDA2 a su alrededor. En la primera opción el valor de  $r_p$  es 0,98 y en la segunda opción es 0,85.

En cada escenario, la comparación se realiza determinando el coeficiente de determinación  $R^2$  y sus parámetros, para las regresiones doble raíz cuadrada, exponencial, lineal, logarítmica, polinómica de grado 2 y potencial. En las regresiones lineal y potencial se obtendrán ecuaciones con y sin constantes. Los valores de  $R^2$  son dados en porcentaje, donde el valor más cercano a 100% representa la mejor relación. Las regresiones, el valor de  $R^2$  y otros parámetros se obtienen mediante el programa Statgraphics

A continuación la Tabla 24 y la Tabla 25 presentan las regresiones para las 6 relaciones para los valores obtenidos del ensayo CPT4 y para los obtenidos de la totalidad de los datos.

**Tabla 24: Coeficiente de determinación y parámetros con los datos del ensayo CPT4 normalizado**

Relación	Parámetros	$R^2$
$q_t = (A + B * \sqrt{q_d})^2$	A=-1,41	97,76%
	B=1,27	
$q_t = A * e^{B*q_d}$	A=1,41	75,54%
	B=0,11	
$q_t = A * q_d + B$	A=1,11	96,50%
	B=-3,39	
$q_t = A * q_d$	A=0,97	98,92%
$q_t = A * \ln(q_d) + B$	A=-22,53	86,91%
	B=14,59	
$q_t = A * q_d^2 + B * q_d + C$	A=-0,005	95,92%
	B=1,28	
	C=-4,65	
$q_t = A * q_d^B$	A=0,09	96,05%
	B=1,74	
$q_t = q_d^B$	B=0,95	96,27%

Según los resultados conseguidos, la relación lineal sin constante, alcanza un mayor coeficiente de determinación, obteniendo un valor de  $R^2$  de 98,92%.

**Tabla 25: Coeficiente de determinación y parámetros con todos los datos de los ensayos CPT**

Relación	Parámetros	$R^2$
$q_t = (A + B * \sqrt{q_d})^2$	A=-0,81	80,01%
	B=1,15	
$q_t = A * e^{B*q_d}$	A=2,15	60,85%
	B=0,10	
$q_t = A * q_d + B$	A=0,98	72,44%
	B=-0,24	
$q_t = A * q_d$	A=0,96	94,08%
$q_t = A * \ln(q_d) + B$	A=-20,25	71,40%
	B=13,73	
$q_t = A * q_d^2 + B * q_d + C$	A=-0,02	75,43%
	B=1,72	
	C=-5,92	
$q_t = A * q_d^B$	A=0,16	82,16%
	B=1,59	
$q_t = q_d^B$	B=0,96	97,70%

Según los resultados conseguidos, la relación potencial sin constante, alcanza un mayor coeficiente de determinación, obteniendo un valor de  $R^2$  de 97,70.

De acuerdo a los resultados de ambas tablas, 3 relaciones presentan un alto porcentaje en el coeficiente de determinación, por lo que, para estas relaciones, se obtiene el error cuadrático medio entre el valor de resistencia del CPT obtenido en terreno y el valor de resistencia obtenido mediante cada relación, para todos los ensayos CPT. Las relaciones escogidas, para los dos escenarios, son: Doble raíz cuadrada, lineal y potencial con y sin constante. Sus resultados se presentan en la Tabla 26.

**Tabla 26: ECM de los 4 ensayos CPT**

Regresiones	Regresión con datos CPT4: ECM promedio de los 4 CPT	Regresión con todos los datos: ECM promedio de los 4 CPT
$q_t = (A + B * \sqrt{q_d})^2$	30,48	27,29
$q_t = A * q_d + B$	26,83	25,22
$q_t = A * q_d$	25,23	25,22
$q_t = A * q_d^B$	52,06	48,06
$q_t = q_d^B$	29,24	28,65

Los valores de error cuadrático medio mostrados en la Tabla 26, tienden a ser menores en las regresiones obtenidas por todos los datos, ésta situación puede deberse a que, como se indicó anteriormente, estas regresiones se toman en cuenta los contextos de los cuatro ensayos CPT. Para escoger la relación en cada caso, se define la condición de borde que, cuando el valor de la resistencia de punta del ensayo PANDA sea 0, el valor del mismo parámetro del ensayo CPT también sea 0.

En conclusión, en el caso de la relación encontrada con los datos del ensayo CPT4, se puede relacionar  $q_t$  y  $q_d$  por medio de la siguiente ecuación, que presenta un coeficiente de determinación de 98,92%:

$$q_t = 0,968 * q_d$$

En el escenario de considerar todos los datos, la ecuación posee un coeficiente de determinación es 97,70% y se presenta en seguida:

$$q_t = q_d^{0,957}$$

## 6.5 COMPARACION DE RESULTADOS CON PROPUESTAS ANTERIORES

A los resultados obtenidos (sin normalizar) por el programa SGEMS, en la ubicación de los ensayos CPT, se les aplican las relaciones encontradas en el punto 6.4 y la relación anterior propuesta por Barre 2014 para suelos plásticos. Las gráficas de las 3 relaciones se presentan más adelante en la Figura 38. La relación de Barre para suelos plásticos se presenta a continuación.

$$q_c = 1,08 * q_d$$

Analizando, cualitativamente las gráficas presentadas, se puede notar similitud entre las dos relaciones propuestas en la presenta memoria y la relación propuesta por Barre con respecto a la obtenida en terreno. Los valores mayores de resistencia, de las relaciones propuestas en esta memoria, se encuentran a la misma profundidad de las determinadas en terreno, pero presentan un valor mayor que los valores reales, menos en el ensayo CPT3. Es importante recordar, que como se mencionó, los ensayos CPT2 y CPT3 no tienen los valores de resistencia máximo parecidos a los ensayos PANDA2 más cercanos, lo que provoca un error en el análisis final.

Estudiando cuantitativamente los resultados, se puede determinar la diferencia de porcentaje entre los valores máximos de resistencia entre los determinados en terreno y las 3 relaciones planteadas, además del coeficiente de relación entre las mismas variables. Las resistencia máximas obtenidas por cada CPT en terreno, se muestran en la Tabla 27, mientras que la Tabla 28 presenta los valores generados por las regresiones planteadas y la de Barre (2014) y sus porcentajes de variación con respecto a los valores reales.

Tabla 27: Valores máximos de resistencia para cada ensayo CPT obtenido en terreno

Ensayo	CPT1	CPT2	CPT3	CPT4
Valores máximos de Resistencia (MPa)	25,53	29,91	43,92	33,86

Tabla 28: Valores máximos de resistencia, porcentaje de variación y coeficiente de correlación de cada relación para cada ensayo CPT

Regresión	Valores Máximos de Resistencia (MPa)	Porcentaje de Variación	$r_p$
$q_t = 0,968 * q_d$	CPT1=27,31	6,99%	0,91
	CPT2=37,15	24,22%	0,82
	CPT3=26,75	-30,56%	0,91
	CPT4=34,49	1,87%	0,98
$q_t = q_d^{0,957}$	CPT1=24,46	-4,17%	0,91
	CPT2=32,84	9,81%	0,82
	CPT3=23,98	37,75%	0,91
	CPT4=30,58	-9,66%	0,97
$q_c = 1,08 * q_d$	CPT1=30,46	19,32%	0,77
	CPT2=41,43	38,53%	0,82
	CPT3=29,83	-22,56%	0,77
	CPT4=38,46	13,60%	0,84

Con respecto a los resultados que se muestran en la Tabla 28, se puede notar la diferencia en los valores máximos de resistencia de punta en las 3 regresiones en los ensayos CPT2 y CPT3.

Como se ha mencionado anteriormente, esto se debe a que los ensayos PANDA2 realizados cerca de estos ensayos CPT no se asemejan en valor. Debido a esta situación, es que para elegir la regresión final para suelos granulares, el análisis se centra en los ensayos CPT1 y CPT4.

La curva del ensayo CPT1 presenta una gran similitud con las relaciones lineal y potencial mostradas en la Figura 38 a) y también una gran semejanza en el valor máximo de resistencia de punta, pero en la relación potencial, este valor es menor que el real, lo que puede generar un problema. El mismo escenario sucede con la curva del ensayo CPT4, mostrada en la Figura 38 d), el valor máximo de la relación lineal es muy cercano al obtenido en terreno, mientras que el valor presentado por la relación potencial es un 10% menor. Es por esto, que aunque la relación lineal pueda generar valores máximos 7% mayores que los reales, como se presentó en ensayo CPT1, es ésta la relación escogida.

La relación lineal determinada, si bien genera valores muy similares a los que plantea la fórmula de Barre, para algunos valores, especialmente en valores bajos, en valores altos la diferencia se acrecienta, ya que la fórmula lineal escogida disminuye los valores de los ensayos PANDA y la de Barre los aumenta, generando un contraste considerable al comparar los valores máximos de resistencia de cada ensayo. Esta diferencia se advierte tanto en la Tabla 28, como en las curvas presentadas en la Figura 38.

Cabe destacar que, como se mencionó en la primera parte de esta memoria, la fórmula obtenida por Barre fue realizada para suelos cohesivos.

Finalmente, como resumen, se plantean los pasos a realizar para obtener los resultados del ensayo CPT, mediante los registros del ensayo PANDA:

- I. Realizar el o los ensayos PANDA en el punto o la zona que se necesita estudiar
- II. A las profundidades obtenidas por el ensayo PANDA, aplicar la normalización con el parámetro obtenido para el método de geoestadística. La parametrización depende de los diámetros del cono cada ensayo, por lo que son datos que se deben conocer.

$$Z'_p = \sqrt[3,223]{\frac{\Phi_{CPT}}{\Phi_P}} * Z_p$$

- III. Con las profundidades normalizadas, obtener los valores de resistencia CPT mediante la relación:

$$q_t = 0,968 * q_d$$

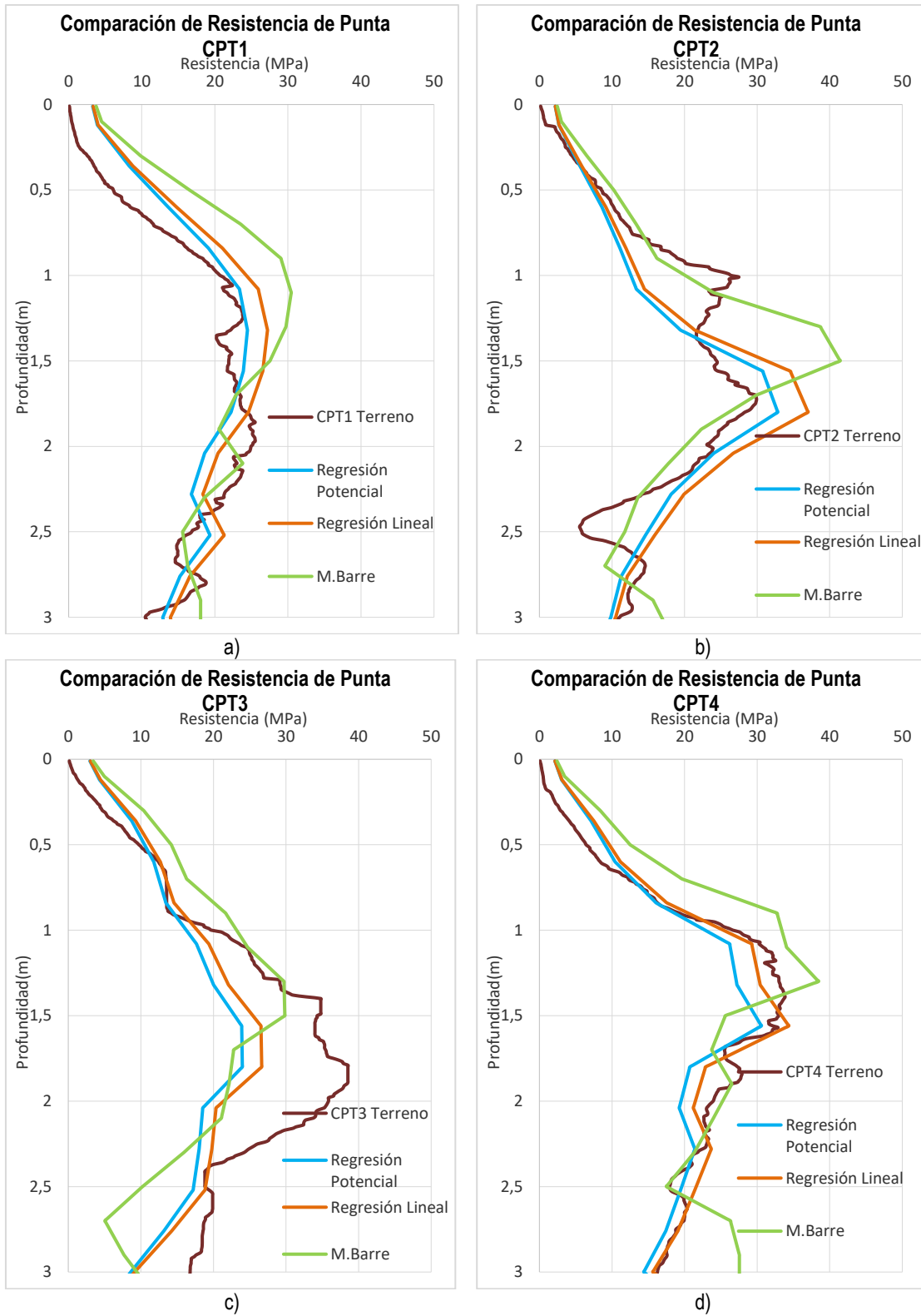


Figura 38: Comparación de perfiles de resistencia de punta: a) CPT1 b) CPT2 c) CPT3 d) CPT4

## 7 CONCLUSIONES

Como resultado de este estudio, se determinó que la herramienta de geoestadística es una herramienta eficaz como método de estimación de puntos en el espacio. Esto se debe, a que basa su análisis de estimación de puntos, en la herramienta del variograma y el método krigin, los que permiten definir una dirección de búsqueda, establecer un alcance de búsqueda, modelar los resultados y ponderar los datos que se encuentran en el área de análisis. Es importante destacar que, para realizar un estudio completo y más preciso con la herramienta de geoestadística, es conveniente obtener una cantidad de datos que permitan realizar un estudio de anisotropía de la zona. Por otra parte, el programa Rockworks, que tuvo una correcta estimación en 3 de los ensayos CPT, es un programa que permite de mejor manera zonificar parámetros en áreas de estudio, más que la estimación puntual en una coordenada específica.

Para realizar una investigación más profunda de los resultados, se procedió a determinar una normalización de la profundidad del ensayo PANDA, con los diámetros de cada ensayo. Esto se realizó, debido a que los resultados, principalmente en el método de geoestadística, presentados en la Figura 33, muestran una similitud en el valor de las resistencias de punta, pero un pequeño desplazamiento entre los resultados obtenidos por el ensayo CPT en terreno y los generados por el programa con los valores del ensayo PANDA, a la profundidad que se dan estos valores. Por lo tanto, se encontró un valor de relación “k” que permita desplazar el perfil de resistencia del ensayo PANDA generado y se asemeje de mejor manera al perfil del ensayo CPT. La ecuación de normalización se presenta a continuación:

$$Z'_p = \sqrt[3,223]{\frac{\phi_{CPT}}{\phi_P}} * Z_p$$

Como se puede notar en la ecuación presentada, el valor de relación “k” es 3,223 y relaciona de manera directa los diámetros del ensayo PANDA y CPT. Es importante destacar que, la normalización también se realizó para los resultados del modelo de distancia inversa rápida del programa Rockworks, pero no se pudo encontrar un valor de relación “k” que permitiera mejorar a la misma vez, todos los resultados obtenidos por el programa, ni generar un cambio considerable entre los resultados sin normalizar y normalizados. La causa de esta situación, fue el desplazamiento en otra dirección del perfil generado en la ubicación del ensayo CPT3, con respecto a los otros tres ensayos CPT.

En el término de este documento, luego del proceso de normalización de los resultados y una comparación de error cuadrático medio y valores máximos de resistencia, se obtuvo una relación lineal entre los dos ensayos. Esta relación está sujeta a la condición de borde, que si el ensayo PANDA tiene valor 0 en su parámetro de resistencia de punta, el ensayo CPT también tenga el mismo valor. La relación se presenta a continuación.

$$q_t = 0,968 * q_d$$

Esta relación encontrada, presenta un 98% de coeficiente de determinación, un coeficiente de correlación, entres los datos generados y obtenidos, mayor a 0,8 en los 4 ensayos CPT y mayor a 0,9 en tres de ellos. Además, presenta un porcentaje mayor de variación, del valor máximo de resistencia de punta, de 7% si los ensayos PANDA ubicados en las cercanías de los ensayos CPT tienen un valor similar. La diferencia presentada en el ensayo CPT2 y especialmente en el ensayo CPT 3, en los valores máximos de resistencia de punta, se entiende que pudo ser provocada, porque los ensayos PANDA2 más cercanos a estos ensayos CPT,

se ubican en una zona donde la arena del sector se encuentra con un nivel de densidad menor o mayor a la posición exacta donde se realizó el ensayo CPT, dependiendo el ensayo estudiado. Lamentablemente el área estudiada no presentaba una distribución homogénea en la densidad del suelo.

Comparando la relación lineal con la determinada por Barre (2014),  $q_c = 1,08 q_d$ , las diferencias radican principalmente, en que la ecuación presentada por Barre aumenta los valores de resistencia de punta del ensayo CPT con respecto a los obtenidos con el ensayo PANDA, mientras que la relación encontrada en esta memoria disminuye esos valores. Esta diferencia se acentúa si los valores de resistencia se hacen cada vez más grandes. Es importante destacar que la relación encontrada por Barre es obtenida para suelos cohesivos, que puede ser la causa de esta diferencia, además de haber ejecutado otras herramientas para el análisis, los ensayos PANDA se realizaron en la misma ubicación de los ensayos CPT y se consideraron propiedades del suelo, que en suelos granulares no son un factor de estudio.

Esta memoria entre ensayos PANDA2 y CPT nos ayudará a estudiar de manera más completa y eficiente las zonas de estudio, ya que como se mencionó anteriormente, el ensayo CPT tiene una gran cantidad de correlaciones para estudiar las propiedades de los suelos, dándole un rol más importante al ensayo PANDA en un futuro cercano. Finalmente, la relación obtenida y la Figura 36 d) nos permiten asegurar que los valores de resistencia de punta de los ensayos PANDA2 y CPT son muy similares en suelos granulares. Adicionalmente se podría comprobar la validez de esta ecuación y metodología, en otros tipos de suelos, cuando existan registros de ensayos CPT y PANDA en la misma ubicación.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

Barre, M (2014). Caracterización geotécnica in-situ de relaves espesados mediante ensayos de penetración. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Bustos, I. (2017). Aportes para una nueva zonificación geotécnica de viña del mar: Estimación de licuefacción en la cuenca del Marga – Marga.

Byrne, B. W., McAdam, R. A., Burd, H. J., Houlsby, G. T., Martin, C. M., Gavin, K. & Potts, D. M. (2015). Field testing of large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications.

Chow, F. C. M. (1997). Investigations into displacement pile behaviour for offshore foundations (Doctoral dissertation, University of London).

D3341-16 (2016). ASTM – Standard test method for mechanical cone penetration testing of soils.

Devincenzi, M., & Frank, N. (2004). Ensayos geotécnicos in situ. *IGEOTEST, SL*.

Emery, X (2007). Apuntes de Geoestadística.

Espinace, R., Palma, J., Peña, A., Villavicencio, G., Bossier, D., Bacconnet, C., & Gourves, R. (2007). Nueva alternativa para el control de compactación de tranques de relave. El penetrómetro PANDA. *Revista de la Construcción*, 6(2).

Henao, R. G. (1993). Introducción a la Geoestadística. Universidad Nacional de Colombia.

MANTEROLA, C., & PINEDA, V. (2008). El valor de "p" y la "significación estadística": Aspectos generales y su valor en la práctica clínica. *Revista chilena de cirugía*, 60(1), 86-89.

Nch3261 (2012). Depósitos de relaves – Control de compactación con penetrometro dinámico ligero. Instituto Nacional de Normalización INN

Nch3364 (2014). Geotecnia - Ensayo de Penetración Estándar. Instituto Nacional de Normalización INN

Ojeda, M. Zamora, M. (2015). Metodología para la modelación del control de compactación en tranques de relaves. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Olea, R. A. (2012). Geostatistics for engineers and earth scientists. Springer Science & Business Media.

Remy, N. (2004). Geostatistical earth modeling software: User's manual. *Stanford Center for Reservoir Forecasting (SCRF), Stanford University, California, USA*.

Remy, N., Boucher, A., & Wu, J. (2009). Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide. Cambridge University Press.

Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2010). Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering. Gregg Drilling & Testing.

Rockworks16, 2016 [En Línea] Available at:  
<https://www.rockware.com/product/newFeaturesContent.php?id=165&category=326>

Rustom, J. Estadística descriptiva, probabilidad e inferencia una visión conceptual y aplicada [internet]. 2012

Saavedra, T. (2017). Análisis de los efectos de la desaturación en la resistencia al corte de relaves espesados. Universidad Técnica Federico Santa María.

Sanhueza, C., & Villavicencio, G. (2010). Estimación de Parámetros Resistentes a Partir del Ensayo de Penetración PANDA y su Aplicación en el Cálculo de la Capacidad de Soporte y Asentamientos del Suelo de Fundación (1ª parte). Revista de la Construcción, 9(1), 120-131.

Schabenberger, O. Statistical methods for spatial data analysis/by Oliver Schabenberger, Carol A. Gotway (No. 001.422 S24.).

Vermorel, J.M (2007). Utilización de la geoestadística para el estudio de la estabilidad de los tranques de relaves. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Polytech' Clermont

Villavicencio, G., Breul, P., Espinace, R., & Valenzuela, P. (2012). Control de compactación con penetrómetro ligero en tranques de relaves, considerando su variabilidad material y estructural. Revista de la Construcción, 11(1), 119-133.

Weisberg, S. (2005). Applied linear regression (Vol. 528). John Wiley & Sons.

Zdravković, L., Taborda, D. M. G., Potts, D. M., Jardine, R. J., Sideri, M., Schroeder, F. C., ... & Martin, C. M. (2015). Numerical modelling of large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications. In *Proceeding 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Norway:[sn]*

## 9 ANEXOS

### 9.1 ANEXO A

Presentación de los variogramas en las direcciones de análisis

- **Variograma en la dirección 0 grados**

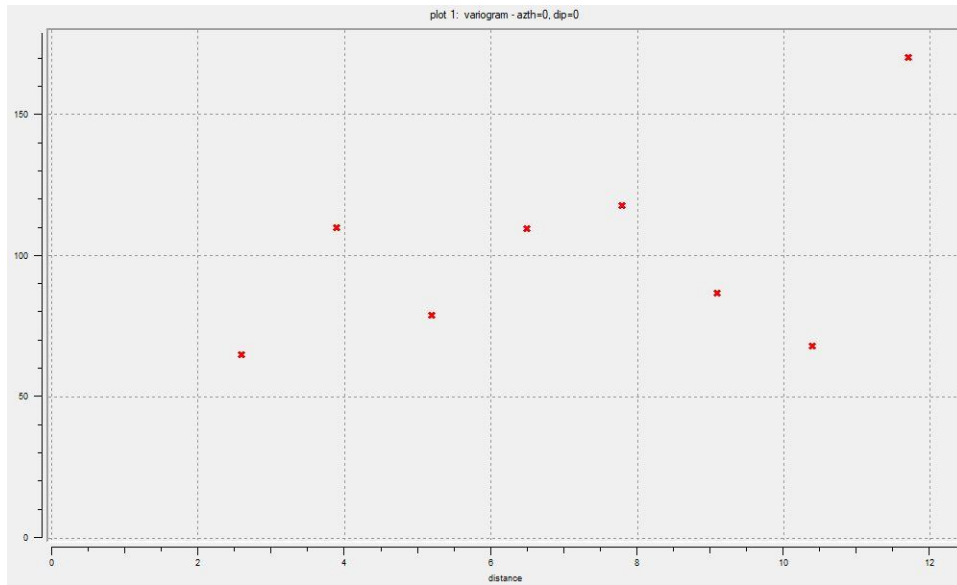


Figura 39: Variograma en la dirección 0 grados azimuth 0 dip

- **Variograma en la dirección 0 grados con dip 90 grados**

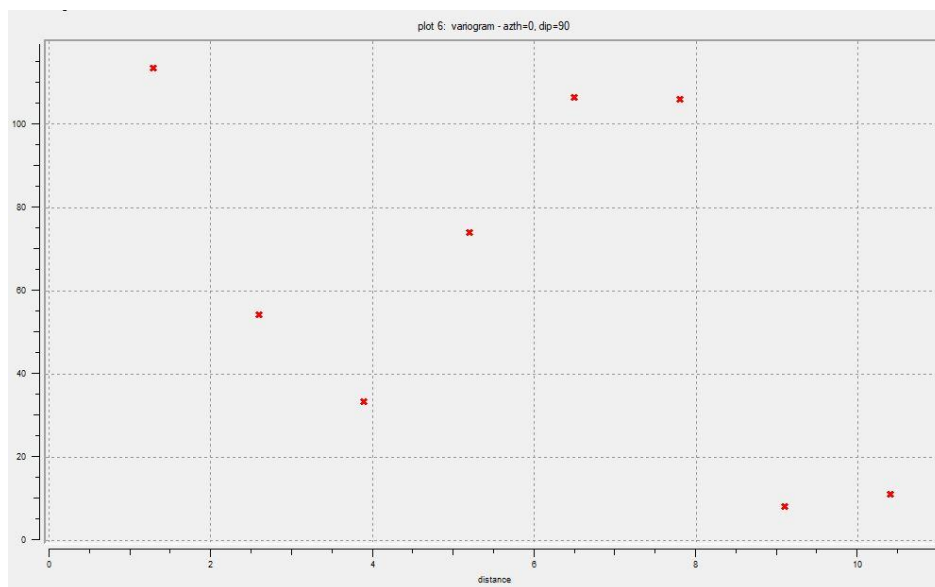


Figura 40: Variograma en la dirección 0 grados azimuth 90 dip

- **Variograma en la dirección 45 grados**

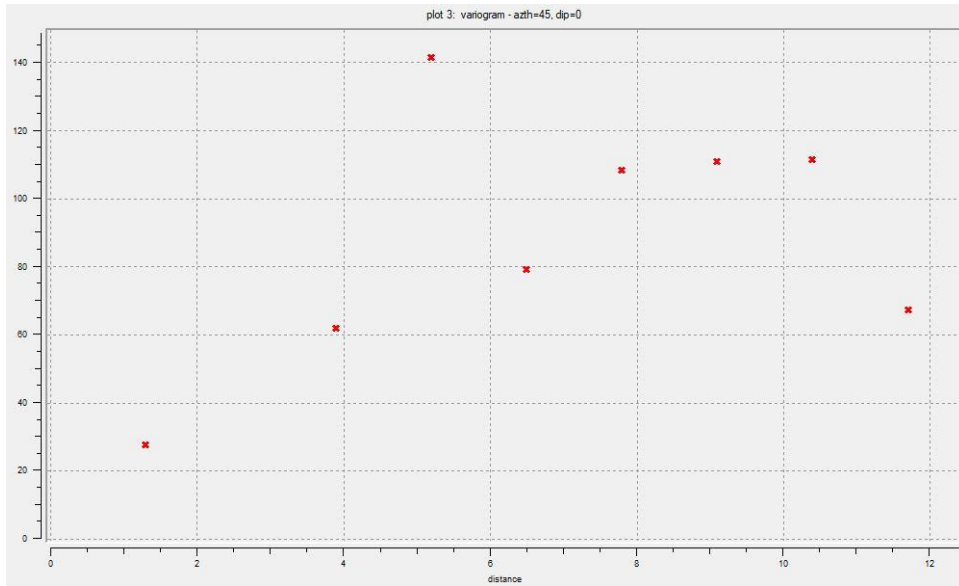


Figura 41: Variograma en la dirección 45 grados

- **Variograma en la dirección 70 grados**

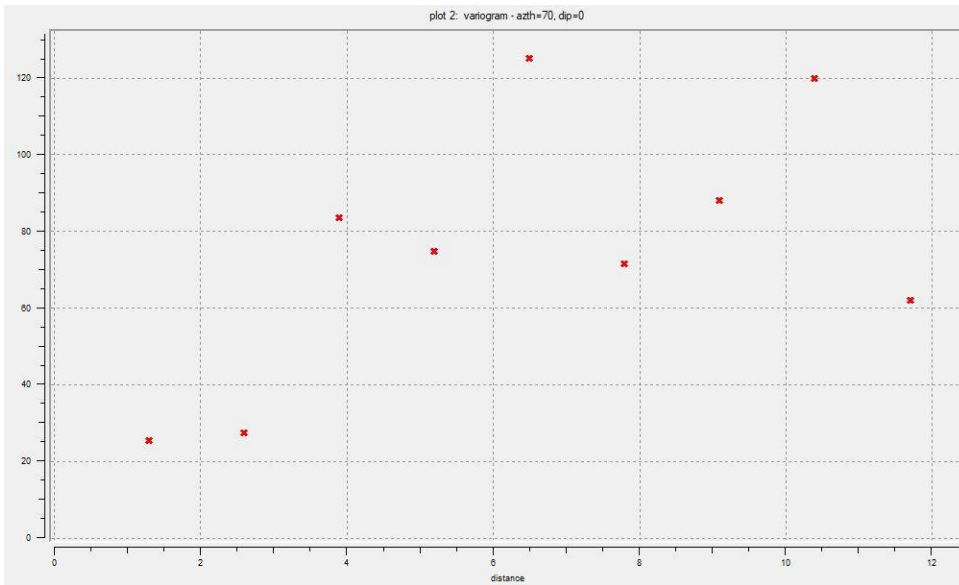


Figura 42: Variograma en la dirección 70 grados

- **Variograma en la dirección 90 grados**

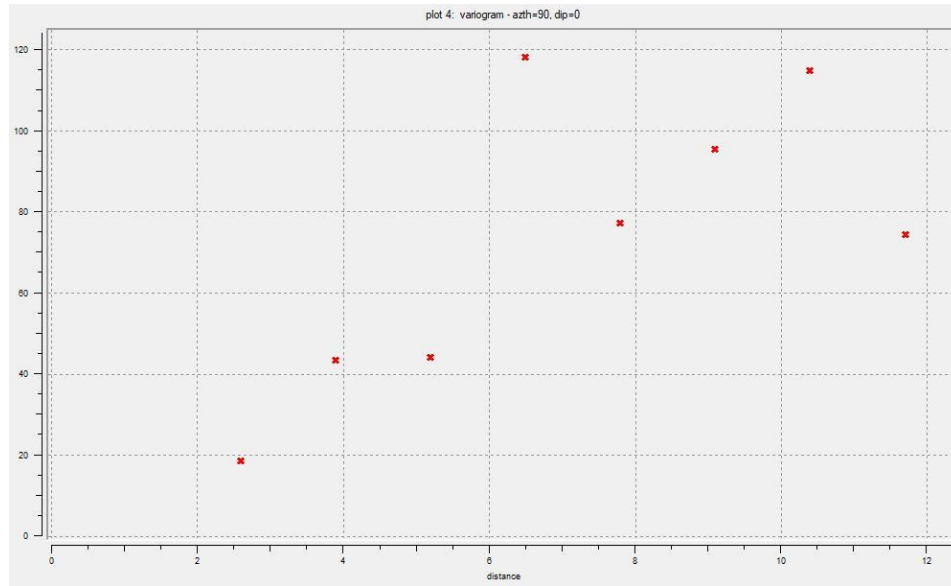


Figura 43: Variograma en la dirección 90 grados

- **Variograma en la dirección 135 grados**

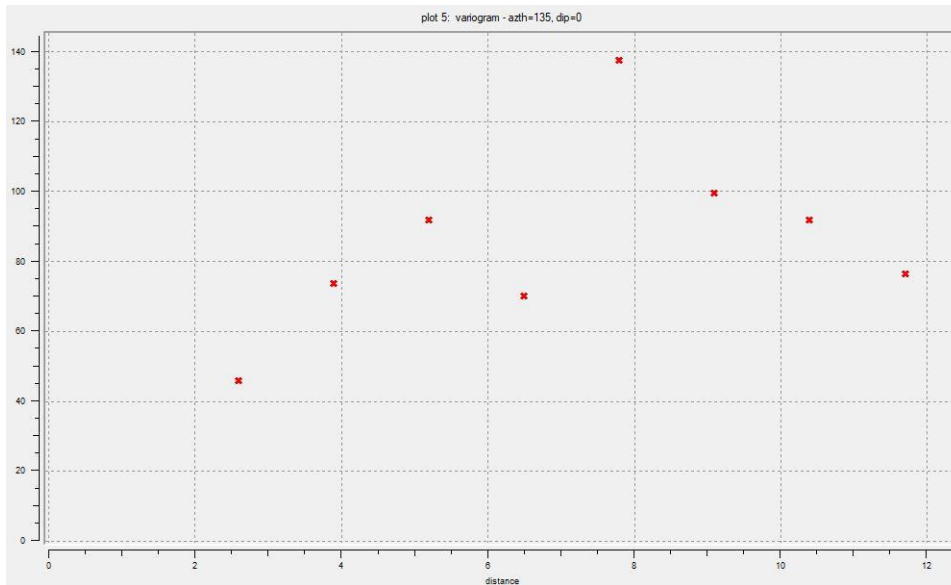


Figura 44: Variograma en la dirección 135 grados

## 9.2 ANEXO B

Presentación de los resultados de los perfiles de resistencia de punta obtenidos por los programas, después de la normalización.

- **Gráficas de datos Rockworks normalizados**

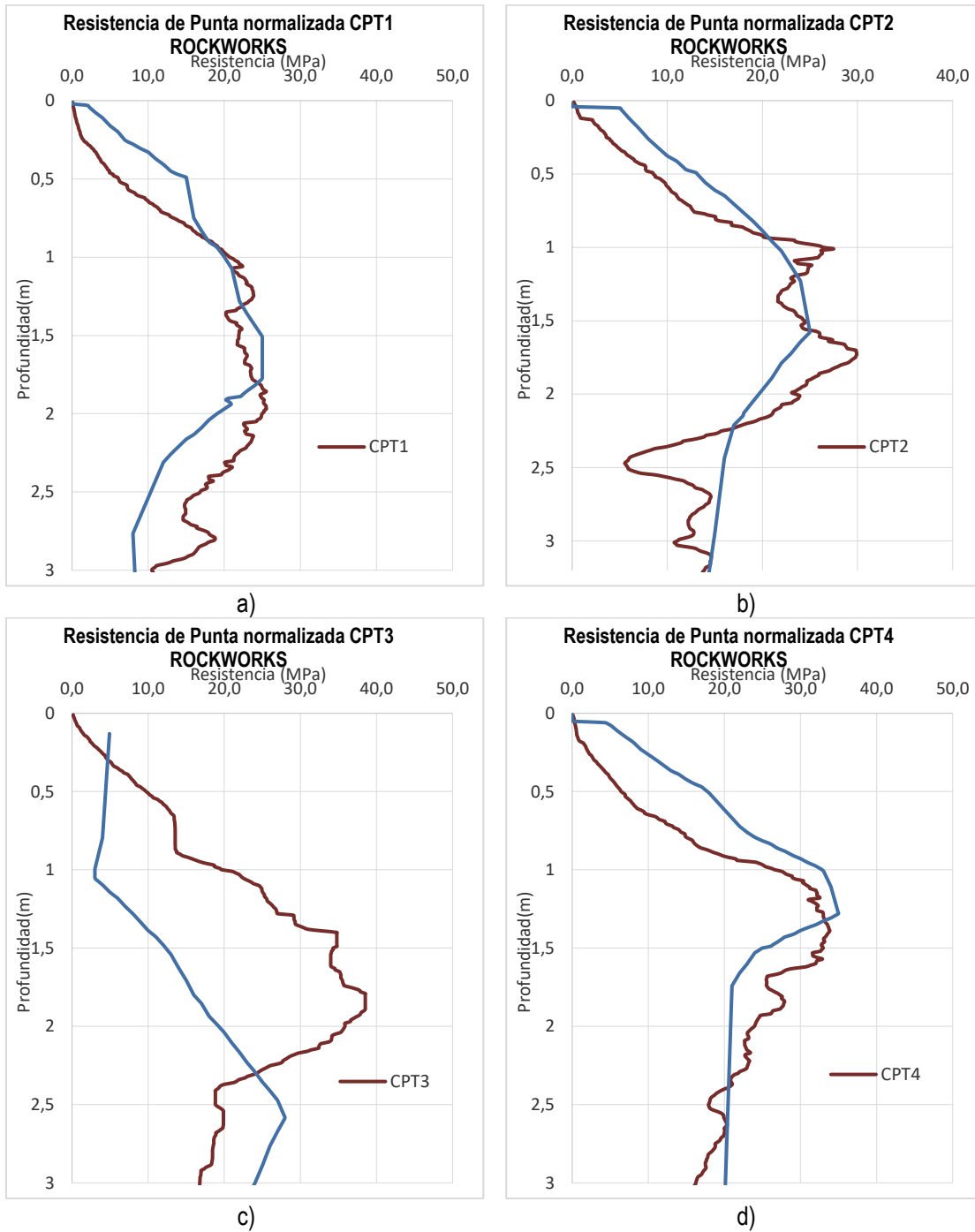


Figura 45: Perfiles de resistencia de punta normalizada programa Rockworks: a) CPT1 b) CPT2 c) CPT3 d) CPT4

• **Gráficas de datos SGEMS normalizados**

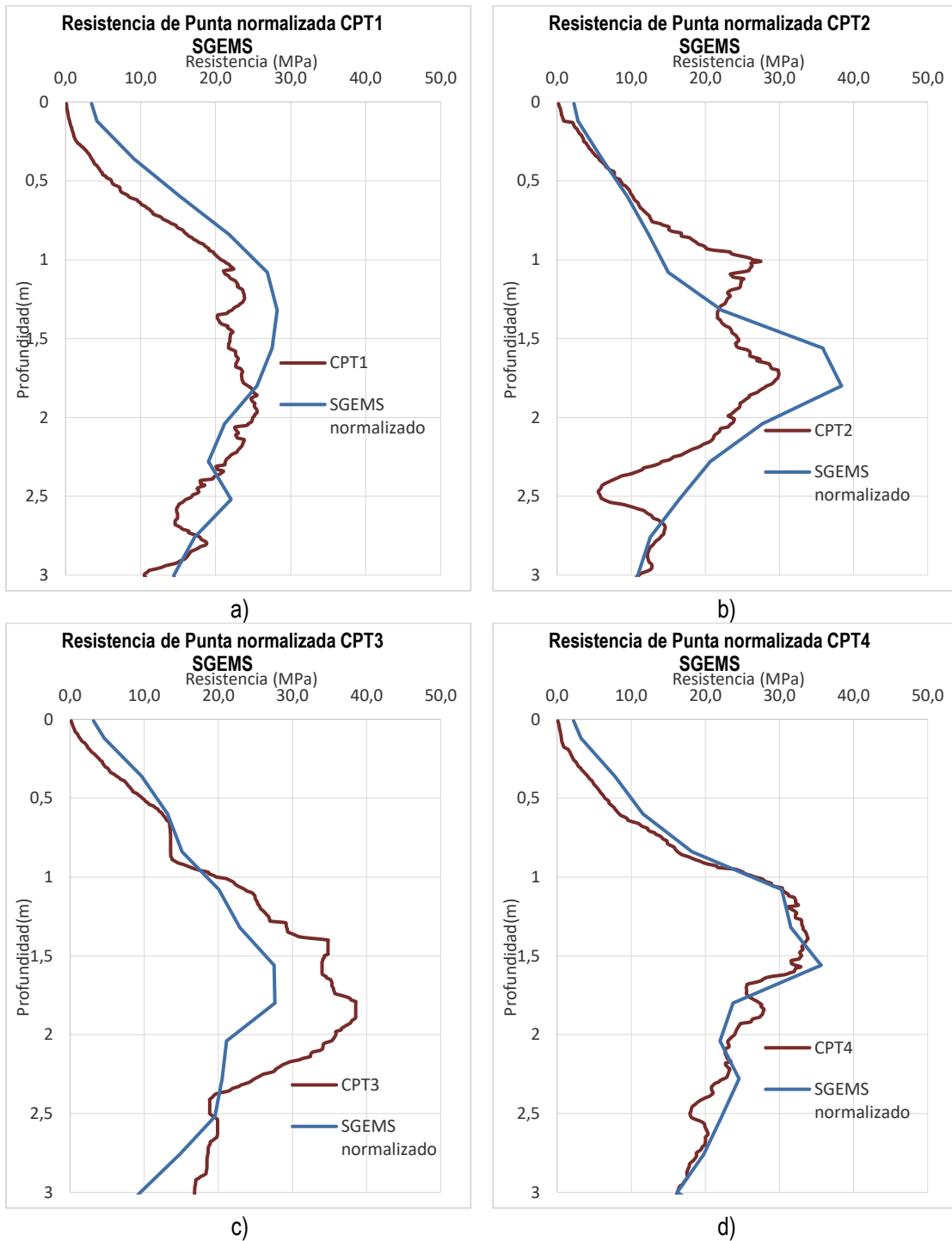


Figura 46: Perfiles de resistencia de punta normalizada programa SGEMS: a) CPT1 b) CPT2 c) CPT3 d) CPT4