

7 01163



UNAM
POSGRADO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

*ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DEL SUBSUELO EN EL
NORTE DE LA ZONA LACUSTRE DEL VALLE DE MÉXICO*

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

T E S I S
que para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA
(Mecánica de suelos)
p r e s e n t a
ARMANDO PANTOJA SÁNCHEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Porque Jehová mismo da la sabiduría; procedentes de su boca hay conocimiento y discernimiento. Y para los rectos atesorará sabiduría práctica; para los que andan en integridad él es un escudo, mediante la observación de las sendas del juicio, y el guardará el mismísimo camino de los que le son leales. En tal caso entenderás justicia y juicio y rectitud, el derrotero entero de lo que es bueno”.

Proverbios 2:6-9

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

♥ A mi esposa Martha Yolanda:

Gracias por su amor y apoyo

♥ A mis hijos Erick Armando y Karen Daniela

Gracias por gozar y compartir sus hermosas vidas conmigo

♥ A mis padres María de Jesús y Agustín

Gracias por servirme de excelente guía y ejemplo en la vida

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Agradecimientos:

- ✓ Al Instituto Politécnico Nacional
- ✓ A la Universidad Nacional Autónoma de México
- ✓ A la Comisión Federal de Electricidad

Mis casas de estudio y aprendizaje profesional

- ✓ Al Dr. Gabriel Auvinet Guichard

Por sus enseñanzas y ayuda en la elaboración de la presente tesis

- ✓ A los ingenieros:

Jorge E. Castilla Camacho

Juan de Dios Alemán Velásquez

José Fco. Fernández Romero

Por su apoyo en la CFE para realizar este trabajo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DEL SUBSUELO EN EL NORTE DE LA ZONA LACUSTRE DEL VALLE DE MÉXICO

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Alcance

2 DESCRIPCIÓN DEL SUBSUELO PARA FINES GEOTÉCNICOS

2.1 Propiedades relevantes

2.2 Representación tradicional

- 2.2.1 Tablas
- 2.2.2 Perfiles
- 2.2.3 Cortes
- 2.2.4 Interpolaciones tradicionales

2.3 Descripción estadística

- 2.3.1 Media, varianza, desviación estándar
- 2.3.2 Histograma
- 2.3.3 Tendencia o deriva

2.4 Descripción geoestadística

- 2.4.1 Variables aleatorias
- 2.4.2 Campos aleatorios
- 2.4.3 Estimación

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DEL SUBSUELO EN EL NORTE DE LA ZONA LACUSTRE DEL VALLE

3.1 Aspectos geológicos y geotécnicos del subsuelo en el Norte del Valle de México

- 3.1.1 Aspectos geológicos y geotécnicos generales

3.1.2 Zona del lago de Texcoco

3.2 Análisis del subsuelo en el sitio Sosa Texcoco

3.2.1 Exploraciones realizadas

3.2.2 Interpretación tradicional

3.2.3 Evaluación geoestadística del sitio

3.2.4 Interpretación geoestadística basada en la resistencia de cono eléctrico y en el contenido de agua

3.2.5 Estratigrafía basada en la resistencia de cono y en el contenido de agua

3.3 Análisis del subsuelo en el sitio Tecámac

3.3.1 Exploraciones realizadas

3.3.2 Interpretación tradicional

3.3.3 Evaluación geoestadística del sitio

3.3.4 Interpretación geoestadística basada en la resistencia a la penetración estándar y el contenido de agua

3.3.5 Estratigrafía basada en la resistencia a la penetración estándar y el contenido de agua.

3.4 Análisis comparativo de los sitios

3.4.1 Estratigrafía

3.4.2 Análisis geoestadístico

3.4.3 Consideraciones ingenieriles

4 CONCLUSIONES

5 REFERENCIAS



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el presente trabajo se evalúa la utilidad de las herramientas de la teoría de la probabilidad para analizar la información geotécnica disponible en dos sitios del norte del valle de México donde es posible que se construya la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Texcoco Norte, la cual forma parte del Proyecto de Saneamiento del Valle de México, estructurado por la Comisión Nacional del Agua (CNA).

1.1.1 Antecedentes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Texcoco Norte

El Proyecto de Saneamiento del Valle de México, estructurado por la Comisión Nacional del Agua (CNA), tiene como objetivo primordial evitar la posibilidad de inundación de la ciudad, así como mejorar las condiciones de salubridad y económicas de la población de la zona conurbada de la Ciudad de México y de los estados de México e Hidalgo. Para tal fin, el mencionado proyecto contempla la realización de ampliaciones y reforzamientos del sistema de drenaje del área metropolitana, la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales y la instalación de obras de saneamiento en los estados de México e Hidalgo.

Para la definición de uno de los componentes del Proyecto de Saneamiento, la CNA encargó a la Gerencia de Ingeniería Experimental y Control de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) la realización del estudio geotécnico en los dos sitios propuestos para construir la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Texcoco Norte, a saber:

- Sitio Sosa Texcoco
- Sitio Tecámac

Ambos sitios se localizan en la zona norte de la zona lacustre del Valle de México (Fig. 1).

Para el sitio Sosa Texcoco, en junio de 1997, la Comisión Federal de Electricidad emitió el informe No. 97-47-GS (CFE, 1997) que contiene el estudio geotécnico respectivo.

En marzo de 1998 se realizó el informe 98-74-GS (CFE, 1998) correspondiente al estudio del sitio Tecámac.

La Planta Texcoco Norte tendría una capacidad de tratamiento de $44 \text{ m}^3/\text{s}$, recibiría las aguas residuales que produce la zona metropolitana de la Ciudad de México y de ella saldrían aguas libres de patógenos, conservando sus principales nutrientes, para usos industriales y de riego.

El sitio Sosa Texcoco se localiza en el Municipio de Ecatepec, Estado de México, al norte del triángulo formado por el Gran Canal del Desagüe, el Río de los Remedios y la Avenida Carlos Hank González, al sur del montículo de carbonato de calcio de las instalaciones de la planta Sosa Texcoco, y al noroeste del evaporador solar conocido como "El Caracol", propiedad de la misma empresa. El terreno es sensiblemente plano y horizontal, con una cota media del terreno natural de 2233.5 msnm. Se dispone

de 50 hectáreas aproximadamente para la construcción de la planta, comprendidas dentro de un polígono regular cuyas dimensiones y forma geométrica se muestran en la figura 2.

El predio del sitio Tecámac se localiza al noroeste de la intersección entre el Gran Canal del Desagüe y la carretera México-Tepexpan, como se muestra esquemáticamente en la figura 1. El terreno, de uso agrícola en la actualidad, es sensiblemente plano y horizontal, con una cota del terreno natural de 2,238 msnm, aproximadamente. Se dispone de alrededor de 165 hectáreas para la construcción de la planta, comprendidas dentro de un polígono regular de aproximadamente 1500 m por 1100 m. Las dimensiones y forma geométrica se muestran en la figura 3.

1.1.2 Antecedentes y justificación del análisis geoestadístico

Dada la complejidad que ofrecen los suelos, frecuentemente los parámetros que considera el ingeniero geotécnico para el análisis y diseño de cimentaciones difieren en gran medida de los reales. Entre los aspectos que propician esta diferencia, pueden mencionarse los siguientes:

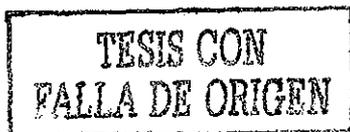
a) Incertidumbres asociadas a la medición o estimación de las propiedades de interés

Estas incertidumbres surgen de los posibles errores en las mediciones (en campo y laboratorio) o estimaciones realizadas. Algunas de las causas por las que no se puede obtener un valor representativo son la recuperación de muestras alteradas, las diferentes condiciones de esfuerzo (los esfuerzos aplicados en las pruebas no corresponden con las condiciones reales), etc. Por otra parte, en la ingeniería geotécnica es frecuente utilizar relaciones empíricas para correlacionar las diferentes propiedades del suelo. Por ejemplo: es común relacionar el contenido de agua (w) con propiedades mecánicas como la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ) o la densidad relativa (D_r) con la resistencia en la prueba de penetración estándar *SPT*. Esta correlación se utiliza porque las propiedades índice son mucho más económicas y fáciles de obtener. Sin embargo, en ocasiones estas relaciones empíricas pueden estar muy lejos de representar las condiciones reales del subsuelo, lo que resulta en una incertidumbre que es necesario valorar.

En esta tesis se ignorará este tipo de incertidumbre.

b) Incertidumbres asociadas a la variabilidad espacial de las propiedades

La compleja variación de las propiedades de los suelos en el espacio es el resultado de su proceso de formación. La imposibilidad de determinar las propiedades en todos los puntos del medio da lugar a una incertidumbre adicional. En esta tesis se pondrá énfasis en la cuantificación de esta incertidumbre. Para ello, se recurrirá a los métodos probabilistas, los cuales, como complementos de los análisis ingenieriles convencionales, proveen los medios para definir las estrategias de adquisición de datos y sobre todo cuantificar el grado de incertidumbre residual tomando en cuenta la información disponible. Se evaluará en que medida estos métodos facilitan la caracterización geotécnica del sitio, y permiten la cuantificación de la variabilidad y heterogeneidad de la estratigrafía y de las propiedades de los suelos.



1.2 Objetivos

En el presente trabajo se pretende:

- a) Revisar las técnicas tradicionales de interpretación de los resultados de exploraciones geotécnicas.
- b) Revisar los conceptos fundamentales de la geoestadística.
- c) Aplicar esta técnica a la interpretación de los resultados de las exploraciones de los dos sitios de interés, desarrollando modelos de la variación espacial de las propiedades.
- d) Definir la estratigrafía en cada predio recurriendo a técnicas de estimación estadística y compararla con la interpretación tradicional.
- e) Cuantificar la incertidumbre residual y definir las zonas donde existe mayor incertidumbre respecto a la caracterización de las propiedades del suelo, y en las cuales podría ser necesaria la realización de sondeos adicionales.
- f) Analizar las implicaciones ingenieriles de los resultados obtenidos y sugerir, en forma preliminar, los sitios más adecuados para la ubicación de los edificios y estructuras más importantes, sus niveles de desplante y posibles sistemas de cimentaciones.
- g) Comparar los resultados obtenidos en los dos sitios y sacar algunas conclusiones generales relativas a la variación espacial de los suelos en la parte norte de la zona lacustre del valle de México.
- h) Contribuir a definir el potencial y las limitaciones de los métodos geoestadísticos a la geotecnia.

1.3 Alcance

Para el sitio Sosa Texcoco se considera el contenido de agua (w) y la resistencia de cono eléctrico (q_c). Se analiza el subsuelo existente entre 0 y 60 m de profundidad.

Para el sitio Tecámac se utilizan los parámetros de contenido de agua (w) y el número de golpes (N) de la prueba de penetración estándar (SPT). Los análisis se realizan de 0 a 30 m de profundidad.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2 DESCRIPCIÓN DEL SUBSUELO PARA FINES GEOTÉCNICOS

Para diseñar y construir en forma adecuada las diferentes obras de ingeniería civil, es muy importante conocer las características y propiedades del subsuelo sobre el que se van a desplantar. Sin embargo, dada la gran variedad existente de tipos de suelo en la naturaleza, y aun para uno mismo, las diferentes propiedades que se pueden presentar, la interpretación y descripción de los medios geotécnicos no resultan sencillas.

En geotecnia, la caracterización del subsuelo se realiza tradicionalmente en varias etapas.

Etapas I. Trabajos de exploración. En función del tipo de suelo se determina el método de exploración y el muestreo más adecuado. Las muestras obtenidas se llevan al laboratorio para su prueba.

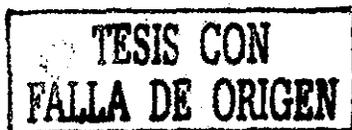
Etapas II. Determinación de las propiedades índice y mecánicas del suelo. Existen procedimientos estándares internacionales para realizar las pruebas más importantes, tanto en laboratorio como en campo.

Etapas III. Interpretación. Para la caracterización del subsuelo se utilizan los resultados de las etapas I y II, adicionando las condiciones geológicas del sitio, la experiencia y la intuición.

Una vez realizadas las etapas anteriores, se presenta una descripción del área que se estudia, sus características y la variación de sus propiedades recurriendo a formas convencionales de representación, tales como: tablas, perfiles geotécnicos, cortes estratigráficos, etc.

La caracterización del subsuelo puede ser más detallada si se analizan los datos aplicando técnicas de la estadística descriptiva.

Actualmente, se cuenta con la herramienta conocida con el nombre de geoestadística, basada en la teoría de los campos aleatorios, que permite describir en forma racional y cuantitativa la variabilidad espacial de las propiedades de las formaciones geológicas, logrando una mejor caracterización del subsuelo. En esta tesis, después de revisar las principales técnicas de interpretación tradicional, se presentan los elementos principales de esta metodología.



2.1 Propiedades relevantes

Desde el punto de vista geotécnico, las propiedades de los suelos se clasifican en índice, mecánicas, hidráulicas y dinámicas. A continuación se indican las propiedades más usuales en mecánica de suelos.

2.1.1 Propiedades índice

- Contenido de agua natural
- Límites de consistencia
- Análisis granulométrico
- Densidad de sólidos

2.1.2 Propiedades mecánicas

Obtenidas en laboratorio:

- Resistencia al esfuerzo cortante
- Compresibilidad
- Permeabilidad

Obtenidas en campo:

- Resistencia a la presión de un Cono eléctrico
- Presión límite y módulos medidos con el presiómetro
- Permeabilidad

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2 Representación tradicional

Los resultados obtenidos en las etapas de exploración en campo y ensayos de laboratorio deben ser organizados y presentados en una forma que permita ilustrar en forma clara y entendible las características naturales del subsuelo. Para ello, en geotecnia, se recurre a técnicas convencionales como son tablas, perfiles geotécnicos y cortes estratigráficos. Con base en estos se pueden realizar ciertas interpolaciones para inferir propiedades en un sitio de interés.

2.2.1 Tablas

La manera más sencilla de organizar los datos experimentales para su presentación es mediante tablas, las cuales consisten en organizar los datos en columnas y renglones. En forma convencional, en la primera columna se registran los valores de las profundidades en las que se hizo la medición y de la segunda en adelante se registran los valores medidos de las propiedades.

2.2.2 Perfiles

Los perfiles geotécnicos son una forma típica para organizar y presentar resultados en forma gráfica. Ellos constituyen una herramienta útil puesto que permiten tener una idea clara de la distribución vertical de los materiales y de la variación de las propiedades a lo largo de la profundidad. Los perfiles se elaboran utilizando patrones convencionales, en los cuales se registran los datos obtenidos en campo y laboratorio. Los elementos que los constituyen son:

- a) Un dibujo de la columna estratigráfica vertical; la cual muestra los cambios en la litología a lo largo de la profundidad, basada en una secuencia de unidades estratigráficas.
- b) Se indica en secuencia el número de muestra y su correspondiente porcentaje de recuperación.
- c) Un dibujo de la variación de los valores de las diferentes propiedades con respecto a la profundidad.
- d) La indicación de la profundidad del nivel freático.
- e) Se coloca la simbología utilizada en el perfil y los datos generales del proyecto.

2.2.3 Cortes

Los cortes estratigráficos son otra forma gráfica que se utiliza para presentar los datos geotécnicos. Están constituidos por la integración de un conjunto de perfiles geotécnicos individuales ubicados a lo largo de una línea o eje de estudio. Para elaborar un corte estratigráfico se requiere de un croquis de localización donde se indica la ubicación de los sondeos y la línea o eje por donde pasa el corte.

Con la información de los perfiles geotécnicos se construye el corte, en el cual, los estratos de suelo pueden ser bosquejados. Resulta claro que entre más corta es la distancia entre sondeos, más preciso será el corte estratigráfico.

La adecuada elaboración e interpretación del corte estratigráfico permite conocer la distribución horizontal de los materiales en el subsuelo, los espesores y los niveles piezométricos.

Queda claro que en suelos estratificados es relativamente sencillo inferir estos perfiles geotécnicos; sin embargo, en suelos heterogéneos es mucho más complicado, puesto que es posible que haya una variación importante de propiedades tanto vertical como horizontalmente.

2.2.4 Interpolaciones tradicionales

De acuerdo con las prácticas actuales de exploración del subsuelo, se puede concluir que solamente un pequeño volumen del subsuelo es ensayado.

Las mediciones de las propiedades del suelo son determinadas en un reducido número de puntos y la distancia de separación entre cada una de las determinaciones no es homogénea a lo largo de la profundidad de exploración. Muchas veces se realiza esta exploración sin conocer (aunque sea tentativamente) la distribución de las diferentes estructuras en planta, lo cual podría ayudar a distribuir el reducido volumen de muestreo en las zonas consideradas como prioritarias.

Por lo anterior, puede concluirse que las prácticas actuales de exploración proporcionan información discontinua.

Bajo estas circunstancias, en la práctica se presenta frecuentemente el problema de conocer o tratar de inferir el valor de algunas propiedades del suelo en puntos donde no hubo determinación. Una solución es recurrir al uso de técnicas de interpolación, las cuales permiten estimar dichos valores.

2.3 Descripción estadística

En geotecnia existe una marcada preocupación (y necesidad) por describir y cuantificar la variabilidad espacial de los suelos, con el fin de determinar un “modelo” representativo del subsuelo para realizar los diferentes análisis geotécnicos. Tradicionalmente, y sólo en casos especiales se ha recurrido al uso de los conceptos básicos de la *estadística descriptiva clásica* para organizar, presentar y describir los datos de las propiedades de los suelos. También se han utilizado técnicas cuantitativas o gráficas para analizar la variabilidad del conjunto de datos.

En la estadística clásica, a partir de un conjunto de datos se estiman algunos parámetros estadísticos, siendo utilizados como medidas numéricas para describir el conjunto de datos. Muchos son los parámetros estadísticos que pueden ser estimados, sin embargo, se considera que los más importantes son la media, la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

La distribución de los valores de los parámetros del suelo puede representarse utilizando técnicas gráficas, tales como los histogramas. Además, puede establecerse la relación o comportamiento de un parámetro con respecto a otro mediante un análisis de correlación.

2.3.1 Media, varianza y desviación estándar

Los parámetros estadísticos son estimaciones realizadas a partir de un número suficiente de datos obtenidos experimentalmente. Los parámetros más comunes son:

Media

La medida de tendencia central más común de un conjunto de datos es la *media*, obtenida en la forma:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 2.1$$

donde m_x es la *media*, x_i es cada uno de los valores del conjunto de datos y n es el número total de mediciones o puntos de datos.

Esta media es un valor típico o representativo del conjunto de datos.

Varianza

La *varianza* es una medida de variación o dispersión de los datos alrededor del valor medio del conjunto de mediciones, definida como el promedio de los cuadrados de la distancia entre dichas mediciones individuales con respecto a su media, obtenida por:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \quad 2.2$$

donde s_x^2 es la varianza muestral.

La dispersión o variación de los datos intenta dar una idea de cuán espaciados se encuentran éstos. El valor mínimo que puede tomar s_x^2 es cero, y eso sólo sucede si toda la población toma un único valor. La varianza se hace más grande en la medida que se esparcen más los valores numéricos de los puntos de datos.

Desviación estándar

La varianza eleva al cuadrado las unidades de medida. Una medida de variación que mantiene las unidades originales es la *desviación estándar*. La *desviación estándar* es la raíz cuadrada de la varianza, y está definida como:

$$s_x = \sqrt{s_x^2} \quad 2.3$$

Coefficiente de variación

La relación entre la desviación estándar, como medida de dispersión, y la media, como medida de centralización, da una idea del grado de dispersión existente en una muestra. Esta relación se conoce con el nombre de *coeficiente de variación*, definido por:

$$CV_x = \frac{s_x}{m_x} \quad 2.4$$

Aquí, la desviación estándar tiene las mismas unidades que la media, por lo tanto el coeficiente de variación es una medida de dispersión sin dimensiones.

2.3.2 Histograma

La variabilidad de las propiedades del suelo puede ser analizada a través de métodos gráficos, siendo el más usual el *histograma*.

Un histograma se obtiene dividiendo el rango de los datos en intervalos de igual tamaño, llamados *clases*. Para ello, es necesario realizar previamente una ordenación tabular de los valores de los puntos de datos en orden creciente o decreciente de magnitud y estimar el *rango*, definido como la diferencia entre el mayor y el menor de los valores de los puntos de datos. La *frecuencia de clase* definida como el número de valores pertenecientes a cada una de las clases es también determinada. Una gráfica de barras donde se indica el número de ocurrencias en cada intervalo es llamada *histograma*.

El histograma proporciona información importante acerca de la variabilidad en el conjunto de datos. Muestra el rango de los datos, los valores de los datos que ocurren con mayor frecuencia y el grado de dispersión alrededor de los valores medios del conjunto de datos.

Hay varios aspectos a considerar en la determinación del número de clases del histograma. Desgraciadamente no hay reglas para determinar el número apropiado de clases a emplear y es común recurrir a la experimentación con diferentes números de intervalos. El número de clases que se emplea

para clasificar los datos en un conjunto depende del total de observaciones en éste. Si el número de observaciones es relativamente pequeño, el número de clases a emplear será cercano a cinco, pero generalmente nunca menor que este valor. Si existe una cantidad sustancial de datos, el número de clases puede encontrarse entre ocho y doce y generalmente no existirán más de 15 clases.

Un número pequeño de clases puede ocultar la distribución real del conjunto de datos, mientras que un número muy grande puede dejar sin observaciones algunas de las clases, limitando de esta forma su uso.

2.3.3 Tendencia o deriva

Graficar los valores de datos de las propiedades del suelo a lo largo de la profundidad permite apreciar algunas características del depósito de suelo, involucrando tanto las características de los materiales como la influencia de los factores de formación.

Los movimientos o variaciones características definidos por la gráfica, pueden presentar una *tendencia* o *deriva*. La tendencia puede definirse como la componente no aleatoria de los datos y tiene generalmente una explicación física (por ejemplo crecimiento de la resistencia con el esfuerzo de confinamiento y por tanto con la profundidad).

En la práctica la estimación de la tendencia puede conseguirse de varias formas, lo más usual es utilizar el método de *mínimos cuadrados* para hallar la ecuación de la recta o curva de ajuste. De esta ecuación se puede estimar numéricamente el valor de la pendiente que define la tendencia, si es que la hay.

Otra alternativa aunque rudimentaria es utilizar el *método libre* de ajuste, que consiste en ajustar una recta o curva de tendencia mediante la sola observación del gráfico, que puede utilizarse para estimar la tendencia. Sin embargo, este método tiene el inconveniente de depender en gran parte del criterio personal.

2.4 Descripción geoestadística

Para evaluar la incertidumbre que presentan las propiedades del subsuelo de un sitio determinado, tomando en cuenta que los estudios geotécnicos que se realizan para las obras de ingeniería son limitados y no se cuenta con valores de las propiedades en una gran cantidad de puntos, es posible aplicar los métodos probabilistas a la información disponible. A continuación se presenta información básica acerca de las variables y campos aleatorios, así como de una herramienta de gran utilidad: la estimación condicional.

2.4.1 Variables aleatorias

La teoría de la probabilidad considera el problema de un experimento que puede originar varios resultados. A la lista de todos los resultados posibles y mutuamente excluyentes de un experimento se le llama *espacio muestral*. Un *evento* es cualquier subconjunto de un espacio muestral.

La idea intuitiva de probabilidad se relaciona con la frecuencia relativa de ocurrencia de un evento. Por tanto las probabilidades deben ser fracciones entre "0" y "1". Entonces supóngase que un experimento tiene asociado un espacio muestral S . Una probabilidad es una función de valor numérico que asigna un número $P(A)$ a cada evento A , de tal manera que son válidos los siguientes axiomas:

1. $P(A) \geq 0$
2. $P(S) = 1$
3. Si A_1, A_2, \dots es una sucesión de eventos mutuamente excluyentes, es decir $A_i \cap A_j = \emptyset$ para toda $i \neq j$, entonces:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i) \quad 2.5$$

De acuerdo con el axioma (3) se llega a la conclusión de que si A y B son eventos mutuamente excluyentes:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad 2.6$$

Las variables aleatorias son valores numéricos asociados a los resultados de los experimentos; en términos formales una variable aleatoria es una función de valor real cuyo dominio es un espacio muestral. Se pueden dividir en dos categorías para simplificar el trabajo. Los resultados que se originan en datos de conteos se llaman variables aleatorias discretas. En tanto que las que no son discretas con frecuencia pueden clasificarse como continuas. Representaremos una variable aleatoria por medio de una letra mayúscula como por ejemplo V . Los valores numéricos reales que puede asumir una variable aleatoria se representan mediante letras minúsculas, como por ejemplo v .

2.4.1.1 Distribuciones discretas de probabilidad

Se dice que una variable aleatoria V es discreta si puede tomar sólo un número finito, o un número infinito contable (asociable con los enteros), de valores posibles v .

En este caso y de acuerdo con los axiomas presentados con anterioridad, se tiene lo siguiente:

1. $P(V=v) = p(v) \geq 0$
2. $\sum P(V=v) = 1$, siendo la suma con respecto a todos los valores posibles de V .

A la función $p(v)$ se le llama *función de probabilidad* de V .

A la función de probabilidad se le llama a veces *función de masa de probabilidad* de V para dar la idea de que se asocia una masa de probabilidad a cada punto discreto.

Con frecuencia conviene hacer una lista de las probabilidades de una variable aleatoria discreta, en forma de tabla. Esta lista es un modo de representar la *distribución de probabilidad* de V .

La función de distribución $F_V(v)$ de una variable V se define como:

$$F_V(v) = P(V \leq v) \quad 2.7$$

Si V es discreta:

$$F_V(v) = \sum_{x=-\infty}^b p(v) \quad 2.8$$

siendo $p(v)$ la función de probabilidad. A la función de distribución se le llama a veces *función de distribución acumulada*.

Como antes enunciamos, la probabilidad es la frecuencia relativa a largo plazo de que suceda un evento, entonces se puede interpretar una distribución de probabilidad como la frecuencia relativa a largo plazo de los resultados numéricos asociados con un experimento.

Las medidas numéricas descriptivas (o parámetros) que permiten caracterizar $p(v)$ son: la esperanza, la varianza y la desviación estándar de la población.

El *valor esperado* o *esperanza matemática* de una variable aleatoria discreta V que tiene una función $p(v)$ de probabilidad se define como:

$$E\{V\} = \sum_v v \cdot p(v) \quad 2.9$$

(La suma es con respecto a todos los valores de v para los cuales $p(v) > 0$).

A veces se emplea la notación:

$$E\{V\} = \mu \quad 2.10$$

Si V es una variable aleatoria discreta, cuya función de probabilidad es $p(v)$, y $g(v)$ es cualquier función de V con valor real, entonces el valor esperado de $g(v)$ está definido por:

$$E\{g(v)\} = \sum_v g(v) \cdot p(v) \quad 2.11$$

La varianza es la esperanza del cuadrado de la desviación respecto al valor esperado.

$$\text{Var}(V) = E\{(V-\mu)^2\} \quad 2.12$$

A veces se utiliza la notación:

$$E\{(V-\mu)^2\} = \sigma^2 \quad 2.13$$

El valor mínimo que puede tomar σ^2 es cero, y eso sólo sucede si la variable toma un único valor (esto es, si V toma un valor constante con probabilidad uno).

Obsérvese que la varianza eleva al cuadrado las unidades de medida. Una medida de variación que mantiene las unidades originales es la *desviación estándar*. La desviación estándar de una variable aleatoria V es la raíz cuadrada de la varianza y está definida mediante:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{E\{(V - \mu)^2\}} \quad 2.14$$

2.4.1.2 Distribuciones continuas de probabilidad

Las variables aleatorias antes mencionadas son discretas; cada una sólo puede asumir un número finito, o un número infinito mensurable de valores. Pero muchas de las variables aleatorias parecen tener en la práctica más de un conjunto mensurable de valores positivos. Es decir, que no se puede eliminar ningún valor como resultado posible de una observación. Es por ello que se define a la variable aleatoria V como continua si puede tomar el número infinito de valores asociados con intervalos de números reales y hay una función $f(v)$, llamada *función de densidad de probabilidad*, tal que:

1. $f(v) \geq 0$ para toda v .
2. $\int_{-\infty}^{\infty} f(v) \cdot dv = 1$
3. $P(a \leq V \leq b) = \int_a^b f(v) \cdot dv$

Nótese que para una variable aleatoria continua V :

$$P(V = a) = \int_a^a f(v) \cdot dv = 0 \quad 2.15$$

para cualquier valor específico de a . No debe preocupar el hecho de que se deba asignar probabilidad cero a cualquier valor específico, ya que hay un número infinito de valores posibles que puede asumir V . La asignación de probabilidad cero a un evento no lo elimina como posible sino sólo dice que la probabilidad de ocurrencia de ese valor exacto es extremadamente pequeña.

La función de distribución de una variable aleatoria V se define como:

$$F(b) = P(V \leq b) \quad 2.16$$

$$F(b) = \int_{-\infty}^b f(v) \cdot dv \quad 2.17$$

Nótese que la derivada de F es: $F'(v) = f(v)$.

Definiremos a continuación la esperanza, la varianza y la desviación estándar de la variable.

Como en el caso discreto, con frecuencia se desea resumir la información contenida en una distribución de probabilidad calculando los valores esperados de la variable aleatoria y determinadas funciones de la misma.

Así el valor esperado de una variable aleatoria continua V que tiene una función de densidad de probabilidad $f(v)$, está dado por:

$$E\{V\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) \cdot dx \quad 2.18$$

Si V es una variable aleatoria continua cuya distribución de probabilidad es $f(v)$ y si $g(v)$ es cualquier función V del valor real, entonces:

$$E\{g(v)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) \cdot f(x) \cdot dx \quad 2.19$$

las definiciones de varianza y de desviación estándar dadas en el caso discreto son válidas también para el caso continuo.

2.4.1.3 Distribuciones de probabilidad multivariadas

Se pueden definir diversas variables aleatorias en el mismo espacio muestral, por ejemplo en el caso de las propiedades de un material elástico, es posible trabajar con dos: el módulo de deformabilidad E y el

de Poisson v . En este caso, estamos frente a una distribución de probabilidad bivariable o distribución de probabilidad multivariada.

Si V_1 y V_2 son dos variables aleatorias discretas. La *distribución de probabilidad conjunta* de V_1 y V_2 es:

$$p(v_1, v_2) = P(V_1=v_1, V_2=v_2) \quad 2.20$$

definida para los números reales v_1 y v_2 . A la función $p(v_1, v_2)$ se le llama *función de probabilidad conjunta* de v_1 y v_2 .

Las *funciones de probabilidad marginal* de V_1 y V_2 , respectivamente, están representadas por:

$$p_1(v_1) = \sum_{v_2} p(v_1, v_2) \quad 2.21$$

$$p_2(v_2) = \sum_{v_1} p(v_1, v_2) \quad 2.22$$

Las probabilidades asociadas a dos variables aleatorias continuas V_1 y V_2 se pueden describir mediante una función bivariada, $f(v_1, v_2)$, que forma una superficie de probabilidad, en tres dimensiones (Fig. 4).

La probabilidad de que V_1 y V_2 queden simultáneamente en determinados intervalos se representa entonces como un volumen bajo tal superficie. Así:

$$P(a_1 \leq V_1 \leq a_2, b_1 \leq V_2 \leq b_2) = \int_{b_1}^{b_2} \int_{a_1}^{a_2} f(v_1, v_2) \cdot dv_1 \cdot dv_2 \quad 2.23$$

Obsérvese que la integral anterior simplemente es el volumen bajo la superficie de la figura 4.

Así como se calcularon las probabilidades univariadas, o marginales, para variables discretas, se puede determinar la función de densidad univariada para V_1 en el caso continuo, si se integran los valores de V_2 . La densidad marginal de V_1 , $f_1(v_1)$ está dada por:

$$f_1(v_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(v_1, v_2) \cdot dv_2 \quad 2.24$$

igualmente la densidad marginal de V_2 , $f_2(v_2)$ está representada por:

$$f_2(v_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(v_1, v_2) \cdot dv_1 \quad 2.25$$

se dice que dos variables aleatorias discretas son independientes si:

$$P(V_1=v_1, V_2=v_2) = P(V_1=v_1) \cdot P(V_2=v_2) \quad 2.26$$

para todas los números reales v_1 y v_2 . Una idea semejante se aplica al caso de variables aleatorias continuas:

$$V(v_1, \dots, v_n) = f_1(x_1) \cdot f_2(v_2) \dots f_n(v_n) \quad 2.27$$

para cualesquiera números reales v_1, v_2, \dots, v_n .

Si $g(V_1, V_2)$ es cualquier función de valor real de las variables discretas V_1, V_2 , entonces:

$$E\{g(V_1, V_2)\} = \sum_{v_1} \sum_{v_2} g(v_1, v_2) p(v_1, v_2) \quad 2.28$$

Si (V_1, V_2) son variables aleatorias continuas con densidad de probabilidad $f(v_1, v_2)$, entonces:

$$E\{g(V_1, V_2)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(v_1, v_2) \cdot f(v_1, v_2) \cdot dv_1 \cdot dv_2 \quad 2.29$$

Si V_1 y V_2 son independientes, entonces, según la definición anterior, se deduce fácilmente que:

$$E\{g(V_1) \cdot h(V_2)\} = E\{g(V_1)\} \cdot E\{h(V_2)\} \quad 2.30$$

Una función de dos variables que tiene mucho interés en problemas probabilistas y estadísticos es la covarianza.

La *covarianza* entre dos variables aleatorias V_1 y V_2 se define como:

$$\text{Cov}(V_1, V_2) = E\{(V_1 - \mu_1) \cdot (V_2 - \mu_2)\} \quad 2.31$$

siendo:

$$\mu_1 = E\{V_1\} \quad \text{y} \quad \mu_2 = E\{V_2\} \quad 2.32$$

Otro modo de calcular la covarianza a través de la esperanza es el siguiente:

$$\text{Cov}(V_1, V_2) = E\{V_1 V_2\} - \mu_1 \mu_2 \quad 2.33$$

Es impráctico utilizar la covarianza como una medida absoluta de la correlación porque su valor depende de la escala de medición y por consiguiente es difícil determinar si una covarianza en particular es grande a simple vista. Se puede eliminar este problema al estandarizar su valor, utilizando el coeficiente simple de correlación lineal:

$$\rho = \frac{\text{Cov}[V_1, V_2]}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad 2.34$$

donde σ_1 y σ_2 son las desviaciones estándar de V_1 y V_2 , respectivamente. Puede demostrarse que el coeficiente de correlación ρ satisface la desigualdad $-1 \leq \rho \leq +1$. Así, -1 ó $+1$ implica una correlación perfecta, con todos los puntos de la muestra sobre una línea recta. El valor de $\rho=0$ implica covarianza igual a cero y ninguna correlación.

Por lo tanto si V_1 y V_2 son dos variables aleatorias independientes:

$$\text{Cov}(V_1, V_2) = 0 \quad 2.35$$

El signo del coeficiente de correlación depende del signo de la covarianza. Así, un coeficiente de correlación positivo indica que V_2 , tiende a crecer cuando V_1 crece. Un coeficiente de correlación negativo implica que V_2 tiende a decrecer cuando V_1 crece.

2.4.2 Campos aleatorios

2.4.2.1 Definición

Se considera que los valores tomados por la propiedad $V(X)$ en los puntos X del dominio R^p ($p=1,2$, o 3), constituyen una *realización* del *campo aleatorio* definido por los siguientes parámetros:

Esperanza:

$$\mu_{V(X)} = E\{V(X)\} \quad 2.36$$

Varianza:

$$\sigma^2_{V(X)} = \text{Var} [V(X)] \quad 2.37$$

Función de autocorrelación:

$$R_V(X_1, X_2) = E\{V(X_1)V(X_2)\} \quad 2.38$$

Autocovarianza:

$$C_V(X_1, X_2) = \text{Cov}[V(X_1), V(X_2)] = \quad 2.39$$

$$E\{[V(X_1) - \mu_{V(X_1)}] [V(X_2) - \mu_{V(X_2)}]\} \quad 2.40$$

Coefficiente de correlación:

$$\rho_V(X_1, X_2) = \frac{C(X_1, X_2)}{\sigma_{V(X_1)} \sigma_{V(X_2)}} \quad 2.41$$

Función de distribución de probabilidad:

$$F_{V(X_1), \dots, V(X_n)}(v_1, \dots, v_n; X_1, \dots, X_n) = P[V(X_1) \leq v_1, \dots, V(X_n) \leq v_n] \quad 2.42$$

y particularmente, la función de distribución de primer orden:

$$F_{V(X)}(v; X) = P[V(X) \leq v] \quad 2.43$$

o sus derivadas, las densidades de probabilidad:

$$f_{V(X_1), \dots, V(X_n)}(v_1, \dots, v_n; X_1, \dots, X_n) \text{ y } f_{V(X)}(v; X) \quad 2.44$$

Si se acepta la hipótesis de considerar al valor esperado constante en todo el dominio X (como se verá más adelante, eventualmente después de haber removido la tendencia) y si la variación espacial para una misma propiedad depende solamente de la distancia vectorial τ entre los puntos X_1 y X_2 , es decir, si se considera al campo como estacionario en el sentido amplio, se cumple:

$$C_V(X_1, X_2) = C_V(X_2 - X_1) = C_V(\tau) \quad 2.45$$

que hace considerar también que la varianza de $V(X)$ es también constante a lo largo del dominio. En este caso el coeficiente de correlación puede ser escrito como:

$$\rho_V(X_1, X_2) = \rho_V(\tau) \quad 2.46$$

2.4.2.2 Campo aleatorio aparente

Las propiedades del suelo, se conocen generalmente a través de pruebas o correlaciones que están afectadas por cierto "error", el cual introduce incertidumbre en los registros obtenidos en campo o laboratorio. Si $\tilde{V}(x, y, z)$ es la realización resultado de la prueba o sondeo y $V(x, y, z)$ es la realización real, entonces:

$$\tilde{V}(x, y, z) - V(x, y, z) = \varepsilon \quad 2.47$$

donde ε es el "error" de la prueba y se considera como una variable aleatoria que representa la incertidumbre del resultado de la prueba. Si la prueba no introduce ningún error o sesgo, o si el sesgo ha sido corregido, ε tendrá un valor esperado $E[\varepsilon] = 0$ y una varianza $Var[\varepsilon]$, donde:

$$E\left\{\tilde{V}\right\} = E\{V\} \quad 2.48$$

$$Cov\left[\tilde{V}_1, \tilde{V}_2\right] = E\left\{\tilde{V}_1 \tilde{V}_2\right\} - E\left\{\tilde{V}_1\right\}E\left\{\tilde{V}_2\right\} \quad 2.49$$

$$= E\{V_1 V_2\} - E\{V_1\}E\{V_2\} = Cov[V_1, V_2] \quad 2.50$$

$$Var[\bar{V}] = Var[V] + Var[\varepsilon] \quad 2.51$$

Si $\rho(\bar{V}_1, \bar{V}_2)$ es el coeficiente de correlación de la propiedad aparente \bar{v} en los puntos X_1 y X_2 entonces:

$$\rho(\bar{V}_1, \bar{V}_2) = \frac{Cov[\bar{V}_1, \bar{V}_2]}{Var[\bar{V}_1] Var[\bar{V}_2]} = \quad 2.52$$

$$\frac{Cov[V_1, V_2]}{(Var[V_1] + Var[\varepsilon])(Var[V_2] + Var[\varepsilon])} \quad 2.53$$

y dado que $Var[\varepsilon] \geq 0$:

$$\rho(\bar{V}_1, \bar{V}_2) \leq \rho(V_1, V_2) \quad 2.54$$

Entonces, la incertidumbre en los resultados de la prueba reduce al grado aparente de correlación espacial entre las propiedades en diferentes puntos del medio.

2.4.2.3 Estadísticas de un campo aleatorio

Los parámetros citados anteriormente pueden ser estimados de los resultados “discretos” o “continuos” de los sondeos disponibles.

Aceptando que el campo es ergódico (cuando al incrementar el número de datos la media tiende a un límite μ y una varianza σ^2), el valor esperado puede ser evaluado utilizando el estimador μ_V :

$$\mu_V = \frac{1}{L} \int_0^L V(X) dX \quad 2.55$$

donde L es la profundidad del sondeo.

De la misma forma, puede obtenerse un estimador de la autocovarianza:

$$C(\lambda u) = \frac{1}{L} \int_0^L V(X) V(X + \lambda u) dX - \mu_V^2 \quad 2.56$$

Donde \mathbf{u} es el vector unitario en la dirección en la que se evalúa la covarianza y λ es un escalar. De esta expresión se puede apreciar, que se induce un sesgo, como puede verificarse evaluando la esperanza del segundo miembro.

Si se considera el vector \mathbf{u} como vertical, las expresiones anteriores (o versiones discretizadas de las mismas) pueden usarse para obtener los parámetros del campo a lo largo de la dirección vertical para cada sondeo. Si se acepta que el campo es estadísticamente homogéneo, es posible promediar los parámetros obtenidos en diferentes sondeos, después de verificar que no presentan grandes diferencias.

Para obtener la autocovarianza horizontal del campo a partir de un grupo de sondeos de misma longitud L , se consideran los sondeos por pares y se calcula la misma expresión :

$$C(\lambda\mathbf{u}) = \frac{1}{L} \int_0^L V(X)V(X + \lambda\mathbf{u})dX - \mu_v^2 \quad 2.57$$

En este caso, el vector \mathbf{u} es horizontal, $V(X)$ pertenece al primer sondeo, $V(X + \lambda\mathbf{u})$ pertenece al segundo, y λ representa la distancia entre los dos sondeos. Para cada par de sondeos, se obtiene en esta forma un valor de $C(\lambda\mathbf{u})$ y es posible construir por puntos la curva de autocovarianza horizontal del campo.

También pueden resultar útiles estimaciones realizadas con la misma relación pero dando al vector \mathbf{u} diversas inclinaciones. Este tipo de estimaciones permitirá hacer resaltar el rumbo y echado de los estratos en caso de que no sean horizontales.

Puede ser también conveniente realizar la evaluación anterior para tramos de sondeos localizados a la misma profundidad. Se escogen en esta forma "ventanas" en las que se concentra el análisis de correlación horizontal para detectar concordancias o heterogeneidades. Si se desplazan dichas "ventanas" a lo largo de todo el sondeo, se realiza un barrido vertical que ha sido llamado *Zcanning*.

Por otra parte, puede ser conveniente poner en evidencia la contribución de cada estrato a la correlación horizontal calculada con la expresión 2.65. En este trabajo, se sugiere realizar lo anterior trazando una curva acumulada del coeficiente de correlación horizontal con la profundidad entre dos sondeos conocidos. Al final de la curva se alcanzará un valor igual al obtenido con la fórmula 2.65, pero también se obtendrá información respecto a como varía este valor conforme se incrementa la profundidad y se podrá apreciar cuales son los estratos que más afectan esta variación. También es posible construir una gráfica con la derivada de esta curva, observándose con mayor claridad los estratos que más influyen en el valor del coeficiente de correlación horizontal.

2.4.3 Estimación

Para evaluar las propiedades en cualquier punto del medio donde no existe medición a partir de los datos disponibles, es posible recurrir a los métodos indicados a continuación:

2.4.3.1 Estimación lineal bivariable

El modelado mediante un campo aleatorio de una propiedad definida en un dominio Ω , permite evaluar el valor esperado condicional y la varianza condicional de V_{Ω_1} , propiedad puntual o media en un subdominio Ω_1 , a partir del valor V_{Ω_2} , también puntual o medio, obtenido por medición directa en otro subdominio Ω_2 . Esta posibilidad es de gran interés práctico, por ejemplo para estimar las propiedades del suelo en el espacio tridimensional a lo largo de una línea recta arbitraria, es decir para definir *sondeos virtuales*.

Se usa un estimador lineal $V_{\Omega_1}^*$ tal que:

$$V_{\Omega_2}^* = aV_{\Omega_2} + b \quad 2.58$$

y que sea además insesgado:

$$E\{V_{\Omega_1}^* - V_{\Omega_1}\} = 0 \quad 2.59$$

Es posible obtener una expresión para los valores a y b , tal que se satisfagan simultáneamente las ecuaciones (2.58) y (2.59), y que se minimice la esperanza del cuadrado del error o *varianza de estimación*:

$$E\{(V_{\Omega_1}^* - V_{\Omega_1})^2\} = \text{var}[aV_{\Omega_2} - V_{\Omega_1}] \quad 2.60$$

De acuerdo con la ecuación (2.58), el valor de b es:

$$b = E\{V_{\Omega_1}\} - aE\{V_{\Omega_2}\} \quad 2.61$$

Por otra parte, es fácil verificar que anulando la derivada de la expresión (2.60) respecto a la variable a para minimizar el error de estimación, se obtiene:

$$a = \frac{\text{Cov}[V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2}]}{\sigma_{V_{\Omega_2}}^2} \quad 2.62$$

La expresión (2.58) resultante es por tanto:

$$V_{\Omega_1}^* = E\{V_{\Omega_1}\} + \rho_V \left(V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2} \right) \frac{\sigma_{V_{\Omega_1}}}{\sigma_{V_{\Omega_2}}} [V_{\Omega_2} - E\{V_{\Omega_2}\}] \quad 2.63$$

donde $\rho_V(V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2})$ es el coeficiente de correlación de V_{Ω_1} y V_{Ω_2} :

$$\rho_V(V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2}) = \frac{\text{Cov}[V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2}]}{\sigma_{V_{\Omega_1}} \sigma_{V_{\Omega_2}}} \quad 2.64$$

La varianza de estimación minimizada correspondiente es:

$$E\{(V_{\Omega_1}^* - V_{\Omega_1})^2\} = \text{Var}[V_{\Omega_1}](1 - \rho_V^2) \quad 2.65$$

Si las dos variables tienen la misma esperanza y la misma varianza (caso del campo estacionario en el sentido amplio), dos situaciones extremas pueden presentarse en cuanto al coeficiente de correlación:

- V_{Ω_1} y V_{Ω_2} están perfectamente correlacionadas, en este caso: $\rho_V(V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2}) = 1$ y $V_{\Omega_1}^* = V_{\Omega_2}$
- V_{Ω_1} y V_{Ω_2} no están correlacionadas, la información sobre Ω_2 no contribuye a reducir la incertidumbre sobre Ω_1

Se observa que, en el caso general, el conocimiento del campo en un subdominio dado conduce a una corrección de la esperanza y a una reducción de la varianza del campo o de su valor medio en otros subdominios.

2.4.3.2 Estimación lineal multivariable

El método puede generalizarse a la estimación de las esperanzas, varianzas y covarianzas condicionales de los valores puntuales o medios asociados respectivamente a diferentes puntos o subdominios del medio estudiado, a partir de cierto número de resultados de mediciones efectuadas en diferentes puntos o subdominios.

Sea \mathbf{V} un vector de dimensión p conteniendo las k variables por estimar y las $p-k$ variables conocidas, definido como:

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{pmatrix} \quad \text{con } \mathbf{V}_1 = \begin{pmatrix} V_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_k \end{pmatrix} \quad \text{y } \mathbf{V}_2 = \begin{pmatrix} V_{k+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ V_p \end{pmatrix} \quad 2.66$$

donde \mathbf{V}_1 es el vector de las variables por estimar y \mathbf{V}_2 es el vector de las variables conocidas.

Sea U el vector, también de dimensión p , de los valores esperados de las variables por estimar y de las variables conocidas definido como:

$$U = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \text{ con } U_1 = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mu_k \end{pmatrix} \text{ y } U_2 = \begin{pmatrix} \mu_{k+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mu_p \end{pmatrix} \quad 2.67$$

Por otra parte, sea K la matriz de covarianza para el conjunto de las variables conocidas y por estimar:

$$K = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix} \quad 2.68$$

con :

K_{11} sub-matriz de las covarianzas entre las variables asociadas a los diferentes puntos o dominios de estimación, de orden k ;

K_{22} sub-matriz de las covarianzas entre las variables asociadas a los diferentes puntos o subdominios conocidos, de orden $p-k$;

K_{12} y K_{21} sub-matrices de las covarianzas entre los diferentes datos y las variables asociadas a los diferentes puntos o subdominios de estimación, respectivamente de orden k et $p-k$. Obsérvese que $K_{21} = K_{12}^T$

Es posible obtener un vector V_1^* de estimación lineal insesgado y de mínima varianza del vector V_1 , conociendo V_2 .

Los elementos de este vector serán combinaciones lineales de los elementos de V_2 :

$$V_1^* = AV_2 + b \quad 2.69$$

La estimación será sin sesgo sí:

$$E\{V_1^* - V_1\} = U_1 - b - AU_2 = 0 \quad 2.70$$

La submatriz de las varianzas de estimación tendrá la forma:

$$K_{1|2} = K_{V_1^*, V_1} = E\{V_1^* - V_1\}(V_1^* - V_1)^T \quad 2.71$$

es decir:

$$\mathbf{K}_{1|2} = \mathbf{K}_{V_1^*, V_1} = \mathbf{A}\mathbf{K}_{22}\mathbf{A}^T + \mathbf{K}_{11} - \mathbf{A}\mathbf{K}_{12}^T - \mathbf{K}_{12}\mathbf{A}^T \quad 2.72$$

Procediendo nuevamente por derivación para minimizar los elementos de esta matriz, se obtiene que la matriz de los coeficientes óptimos es:

$$\mathbf{A} = \mathbf{K}_{12}\mathbf{K}_{22}^{-1} \quad 2.73$$

Combinando las ecuaciones anteriores, se obtiene el vector de los valores estimados:

$$\mathbf{V}_1^* = \mathbf{U}_1 + \mathbf{K}_{12}\mathbf{K}_{22}^{-1}(\mathbf{V}_2 - \mathbf{U}_2) \quad 2.74$$

En la misma forma como se obtuvo la varianza del estimador en el caso univariable se obtienen en el caso multivariable, las varianzas de los elementos correspondientes al estimador \mathbf{V}_1^* .

$$\mathbf{K}_{V_1^*} = \mathbf{K}_{12} \mathbf{K}_{22}^{-1} \mathbf{K}_{12}^T = \mathbf{K}_{12} \mathbf{K}_{22}^{-1} \mathbf{K}_{21} \quad 2.75$$

y la submatriz de varianza minimizada resulta:

$$\mathbf{K}_{1|2} = \mathbf{K}_{V_1^*, V_1} = \mathbf{K}_{11} - \mathbf{K}_{12} \mathbf{K}_{22}^{-1} \mathbf{K}_{21} \quad 2.76$$

Este método permite estimar valores puntuales o medios del campo aleatorio en subdominios del medio (por ejemplo elementos finitos o grupos de estos elementos) tomando en cuenta ciertos resultados obtenidos por muestreo. La técnica se vuelve laboriosa cuando las dimensiones de la matriz de covarianza \mathbf{K} son importantes, pero siempre es posible limitar el número de datos tomados en cuenta (tamaño del vector \mathbf{V}_2) en la estimación, conservando solamente los datos más correlacionados con las variables por estimar.

3 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DEL SUBSUELO EN EL NORTE DE LA ZONA LACUSTRE DEL VALLE

3.1 Aspectos geológicos y geotécnicos del subsuelo en el Norte del Valle de México

3.1.1 Aspectos geológicos y geotécnicos generales

3.1.1.1 Morfología del Valle de México

El Valle de México, de aproximadamente 7160 km², está limitado al norte por las sierras de Tepetzotlán, Tezontlalpan y Pachuca, al este por los llanos de Apan y la Sierra Nevada, al sur por las sierras de Chichinautzin y Ajusco y al oeste por las sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo (Fig. 5). De la superficie total, aproximadamente 3080 km² corresponden a áreas de montaña y 2050 km² a partes bajas, las primeras con altitudes superiores a 200 m sobre el fondo del Valle y las segundas, comprendidas entre 0 y 50 m. La altitud de la zona más baja de la Ciudad de México es de 2240 msnm.

3.1.1.2 Génesis

De acuerdo con los estudios realizados por Federico Mooser (1970) relacionados con el origen y evolución de la cuenca del Valle de México, se acepta que, a raíz de los esfuerzos tectónicos que actuaron desde principios del Terciario, se originó un intenso fracturamiento de la corteza que propició el ascenso de abundantes flujos de lava y la formación de los grandes aparatos volcánicos que actualmente rodean el valle.

Parece que la actividad volcánica decreció a fines del Mioceno y fue seguida por un período de erosión intensa que suavizó el relieve abrupto del terreno. Posteriormente, tanto en la región de Pachuca como en la Sierra de Guadalupe se inicia en el Plioceno una nueva etapa de actividad volcánica caracterizada por la emisión de grandes masas lávicas ácidas (diacríticas y riolíticas) localizadas hoy en la cima de esas sierras, particularmente en el cerro del Chiquihuite, que da el nombre a esta serie. La actividad volcánica continúa en las sierras Nevada y de las Cruces, para posteriormente manifestarse en el Iztaccíhuatl y en el Ajusco. Luego, en el Plioceno Superior, las emisiones volcánicas de andesitas basálticas de la parte septentrional de la cuenca interrumpen la conexión con el norte.

Al finalizar esta última etapa de actividad volcánica sobreviene una época de lluvias torrenciales que ocasiona otro período erosivo el cual suaviza de nuevo el relieve abrupto, depositando en los flancos poniente y oriente de la cuenca extensos abanicos aluviales formados típicamente por fragmentos andesíticos angulosos envueltos por una matriz de arena y limo (Formación Tarango) producto de la destrucción de los complejos volcánicos del Terciario Medio y Superior.

Probablemente el desarrollo de estos abanicos aluviales continuó ininterrumpidamente hasta el Pleistoceno inferior, ya que posteriormente el clima húmedo y frío de este período causó tanto la formación de grandes glaciares en el Iztaccíhuatl y el Popocatepetl como la destrucción de gran parte de la formación Tarango, labrando profundas barrancas a lo largo de las laderas y abriendo los dos valles principales que servían como drenaje de la cuenca desalojando las aguas hacia el sur por el río Amacuzac. Uno de ellos, el occidental, tenía sus cabeceras en Pachuca, pasaba por el lugar hoy

ocupado por la Ciudad de México y llegaba hasta Cuernavaca, al oeste de la Sierra del El Tepozteco; el segundo valle recorría el pie de la Sierra Nevada, atravesaba Chalco y Amecameca para alcanzar la cuenca del Alto Amacuzac en Cuautla.

Contemporáneamente a la formación de estos valles y barrancas, se inició un nuevo período de erupciones volcánicas en el norte de la cuenca, que se desplazaron paulatinamente hacia el sur, cubriendo los valles recién formados con gruesas capas de basalto y pómez. Se crean los cerros de Chiconautla, Chimalhuacán y La Estrella. También sobrevienen las potentes efusiones lávicas del Chichinautzin, de unos 2,000 m de espesor, que cerraron el drenaje hacia el sur, transformando el Valle de México en una cuenca cerrada.

A consecuencia de esta obstrucción se inicia una nueva fase erosiva que suaviza la topografía abrupta de las sierras generando la morfología actual de la planicie del Valle de México, originando importantes depósitos en las barrancas y lagos de las regiones bajas. Estos depósitos forman una compleja secuencia de estratos arcillosos blandos, intercalados con capas y lentes duros.

El proceso de depositación sufrió largas interrupciones durante los períodos de intensa sequía, en los que el nivel del lago bajó, formándose costras superficiales endurecidas por deshidratación solar. Los espesores de estas costras duras dependen de las condiciones topográficas del fondo del lago, alcanzando su mayor espesor hacia las orillas del vaso y llegando a desaparecer en el centro del mismo.

En el siglo XVI, el área ocupada por los lagos era aproximadamente la que se indica en la figura 6. El drenaje del valle para permitir el desarrollo de la ciudad y prevenir inundaciones se logró progresivamente con la apertura del tajo de Nochistongo en 1789 y la construcción del gran canal y del túnel de Tequisquiác a fines del siglo XIX y principios del XX.

3.1.1.3 Zonificación geotécnica

A partir de la década de los 50's se ha trabajado sobre la zonificación geotécnica del Valle, con base en exploraciones efectuadas, en su mayoría, con propósitos de diseño de cimentaciones dentro de la Ciudad de México. Con estos datos se han elaborado varias zonificaciones atendiendo principalmente a las propiedades geotécnicas de los materiales encontrados en sondeos que alcanzaron profundidades de hasta 50 m, y con algunos que han llegado hasta 100 m. En la figura 6a se presenta la zonificación geotécnica de la ciudad de México propuesta por Auvinet, Méndez y Juárez (2000).

Zona I (Zona de Lomas). Denominada así con base en su altitud relativa al resto del Valle. Incluye la parte de la mancha urbana localizada en las faldas de la serranía de las Cruces, formada tanto por terrenos compactos, de carácter areno-limoso con alto contenido de grava como por tobas pumíticas bien cementadas. La capacidad de carga del terreno es elevada y no existen capas de arcillas compresibles que puedan ser causa de asentamientos diferenciales de gran magnitud. Sin embargo, debido a la explotación de minas de grava y arena, muchos predios están cruzados por galerías, a diferentes profundidades, las cuales suelen tener un desarrollo muy caprichoso. Esta zona también incluye la parte sur de la urbe que invade el derrame basáltico de El Pedregal en la cual las estructuras cimentadas sobre dicho derrame pueden presentar problemas de inestabilidad debido a que, en los contactos entre flujos sucesivos, es común encontrar cavernas y material muy fracturado. Además en

algunos puntos del área, principalmente hacia el norte de la Ciudad, particularmente en las laderas de la Sierra de Guadalupe, existen depósitos eólicos de arena fina y uniforme.

Zona II (Zona de transición). Entre las serranías del poniente y el fondo del lago de Texcoco, se presenta una zona donde las condiciones estratigráficas del subsuelo varían en forma extraordinaria de un punto a otro del área urbanizada. En general, se tienen superficialmente depósitos limosos cubriendo a estratos de arcilla volcánica muy compresibles y de espesores variables (generalmente menores que en la Zona de Lago), intercalados con capas de arena limosa compacta o arena limpia, los cuales descansan sobre potentes mantos en los que el material predominante es la grava y la arena. Los problemas de capacidad de carga y asentamientos diferenciales pueden ser muy críticos, especialmente cuando se trata de construcciones extensas. La estratigrafía y propiedades de los materiales del subsuelo deben investigarse con todo detalle para diseñar correctamente las cimentaciones y las superestructuras.

Zona III (Zona de Lago). Para su definición se ha tomado como base la formación típica de la parte centro y oriente de la ciudad construida sobre el fondo del lago de Texcoco. La zona se caracteriza por la presencia de potentes estratos arcillosos altamente compresibles.

3.1.1.4 Hundimientos regionales provocados por los abatimientos piezométricos

Debido a la explotación de agua subterránea tanto para consumo de la población como para otras aplicaciones en el curso del presente siglo, la Ciudad de México ha sufrido una subsidencia de hasta 10 m en algunas zonas. Aunque es cierto que las construcciones transmiten cargas directamente al terreno y que los rellenos construidos para nivelar algunas vías han contribuido al fenómeno, su efecto es de apenas 20% del total. La causa principal del hundimiento es la reducción de la presión de poro en los estratos permeables del subsuelo, la cual a su vez ha generado un proceso de consolidación dentro de los estratos arcillosos de origen lacustre.

Hay una correlación entre el desarrollo de la red de pozos municipales de extracción de agua para consumo doméstico o industrial, los abatimientos piezométricos y el hundimiento observado. Fue Nabor Carrillo quien estableció la relación entre la causa y el efecto, lo que llevó el gobierno de la ciudad a aplicar restricciones sobre la explotación de los acuíferos dentro de la zona urbana. Desgraciadamente, debido a la fuerte demanda de agua estas restricciones ya no se han podido respetar en las últimas décadas.

Desde principios de siglo, la velocidad de asentamiento en la zona de la Catedral y del parque de La Alameda Central varió entre 3 y 5 cm/año para el período 1900-1938; y se incrementó a 15 cm/año durante los cinco años siguientes, para alcanzar luego un máximo del orden de 50 cm/año en 1950 y entonces disminuir a valores de menos de 10 cm/año. Se ha observado que en el centro del lago de Texcoco se alcanzan velocidades de hundimiento de hasta 30 cm/año.

3.1.1.5 Agrietamiento del subsuelo

Otro fenómeno geotécnico importante a tomar en cuenta en el diseño de cimentaciones es el agrietamiento del subsuelo que se observa en la zona lacustre. Las grietas se atribuyen a diferentes causas. En la cercanía de los cerros que forman islas dentro de la zona lacustre y en las transiciones

bruscas hacia la zona de lomas, el agrietamiento se atribuye a hundimientos diferenciales asociados a la consolidación regional discutida en el punto anterior. Sin embargo, también ha sido común observar, además de las grietas superficiales por secado, unas grietas muy profundas (hasta 20 m) en el centro de la zona lacustre y especialmente en el lago de Texcoco. Estas grietas profundas se presentan principalmente al principio de la época de lluvias y tienen su origen en los esfuerzos de tensión generados por las condiciones de presión y de flujo que generan las aguas superficiales. Para evitar que estas grietas afecten las cimentaciones, es necesario dar a éstas una resistencia significativa a la tensión mediante traveses de liga. En algunos casos se han tratado grietas existentes rellenándolas con una lechada con propiedades semejantes a las arcillas del valle, esta operación debe llevarse a cabo en forma muy progresiva para evitar la propagación de las mismas durante el tratamiento.

3.1.1.6 Cimentaciones en el Valle de México

Las características del subsuelo y la subsidencia del área urbana, adicionadas al hecho que el valle de México se localiza en una región de actividad sísmica, han creado situaciones que normalmente constituyen serios retos para el ingeniero de cimentaciones (Marsal y Mazari, 1959). Las soluciones adoptadas para las cimentaciones de edificios en la ciudad de México varían desde zapatas aisladas o corridas y losas continuas superficiales para edificios de unos cuantos pisos, hasta pilotes de concreto hincados hasta la capa dura para construcciones pesadas de más de ocho pisos.

a) Cimentaciones superficiales

Su uso sólo es aceptable para construcciones ligeras y de poca extensión. Debe tomarse en cuenta que una carga de únicamente 2 t/m^2 (20 kPa) aplicada sobre un área extensa de la zona de lago es capaz de inducir asentamientos totales del orden de 1 m y diferenciales de aproximadamente 50 cm.

b) Cimentaciones compensadas o "flotantes"

También se ha recurrido a cimentaciones compensadas o "flotantes", las cuales reducen grandemente la carga neta aplicada al suelo o la eliminan completamente mediante la excavación. El uso de este tipo de cimentaciones está limitado por las dificultades que se encuentran para realizar excavaciones suficientemente profundas, asociadas a problemas de estabilidad de taludes y de expansión por descarga. Para que su funcionamiento sea adecuado, es necesario que el cajón de cimentación sea totalmente estanco o que se instale un sistema automático de achique permanente.

Conviene mencionar que la experiencia en la ciudad de México y en el propio lago de Texcoco muestra que esta solución puede conducir a problemas serios que podrían dificultar la construcción y poner en peligro la operabilidad de la planta. Entre los problemas que pueden anticiparse pueden mencionarse los siguientes (Auvinet, G., Alberro, J, Hernández, R., 1998):

- Variaciones de nivel de las estructuras respecto a las elevaciones de alimentación y descarga de la planta debido a que las estructuras compensadas siguen el hundimiento regional.
- Problemas para la realización de la excavación (inestabilidad de taludes, control del agua)

- Flotación de tanques parcial o totalmente vacíos, especialmente durante los períodos de mantenimiento, asociada a la presencia de un nivel freático alto o a encharcamientos superficiales.
- Expansiones y asentamientos totales y diferenciales por descarga y recarga respectivamente tanto durante la construcción como durante la operación de las estructuras.
- Emersión aparente de áreas permanentemente sobrecompensadas, debida a la interferencia con la consolidación regional.

c) Cimentaciones sobre pilotes de punta

Las cimentaciones de los edificios altos sobre pilotes hincados hasta la capa dura generalmente hacen que el edificio "emerja" afectando a las edificaciones vecinas por asentamientos diferenciales. La losa de cimentación deja de tener contacto con el suelo y puede sufrir daños estructurales en caso de no haber sido diseñada para esta condición. Además, los pilotes pierden su confinamiento lateral en su parte superior y resultan vulnerables a las sollicitaciones causadas por los momentos de volteo y fuerzas cortantes de origen sísmico.

d) Cimentaciones sobre pilotes de fricción

Desde los años 50's, se han empleado pilotes de fricción para reducir al mínimo los asentamientos y evitar el fenómeno de emersión de los edificios con respecto a su vecindad como consecuencia de la consolidación regional. El diseño de este tipo de cimentaciones es delicado. Si se usa un número reducido de pilotes, esta solución no elimina totalmente los asentamientos. Por otra parte un sobrediseño puede llevar a problemas de emersión similares a los que causan las cimentaciones sobre pilotes de punta.

e) Cimentaciones especiales

Para el mismo propósito, se han diseñado y construido tipos especiales de pilotes entre los cuales destacan los pilotes de control, los arreglos especiales de elementos friccionantes y fijos (pilotes entrelazados) y los pilotes penetrantes o telescópicos.

A pesar de los esfuerzos de una gran variedad de investigadores en este campo durante los últimos 50 años, muchos aspectos de la ingeniería de cimentaciones están por aclararse antes de poder lograr diseños óptimos en la Ciudad de México, que ha sido apropiadamente descrita como un paraíso para los especialistas de la Mecánica de Suelos.

3.1.1.7 Respuesta sísmica del subsuelo y de las cimentaciones

La importancia de los efectos de sitio sobre las características de los movimientos sísmicos del subsuelo en el valle de México fue claramente demostrada durante el macrosismo de 1985 y en varios sismos posteriores.

En 1985, en la zona lacustre, los movimientos superficiales del terreno alcanzaron ± 20 cm, con los consiguientes daños estructurales inducidos en pavimentos, tuberías enterradas y otros elementos someros rígidos.

Tanto la amplificación de las ondas sísmicas como su baja frecuencia debidas a su propagación desde la roca basal a través del grueso depósito de suelos altamente compresibles, producen grandes fuerzas horizontales sobre los edificios altos. Las estructuras más vulnerables ante sollicitaciones sísmicas han sido los edificios esbeltos con cimentación parcialmente compensada o sobre pilotes de fricción. Algunas de las cimentaciones de este tipo presentaron grandes deformaciones permanentes y en algunos casos, colapso total. Por otra parte, en varias cimentaciones sobre pilotes de punta se observaron daños en la cabeza de los pilotes y en su conexión con la subestructura.

Los efectos de sitio han sido reconocidos explícitamente en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y en sus Normas Técnicas Complementarias, al especificar espectros de diseño con características muy diferentes para cada zona geotécnica.

3.1.2 Zona del lago de Texcoco

3.1.2.1 Antecedentes geológicos y geotécnicos.

Desde el punto de vista geológico, el fondo del lago Texcoco es una gran depresión tectónica o graben, limitada al E y W por fallas de sentido N-S cuyos desplazamientos no han sido plenamente definidos, las cuales afectan al basamento volcánico debajo de la planicie aluvial de Texcoco. La estructura de este basamento ha sido deducida de los resultados obtenidos del pozo Texcoco PP-1 que atravesó 2,065 m de depósitos lacustres, aluviales y volcánicos sin alcanzar el basamento cretácico marino, el cual se encuentra probablemente plegado.

A continuación se presenta un resumen de la columna estratigráfica del pozo Texcoco PP-1 (Mooser, 1970), el cual sirve para visualizar la serie de eventos que dieron origen a lo que actualmente se conoce como planicie del ex-lago Texcoco, y en general a todo el valle de México.

Época geológica	Prof. (m)	Descripción
Cuaternario superior a inferior	0 - 500	Depósitos aluviales (arcillas, limos, arenas, travertinos y algunas lavas). Grupo Chichinautzin.
Plioceno y Mioceno	500 - 815	Depósitos volcánicos (principalmente tobas) producidos por la Sierra de Río Frío, comprendidos en la Formación Nevada del grupo de las Sierras.
Mioceno superior y medio	920 - 1,438	Depósitos volcánicos (lavas y aglomerados) comprendidos en el grupo Xochiltepec.
Oligoceno superior	1,438 - 1,965	Depósitos volcánicos (lavas, aglomerados y tobas) que constituyen

		la parte superior del grupo del Basamento Volcánico de la Cuenca.
Oligoceno inferior y Eoceno superior	1,965 – 2,065	Depósitos volcánicos (tobas) anhidrita y conglomerados calcáreos. Parte inferior del grupo del Basamento Volcánico de la Cuenca.

Los abundantes derrames de lavas andesíticas y basálticas que fueron detectados en la columna estratigráfica del pozo, con potencias variables entre 3.5 y 108 m, y edades entre 13 y 31 millones de años, demuestran una intensa actividad volcánica durante el terciario (Oligoceno medio a Mioceno). Estos depósitos están cubiertos por potentes depósitos de arcillas lacustres de edad menor que 1 millón de años (cuaternario) (Mooser, 1970), que constituyen las formaciones superiores del subsuelo de la zona del ex-lago de Texcoco.

De acuerdo con la zonificación geotécnica descrita en el punto anterior, tanto el sitio Tecámac como el Texcoco Norte (Sosa Texcoco) se localizan en la Zona de Lago, en un puerto geológico formado por la Sierra de Guadalupe, al Noroeste, y por el cerro de Chiconautla al Noreste, como se aprecia en la figura 7. Según lo descrito en la zonificación geotécnica, y tomando en cuenta la cercanía de las sierras de Guadalupe y Chiconautla, se pueden esperar suelos superficiales compresibles con espesor relativamente menores que en las zonas francas de lago e influencias de las serranías en las características de los depósitos más profundos.

A continuación se presenta una descripción estratigráfica detallada de las formaciones superiores:

- **Manto superficial.** A veces llamado "capa superior". Se compone de arcillas consolidadas por secado, arenas limosas y limos arcillosos con espesor medio de 1.5 m, el cual aumenta hasta 6.0 m al acercarse a la Sierra de Guadalupe. Es común la presencia de abundantes grietas rellenas con materiales eólicos y de profundidad cercana y a veces algo superior a los 4 m, por lo que penetran en el estrato subyacente.
- **Formación arcillosa superior.** Compuesta por un paquete de arcillas de origen volcánico-lacustre cuyo espesor varía de 16 a 18 m en El Caracol, a 40 m en el bordo Xochiaca. Estas arcillas son altamente compresibles y se encuentran intercaladas con bolsas y estratos arenosos, limo arenosos y de vidrio volcánico a diversas profundidades.
- **Capa dura.** Se trata de suelos de carácter limo arenoso, que alcanzan una potencia de hasta 3 m. Se localiza a una profundidad variable entre 16 y 18 m en El caracol, hasta 45 m en el bordo Xochiaca. En los alrededores de Ciudad Nezahualcóyotl prácticamente desaparece y eventualmente se encuentra intercalada con materiales arcillosos.
- **Formación arcillosa inferior.** Se diferencia de la formación arcillosa superior, entre otros aspectos, por tener menor compresibilidad. Son frecuentes las intercalaciones de lentes y estratos limo arenosos así como de vidrio volcánico. Presenta un espesor variable de 15 a 20 m en el centro del lago disminuyendo tanto al N como al W hasta 3 m aproximadamente.

- Depósitos profundos superiores. También llamados "segunda capa dura". Se componen preferencialmente por limos y arenas limosas muy compactas. Se localizan a una profundidad comprendida entre 24 m al E y 64 m al S, en el bordo Xochiaca.
- Tercera formación arcillosa. Es una formación compresible de espesor variable entre 6 y 14 m aproximadamente. En la zona industrial de Xalostoc se localiza a partir de 46 m de profundidad con un espesor de 14 m.
- Depósitos profundos inferiores. Se denomina así a una secuencia de estratos arenosos y limo arenosos en los que eventualmente se encuentran gravas, localizados inmediatamente después de la tercera formación arcillosa y hasta profundidades cercanas a 150 m en el centro del lago.

3.1.2.2 Hundimientos regionales y abatimientos piezométricos

Actualmente, no se cuenta con información precisa respecto a los abatimientos piezométricos en la zona. Se sabe que la Gerencia del Valle de México de la CNA sigue la evolución de diferentes estaciones piezométricas en la zona (P536-7 y P356-10). Por su parte la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) ha instalado una gran cantidad de piezómetros en la zona estudiada. Sin embargo, los datos disponibles no parecen ser confiables.

A pesar de las limitaciones señaladas, la información disponible muestra el fuerte descenso del nivel freático que se ha originado en la zona. Se sabe que hasta hace alrededor de unas cuatro décadas el nivel freático en la zona se encontraba a 1 m de profundidad, mientras que en los sondeos realizados en 1995 el nivel freático se reporta a 7.5 m aproximadamente. Por otro lado, en la exploración de los sitios de estudio se ha encontrado el nivel freático a 10 m de profundidad.

La información acerca de los hundimientos regionales en el valle de México, que viene investigando la DGCOH desde hace varios años, no incluye la zona del caracol de Sosa Texcoco. Sin embargo, se sabe que la Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento del Estado de México, dependiente de la Secretaría de Desarrollo Urbano del Estado de México, ha realizado nivelaciones en la zona con objeto de apreciar las pérdidas de pendiente de la red de aguas negras. Por otro lado, a partir de las observaciones de los hundimientos a lo largo del Gran Canal, se puede adelantar que los hundimientos regionales en la zona pueden tener como cota mínima 5 cm/año, tomando como base la información reportada por la CNA y el DDF (1995). El hundimiento regional real puede ser sensiblemente mayor ya que las zonas descargadas como el canal tienden a hundirse más lentamente que el resto del terreno.

3.2 Análisis del subsuelo en el sitio "Sosa Texcoco"

3.2.1 Exploraciones realizadas

3.2.1.1 Objetivos de la campaña

La campaña de exploración geotécnica fue diseñada atendiendo principalmente a los siguientes objetivos:

Investigar las condiciones del subsuelo en toda el área disponible para la planta, debido a que no se cuenta con algún anteproyecto que pudiera concentrar la atención en alguna zona en particular.

Investigar la posible influencia del puerto geológico formado por la Sierra de Guadalupe y del Cerro de Chiconautla en las condiciones del subsuelo, específicamente en la variación de la potencia de los estratos compresibles superficiales y profundos.

Conocer con detalle las condiciones piezométricas del agua del subsuelo.

Conocer con detalle los asentamientos regionales en la zona de interés.

3.2.1.2 Tipo y número de sondeos e instrumentos

Con base en los objetivos planteados se consideró necesario realizar la siguiente campaña de exploración geotécnica (Fig 8):

- Ejecución de 5 sondeos mixtos (SM) a 60 m de profundidad, alternando el hincado de tubos de pared delgada tipo Shelby, de 10.16 cm de diámetro en suelos arcillosos blandos, hincado con rotación de tubos dentados tipo Shelby de 10.16cm de diámetro en suelos arcillosos de consistencia media a rígida, recuperación de muestras inalteradas de arcilla dura por medio de barril doble giratorio de 7.62cm de diámetro y prueba de Penetración Estándar en suelos granulares o arcillosos duros.
- Ejecución de 12 sondeos de cono eléctrico (SCE), 8 a 60 m de profundidad y los 4 restantes a 30 m, utilizando un cono-eléctrico de 2,000 kg de capacidad y 10 cm² de área transversal en suelos con poca o mediana resistencia, alternando con el avance por medio de corona de carburo de tungsteno de diámetro NQ (6.99 cm) en suelos compactos y/o cementados.
- Ejecución de 6 pozos a cielo abierto (PCA) a 4 m de profundidad, excavados con pico y pala, incluyendo el levantamiento del perfil estratigráfico, muestreo inalterado obteniendo muestras cúbicas en los principales estratos, muestreo alterado obteniendo muestras representativas de cada uno de los estratos encontrados, pruebas de resistencia al corte no drenada realizadas con torcómetro de bolsillo en los suelos arcillosos, perfil fotográfico de cada uno de los pozos excavados y finalmente extracción de muestras alteradas (8 en total) para su análisis químico.
- Instalación de 4 piezómetros abiertos tipo Casagrande (PZ), localizados a 15, 30, 40 y 60 m de profundidad, situados en una estación piezométrica localizada en el vértice "B" del polígono que

encierra al predio (elevación aproximada igual a 2233.5 msnm). Incluyendo la medición inicial con una periodicidad de una lectura por semana, en un lapso de cuatro semanas.

- Instalación de un pozo de observación (PO) del nivel freático, de 15 m de profundidad, localizado en la zona de la estación piezométrica.

Adicionalmente a estos trabajos se llevó a cabo el levantamiento topográfico de las grietas superficiales que existen en la mayor parte del terreno.

3.2.2 Interpretación tradicional

3.2.2.1 Estratigrafía

La estratigrafía que se presenta a continuación está basada en los resultados de la exploración y de laboratorio obtenidos, apoyada también en la información recopilada de manera indirecta:

- Costra superficial (prof. 0.0 - 0.5 m)

Arcilla gris y café de varios tonos, con arena fina limosa, quebradiza, endurecida por secado solar, de 0.5 m de espesor medio.

- Depósito arcilloso superficial (prof. 0.5 - 8 a 11 m)

Con un espesor máximo de entre 40 y 11 m en los SM-2, SM-3 y SM-5, y mínimo de 7.5 m en los SM-1 y SM-4. Con pequeños lentes de arena fina y/o ceniza volcánica en los primeros 5 m de profundidad en todos los sondeos. También se presentan pequeños estratos de limo arenoso en el SM-2 y de arena fina en el SM-3 y SM-5, de 1 m de espesor y a 7.5 m de profundidad aproximadamente en estos sondeos. Estas capas se encuentran en estado suelto a semicompacto.

El contenido de agua de las arcillas varía generalmente entre 200 y 350%, con máximos de 500% en el PCA-6. Sin embargo, en el SM-4 se observa que estas arcillas presentan contenidos de agua menores, variando entre 100 y 200%. Se destaca que, con excepción del SM-4, en varias ocasiones el contenido natural de agua es mayor que el correspondiente al límite líquido, resultando en consistencias relativas negativas¹; esto se observa más claramente en los perfiles estratigráficos de los pozos a cielo abierto (figuras 9, 10, 11, 12, 13 y 14). Lo anterior es indicativo de un suelo altamente estructurado.

La resistencia al corte no drenada o "cohesión" de las arcillas presenta valores mínimos del orden de 0.1 kg/cm² y aumenta a cerca de 0.4 kg/cm² en la parte baja de este estrato. Los parámetros de resistencia en pruebas triaxiales consolidadas no drenadas indican un ángulo de fricción interna, ϕ , del orden de 16° y una cohesión igual a cero para los primeros 4.5 m estudiados con este tipo de pruebas.

¹ Se define como $C_r = (L_L - w) / (L_L - L_P)$
Donde:

C_r , Consistencia relativa (adimensional)
 L_L , Límite líquido (%)
 L_P , Límite plástico (%)
 w , Contenido natural de agua (%)

Los valores de la relación de sobreconsolidación OCR (Over-Consolidation Ratio), obtenidos directamente de las pruebas odométricas realizadas, indican que los primeros 3 a 3.5 m se encuentran preconsolidados, teniendo un OCR que va de 1.3 a más de 2. Los siguientes 3 m de arcilla se encuentran en general normalmente consolidados o con ligera preconsolidación. La parte baja de este estrato, entre los 6 y 11 m de profundidad presenta variaciones en la sobreconsolidación, encontrándose desde arcillas normalmente consolidadas hasta arcillas con un OCR de 1.7. También se han inferido los valores del OCR a través de la expresión propuesta por Schmertmann (Briaud, 1988):

$$OCR(x) ; x = c/0.33\sigma_0$$

Donde:

c ; Resistencia al corte no drenada del suelo ("cohesión"), kg/cm^2

σ_0 ; Esfuerzo vertical efectivo, kg/cm^2 , a la profundidad en donde se determina el valor de la cohesión

Los resultados muestran la misma tendencia que los resultados directos, aunque con valores generalmente más altos de la relación OCR , sobre todo cuando este parámetro aumenta a más de 2. Los resultados inferidos confirman que las arcillas del fondo de este estrato tienen variaciones en el OCR .

La compresibilidad de este estrato se puede inferir partiendo de los módulos de compresibilidad, m_v , obtenidos de las pruebas odométricas. Estos resultados se presentan en las figuras 15, 16, 17, 18, 19 y 20. Se observa que los módulos de las muestras obtenidas hasta 5 m son extraordinariamente altos, con valores superiores a $0.25 \text{ cm}^2/\text{kg}$ (máximo de $0.60 \text{ cm}^2/\text{kg}$). Las muestras obtenidas entre 5 m y hasta los 11 m presentan una reducción de los módulos, con valores máximos del orden de $0.20 \text{ cm}^2/\text{kg}$. Sin embargo, debe notarse la excepción del SM-5 en el que todas las pruebas realizadas en este sondeo hasta a los 10 m de profundidad conservan su módulo en un valor alto del orden de $0.25 \text{ cm}^2/\text{kg}$.

La comparación de todos los sondeos de cono eléctrico en este estrato superficial arcilloso, muestra que la resistencia q_c es en general menor de 4 kg/cm^2 . Se observa cierta tendencia al aumento de la resistencia con la profundidad, la cual es clara en algunos sondeos, pero no se presenta en otros como el SCE-4, SCE-5 y SCE-6.

Se ha podido establecer la correlación entre la resistencia al corte no drenada del suelo y la resistencia al hincado del cono eléctrico, denominado factor de correlación N_K , para los primeros 10 m del subsuelo, utilizando la expresión propuesta por Schmertmann (Briaud, 1988):

$$N_K = q_c / c$$

Donde:

N_K ; Factor de correlación de resistencia², adimensional

q_c ; Resistencia al hincado del cono eléctrico (en la punta), kg/cm^2

c ; Resistencia al corte no drenada del suelo ("cohesión"), kg/cm^2 , a la profundidad donde se mide q_c .

² En realidad la expresión involucra también al esfuerzo vertical efectivo. Sin embargo, se acostumbra eliminar este término para las arcillas del Valle de México

A partir de los resultados obtenidos y haciendo un sencillo análisis estadístico se puede deducir que el factor de correlación N_k queda entre 6 y 8 para este depósito arcilloso superficial.

Otro aspecto importante lo constituyen las grietas que aparecen en buena parte de la superficie del predio. En el recorrido de campo se observó que las grietas tienen longitudes de desarrollo erráticas, sin poder establecer alguna cota superior o inferior; además se vio que muchas de ellas tienen varios centímetros de apertura en la superficie, inclusive algunas decenas. Resultó imposible establecer algún patrón de agrietamiento así como la profundidad de las mismas, aunque en la inspección se observó que muchas de ellas tienen por lo menos unos 2 m de profundidad. Se tiene información de que estas grietas pueden alcanzar profundidades hasta de 20 m. Parece ser que la generación de las grietas obedece, entre otros factores, tanto al hundimiento regional provocado por los abatimientos piezométricos, como a la pérdida de tensión superficial provocada por la lluvia después de un período de sequía (Alberro y Hernández, 1990), o a las presiones internas dentro de grietas por secado preexistentes (Auvinet y Arias, 1991). Lo anterior hace que la configuración actual de grietas cambie con el tiempo, lo que complica aun más la posibilidad de aportar información a este respecto.

- Serie estratificada (prof. 8 a 11 m - 34 a 38 m)

De 25.5 m de espesor mínimo en el SM-4 y máximo de 29 m en el SM-1. Es una secuencia compleja de estratos en la que predominan los suelos granulares, principalmente arenas finas limosas o limos con cantidades variables de arcilla. Entre estos estratos se encuentran intercaladas capas de arcilla con espesores máximos del orden de 2 m. Las compacidades de los estratos granulares son erráticas con la profundidad y variables de un sondeo a otro; sin embargo, predominan las compacidades medias a muy altas, estando sueltas en el menor de los casos. Los estratos arcillosos presentan contenidos de agua comprendidos entre 100 y 250% y consistencias rígidas a duras, con valores de cohesión superiores a 0.5 kg/cm^2 . Según los resultados de las pruebas odométricas estas intercalaciones de arcilla tienen módulos de compresibilidad máximos del orden de $0.10 \text{ cm}^2/\text{kg}$, resultando ser aproximadamente tres veces menores que las arcillas más compresibles del depósito arcilloso superficial.

- Depósito arcilloso profundo (prof. 34 a 38 m - 52 a 59 m)

Compuesto en su gran mayoría por arcilla rígida a dura, contiene pocos lentes de limo o ceniza volcánica. Su espesor es mínimo de 14 m en el SM-3 y máximo de 27 m en el SM-2. Observando tanto los contenidos de agua como las resistencias al corte y en la punta del cono eléctrico se podría dividir al depósito en tres "subestratos", uno intermedio, localizado alrededor de los 43 m de profundidad, con un espesor aproximado de 7 m, y cuyos valores del contenido de agua son menores a 100%, resistencias al corte mayores de 1.5 kg/cm^2 y en la punta del cono eléctrico superiores a 20 kg/cm^2 . Este estrato separa a los otros dos (superior e inferior), cuyos espesores van de 3 a 6 m aproximadamente. En estos dos estratos los contenidos de agua son del orden de 120 a 150%, resistencia al corte entre 0.5 y 1.5 kg/cm^2 y q_c entre 10 y 20 kg/cm^2 .

Los resultados de dos pruebas odométricas realizadas en la parte superior e inferior de este depósito muestran compresibilidades relativamente bajas, con módulos m_v , del orden de $0.03 \text{ cm}^2/\text{kg}$.

- Depósitos profundos de limos y/o arenas (52 a 59 m - 60 m)

Corresponde al último depósito identificado en los sondeos, su espesor va de 1 a 7 m y está compuesto por suelos granulares de compacidad muy alta y resistencia a la penetración el cono eléctrico también alta. Este depósito no fue detectado en el SM-5.

En las figuras 21a, 21b, 22a y 22b se presentan los cortes estratigráficos A-A' y B-B' marcados en la figura 8. Éstos fueron hechos con base en la información de los sondeos mixtos (con sus correspondientes sondeos de cono eléctrico) localizados en los extremos de cada corte. A la fecha de la realización de dichos cortes no se contaba con la información de los sondeos intermedios, por lo que no fueron incluidos. Realmente las figuras 21a, 21b, 22a y 22b son una mera interpretación "artística" de la estratigrafía encontrada en los barrenos, con todos los riesgos que esto implica. Carecen de valor para diseño, sin embargo se presentan para dar una idea de las condiciones generales del subsuelo. Más adelante compararemos estos cortes con los obtenidos del análisis geoestadístico.

3.2.2.2 Condiciones piezométricas

En las mediciones realizadas durante los trabajos de campo del estudio geotécnico (1997), la profundidad del nivel freático se observó a una profundidad de 10 m, con variaciones despreciables.

Es importante mencionar que el nivel de agua dentro de un sondeo, durante la ejecución del mismo, se ve afectado por el uso del fluido en el proceso de la perforación. Debido a esto, el nivel freático reportado anteriormente se refiere a la profundidad del nivel de agua encontrado a partir de 2 o 3 días de terminado el sondeo. Como se describirá posteriormente, los barrenos ejecutados en el sitio atraviesan mantos permeables separados por impermeables, y comunican inmediatamente los niveles piezométricos de los estratos drenantes con la superficie, lo mismo sucede con el pozo de observación. Sabiendo que los niveles piezométricos se encuentran abatidos por la extracción de agua (información en los siguientes párrafos), es posible que el nivel de agua reportado no sea precisamente el freático, por lo que la interpretación de este nivel deberá hacerse con cuidado.

Se hace notar el hecho de que en los 4 a 5 m excavados en los pozos a cielo abierto, los cuales permanecieron abiertos durante al menos 3 meses en la época de la exploración (diciembre/96 a febrero/97), no apareció en ningún momento el agua freática. Esto es importante desde el punto de vista constructivo.

3.2.2.3 Consideraciones respecto a cimentaciones de la planta

- Problemática previsible en el sitio

Anteriormente se ha dado un panorama general de la problemática de las cimentaciones en el Valle de México, incluyendo conceptualmente algunas de las principales soluciones de cimentación que se han propuesto, diseñado y probado en las estructuras de la Ciudad, así como sus principales desventajas y puntos importantes a considerar en la planeación de una cimentación en particular. Tomando en cuenta lo anterior y los resultados del estudio geotécnico realizado, puede concluirse que el diseño de la cimentación de la planta en proyecto deberá prestar especial atención a los aspectos geotécnicos siguientes:

- a) Capacidad de carga de las cimentaciones superficiales, pensando en que se desplantarán sobre el depósito superficial arcilloso muy compresible y susceptible de agrietarse.
- b) Deformaciones elásticas instantáneas del terreno por efecto de cargas o descargas durante la construcción y la operación de las estructuras.
- c) Asentamientos totales y diferenciales de las estructuras sensibles a este fenómeno, cimentadas superficialmente, tanto para una misma estructura como por su interacción con otros equipos de la planta.
- d) Flotación de cimentaciones compensadas, durante su construcción o cuando se encuentren vacías y se presenten inundaciones naturales o accidentales.
- e) Hundimiento regional provocado por la extracción de agua del subsuelo.
- f) "Emersión" de las estructuras cimentadas sobre pilotes o pilas apoyados en un estrato incompresible, o sobre pilotes de fricción cuando su densidad es alta (p. ej. El Monumento a la Independencia).
- g) Fricción negativa sobre elementos de cimentación profunda apoyados en la punta.
- h) Interacción entre estructuras cimentadas superficialmente y estructuras aladañas con problemas de "emersión".
- i) Estabilidad de cortes y rellenos a corto y largo plazo. También aquí se prevé que los cortes y rellenos que pudieran existir se llevarán a cabo en la arcilla superior, y que, a largo plazo, ésta tiende a modificar su cohesión hasta tener un valor del orden del 30% de su valor a corto plazo.
- j) Inundación del sitio de la planta de no contarse con un sistema eficiente de bordos de protección y drenes con cárcamos de bombeo.
- k) Daños estructurales en pavimentos, tuberías enterradas y otros elementos someros rígidos, así como las propias cimentaciones por la acción de sismos.

- **Análisis realizados**

Para dar una idea de la magnitud de algunos de los problemas ubicados en estos rubros, se hicieron algunos análisis que se concentran en los grupos (b) y (c), ya que, tomando en cuenta la naturaleza del proyecto, se considera que los asentamientos son críticos y pudieran ser los que rijan el tipo de cimentación.

Como no se cuenta con información acerca de las características de las estructuras y los equipos que se instalarán (dimensiones, arreglo del conjunto, cargas muertas y vivas, restricciones de asentamientos totales y diferenciales, etc), solo se han realizado análisis preliminares de asentamientos inmediatos y a largo plazo, con objeto de proporcionar el orden de magnitud de los mismos. Para tal efecto se han

utilizado las teorías clásicas de consolidación unidimensional propuesta por K. Terzaghi y la de distribución de esfuerzos en la masa de suelo propuesta por Boussinesq. Estos análisis se han hecho bajo las siguientes consideraciones:

1) Se considera representativo el modelo estratigráfico obtenido del SM-1, mismo que se muestra en las figuras 23a y 23b, considerando una condición hidrostática de presiones en el agua. En la citada figura se presenta la secuencia de estratos considerados compresibles e incompresibles, determinados éstos con base en el contenido de agua, resistencia al corte y al hincado del cono eléctrico, además de los resultados de las pruebas odométricas. La deformabilidad de los estratos compresibles se determinó ajustando (cuando era pertinente) las curvas de compresibilidad para representar la media del estrato, teniendo en cuenta la diferencia entre el contenido de agua obtenido en la muestra sometida a la prueba odométrica y el contenido de agua medio del estrato correspondiente. Las intercalaciones arcillosas de la serie estratificada se modelaron utilizando los resultados de las pruebas odométricas de muestras obtenidas en estas capas, pero en otros sondeos.

2) También se modeló la estratigrafía encontrada en el SM-5, por representar este la "condición más desfavorable" dentro del predio, desde el punto de vista de los asentamientos.

3) Se consideró para el análisis de asentamientos elásticos inmediatos, una estructura hipotética rectangular de dimensiones $D \times 2D$, sometida a una carga (σ descarga) uniforme de magnitud P , considerando un módulo elástico, E , de 500 t/m^2 y una relación de Poisson, ν , igual a 0.45, (fig 24).

4) Se consideró para el análisis de asentamientos a largo plazo, un arreglo hipotético de cuatro estructuras cuadradas de 40 m de lado, dispuestas en una área cercana a los $10,000 \text{ m}^2$, descargando 6 t/m^2 mediante una cimentación superficial "flexible" (figs. 25 y 26) y el mismo arreglo pero utilizando cimentaciones profundas (consideradas también "flexibles"), desplantadas a 15 y 23 m aproximadamente (figs. 27 y 28).

- Resultados obtenidos

En cuanto a las deformaciones elásticas se observa que deben esperarse deformaciones importantes durante la construcción de las estructuras y las operaciones de vaciado y llenado de los tanques (figura 24).

Considerando el modelo estratigráfico del SM-1, una estructura de 40 m de lado desplantada superficialmente mediante una cimentación "flexible", y que transmite al suelo una carga de 6 t/m^2 sufriría un asentamiento diferido total del orden de 1.25 m en el centro y de 0.35 m en una de las esquinas, dando como resultado un asentamiento diferencial de 0.90 m (3 cm/m) entre estos dos puntos (figura 25).

Bajo las mismas condiciones del punto anterior, pero considerando la estratigrafía del SM-5, el asentamiento diferido al centro de la estructura sería del orden de 1.60 m (0.35 m más que bajo la condición del SM-1) y de 0.45 m en una de las esquinas, dando como resultado un asentamiento diferencial de 1.15 m (4 cm/m) entre estos dos puntos (figura 26). Esto indica que es importante tomar en cuenta la variación del espesor del depósito arcilloso superficial, así como las variaciones de la compresibilidad.

El mismo arreglo de estructuras, cimentado con pilas o pilotes de 15 m de longitud aproximadamente, sufriría un asentamiento diferido total del orden de 0.18 m en el centro y de 0.08 m en la esquina, resultando en un asentamiento diferencial de 0.10 m. Este análisis también consideró una cimentación "flexible", por lo cual la carga es uniformemente distribuida (figura 27).

Ahora, bajo las mismas condiciones del párrafo anterior, pero considerando elementos desplantados a 23 m de profundidad aproximadamente, arrojan un asentamiento diferido total al centro y en la esquina de 0.09 m y 0.05 m respectivamente (figura 28).

3.2.3 Evaluación geoestadística del sitio

Para evaluar la variabilidad espacial del subsuelo se procesaron los perfiles de contenido de agua y de resistencia de cono eléctrico recurriendo a técnicas de análisis de señales, considerando la distribución espacial de tales propiedades como una realización de un campo aleatorio.

3.2.3.1 Contenido de agua, $w\%$

Como primera evaluación de la variabilidad espacial del subsuelo, se estudió la de su contenido de agua. La razón de seleccionar primero esta propiedad índice es que resulta la propiedad para la cual se cuenta con la mayor cantidad de datos disponibles. Además, esta propiedad presenta la virtud de poder correlacionarse con las propiedades mecánicas, incluyendo la compresibilidad.

a) Análisis de los perfiles verticales del contenido de agua

a.1) Histogramas, valores medios y variabilidad entre sondeos

En el sitio Sosa Texcoco, en tres de los cinco sondeos (SM-1, SM-4 y SM-5), los perfiles de contenido de agua son prácticamente continuos hasta los 60 m de profundidad; mientras que en los otros dos (SM-2 y SM-3) existen tramos en los que no se cuenta con contenido de agua debido a que el suelo fue más resistente y las muestras que se recuperaron fueron mediante el barril doble giratorio; aunque también se perforaron hasta los 60 m de profundidad. En las figuras 29, 30, 31, 32 y 33 se presentan los perfiles.

Se evaluó para cada perfil vertical el número de "muestras" por metro lineal así como el valor medio y la desviación estándar del contenido de agua. Para este análisis, se consideró la información obtenida hasta una profundidad de 60 m, para todos los sondeos, para contar con la misma población y poder así detectar las diferencias entre un sondeo y otro. Considerando que el número de muestras por sondeo es muy diferente en todos los sondeos (variable de 154 en el SM-3 a 314 en el SM-5) y con la finalidad de que la falta de esta información no afecte los valores de la media, desviación estándar y coeficiente de variación, estos parámetros se calcularon con valores interpolados a cada 0.25 m. Estos parámetros estadísticos se presentan en la tabla 1.

El número de muestras por metro para los diferentes sondeos se indica en la figura 34. Para los sondeos SM-1, SM-4 y SM-5 resultó variable de 4 a 5.23 muestras por metro y para los sondeos SM-2 y SM-3 de 2.73 y 2.57 muestras por metro respectivamente.

El contenido de agua, $w\%$, en general, presenta valores mayores en la parte superior del subsuelo. Los valores pico se ubican en los primeros 15 m de profundidad.

Las tendencias globales de la variación en planta del valor medio del contenido de agua $w\%$ y de su desviación estándar por sondeo se presentan en las figuras 35 y 36 respectivamente. Los resultados obtenidos indican que en los sondeos SM-3 y SM-5 existen valores medios del contenido de agua más altos: 121 y 111% respectivamente.

Tomando en cuenta que en todos los sondeos, en los primeros 15 m se tienen los valores mayores (de 200 a 400%) del contenido de agua y de 15 a 60 m los menores (de 50 a 150%), se consideró que tomar los valores medios del contenido de agua de toda la profundidad estudiada no era conveniente puesto que sus propiedades son muy diferentes. Por lo anterior, se tomó la decisión de calcular nuevamente las tendencias globales de la variación en planta del valor medio del contenido de agua y de su desviación estándar por sondeo, pero ahora con estos dos rangos de profundidad.

En las figuras 37 y 38 se presentan las tendencias globales de la variación en planta del valor medio del contenido de agua para los rangos de profundidad de 0 a 15 m y de 15 a 60 m respectivamente. Para ambos rangos, al igual que para el análisis con la profundidad total (60 m), se encontró que los sondeos SM-3 y SM-5 son los que tienen los valores más altos. De 0 a 15 m de profundidad resultaron de 202 y 183% y de 15 a 60 m de 92 y 87%.

Para la profundidad total el valor de la desviación estándar en los sondeos SM-2 y SM-3 resultó mayor, de 96 y 106% respectivamente, contra 51, 79 y 94% de los otros tres sondeos. El coeficiente de variación está comprendido entre 0.50 y 0.74 con un valor típico del orden de 0.70.

En las tablas 2 y 3 se presentan los parámetros estadísticos de los dos rangos de profundidad. De 0 a 15 m de profundidad, la mayor desviación estándar correspondió a los sondeos SM-1, SM-3 y SM-5, con valores variables de 104 a 119%. Al sondeo SM-4 le correspondió el menor valor, con 55%. El coeficiente de variación está comprendido entre 0.52 y 0.79.

De 15 a 60 m de profundidad, la mayor desviación estándar resultó en los sondeos SM-3 y SM-5 con valores de 92 y 87%. El coeficiente de variación está comprendido entre 0.43 y 0.53.

En la figura 39 se presenta el histograma del contenido de agua para el conjunto de los cinco sondeos. Este tiene una forma asimétrica.

a.2) Tendencia vertical

Se analizó cada realización de los cinco sondeos ajustando una tendencia lineal y polinómica para evaluar si existía alguna tendencia global en el comportamiento de las señales con la profundidad. Se corroboró que efectivamente existe una deriva, al disminuir el contenido de agua con la profundidad, con lo que se propone una ecuación general que gobierne esta tendencia al ajustar un hiperplano a los datos de las cinco realizaciones consideradas. Las ecuaciones de las rectas ajustadas y la ecuación del hiperplano se encuentran en la tabla 4. Las gráficas de cada realización donde se presentan las tendencias se muestran en las figuras 29, 30, 31, 32 y 33.

Los coeficientes de los parámetros de espacio x , y , z correspondientes a la ecuación de la tendencia lineal global, muestran que la relación de decremento del contenido de agua con la profundidad z es de 2.15% por metro (muy similar al del sitio Tecámac, que fue de 2.75%), mientras que los coeficientes de los parámetros de espacio horizontales x , y son cercanos a cero (0.037 y 0.077). La variación del contenido de agua a una misma profundidad en diferentes puntos en planta es por tanto muy pequeña respecto a su variación vertical.

Si a cada uno de los datos muestreados del contenido de agua (de las cinco realizaciones) se resta el valor estimado por el hiperplano, o valor esperado en el campo aleatorio de análisis ($E\{w, \%\}$) se obtiene una nueva realización en cada sondeo. El histograma de la nueva población así definida (la global, considerando los cinco sondeos) se presenta en la figura 40. Este histograma es prácticamente simétrico y se aproxima a una función de tipo gaussiano, con media 0 % y desviación estándar 30.82%. Se volverá sobre este punto más adelante cuando se trate del modelo que rige el campo aleatorio.

a.3) Funciones de autocorrelación

Para evaluar el grado de relación lineal que existe entre los datos obtenidos en un mismo sondeo vertical, se obtiene el *coeficiente de autocorrelación vertical* ρ_V asociado a cada sondeo. Estas funciones, que se presentan en las figuras 41, 42, 43, 44 y 45, indican el grado de correlación lineal que guarda cada realización consigo misma conforme se desfasa una distancia d , (constante entre los datos de una misma realización) verticalmente. Para $d_v = 0$, el *coeficiente de autocorrelación* ρ_V , es 1, y conforme el desfaseamiento aumenta tiende a disminuir.

Los coeficientes de autocorrelación verticales en el sitio Sosa Texcoco fueron obtenidos usando tres tipos de registros: realizaciones continuas con datos interpolados linealmente a cada 1 m; realizaciones continuas con datos interpolados linealmente a cada 0.25 m y finalmente, realizaciones continuas sin la tendencia lineal global (caso gaussiano), con datos interpolados linealmente a cada 0.25 m. La diferencia entre los tres tipos de análisis revela que la influencia de la "continuidad" del muestreo de los datos es poco significativa. Al remover la tendencia de las señales disminuye en general la distancia de influencia.

Es poco común que en medios estratificados se encuentren diferencias entre los coeficientes de autocorrelación vertical de cada sondeo y el sitio Sosa Texcoco, al igual que el sitio Tecámac, no es la excepción. Las cinco funciones de autocorrelación se abaten para una distancia de influencia de aproximadamente 2 m (igual que en Tecámac), y después mantienen un comportamiento muy irregular, puesto que ningún sondeo es por lo menos semi-armónico, lo cual indica que no existen estratos que induzcan una pseudo-periodicidad en las realizaciones.

Para definir la función de correlación general vertical del campo, se tomó en cuenta la media de los cinco sondeos y se presenta en la figura 46. Esta representa el "modelo de correlación vertical del campo aleatorio".

b) Análisis de la variación horizontal del contenido de agua (funciones de correlación cruzada).

Para evaluar el comportamiento aleatorio que presenta el contenido de agua horizontalmente es necesario evaluar el grado de correlación lineal que guarda un sondeo con otro. En forma similar a lo realizado en la dirección vertical, se obtuvo una función "modelo" de correlación horizontal entre valores de contenido de agua en puntos localizados a una distancia horizontal d_H .

La *función de correlación cruzada* se obtiene comparando dos poblaciones diferentes, o dos sondeos diferentes, los cuales tienen un comportamiento particular con la profundidad. Si se compara la relación que tienen ambas poblaciones utilizando el coeficiente de correlación para una distancia de desfaseamiento vertical $d_v = 0$ se obtiene el coeficiente de correlación horizontal entre ambas poblaciones ρ_H . El valor de este coeficiente es de uno para una distancia horizontal entre sondeos $d_H = 0$, y tiende a disminuir conforme aumenta la distancia entre los sondeos.

Para obtener el "modelo de correlación horizontal del campo aleatorio" es necesario evaluar la correlación cruzada entre todos los sondeos uno contra otro. En este caso se obtiene un número total de valores de correlación "combinando" los cinco sondeos tomados de dos en dos a la vez (10 combinaciones), para los cuales se considera la distancia de análisis entre uno y otro sondeo d_H . La función de correlación cruzada obtenida de esta forma en los cinco casos genera el "modelo de correlación horizontal del campo aleatorio", el cual se presenta en la figura 47.

Debido a la diferencia en contenido de agua en la parte superior e inferior, se obtuvo un "modelo de correlación horizontal del campo aleatorio" para cada uno de los dos rangos de profundidad, los cuales se presentan en las figuras 48 y 49.

3.2.3.2 Resistencia de cono, q_c (kg/cm^2)

En el predio en estudio se realizaron 12 sondeos de cono eléctrico, 8 a 60 m de profundidad y los 4 restantes a 30 m, utilizando un cono eléctrico de 2,000 kg de capacidad y 10 cm^2 de área transversal, en suelos con poca o mediana resistencia, alternando con el avance por medio de corona de carburo tungsteno de diámetro NQ (6.99 cm) en suelos compactos y/o cementado.

Debido a que se realizó el análisis estadístico del contenido de agua hasta los 60 m de profundidad, con la finalidad de estudiar la misma población, para los análisis de resistencia de cono solo se utilizaron los 8 sondeos que se ejecutaron a esta misma profundidad.

Cabe aclarar que la resistencia de cono (q_c) está limitada por la capacidad del aparato, en este caso la máxima resistencia que puede medir es $200 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Sin embargo, en pocas ocasiones se alcanzó esta resistencia.

La variable del contenido de agua se comporta en forma inversamente proporcional con la variable de la resistencia de cono, es decir, a mayor contenido de agua menor resistencia.

a) Análisis de los perfiles verticales de la resistencia de cono (q_c)

a.1) Histogramas, valores medios y variabilidad entre sondeos

Los perfiles de la resistencia de cono fueron prácticamente continuos, obteniéndose una prueba a cada 0.10 m, a excepción de los sitios donde se extrajeron muestras de suelos compactos y/o cementados con corona de carburo de tungsteno (figuras 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56 y 57).

Primeramente se obtuvieron los parámetros estadísticos básicos de los perfiles verticales (tabla 5), de los cuales se destaca lo siguiente:

Para cada perfil se calculó el número de pruebas por metro, obteniéndose la media de los ocho sondeos de 6.42 pbas/m, con una desviación estándar de 0.84 pbas/m. Este valor en el sondeo SC-1 resultó muy bajo (5 pbas/m) debido a que de 26.8 a 35.9 m y de 44.6 a 50.2 m de profundidad se encontraron suelos compactos y por lo tanto no se pudieron probar con el cono.

De los perfiles de la resistencia de cono se concluye que los primeros 15 m son los que contienen a los suelos de menor resistencia, variable de 0 a 3 kg/cm².

El valor medio de siete de los ocho sondeos (excepto el SC-1) varía entre 22.4 y 25.7 kg/cm² y su desviación estándar de 26.8 a 32.4 kg/cm². En el SC-1 los valores fueron menores (16 y 22.1 kg/cm² respectivamente) debido a que el número de muestras es menor que en los otros sondeos.

En las figuras 58 y 59 se presentan las tendencias globales de la media y desviación estándar de la resistencia a la penetración estándar, utilizando el método Kriging como algoritmo de interpolación, mediante el programa SURFER. En términos generales se puede concluir que la zona de los sondeos SC-8, SC-10 y SC-11 es la que presenta la resistencia mayor.

El coeficiente de variación está comprendido entre 1.117 a 1.44, con valores típicos de 1.24.

Al igual que para el contenido de agua, se calcularon las tendencias globales de la variación en planta del valor medio de la resistencia de cono y de su desviación estándar por sondeo, en los mismos rangos de profundidad (de 0 a 15 m y de 15 a 60 m).

En las figuras 60 y 61 se presentan las tendencias globales de la variación en planta del valor medio de la resistencia de cono para los rangos de profundidad de 0 a 15 m y de 15 a 60 m respectivamente. Para ambos rangos, la zona de los sondeos SC-8, SC-10 y SC-11 es la que presenta la resistencia mayor. De 0 a 15 m de profundidad resultaron de 17 a 28 kg/cm² y de 15 a 60 m, de 44 a 52 kg/cm².

En las tablas 6 y 7 se presentan los parámetros estadísticos de los dos rangos de profundidad. De 0 a 15 m de profundidad, la mayor desviación estándar correspondió a los sondeos SC-6, SC-8, SC-11 y SC-12, con valores variables de 36 a 45 kg/cm². El coeficiente de variación está comprendido entre 1.6 y 2.1.

De 15 a 60 m de profundidad, la mayor desviación estándar resultó en los sondeos SC-3, SC-10 y SC-11 con valores de 47 a 52 kg/cm². El coeficiente de variación está comprendido entre 0.72 y 0.85.

En la figura 62 se presenta el histograma de la población global, el cual es asimétrico y concentra la mayor frecuencia entre 7 y 37 kg/cm².

a.2) Tendencia vertical

Sobre cada uno de los perfiles de la resistencia de cono se ajustó una línea de tendencia lineal y polinómica, para determinar si existía alguna tendencia global en el comportamiento de la señal con la profundidad. En las figuras 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56 y 57 se presentan estas gráficas. De ellas se concluye que efectivamente hay una tendencia general, la cual indica que a medida que aumenta la profundidad aumenta también la resistencia ala penetración estándar. Para una profundidad igual a cero, la tendencia indica que la resistencia tiene valores positivos (de 3.8 a 18.4 kg/cm²). Se propone una ecuación general que gobierne esta tendencia al ajustar un hiperplano (regresión lineal) a los datos de las ocho realizaciones. Las ecuaciones de las rectas ajustadas y la ecuación del hiperplano se presentan en la tabla 8.

De los coeficientes de la ecuación de tendencia lineal global se concluye que para el parámetro z (profundidad) la variable resistencia de cono eléctrico disminuye 0.52% por metro. Los parámetros de espacio x , y son prácticamente igual a cero, lo que indica que la variación en planta de la resistencia es muy pequeña de un sitio a otro del predio.

Si a cada uno de los datos muestreados de la resistencia en los diez sondeos se le resta el valor estimado por el hiperplano, o valor esperado en el campo aleatorio de análisis $E(q_c)$ se obtiene una nueva realización en cada sondeo. El histograma de la nueva población así definida (la global considerando los ocho sondeos) se presenta en la figura 63. Este histograma es simétrico (gaussiano).

a.3) Funciones de autocorrelación

Para evaluar el grado de relación lineal que existe entre los datos obtenidos en un mismo sondeo vertical, se obtiene el *coeficiente de autocorrelación vertical* ρ_v asociado a cada sondeo. Estas funciones, que se presentan en las figuras 64, 65, 66, 67, 68, 69 y 70, indican el grado de correlación lineal que guarda cada realización consigo misma conforme se desfasa una distancia d_v (constante entre los datos de una misma realización) verticalmente. Para $d_v = 0$, el coeficiente de autocorrelación ρ_v es 1, y conforme el desfaseamiento aumenta tiende a disminuir.

Los coeficientes de autocorrelación verticales fueron obtenidos usando tres tipos de registros: realizaciones continuas con datos interpolados linealmente a cada 1 m; realizaciones continuas con datos interpolados linealmente a cada 0,1 m y finalmente, realizaciones continuas sin la tendencia lineal global (caso gaussiano), con datos interpolados linealmente a cada 0,1 m. Con estos análisis se corrobora lo encontrado en el caso del contenido de agua, es decir, en los ocho sondeos los tres tipos de función de autocorrelación se abaten para una distancia de influencia de aproximadamente 2 m. En los sondeos SC-1, SC-8, SC-11 y SC-12 el comportamiento es semiarmónico.

La función de correlación general vertical del campo fue definida a partir de la media de los ocho sondeos, y se presenta en la figura 71. Esta representa el "modelo de correlación vertical del campo aleatorio".

b) Análisis de la variación horizontal de la resistencia de cono (funciones de correlación cruzada).

Para evaluar el comportamiento aleatorio que presenta la resistencia de cono horizontalmente es necesario evaluar el grado de correlación lineal que guarda un sondeo con otro. En forma similar a lo realizado en la dirección vertical, se obtuvo una función "modelo" de correlación horizontal entre valores de la resistencia a la penetración estándar en puntos localizados a una distancia horizontal d_H .

La función de correlación cruzada se obtiene comparando dos poblaciones diferentes, o dos sondeos diferentes, los cuales tienen un comportamiento particular con la profundidad. Si se compara la relación que tienen ambas poblaciones utilizando el coeficiente de correlación para una distancia de desfase vertical $d_v = 0$ se obtiene el coeficiente de correlación vertical ρ_H de correlación horizontal entre ambas poblaciones. El valor de este coeficiente es de uno para una distancia horizontal entre sondeos $d_H = 0$, y tiende a disminuir conforme aumenta la distancia entre los sondeos.

Para obtener el "modelo de correlación horizontal del campo aleatorio" es necesario evaluar la correlación cruzada entre todos los sondeos uno contra otro. En este caso, al igual que para el contenido de agua, se obtiene un número total de valores de correlación "combinando" los ocho sondeos tomados de dos en dos a la vez (28 combinaciones), para los cuales se considera la distancia de análisis entre uno y otro sondeo d_H . La función de correlación cruzada obtenida de esta forma en los 28 casos genera el "modelo de correlación horizontal del campo aleatorio", el cual se presenta en la figura 72.

En este caso también se obtuvieron los "modelos de correlación horizontal del campo aleatorio" para cada uno de los dos rangos de profundidad, los cuales se presentan en las figuras 73 y 74.

3.2.3.3 Cortes virtuales

a) Contenido de agua, $w\%$

Se definieron tres cortes longitudinales y tres transversales formados por sondeos virtuales contiguos a cada 10 m, a lo largo y ancho del terreno (cortes A a F de la figura 2). En las figuras 75, 76, 77, 78, 79 y 80 se presenta el valor esperado de contenido de agua y en las figuras 81, 82, 83, 84, 85 y 86 la desviación estándar, desde la superficie hasta 60 m de profundidad.

Con la finalidad de simplificar la interpretación de los cortes virtuales (verlos todos en conjunto) se construyeron modelos físicos impresos a color en acetatos que permiten integrar los cortes longitudinales y transversales y visualizar de manera tridimensional la variación estratigráfica. En las figuras 87, 88 y 89 se presentan vistas de estos modelos físicos.

b) Resistencia de cono, q_c (kg/cm^2)

Al igual que para el contenido de agua, se definieron tres cortes longitudinales y tres transversales formados por sondeos virtuales contiguos a cada 10 m, a lo largo y ancho del terreno (cortes A a F de la figura 2). En las figuras 90, 91, 92, 93, 94 y 95 se presenta el valor esperado de resistencia de cono y en

las figuras 96, 97, 98, 99, 100 y 101 la desviación estándar, desde la superficie hasta 60 m de profundidad.

Con la finalidad de simplificar la interpretación de los cortes virtuales (verlos todos en conjunto) se construyeron modelos físicos impresos a color en acetatos que permiten integrar los cortes longitudinales y transversales y visualizar de manera tridimensional la variación estratigráfica. En las figuras 102, 103 y 104 se presentan vistas de estos modelos físicos.

3.2.4 Interpretación geoestadística basada en la resistencia de cono eléctrico (q_c) y en el contenido de agua (w).

Tomando en cuenta la información disponible del estudio geotécnico, el análisis geoestadístico se realizó considerando los siguientes sondeos:

Contenido de agua

- Se utilizaron cinco sondeos mixtos (SM-1, SM-2, SM-3, SM-4 y SM-5) con información de 0 a 60 m de profundidad (ver figura 2).

Resistencia de cono eléctrico

- De 0 a 15 m de profundidad se utilizaron diez sondeos (SC-1, SC-2, SC-3, SC-4, SC-6, SC-7, SC-8, SC-9, SC-10 y SC-12).
- De 15 a 60 m de profundidad se utilizaron ocho sondeos (SC-1, SC-3, SC-4, SC-6, SC-8, SC-10, SC-11 y SC-12).

Observando el comportamiento de la distribución de ambos parámetros (contenido de agua y resistencia de cono eléctrico) en los perfiles estratigráficos de los sondeos, se consideró que existen dos tipos de material claramente identificables, uno de baja resistencia, de 0 a 15 m de profundidad y otro cuya resistencia es mayor, de 15 a 60 m. Por esta razón se determinó realizar el análisis geoestadístico en estas dos poblaciones.

Conviene aclarar que, para el suelo de este predio, el parámetro de resistencia de cono eléctrico tiene cambios muy bruscos de resistencia en profundidades relativamente pequeñas. Por ejemplo, puede variar de 3 a 130 kg/cm² de resistencia en 50 cm de profundidad, debido a la presencia de lentes muy duros.

En el predio se definieron tres cortes longitudinales y tres transversales, formados por sondeos virtuales separados a cada 10 m. En el programa de estimación condicional, en teoría podríamos utilizar un número ilimitado de datos por estimar; sin embargo, con el fin de optimizar la capacidad de memoria de la computadora y el tiempo de ejecución de los programas, dados los tamaños de las matrices de cálculo, en cada tramo analizado (en este caso de 0 a 15 y de 15 a 60 m de profundidad) se tiene un máximo de 20 datos por estimar. De esta manera, de 0 a 15 m de profundidad se estimó el valor esperado y la desviación estándar a cada 0.79 m y de 15 a 60 se estimaron a cada 2.37 m.

En forma similar que para los análisis del predio de Tecámac, y con la finalidad de identificar de manera práctica las zonas más o menos convenientes para el asentamiento de los edificios de la planta de tratamiento, se hará primero referencia a los suelos “blandos” y “firmes”. Los primeros corresponden a resistencia menor de 20 kg/cm² y los segundos a una mayor a 50 kg/cm². Con relación al contenido de agua, esta clasificación corresponde a valores mayores de 100% y menores de 50% respectivamente.

Para la graficación de los sondeos virtuales se consideraron los siguientes rangos de valores:

- Contenido de agua: de 0 a 400%, con rangos a cada 50%.
- Resistencia de cono eléctrico: de 0 a 160 kg/cm², con rangos a cada 20 kg/cm².

Con base en los análisis realizados se observó que en los 15 m superficiales el rango de valores de contenido de agua es muy amplio, es decir, varía de 20% para lentes duros hasta 370% en suelos arcillosos blandos. Con relación a la prueba de cono eléctrico, el rango de valores es también amplio (de 0 a 120 kg/cm²), pero solo en lentes o estratos delgados (del orden de 1.5 m de espesor). En la mayor parte del suelo de estos 15 m superficiales la resistencia es variable de 0 a 10 kg/cm². Por lo anterior (y al igual que en el caso de la resistencia a la penetración estándar), se puede concluir que la prueba de cono eléctrico no distingue un suelo si tiene un contenido de agua variable de 100 a 370%, puesto que en este amplio rango la resistencia es variable de 0 a 10 kg/cm².

Con la finalidad de conocer con más detalle la distribución de la resistencia de cono eléctrico en los estratos donde se desplantarían las cimentaciones superficiales, para los 15 m superficiales se graficaron cortes virtuales de 0 a 160 kg/cm², con rangos a cada 10 kg/cm². En las figuras 105, 106, 107, 108, 109 y 110 se presenta el valor esperado de resistencia de cono.

Suelos blandos

Con base en el análisis de resistencia de cono, se observa que en todo el predio, de 0 a 15 m de profundidad se encuentra un estrato continuo de suelo blando (aunque de 8 a 10 y de 11 a 13 m hay dos capas resistentes, así como algunos lentes firmes). El valor esperado en este estrato es de 0.5 a 20 kg/cm². Con el análisis de contenido de agua se identificaron substratos, cuyas propiedades son las siguientes: Existen cuatro substratos bien definidos de espesores variables de 1 a 3 m. Sus profundidades aproximadas son de 0.8 a 1.8 m, de 4.8 a 7.2, de 8.8 a 10.4 y de 11.5 a 14.5. El contenido de agua esperado es variable de 150 a 280%.

En prácticamente todo el terreno, de 1.8 a 4.8 m de profundidad se encontró el estrato de suelo más blando de predio, en el cual se esperan valores de contenido de agua de 250 a 380%. Este estrato desaparece cerca de los sondeos SM-1 y SM-4.

Un segundo estrato blando, prácticamente continuo, se localiza de 19 a 23 m de profundidad. Es estrato se observa más claramente en los cortes del cono y se desvanece en la parte central y oriente del predio (sondeos SC- 5, SC-6, SC-9 y SC-10). El valor esperado de la resistencia es de 0.7 a 18 kg/cm² y el de contenido de agua de 20 a 100%.

Un tercer estrato blando continuo se localiza de 35 a 40 m de profundidad. El valor esperado de la resistencia es de 0.4 a 20 kg/cm². El menor espesor existe al poniente (sondeos SC-1, SC-2, SC-7 y SC-8), siendo éste de 2.8 m aproximadamente. El mayor espesor se presenta al sur-oriente del predio (sondeos SC-4, SC-12, y SC-11), alcanzando 5 m como máximo. El contenido de agua que se puede esperar de este estrato varía de 40 a 120%.

Un cuarto estrato semi-continuo se localiza al nor-poniente del predio, entre 50 y 60 m de profundidad, y su espesor es variable de 5 a 10 m. Este estrato, en general, espera valores de 1 a 20 kg/cm², aunque contiene algunos estratos pequeños de mayor resistencia. Esta capa no se detecta en los sondeos SC-4, SC-11 y SC-12. El contenido de agua esperado es de 40 a 90%.

Suelos firmes

Interestratificados con los estratos de suelo blando mencionados para la profundidad de 0 a 15 m, existen suelos resistentes cuyo contenido de agua esperado varía de 40 a 100%.

De 7 a 8.5 m de profundidad se encontró el primer estrato firme, cuyo valor esperado varía de 20 a 55 kg/cm². En los sondeos SC-2, 3 y 12, desaparece este estrato. De 20 a 140% es el valor del contenido de agua que se puede esperar de este material.

El segundo estrato firme se encuentra entre 11 y 13.5-15 m de profundidad y es continuo en todo el predio. En los sitios de los sondeos SC-4, SC-6, SC-8, SC-9 y SC-12 se encuentran los más resistentes, alcanzando valores hasta de 140 kg/cm². En este estrato se esperan valores de 20 a 120% de contenido de agua.

De 15 a 35.5 m de profundidad se encuentra una interestratificación de materiales firmes. Aproximadamente cada 5 m hay cambios de resistencia bien marcados, variando en valores extremos de 20 a 140 kg/cm². El contenido de agua máximo que se puede esperar es de 135%. En los sitios de los sondeos SC-2, SC-6, SC-9 y SC-10 se encontraron los suelos más resistentes y en los sondeos SC-1, SC-8 y SC-12 los menores.

En la zona de los sondeos SC-9 y SC-10, de 40 a 50 m de profundidad se encuentra un estrato semi-continuo de suelo firme. Los valores esperados son de hasta 150 kg/cm². En los sitios de los sondeos SC-4, SC-11 y SC-12 este suelo firme se extiende hasta los 60 m de profundidad y alcanza valores máximos de 135 kg/cm². El contenido de agua que se puede esperar de este suelo es variable de 45 a 120%.

Incertidumbre en la repartición espacial

En todos los cortes virtuales de distribución de la incertidumbre, en las zonas próximas a los sitios de los sondeos se presentan los menores valores. Esto es lógico puesto que en estos sitios existe información conocida (sondeo real). Con ésta se forman los mencionados "bulbos que dan luz".

La mayor incertidumbre se encuentra en las zonas alejadas de los sondeos, es decir, donde la distancia de estos puntos a un valor conocido (real de sondeo) es mayor. Esto se debe a que para el cálculo de la varianza condicional y por lo tanto de la desviación estándar se necesita el coeficiente de correlación.

Este coeficiente representa el grado de correlación lineal existente entre el valor estimado y el valor conocido. Se espera entonces que esta correlación y la influencia del valor conocido sobre el estimado se pierdan cuando el dominio de estimación se aleja del dominio conocido. Asimismo, mientras más cerca se encuentre el dominio estimado del conocido, la incertidumbre será menor. Con base en lo anterior, la mayor incertidumbre se encontró en las zonas comprendidas entre los sondeos y en los extremos de los cortes virtuales.

Para el parámetro del contenido de agua la escala seleccionada para la graficación de los cortes virtuales de la incertidumbre inicia en 10%, tiene un máximo de 90% y rangos a cada 10%.

El valor de la incertidumbre (desviación estándar) está directamente relacionado con la población que se utilice para el análisis. Por ejemplo, para el horizonte de 0 a 15 m de profundidad resultó una media de contenido de agua de 155% y para el de 15 a 60 m de profundidad una media de 84%. Es lógico esperar que la desviación estándar sea mayor en el primer horizonte que el segundo. De 0 a 15 m de profundidad, del análisis de parámetros estadísticos básicos resultó una desviación estándar media de 97% y con el análisis geoestadístico dieron valores variables entre 10 y 90 %. Para la profundidad de 15 a 60 m dio una desviación estándar media de 41% y con el análisis geoestadístico se obtuvieron valores variables entre 10 y 40 %.

Para la resistencia de cono eléctrico, la escala seleccionada para la graficación de los cortes virtuales de la incertidumbre inicia en 5 kg/cm², tiene un máximo de 35 kg/cm² y rangos a cada 5 kg/cm².

Para el análisis de resistencia de cono eléctrico, de 0 a 15 m de profundidad, resultó una media de 18 kg/cm² y para el de 15 a 60 m una media de 44 kg/cm². Del análisis de parámetros estadísticos básicos, de 0 a 15 m resultó una desviación estándar media de 33 kg/cm² y con el análisis geoestadístico dieron valores variables entre 10 y 16 kg/cm². Para la profundidad de 15 a 60 m dio una desviación estándar media de 34 kg/cm² y con el análisis estadístico se obtuvieron valores variables entre 10 y 26 kg/cm², predominando los valores de 10 a 18 kg/cm².

Los valores menores de la incertidumbre (10 a 14 kg/cm²) se localizaron siempre cercanos a los sondeos y los valores mayores (de 18 a 26 kg/cm²) en las zonas alejadas. Esto último se observa especialmente en los extremos del corte E de cono eléctrico. Es lógico esperar estos resultados debido a que este corte se localizó solo un sondeo real (SC-6).

Al igual que en el análisis del predio Tecámac, se comprobó que lo que más influye en la definición de cada parámetro no es la distancia del punto por estimar al punto conocido sino la varianza existente en el medio. Por ejemplo, para el contenido de agua, la mayor incertidumbre resultó considerablemente mayor en el primer horizonte (los 15 m superficiales) debido a que en éste se presenta el mayor valor de la varianza, esto condicionado por la existencia de mayores valores de contenido de agua.

3.2.5 Estratigrafía basada en la resistencia de cono y el contenido de agua

A continuación se describe la estratigrafía continua en las dimensiones x , y , z , que toma en cuenta los resultados del análisis geoestadístico del contenido de agua y la resistencia de cono eléctrico.

En general, se puede comentar que los estratos que se observan en los cortes del modelo impreso en acetatos, correspondientes al valor esperado condicional del contenido de agua, concuerdan en general con los de la resistencia de cono eléctrico. Con base en los modelos impresos en acetatos, los echados y el orden de magnitud con que se presentan los estratos de contenido de agua y cono eléctrico quedan aceptablemente corroborados. Sin embargo, en ocasiones existe cierta discontinuidad y erraticidad en los mismos.

Existen dos condiciones en las cuales no existe buena concordancia de los dos análisis (w y q_c):

- La primera corresponde a los suelos poco resistentes de los 15 m superficiales, donde el contenido de agua varía de 100 a 370% y se observan interestratificaciones de suelos blandos. En el análisis de cono eléctrico no se delimitan bien los diferentes estratos, a pesar de que las gráficas se conformaron con rangos a cada 10 y 20 kg/cm^2 .
- En el caso contrario, en los suelos firmes comprendidos de los 40 a los 60 m de profundidad, donde el contenido de agua varía de 50 a 110% se observa poca variación en la gráfica de rangos a cada 50%. En este caso, en el análisis de cono eléctrico si se delimitan algunos estratos adicionales.

Debajo de los 20 m de profundidad, existen algunas discrepancias en cuanto a la continuidad horizontal de los estratos. Los estratos de w y q_c bajo esta profundidad aparecen discontinuos y con características diferentes en los diferentes cortes del terreno. Sin embargo, bajo esta profundidad las características del suelo son significativamente mejores en resistencia y deformabilidad respecto a los estratos que se ubican arriba de este nivel.

A fin de comprender la continuidad estratigráfica, se recurre a la descripción de suelos blandos y firmes considerada en la interpretación del análisis geoestadístico. Los suelos intermedios se omiten.

Secuencia estratigráfica

Con la finalidad de tener un modelo estratigráfico para la interpretación ingenieril, se consideran los siguientes estratos:

a) Primer estrato: estrato blando, continuo.

Se observa únicamente en los cortes de contenido de agua y se presenta debajo de la costra desecada, entre 0.5 y 2.2-3 m de profundidad. Los valores esperados del contenido de agua están comprendidos entre 100 y 250% y los del valor de q_c entre 1 y 20 kg/cm^2 . Su mayor estrato se presenta cerca del sondeo SC-10. El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 90% para el w y de 16 kg/cm^2 para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

b) Segundo estrato: estrato muy blando, continuo.

También se observa únicamente en los cortes de contenido de agua, se ubica bajo el primer estrato blando y tiene un espesor medio de 1.5 m. Alcanza su máximo espesor (2.5 m) y tiene su límite superior a 2 m de profundidad, cerca de los sondeos SM-3 y SM-5. Este estrato desaparece en la zona del sondeo SM-4. El valor esperado de contenido de agua para este estrato está comprendido entre 300

y 370%, en tanto que el valor de q_c oscila entre 1 y 20 kg/cm². El nivel de incertidumbre máximo en este estrato es de 90% para el w y de 16 kg/cm² para q_c en las zonas más alejadas a un sondeo real.

c) Tercer estrato: estrato blando, continuo.

Presenta propiedades similares al primer estrato, es decir, valores esperados del contenido de agua comprendidos entre 100 y 250% y los del valor de q_c entre 1 y 20 kg/cm². Su espesor es de 3 m y su límite mínimo inferior se encuentra a 8 m de profundidad. Este estrato se identifica claramente solo en el análisis de w . El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 90% para el w y de 16 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

d) Cuarto estrato: estrato firme, continuo.

Se extiende en prácticamente toda la superficie del predio, a excepción de la zona del sondeo SC-2. Su límite máximo superior se encuentra a los 8 m de profundidad. Su espesor es variable (0.5 a 1.5 m), y tiene un valor esperado de contenido de agua entre 100 y 150%, con valores de q_c entre 20 y 80 kg/cm². El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 90% para el w y de 16 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

e) Quinto estrato, estrato blando, continuo.

Se presenta debajo del cuarto estrato, su espesor es de 0.5 m y su límite mínimo inferior se encuentra a 10.5 m de profundidad. Este estrato se identifica claramente solo en el análisis de w . Los valores esperados del contenido de agua están comprendidos entre 100 y 250% y los del valor de q_c entre 1 y 20 kg/cm². El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 90% para el w y de 16 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

f) Sexto estrato: estrato firme, continuo.

Se presenta en toda la superficie del predio. Su límite máximo superior se encuentra a los 10.5 m de profundidad. Su espesor medio es de 2 m y tiene un valor esperado de contenido de agua entre 80 y 150%, con valores de q_c entre 40 y 120 kg/cm². El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 90% para el w y de 16 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

g) Séptimo estrato: estrato blando, continuo.

Tiene un echado de norte a sur. Se desarrolla de 13.5 a 16.5 m de profundidad. El máximo espesor se presenta en la zona del sondeo SM-3. Este estrato se identifica claramente en ambos análisis (w y q_c). Los valores esperados del contenido de agua están comprendidos entre 80 y 200% y los del valor de q_c entre 5 y 14 kg/cm². El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 90% para el w y de 16 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

h) Octavo estrato: estrato firme, continuo.

Se presenta en toda la superficie del predio. Su límite máximo superior se encuentra a los 16.5 m de profundidad. Su espesor medio es de 3.5 m y tiene un valor esperado de contenido de agua entre 20 y 100%, con valores de q_c entre 25 y 90 kg/cm². El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 50% para el w y de 35 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

i) Noveno estrato: estrato blando, continuo,

Tiene un echado de poniente a oriente. Se desarrolla de 19 a 21.5 m de profundidad. El máximo espesor se presenta en la zona de los sondeos SC-2 y SM-1. Este estrato se identifica claramente solo en el análisis de q_c . Los valores esperados del contenido de agua están comprendidos entre 40 y 180% y los del valor de q_c entre 5 y 35 kg/cm². El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 50% para el w y de 35 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

j) Décimo estrato: estrato firme, continuo.

Se presenta en toda la superficie del predio. Su límite máximo superior se encuentra a los 21.5 m de profundidad. Tiene un echado de oriente a poniente. Su espesor es variable de 3 a 5.5 m. En general presenta valores esperados de contenido de agua entre 20 y 100%, con valores de q_c entre 25 y 90 kg/cm². Aunque contiene lentes muy duros en las zonas de los sondeos SC-11 y SC-2, con resistencias máximas de 105 y 145 kg/cm² respectivamente. El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 50% para el w y de 35 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

k) Interestratificación de suelos blandos y firmes, semi continuos

Solo se encontró en los cortes de q_c . Se localizan de 21.5 a 38 m. Tienen espesores medios de 2.5 m. En la zona nor-oriente del predio (sondeos SC-8, SC-9 y SC-10) se presentan los mayores espesores de suelo firme, alcanzando hasta 3.5 m. Los suelos blandos presentan valores esperados de contenido de agua entre 100 y 150%, con valores de q_c entre 15 y 60 kg/cm². Los suelos firmes presentan valores esperados de contenido de agua entre 40 y 120%, con valores de q_c entre 45 y 120 kg/cm². El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 50% para el w y de 35 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

l) Décimo primer estrato: estrato blando, continuo,

Su profundidad varía de 38 a 43 m de profundidad. El máximo espesor se presenta en la zona de los sondeos SC-4 y SC-12. Este estrato se identifica claramente solo en el análisis de q_c . Los valores esperados del contenido de agua están comprendidos entre 100 y 150% y los del valor de q_c entre 10 y 45 kg/cm². El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 50% para el w y de 35 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

m) Duodécimo estrato: estrato firme, semi-continuo.

Se presenta en toda la superficie del predio, excepto en la zona del sondeo SC-1. Se extiende desde los 43 a los 47.5 m de profundidad. Su espesor es variable de 3 a 4.5 m. En general presenta valores esperados de contenido de agua entre 20 y 80%, con valores de q_c entre 15 y 60 kg/cm², aunque en la zona de los sondeos SC-9 y SC-10 se presentan resistencias máximas de 135 kg/cm². El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 50% para el w y de 35 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

Desde los 47.5 hasta los 60 m de profundidad se detectaron estratos y subestratos semicontinuos de suelos blandos y firmes. Los suelos blandos presentan valores esperados de contenido de agua entre 60 y 150%, con valores de q_c entre 15 y 40 kg/cm². Los suelos firmes presentan valores esperados de contenido de agua entre 20 y 80%, con valores de q_c entre 45 y 100 kg/cm². El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 50% para el w y de 35 kg/cm² para q_c . Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real.

3.3 Análisis del subsuelo en el sitio "Tecámac"

3.3.1 Exploraciones realizadas

3.3.1.1 Objetivos de la campaña

La campaña de exploración geotécnica fue diseñada atendiendo principalmente a los siguientes objetivos:

Investigar las condiciones del subsuelo en toda el área disponible para la planta, debido a que no se cuenta con algún anteproyecto que pudiera concentrar la atención en alguna zona en particular.

Investigar la posible influencia del puerto geológico formado por la Sierra de Guadalupe y del Cerro de Chiconaufla en las condiciones del subsuelo, específicamente en la variación de la potencia de los estratos compresibles superficiales y profundos.

Conocer con detalle las condiciones piezométricas del agua del subsuelo.

Conocer con detalle los asentamientos regionales en la zona de interés.

3.3.1.2 Tipo y número de sondeos e instrumentos

Con base en los objetivos planteados se consideró necesario realizar la siguiente campaña de exploración geotécnica (figura 111):

- Ejecución de seis sondeos mixtos (SM). Cuatro a 30 m de profundidad y dos a 60 m, alternando el hincado de tubos de pared delgada tipo Shelby, de 10.16 cm de diámetro en suelos arcillosos blandos, hincado con rotación de tubos dentados tipo Shelby de 10.16 cm de diámetro en suelos arcillosos de consistencia media a rígida, recuperación de muestras inalteradas de arcilla dura por medio de barril doble giratorio de 7.62 cm de diámetro y prueba de Penetración Estándar en suelos granulares o arcillosos duros.
- Ejecución de 3 sondeos de cono eléctrico (SCE), a 15 m de profundidad, utilizando un cono eléctrico de 2,000 kg de capacidad y 10 cm² de área transversal en suelos con poca o mediana resistencia, alternando con el avance por medio de corona de carburo de tungsteno de diámetro NQ (6.99 cm) en suelos compactos y/o cementados.
- Ejecución de 4 pozos a cielo abierto (PCA) a 4 m de profundidad, excavados con pico y pala, incluyendo el levantamiento del perfil estratigráfico, muestreo inalterado obteniendo muestras cúbicas en los principales estratos, muestreo alterado obteniendo muestras representativas de cada uno de los estratos encontrados, pruebas de resistencia al corte no drenada realizadas con torcómetro de bolsillo en los suelos arcillosos, perfil fotográfico de cada uno de los pozos excavados y finalmente extracción de muestras alteradas (4 en total) para su análisis químico.

- Instalación de 9 piezómetros abiertos tipo Casagrande (PZ). Siete localizados entre 8 y 18 m de profundidad, uno a 30 m y el restante a 60 m, aproximadamente, situados en diferentes estaciones piezométricas localizadas según se muestra en la figura 111.
- Instalación de 4 pozos de observación (PO) del nivel freático, tres con una profundidad variable entre 4 y 6 m, y el restante a 8 m aproximadamente, localizados como se muestra en la figura 111.
- Instalación de 3 bancos de nivel profundos (BNP), desplantados a 15, 30 y 60 m de profundidad, aproximadamente, situados según la figura 111.

3.3.2 Interpretación tradicional

3.3.2.1 Estratigrafía

A la vista de los resultados de campo y laboratorio se ha intentado dividir al subsuelo en “paquetes” o “formaciones” para la descripción estratigráfica. Cuando ha sido posible se ha utilizado la nomenclatura comúnmente empleada para las formaciones del subsuelo en la Cuenca de México.

Cabe aclarar que, dada la erraticidad encontrada en algunas de las “formaciones” del subsuelo, principalmente por debajo de los 15 m, hacen difícil su integración en paquetes o formaciones para la descripción del subsuelo. Sin embargo, se ha tomado el riesgo en aras de lograr una visualización simple del subsuelo.

Se han elaborado los cortes A-A' y B-B' (figuras 112 y 113) localizados en la figura 111, que son solo interpretaciones “artísticas” de lo hallado en los perfiles estratigráficos que los forman. Carecen de validez para diseño, pero se presentan para una visualización gráfica de lo que se pretende describir en lo que sigue.

Esquemáticamente se puede decir que el subsuelo, desde 0 hasta 60 m, está compuesto por siete “formaciones” principales, que, para efectos de este informe, se denominarán:

1) **Costra desecada (CS):** prof. 0.0 - 1 a 1.5 m

Compuesta principalmente de arcilla café o gris con varias tonalidades, con limo y raicillas, de alta plasticidad, con un espesor que fluctúa entre 1 a 1.5 m. El contenido natural de agua, $w(\%)$, de esta costra fluctúa entre 30 a 80%, su consistencia va de media a firme ($5 < N_{SPE} < 17$) y tiene módulos de compresibilidad, m_v (cm^2/kg), del orden de 0.1.

2) **Formación arcillosa superior (FAS):** prof. 1 a 1.5 - 12 a 13 m

Se distinguen básicamente tres estratos arcillosos en esta formación:

El primero y más importante compuesto por arcilla gris o café con varias tonalidades, con un espesor de 3 a 4.5 m, con pequeños lentes de arena fina y/o ceniza volcánica. El contenido de agua de estas arcillas varía generalmente entre 120 a 300%, con máximos puntuales de 400%. En varias ocasiones el contenido natural de agua es mayor que el correspondiente al límite líquido, resultando en consistencias

relativas negativas¹. Lo anterior es resultado de la influencia de las sales contenidas en el suelo (que afecta las determinaciones) y además es indicativo de un suelo altamente estructurado.

En la figura 114 se puede ver que estas arcillas tienen pesos volumétricos naturales, γ , del orden de 1.2 t/m³.

La resistencia al corte no drenada o "cohesión" de este primer estrato arcilloso tiene valores mínimos del orden de 0.3 kg/cm² y máximos de cerca de 0.6 kg/cm² (apéndice C).

Los valores de la relación de sobreconsolidación (Over Consolidation Ratio, *OCR*), obtenidos directamente de las pruebas odométricas realizadas (fig 115), indican que la costra desecada se encuentra fuertemente preconsolidada ($4 < OCR < 9$) y que el resto de este estrato arcilloso se encuentran también preconsolidado aunque con valores relativamente menores ($1.8 < OCR < 4$).

También se han inferido los valores del *OCR* a través de la expresión propuesta por Schmertmann (Briaud, 1994):

$$OCR(x); x = [c/\sigma_0] / [0.11 + 0.0037I_p]$$

donde:
c: Resistencia al corte no drenada del suelo ("cohesión"), kg/cm²
 σ_0 : Esfuerzo vertical efectivo, kg/cm², a la profundidad en donde se determina el valor de la cohesión
I_p: Índice plástico de la muestra sujeta a consolidación, (%)

Los resultados muestran la misma tendencia que los resultados de las pruebas odométricas.

La compresibilidad de este estrato se puede inferir de los módulos de compresibilidad, *m_v*, obtenidos de las pruebas odométricas. Estos resultados señalan un módulo de compresibilidad que fluctúa entre 0.15 a 0.2 cm²/kg

El coeficiente de proporcionalidad entre la resistencia al corte no drenada del suelo y la resistencia al hincado del cono eléctrico, denominado *N_K*, para los primeros 4 m del subsuelo, se ha obtenido utilizando la expresión propuesta por Schmertmann (Briaud, 1994):

$$N_K = q_c / c$$

Donde:

N_K; Coeficiente de proporcionalidad², adimensional

¹ Se define como $C_r = (\omega_L - \omega) / (\omega_L - \omega_P)$

Donde:

C_r, Consistencia relativa (adimensional)
 ω_L , Límite líquido (%)
 ω_P , Límite plástico (%)
 ω , Contenido natural de agua (%)

q_c : Resistencia al hincado del cono eléctrico (en la punta), kg/cm^2

c : Resistencia al corte no drenada del suelo ("cohesión"), kg/cm^2 , a la profundidad donde se mide q_c .

Los otros dos estratos arcillosos, es decir la segunda y tercera capa que se encuentra dentro de esta FAS se localizan, aproximadamente, entre 5.5 a 8 m de profundidad la segunda, y entre 9 a 11.5 m la tercera. El espesor de la segunda varía entre 1 a 3 m, y de 1.5 a 3 m la tercera. Sus contenidos de agua son menores que el estrato superficial, entre 100 a 160% la segunda y entre 80% a 140% la tercera. La consistencia aumenta respecto al estrato superficial, presentando cohesiones de 0.4 a 0.8 kg/cm^2 la segunda y de 0.6 a más de 1.5 kg/cm^2 la tercera. Estas capas arcillosas se encuentran ligeramente preconsolidadas ($1.2 < OCR < 1.5$) y son menos compresibles que las arcillas superficiales, $0.04 < m_v$ (cm^2/kg) < 0.1 para la segunda y $m_v = 0.03 \text{ cm}^2/\text{kg}$ para la tercera.

Intercalados dentro de estos estratos arcillosos, pero aún dentro de la FAS, se encuentran básicamente dos capas de suelos granulares (limos o arenas finas), mezcladas con limos arcillosos.

La primera capa subyace al estrato superficial arcilloso, se localiza entre 4 a 6 m de profundidad y tiene un espesor variable entre 1 a 3.5 m, aproximadamente. Desgraciadamente su compacidad no es constante ($N_{SPE} = 1$ en algunos sondeos y hasta más de 40 en otros), por lo que no puede considerarse como una capa de compacidad media a alta. Los resultados de las pruebas triaxiales CU (sin saturar y saturadas) realizadas en probetas labradas de una muestra cúbica obtenida de este estrato (PCA-1, limo arenoso), indican un ángulo de fricción interna efectivo, ϕ' , de 25° y una cohesión de 0.5 kg/cm^2 debida al cementante que se detectó (carbonato de calcio). Se encontró una compacidad relativa, C_r , de 80% para esta muestra cúbica. Tomando en cuenta esta compacidad relativa, el esfuerzo vertical efectivo de campo, γ_0 , la relación de sobreconsolidación, OCR , de la prueba odométrica sobre esta muestra y la resistencia en la punta del cono eléctrico, q_c , a este nivel, se encontró que los parámetros de resistencia indicados anteriormente corresponden a un valor de N_{SPE} de alrededor de 5 golpes. Cabe señalar que los resultados muestran que existe, en general, una mejoría de las condiciones geotécnicas de esta capa en dirección NE a SW, a juzgar por los espesores, contenidos de agua y resistencias. Se tienen pues peores condiciones en los sondeos cercanos al gran canal del desagüe y mejores en los sondeos más alejados.

La segunda capa granular se localiza entre 8 a 9.5 m de profundidad, aproximadamente, tiene un espesor variable entre 1 y 2.5 m, y presenta estados de compacidad variables de media a muy compacta ($N_{SPE} > 15$ a más de 50).

3) Primera capa dura (PCD): prof. 12 a 13 m - 14 a 16 m

Compuesta principalmente por limos y en menor proporción por arenas. Tiene espesores de 1.5 a 3 m, con altas compacidades ($N_{SPE} > 30$ a más de 50).

4) Formación arcillosa inferior (FAI): prof. 14 a 16 m - 15.5 a 17 m

² En realidad la expresión involucra también al esfuerzo vertical total. Sin embargo, se acostumbra eliminar este término para las arcillas del Valle de México

Compuesta por arcilla gris verdosa de alta plasticidad y consistencia firme a dura ($1.0 < c$ (kg/cm^2) < 1.7 , $8 < N_{SPE} < 50$)), con contenidos de agua entre 100 a 140%. Tiene módulos de compresibilidad entre 0.02 a 0.04 cm^2/kg y ligera sobreconsolidación (*OCR* cercano a 1.0).

5) Serie estratificada superior (SES): prof. 15.5 a 17 m - 25.5 a 29.5 m

Formación errática compuesta principalmente por suelos granulares (limos y arenas) que presentan compacidades medias a muy compactas (N_{SPE} de 30 a más de 50) y contenidos de agua entre 20 y 60%. Ocasionalmente se encuentran lentes arcillosos de poco espesor (menor a 1.5 m), de consistencia blanda a muy firme ($3 < N_{SPE} < 30$) y contenidos de agua del orden de 60 a 80%.

6) Formación arcillosa profunda (FAP): prof. 25.5 a 29.5 m - 27 a 30 m

Compuesta por arcilla gris verdosa de alta plasticidad y consistencia firme a dura ($c > 2$ kg/cm^2 , $12 < N_{SPE} < 40$), con contenidos de agua fluctuando entre 80 a 120%.

7) Serie estratificada inferior (SEI): prof. 27 a 30 m - 60 m

Formación errática compuesta tanto por suelos granulares como por arcillas. En cualquier caso presentan altas consistencias ($N_{SPE} > 15$) o compacidades ($N_{SPE} > 30$) y contenidos de agua entre 100 y 120% (arcillas) y del orden de 40% (granulares).

3.3.2.2 Condiciones piezométricas

La profundidad del nivel de agua establecido dentro de los barrenos se observó desde los inicios de los trabajos de campo y hasta su término (15 de abril a 15 julio de 1998).

Se observó que el nivel se establecía entre los 18 y 20 m de profundidad. Sin embargo, se notó que en los periodos de riego de las parcelas el nivel se elevaba rápidamente. Al inspeccionar a detalle la boca de los barrenos se escuchó el sonido de la caída de agua en algunos de ellos y se pudo observar que el agua de riego se infiltraba a 2 m de profundidad, aproximadamente, a través de las arcillas fisuradas superficiales.

Para tener mayor información al respecto, se instalaron 4 pozos de observación del nivel freático, localizados según se muestra en la figura 111, a 4.4, 8.5, 4.8 y 6 m de profundidad, respectivamente. La lectura sistemática de dichos instrumentos durante la época de exploración y hasta principios de agosto indicó que no existe la presencia de agua a esas profundidades, ya que estuvieron secos.

El punto anterior quedó reforzado con el hecho de que en los cuatro pozos a cielo abierto excavados (PCA-1 a PCA-4, fig 111), no apareció el agua freática durante la época de la exploración. Asimismo, durante la inspección del PCA-4 se presentaron fuertes infiltraciones del agua de riego, confirmando el hecho de que el agua fluye rápidamente a través de las arcillas fisuradas de la superficie.

Para conocer las condiciones piezométricas profundas en el sitio se instalaron 9 piezómetros abiertos tipo Casagrande, localizados como se muestra en la figura 111. La profundidad de instalación de cada

instrumento quedó determinada por la presencia de estratos o lentes permeables de suelo entre 15 y 60 m de profundidad.

Hasta la fecha se han realizado 6 mediciones de los instrumentos, independientes de las realizadas para la prueba de los mismos. Estas mediciones abarcan el periodo comprendido entre la última semana de junio y la tercera semana de agosto.

Los resultados de las mediciones indican que los niveles piezométricos se han mantenido estables dentro del periodo señalado, con variaciones despreciables.

En la figura 116 se presentan las gráficas de esfuerzos verticales de campo para los primeros 15 m de profundidad. Considerando que el nivel freático se encuentra a 20 m de profundidad, los esfuerzos totales resultan iguales a los efectivos.

3.3.2.3 Consideraciones respecto a cimentaciones de la planta

• Problemática previsible en el sitio

A partir de los resultados del estudio geotécnico realizado, puede concluirse que el diseño de la cimentación de la planta en proyecto deberá prestar especial atención a los aspectos geotécnicos siguientes:

- Capacidad de carga de las cimentaciones superficiales, pensando en que se desplantarán sobre el depósito superficial arcilloso compresible.
- Deformaciones elásticas instantáneas del terreno por efecto de cargas o descargas durante la construcción y la operación de las estructuras.
- Asentamientos totales y diferenciales de las estructuras sensibles a este fenómeno, cimentadas superficialmente, tanto para una misma estructura como por su interacción con otros equipos de la planta.
- Flotación de cimentaciones compensadas, durante su construcción o cuando se encuentren vacías y se presenten inundaciones naturales o accidentales.
- Hundimiento regional provocado por la extracción de agua del subsuelo.
- "Emersión" de las estructuras cimentadas sobre pilotes o pilas apoyados en un estrato incompresible, o sobre pilotes de fricción cuando su densidad es alta (p. ej. El Monumento a la Independencia).
- Fricción negativa sobre elementos de cimentación profunda apoyados en la punta.
- Interacción entre estructuras cimentadas superficialmente y estructuras aledañas con problemas de "emersión".

- Estabilidad de cortes y rellenos a corto y largo plazo. Se prevé que los cortes y rellenos que pudieran existir se llevarán a cabo en la arcilla superior, y que, a largo plazo, ésta tiende a reducir su cohesión hasta tener un valor del orden del 60% de su valor a corto plazo.
- Inundación del sitio de la planta de no contarse con un sistema eficiente de bordos de protección y drenes con cárcamos de bombeo.
- Daños estructurales en pavimentos, tuberías enterradas y otros elementos someros rígidos, así como las propias cimentaciones por la acción de sismos.
- Análisis realizados
 - Para dar una idea de la magnitud de algunos de los problemas, se hicieron algunos análisis que se concentran en los grupos (b) y (c), ya que, tomando en cuenta la naturaleza del proyecto, se considera que los asentamientos son críticos y pudieran ser los que rijan el tipo de cimentación.
 - Como no se cuenta con información acerca de las características de las estructuras y los equipos que se instalarán (dimensiones, arreglo del conjunto, cargas muertas y vivas, restricciones de asentamientos totales y diferenciales, etc), solo se han realizado análisis preliminares de asentamientos inmediatos y a largo plazo, con objeto de proporcionar el orden de magnitud de los mismos. Para tal efecto se han utilizado las teorías clásicas de consolidación unidimensional propuesta por K. Terzaghi y la de distribución de esfuerzos en la masa de suelo propuesta por Boussinesq. Estos análisis se han hecho bajo las siguientes consideraciones:
 - Se considera representativo el modelo estratigráfico obtenido del SM-6, mismo que se muestra en la figura 117. En la citada figura se presenta la secuencia de estratos considerados compresibles e incompresibles, determinados éstos con base en el contenido de agua, resistencia al corte y al hincado del cono eléctrico, además de los resultados de las pruebas odométricas. La deformabilidad de los estratos compresibles se determinó ajustando (cuando era pertinente) las curvas de compresibilidad para representar la media del estrato, teniendo en cuenta la diferencia entre el contenido de agua obtenido en la muestra sometida a la prueba odométrica y el contenido de agua medio del estrato correspondiente.
 - Se consideró para el análisis de asentamientos elásticos inmediatos, una estructura hipotética rectangular, de dimensiones $D \times 2D$, sometida a una carga (o descarga) uniforme de magnitud P , considerando un módulo elástico, E , de 500 t/m^2 y una relación de Poisson, ν , igual a 0.45, (fig 118).
 - Se consideró para el análisis de asentamientos a largo plazo, un arreglo hipotético de cuatro estructuras cuadradas de 40 m de lado, dispuestas en una área cercana a los $10,000 \text{ m}^2$, descargando 6 t/m^2 mediante una cimentación superficial "flexible" (fig 119). Se analizó el comportamiento de este arreglo cimentado sobre la superficie natural del terreno, $D_f = 0.0 \text{ m}$ (fig 120), y el mismo arreglo pero cimentado a una profundidad de 2 m (fig 121).
 - Para investigar la influencia del esfuerzo vertical transmitido por el arreglo propuesto, P , y la compensación lograda por la cimentación a diferentes profundidades de desplante, D_f , se calculó el

asentamiento del punto central de uno de los tanque haciendo variar estos dos parámetros, según se muestra en la figura 122.

- **Resultados obtenidos**

- En cuanto a las deformaciones elásticas se observa que deben esperarse deformaciones importantes durante la construcción de las estructuras y las operaciones de vaciado y llenado de los tanques (figura 118).

- Considerando el modelo estratigráfico del SM-6 (fig 117), una estructura de 40 m de lado desplantada superficialmente ($D_f = 0.0$ m) mediante una cimentación "flexible", y que transmite al suelo una carga de 6 t/m^2 sufriría un asentamiento diferido total del orden de 0.25 m en el centro y de 0.04 m en una de las esquinas, dando como resultado un asentamiento diferencial de 0.21 m (0.75 cm/m) entre estos dos puntos (figura 120).

- Al cimentar el arreglo a una $D_f = 2.0$ m (fig 121) produce una reducción importante en el espesor de arcilla compresible sujeta a consolidación, además de una compensación de alrededor de 2.5 t/m^2 . Debido a estos efectos, el asentamiento diferido al centro de la estructura resulta del orden de 0.09 m y de 0.02 m en una de las esquinas, dando como resultado un asentamiento diferencial de 0.07 m (0.25 cm/m) entre estos dos puntos.

- Al observar la figura 122 se aprecia que para una $D_f = 0.0$ m se tienen asentamientos que pueden resultar excesivos, aún para esfuerzos transmitidos de poca magnitud. En el caso de cimentar a 2 m de profundidad, para esfuerzos verticales transmitidos al terreno menores de 3.5 t/m^2 , aproximadamente, la magnitud de los asentamientos puede ser manejable. Por último, en el caso de desplantar a 5 m de profundidad, aproximadamente, la magnitud de los asentamientos se reduce de manera importante, inclusive para esfuerzos verticales netos del orden de 10 t/m^2 .

- Con base en los resultados anteriores parece factible evitar el uso de cimentaciones profundas.

- Conviene subrayar que los resultados anteriores se refieren tan solo a algunos de los aspectos que hay que tomar en cuenta para la concepción integral de las cimentaciones, y que fueron obtenidos con base en las condiciones estratigráficas obtenidas en el SM-6 y en arreglos hipotéticos que pudieran no corresponder estrictamente con la realidad. Por lo tanto, los análisis finales con cimentaciones superficiales o profundas (si se juzga conveniente el uso de éstas) deberán tomar en cuenta todos los fenómenos mencionados en el inciso 9.1, ya que pueden afectar significativamente el comportamiento de la planta. Estos análisis definitivos deberán contemplar estructuras específicas y detalladas.

- **Comparación entre los comportamientos esperados de las cimentaciones en los sitios "Sosa Texcoco" y "Tecámac"**

- Aquí se presenta la comparación entre el comportamiento esperado del arreglo hipotético propuesto, el cual se utilizó en ambos sitios. De la comparación se destacan los siguientes puntos (fig 123):

- El centro de una de las cuatro estructuras del arreglo, cuando éste se desplanta sobre la superficie natural del terreno ($D_f = 0.0$ m), sufriría un asentamiento diferido con el tiempo de 1.60 m en el caso de "Sosa Texcoco" y de 0.25 m en el caso de "Tecámac". Los asentamientos diferenciales máximos entre el centro y la esquina de una de las estructuras serían de 1.15 m para el caso de "Sosa Texcoco" y de 0.21 m para el sitio "Tecámac". Existe pues una relación de 6 a 1 aprox., en la magnitud de los asentamientos de un sitio a otro.

- Cuando el arreglo se desplanta a 2 m de profundidad, el centro de una de las cuatro estructuras sufriría un asentamiento diferido con el tiempo de 0.94 m en el caso de "Sosa Texcoco" y de 0.09 m en el caso de "Tecámac". Los asentamientos diferenciales máximos entre el centro y la esquina de una de las estructuras serían de 0.63 m para el caso de "Sosa Texcoco" y de 0.07 m para el sitio "Tecámac". Existe pues una relación de 10 a 1 aprox., en la magnitud de los asentamientos de un sitio a otro.

3.3.3 Evaluación geoestadística del sitio

3.3.3.1 Resistencia a la penetración estándar (SPT)

En cada uno de los sondeos de donde se obtuvieron perfiles de contenido de agua, se cuenta con perfiles de número de golpes N , que evalúa la resistencia a la penetración estándar en el suelo en la prueba SPT. Sin embargo, el tratamiento estadístico de estos perfiles como variable aleatoria permite ver que se trata de una población de datos acotada en sus extremos, es decir, existen muchos valores de N cercanos a cero y a cincuenta, tal como se observa en el histograma global de la figura 124 y que por lo tanto no guarda un comportamiento normal. Esta acotación se interpreta como la concentración de dos tipos de suelo: el de menor y mayor resistencia respectivamente.

Cabe aclarar que la variable del contenido de agua analizada en la referencia CFE, 1997, se comporta en forma inversamente proporcional con la variable de la resistencia de penetración estándar (objeto de este análisis), es decir, a mayor contenido de agua menor resistencia.

Con la finalidad de interpretar los resultados de ambos análisis para los mismos estratos, aquí también se consideró un espesor de 30 m.

a) Análisis de los perfiles verticales de la resistencia de penetración estándar (N)

a.1) Histogramas, valores medios y variabilidad entre sondeos

Los perfiles de la resistencia a la penetración estándar fueron prácticamente continuos, obteniéndose una prueba a cada 0.45 m, a excepción de los sitios donde se extrajeron muestras alteradas de tubo shelby (figs 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133 y 134). Debido a que en esta prueba se le asigna una resistencia (N , en número de golpes) por cada tramo de 45 cm, el valor se le asignó a la media de la profundidad del tramo considerado.

Primeramente se obtuvieron los parámetros estadísticos básicos de los perfiles verticales de penetración estándar (tabla 9), de los cuales se destaca lo siguiente:

Para cada perfil se calculó el número de pruebas por metro, obteniéndose la media de los diez sondeos de 2.3 pbas./m, con una desviación estándar de 0.246 pbas./m.

De los perfiles de la resistencia a la penetración estándar se concluye (igual que para el contenido de agua) que los primeros 10 m son los que contienen a los suelos de menor resistencia, variable de 0 a 28 golpes, aunque tienen valores pico de hasta 40 golpes.

El valor medio de ocho de los diez sondeos (excepto el SM-2 y SM-6) varía entre 21.9 y 29.6 golpes y su desviación estándar de 16.3 a 21.4 golpes.

En los sondeos SM-2 y SM-6 la media es muy inferior (15.4 y 15.8 golpes respectivamente), debido a que a pesar de que tienen una frecuencia similar en valores de 50 golpes a lo largo del sondeo, en ellos se presentan como "picos", es decir, la resistencia llega a 50 golpes y disminuye muy drásticamente a valores de 20 o incluso hasta 0 golpes. Mientras que en los otros ocho sondeos las resistencias altas se mantienen por tramos más amplios.

En las figuras 135 y 136 se presentan las tendencias globales de la media y desviación estándar de la resistencia a la penetración estándar, utilizando el método Kriging como algoritmo de interpolación, mediante el programa SURFER. En términos generales se puede concluir lo mismo que con la variable contenido de agua (Auvinet, G., Medina, Z., 1999), es decir, que los sondeos SM-1, SM-2 y SPE-3 son los que presentan una resistencia menor, aunque en este caso el sondeo SM-6 también resultó con baja resistencia.

El valor de la desviación estándar tiene una variación relativamente pequeña, de 16.3 a 21.3 golpes, presentándose la menor en el sondeo SPE-3.

El coeficiente de variación está comprendido entre 0.68 a 1.30, con valores típicos de 0.80.

En la figura 137 se presenta el histograma de la población global, la cual como se mencionó, presenta concentración de dos tipos de suelo: el de menor (cero golpes) y mayor resistencia (50 golpes).

a.2) Tendencia vertical

Sobre cada uno de los perfiles de la resistencia a la penetración estándar se ajustó una línea de tendencia lineal y polinómica, para determinar si existía alguna tendencia global en el comportamiento de la señal con la profundidad. En las figuras 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133 y 134 se presentan esta gráficas. De ellas se concluye que efectivamente hay una tendencia general, la cual indica que a medida que aumenta la profundidad aumenta también la resistencia a la penetración estándar. Para una profundidad igual a cero, para los sondeos SM-1, SM-3 y SM-6, la tendencia indica que la resistencia tiene valores negativos (de -4.92, -2.59 y -5.63 golpes respectivamente), mientras que para el resto es positivo (de 2.51 a 10.07 golpes). Por lo anterior se propone una ecuación general que gobierne esta tendencia al ajustar un hiperplano (regresión lineal) a los datos de las diez realizaciones. Las ecuaciones de las rectas ajustadas y la ecuación del hiperplano se presentan en la tabla 10.

De los coeficientes de la ecuación de tendencia lineal global se concluye que para el parámetro z (profundidad) la variable resistencia a la penetración estándar disminuye 1.29% por metro. Los parámetros de espacio x , y son prácticamente igual a cero, lo que indica que la variación en planta de la resistencia es muy pequeña de un sitio a otro del predio.

Si a cada uno de los datos muestreados de la resistencia en los diez sondeos se le resta el valor estimado por el hiperplano, o valor esperado en el campo aleatorio de análisis $E(w)$ se obtiene una nueva realización en cada sondeo. El histograma de la nueva población así definida (la global considerando los diez sondeos) se presenta en la figura 138. Este histograma es ligeramente asimétrico y claramente bimodal.

a.3) Funciones de autocorrelación

Para evaluar el grado de relación lineal que existe entre los datos obtenidos en un mismo sondeo vertical, se obtiene el *coeficiente de autocorrelación vertical* ρ_V asociado a cada sondeo. Estas funciones, que se presentan en las figuras 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147 y 148, indican el grado de correlación lineal que guarda cada realización consigo misma conforme se desfasa una distancia d_v (constante entre los datos de una misma realización) verticalmente. Para $d_v = 0$, el coeficiente de autocorrelación ρ_V es 1, y conforme el desfaseamiento aumenta tiende a disminuir.

Los coeficientes de autocorrelación verticales en el sitio *Tecamac* fueron obtenidos usando tres tipos de registros: realizaciones continuas con datos interpolados linealmente a cada 1 m; realizaciones continuas con datos interpolados linealmente a cada 0.25 m y finalmente, realizaciones continuas sin la tendencia lineal global (caso gaussiano), con datos interpolados linealmente a cada 0.25 m.

Con estos análisis se corrobora lo encontrado en el caso del contenido de agua, es decir, en los diez sondeos los tres tipos de función de autocorrelación se abaten para una distancia de influencia de aproximadamente 2 m, aunque su comportamiento posterior ya no es semiarmónico. Es importante destacar que en las realizaciones sin tendencia, el coeficiente de autocorrelación disminuye a valores mucho menores (valores medios de -0.2 a 0.0, contra 0.2 a 0.5).

En el sondeo SPE-1, para el contenido de agua, la realización muestra un comportamiento armónico casi perfecto. En el presente análisis, si bien no presenta esta tendencia, si es el caso en el cual las tres curvas son de forma más parecida.

La función de correlación general vertical del campo fue definida a partir de la media de los diez sondeos, y se presenta en la figura 149. Esta representa el "modelo de correlación vertical del campo aleatorio".

b) Análisis de la variación horizontal de la resistencia a la penetración estándar (funciones de correlación cruzada).

Para evaluar el comportamiento aleatorio que presenta la resistencia a la penetración estándar horizontalmente es necesario evaluar el grado de correlación lineal que guarda un sondeo con otro. En forma similar a lo realizado en la dirección vertical, se obtuvo una función "modelo" de correlación

horizontal entre valores de la resistencia a la penetración estándar en puntos localizados a una distancia horizontal d_H .

La función de correlación cruzada se obtiene comparando dos poblaciones diferentes, o dos sondeos diferentes, los cuales tienen un comportamiento particular con la profundidad. Si se compara la relación que tienen ambas poblaciones utilizando el coeficiente de correlación para una distancia de desfaseamiento vertical $d_v = 0$ se obtiene el coeficiente de correlación vertical ρ_{\square} de correlación horizontal entre ambas poblaciones. El valor de este coeficiente es de uno para una distancia horizontal entre sondeos $d_H = 0$, y tiende a disminuir conforme aumenta la distancia entre los sondeos.

Para obtener el "modelo de correlación horizontal del campo aleatorio" es necesario evaluar la correlación cruzada entre todos los sondeos uno contra otro. En este caso, al igual que para el contenido de agua, se obtiene un número total de valores de correlación "combinando" los diez sondeos tomados de dos en dos a la vez (45 combinaciones), para los cuales se considera la distancia de análisis entre uno y otro sondeo d_H . La función de correlación cruzada obtenida de esta forma en los cuarenta y cinco casos genera el "modelo de correlación horizontal del campo aleatorio", el cual se presenta en la figura 150.

También se analizó la variación de la correlación con la dirección en planta. El resultado de este análisis o "rosa" de correlación horizontal se presenta en las figuras 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159 y 160. En estas figuras se toman como referencia las coordenadas geográficas (no modificadas) y no se considera la distancia entre sondeos, sino únicamente su dirección y su grado de correlación lineal horizontal evaluado por ρ_H .

Adicionalmente, si se colocan todos los puntos de correlación en una misma "rosa" de correlaciones se puede observar que no existe una dirección preferencial donde aumenten o disminuyan de manera sistemática los valores de correlación (fig 161), del cual se deduce que la aleatoriedad direccional que guardan los sondeos uno respecto a otro es isotrópica.

3.3.3.2 Cortes virtuales

a) Contenido de Agua, $w\%$

En el análisis de contenido de agua (Auvinet, G., Medina, Z., 1994) se definieron tres cortes longitudinales y tres transversales formados por sondeos virtuales contiguos a cada 10 m, a lo largo y ancho del terreno (cortes A a F de la figura 3). Se obtuvieron las figuras del valor esperado de contenido de agua y en las de la desviación estándar, desde la superficie hasta 30 m de profundidad.

b) Resistencia a la penetración estándar (SPT)

Se definieron tres cortes longitudinales y tres transversales formados por sondeos virtuales contiguos a cada 10 m, a lo largo y ancho del terreno (cortes A a F de la figura 3). En las figuras 162, 163, 164, 165, 166 y 167 se presenta el valor esperado de resistencia a la penetración estándar y en las figuras 168, 169, 170, 171, 172 y 173 la desviación estándar, desde la superficie hasta 30 m de profundidad.

También se construyeron modelos físicos impresos a color en acetatos que permiten integrar los cortes longitudinales y transversales y visualizar de manera tridimensional la variación estratigráfica. En las figuras 174, 175 y 176 se presentan vistas de estos modelos físicos.

3.3.4 Interpretación geoestadística basada en la resistencia a la penetración estándar (SPT) y el contenido de agua (w)

Primeramente, es conveniente mencionar que la resistencia a la penetración estándar (SPT) es un parámetro acotado en su parte superior, es decir, el valor máximo de resistencia considerado en la prueba es de 50 golpes.

Con la finalidad de tener una sola referencia de interpretación, en el presente análisis geoestadístico de la resistencia a la penetración estándar se consideró la misma localización de cortes virtuales que para los análisis basados en el contenido de agua (CFE, 1997).

El presente análisis (SPT) se realizó considerando a toda la profundidad de 30 m como un solo estrato y para el análisis del contenido de agua (w) se consideraron seis horizontes de aproximadamente 5 m de espesor.

En la referencia CFE, 1997, para el contenido de agua se consideraron únicamente suelos “blandos” y “firmes”, correspondientes a valores mayores de 100% y menores de 50% respectivamente. Para tratar de uniformizar la descripción de los materiales existentes, para el parámetro de penetración estándar se consideró que los suelos “blandos” corresponden a suelos con resistencia menor a 10 golpes y los firmes a resistencia mayor a 20 golpes.

Para la graficación de los cortes virtuales se consideraron los siguientes rangos de valores:

- Contenido de agua: de 0 a 350%, con rangos a cada 50%.
- Resistencia a la penetración estándar: de 0 a 50 golpes, con rangos a cada 10 golpes.

Con base en los análisis realizados se observó que en los 8 m superficiales el rango de valores de contenido de agua es muy amplio, es decir, varía de 20% para la “costra” superficial hasta 250% en suelos arcillosos blandos. Con relación a la prueba SPT, el rango de valores es pequeño, puesto que es variable de 2 a 10 golpes para el suelo arcilloso blando hasta 12 a 20 golpes para la “costra” superficial. Por lo anterior, se puede concluir que la prueba de SPT no distingue un suelo si tiene un contenido de agua de 100 a 250%, puesto que en este amplio rango la resistencia es variable de 2 a 10 golpes.

Con la finalidad de conocer con mas detalle la distribución de la resistencia N de SPT en los estratos donde se desplantarían las cimentaciones superficiales, para los 15 m superficiales se graficaron cortes virtuales de 0 a 50 golpes, con rangos a cada 5 golpes.

Suelos blandos

En toda la superficie del predio, entre 1 y 7,5-10,5 m de profundidad, se encontró un estrato continuo de material con resistencia menor a 10 golpes. La mayor profundidad se encuentra en la zona de los

sondeos SM-1, SM-2, SM-3, SM-6, SPE-1 y SPE-3 (zona de los cortes C y F). En el análisis de w la profundidad máxima es de 9 m y en el de SPT de 10,5 m. Presenta un buzamiento de sur a norte y de poniente a oriente. El contenido de agua de este estrato presenta valores entre 150 y 250%, con algunos lentes significativos que presentan los valores más altos (mayores de 250%). Con relación a la prueba SPT, resultó con valores variables de 0 a 10 golpes.

En la zona del sondeo SM-5, a la profundidad de 15 m se encontró un lente de suelo blando. Su espesor es del orden de 80 cm. Tiene una resistencia de 0 a 12 golpes.

Un estrato de material blando se encontró de 10.5 a 12 m de profundidad en la zona de los sondeos SM-1, SM-3, SPE-1 y SPE-2. El mayor espesor se localiza próximo a sondeo SM-3 y puede tener una resistencia mínima de hasta 4 golpes. El valor esperado del contenido de agua en este estrato es de 100 a 150%.

En la zona próxima al sondeo SM-6, de 12 a 19 m de profundidad, se encuentra una capa de suelo blando de menos de 10 golpes de resistencia; aunque aproximadamente de 13 a 15 m existe un material que incrementa su resistencia hasta 16 golpes. Aquí se espera un contenido de agua de 70 a 180%.

Con el parámetro de contenido de agua se identificó claramente un estrato de suelo blando, el cual no fue fácil ubicarlo con la resistencia a la penetración estándar. Se ubica en todo el terreno, es prácticamente continuo y presenta un echado de poniente a oriente. Su espesor varía de 1 a 2.5 m. Sus límites máximo superior e inferior son 14.8 y 17 m de profundidad respectivamente, el primero cerca del sondeo SPE-4 y el segundo en la esquina poniente del terreno (cerca del SM-5). El valor esperado de contenido de agua es de 100 a 150%. La resistencia a la penetración estándar en este estrato es 3 a 14 golpes.

Un estrato semi-continuo aparece a una profundidad media de 28,5 m, con un espesor pequeño (0.2 a 0.5 m), cerca de los sondeos SM-1, SPE-1, SM-2, SPE-2, SM-5, SPE-4 y SM-6. A la misma profundidad, pero con mayor espesor (2 m) se presenta un lente próximo al sondeo SPE-3. En estos lentes los valores de contenido de agua varían entre 100 y 150%. Por su parte, la resistencia a la penetración estándar se espera de 4 a 20 golpes.

Con el parámetro de SPT, en la zona del sondeo SPE-2, se encontró un lente de suelo blando cuya profundidad va de 24 a 27 m. El valor de SPT esperado va de 5 a 25 golpes.

En el análisis de w se identifican lentes de suelos blandos en zonas puntuales del medio, que aparentan no pertenecer a ningún estrato continuo y que contribuyen a la erraticidad del medio.

Suelos firmes

En el metro superficial, en prácticamente todo el predio, se encuentra una "costra" resistente cuya resistencia es de 25 golpes como máximo. Con base en el análisis de w , en la zona sur del predio (SM-1, SM-2 y SPE-1) es donde prácticamente no existe este material. Para este estrato se esperan valores de 20 a 80%.

De 9 a 15 m de profundidad se encontró un estrato prácticamente continuo de suelo resistente, llegando a 40 golpes de resistencia. El suelo de la zona oriente del predio (sondeos SM-2, SM-6 y SPE-3) tiene una resistencia relativamente menor, teniendo como máximo 19 golpes. El valor esperado en este estrato es de 20 a 40 golpes de resistencia y 40 a 90% de contenido de agua.

A excepción del sitio próximo a los sondeos SM-2, SM-5 y SM-6, de 15 a 18 m se encontró un estrato resistente. En este estrato se puede esperar una resistencia 20 a 38 golpes. En la zona cercana al sondeo SM-1, a esta profundidad, aunque se encuentran resistencias de hasta 30 golpes, se encuentra un lente de 80 cm de espesor de suelo blando. Se espera en esta capa un contenido de agua variable de 15 a 100%.

Debajo de los 18 m de profundidad, en términos generales, el suelo existente es firme con algunos lentes o pequeñas estratificaciones de suelo blando. Alcanza una resistencia mayor a 50 golpes en la zona cercana a los sondeos SPE-2, SM-3 y SM-4 de 21 a 25 m de profundidad. En la zona del sondeo SM-2 se encuentra una capa de suelo blando de 27 a 28.5 m de profundidad, cuya resistencia es de 8 a 15 golpes.

La estimación con ambos parámetros considera la influencia de los valores conocidos más cercanos y la influencia de la variación aleatoria del medio, o en su caso, de su horizonte, a través del modelado de la variabilidad espacial. Sin embargo, la presencia de estratos de espesor pequeño se desvanecen cuanto más lejos se encuentran de un sondeo conocido, pudiendo parecer discontinuidades en el sentido horizontal. Esto se explica ya que los valores que guardan más influencia respecto al valor estimado, son los más cercanos a éste pero obviamente son más, los que son diferentes a los del estrato de espesor pequeño.

Incertidumbre en la repartición espacial

En los cortes de distribución de la incertidumbre del contenido de agua y resistencia a la penetración estándar se puede observar que en las zonas próximas a los sitios de los sondeos se presentan los menores valores. Para el contenido de agua resultó variable de 0 a 10% y para la resistencia SPT de 3 a 4 golpes. Esto es lógico puesto que en estos sitios existe información conocida (sondeo real). Como se mencionó en la referencia CFE, 1997, en estos sitios cercanos a los sondeos se forman "bulbos que dan luz", los cuales indican que la información conocida ha condicionado la estimación de los sondeos virtuales.

La mayor incertidumbre se encuentra en las zonas alejadas de los sondeos, es decir, donde la distancia de estos puntos a un valor conocido (real de sondeo) es mayor. Esto se debe a que para el cálculo de la varianza condicional y por lo tanto de la desviación estándar se necesita el coeficiente de correlación. Este coeficiente representa el grado de correlación lineal existente entre el valor estimado y el valor conocido. Se espera entonces que esta correlación y la influencia del valor conocido sobre el estimado se pierdan cuando el dominio de estimación se aleja del dominio conocido. Asimismo, mientras más cerca se encuentre el dominio estimado del conocido, la incertidumbre será menor. Con base en lo anterior, la mayor incertidumbre se encontró en las zonas comprendidas entre sondeos. Para el contenido de agua resultó de 50 a 60% y para la resistencia a la penetración estándar de 10 a 11 golpes.

Tomando en cuenta ambos análisis (contenido de agua considerando seis horizontes y penetración estándar con un horizonte) se observa que lo que más influye en la definición de cada parámetro no es la distancia del punto por estimar al punto conocido sino la varianza existente en el medio.

Por ejemplo, para el contenido de agua, la mayor incertidumbre resultó mayor en los dos primeros horizontes (los 10 m superficiales) debido a que en estos se presenta el mayor valor de la varianza, esto condicionado por la existencia de mayores valores de contenido de agua. La desviación estándar para estos horizontes resultó variable entre 0 y 50%.

Para el tercero y cuarto horizontes la desviación estándar oscila entre 0 y 30%, siendo predominantes los valores comprendidos entre 10 y 30%. El quinto y sexto horizontes presentan también un valor de desviación estándar variable entre 0 y 30%, pero ahora, siendo predominantes los valores entre 10 y 20%.

Para la resistencia a la penetración estándar, dado que se realizó el análisis considerando un solo estrato (se utilizó una sola población), se obtuvo una incertidumbre uniforme a lo largo de toda la profundidad. En las zonas donde el corte virtual "toca" a un sondeo real, la incertidumbre fue mínima (variable entre 3 y 5 golpes), tal es el caso de los cortes A y E, donde "tocan" al sondeo SPE-2. Por el contrario, en las zonas alejadas de los sondeos reales, como las que se observan entre los sondeos SM-6, SPE-3 y SM-2 del corte C y SM-5, SPE-2 y SM-1 del corte A, la incertidumbre fue máxima, variable entre 9 y 11 golpes. Estos valores altos se presentaron también en los extremos de los cortes.

La escala seleccionada para la graficación de los cortes virtuales de la incertidumbre varía cada golpe (por ejemplo 3-4, 4-5, 5-6, etc.) y con base en lo observado, mientras nos alejamos del sitio del sondeo real, cambia de rango aproximadamente cada 40 m.

3.3.5 Estratigrafía basada en la resistencia a la penetración estándar (SPT) y el contenido de agua (w)

A continuación se describe la estratigrafía continua en las dimensiones x , y , z , que toma en cuenta los resultados del análisis geoestadístico del contenido de agua w en % (presentados en CFE, 1997) y los del número de golpes N de la prueba de penetración estándar analizados en el presente estudio.

Se observa que desde la superficie y hasta los 20 m de profundidad existe una estrecha relación entre ambos análisis. Los estratos que se observan en los cortes del modelo impreso en acetatos, correspondientes al valor esperado condicional del contenido de agua, concuerdan en general con los de la resistencia del suelo a la penetración según el número de golpes N de SPT. Con base en los modelos impresos en acetatos, los echados y el orden de magnitud con que se presentan los estratos de w y N quedan aceptablemente corroborados. Sin embargo, en ocasiones existe cierta discontinuidad y erraticidad en los mismos.

Debajo de los 20 m de profundidad, existen algunas discrepancias en cuanto a la continuidad horizontal de los estratos. Los estratos de w , % y N bajo esta profundidad aparecen discontinuos y con características diferentes en los diferentes cortes del terreno. Sin embargo, bajo esta profundidad las características del suelo son significativamente mejores en resistencia y deformabilidad respecto a los estratos que se ubican arriba de este nivel.

A fin de comprender la continuidad estratigráfica, se recurre a la descripción de suelos blandos y firmes considerada en la interpretación del análisis geoestadístico. Los suelos intermedios se omiten.

Secuencia estratigráfica

Con la finalidad de tener un modelo estratigráfico para la interpretación ingenieril, se consideran los siguientes estratos:

a) Primer estrato: estrato blando, continuo.

Se ubica entre 1.0-1.5 y 5m de profundidad, bajo una delgada costra desecada. Los valores esperados del contenido de agua están comprendidos entre 150 y 250% y los del valor de N entre 0 y 7. Su mayor estrato se presenta cerca de los sondeos SM-1, SPE-1 y SM-2. Se detecta un substrato entre 2 y 3m de profundidad con valores de w mayores a 250%, el suelo más blando encontrado en todo el medio. El nivel de incertidumbre (desviación estándar) en este estrato alcanza hasta 50% para el w y de 10 a 11 golpes para el SPT. Ambos corresponden a las zonas más alejadas a un sondeo real. Conviene aclarar que para el análisis de penetración estándar, dado que se utilizó una sola población (de 0 a 30 m de profundidad) el valor de la incertidumbre (desviación estándar) es representativo de todos los estratos, es decir, le corresponde un valor de 3 a 4 golpes cerca de los sondeos y de 10 a 11 golpes para las zonas más alejadas.

b) Segundo estrato: estrato firme, semi-continuo.

Se ubica bajo el primer estrato blando. Su límite superior se ubica a 5 m de profundidad. Se detecta con mayor claridad en el análisis de w y comprende la zona de los sondeos SPE1, SM-2, SM-3, SPE-3 y SPE-4 (zona oriente). Su espesor es variable (0.2 a 2m) y alcanza su mayor amplitud en la zona cercana al sondeo SM-2, donde se ubica su límite máximo inferior a 7 m de profundidad. El valor esperado de contenido de agua para este estrato está comprendido entre 0 y 50%, en tanto que el valor de N oscila entre 20 y 40 golpes. El nivel de incertidumbre máximo en este estrato es de 50% para el w y de 11 golpes para el SPT en las zonas más alejadas a un sondeo real.

c) Tercer estrato: estrato blando, semi-continuo.

Presenta un echado de la zona poniente hacia el oriente. Su límite máximo superior se encuentra entre el sondeo SPE-2 y SM-5 a una profundidad de 5m, y su límite máximo inferior se ubica en la esquina oriente del terreno a una profundidad de 10 m. Este estrato se identifica claramente en el análisis de w . Su espesor varía de 1 a 3 m. En la proximidad del sondeo SM-5 y SPE-4, el estrato pierde continuidad. El valor esperado del contenido de agua en este estrato oscila entre 100 y 200% con algunos lentes interestratificados que presentan valores puntuales mayores de 200%, en tanto que los valores de N oscilan entre 2 y 6. El nivel de la incertidumbre en este estrato es inferior a 50% para el w y de 11 golpes para el SPT en las zonas más alejadas a un sondeo real.

d) Cuarto estrato: estrato firme, semi-continuo.

Presenta un echado de poniente a oriente y se extiende en la zona comprendida por los sondeos SM-1, SPE-1, SM-2, SPE-2, SM-5, SPE-4 y SM-6. Su límite máximo superior se encuentra a los 8.5m cerca

del sondeo SM-5 y su límite máximo inferior se ubica en la esquina oriente del terreno a una profundidad de 11 m. Su espesor es variable (0.2 a 1 m), y tiene un valor esperado de contenido de agua entre 0 y 50%, con valores de N que oscilan entre 20 y 50. El nivel de incertidumbre en este estrato no rebasa 30% para el w y es de 11 golpes para el SPT en las zonas más alejadas a un sondeo real.

e) Quinto estrato, estrato blando, semi-continuo.

Presenta un echado de poniente a oriente, y se ubica en la zona comprendida por los sondeos SM-1, SPE-1, SM-2, SPE-2, SM-3, SPE-3, SM-4 y SM-6, a una profundidad media de 12.5m. Su espesor es pequeño (0.2 a 2 m), y contiene un valor esperado del contenido de agua entre 100 y 150%, con valores de N que oscilan entre 6 y 25 golpes. El nivel máximo de la incertidumbre en este estrato es de 30% para el w y de 11 golpes para el SPT en las zonas más alejadas a un sondeo real.

f) Sexto estrato: estrato firme, continuo.

Presenta un echado de poniente a oriente. Su límite máximo superior se encuentra próximo al sondeo SM-5 a 12.5m de profundidad, y su límite máximo inferior en la cercanía al sondeo SPE-1 a 14 m de profundidad. Su espesor medio es de 1.2 m, y presenta un mayor engrosamiento (2m) en la zona comprendida por los sondeos SM-3 y SPE- 1. El valor esperado del contenido de agua para este estrato está comprendido entre 0 y 50%, en tanto que el valor esperado de N oscila entre 20 y 50 golpes. El nivel máximo de la incertidumbre en este estrato es 30% para el w y de 11 golpes para el SPT en las zonas más alejadas a un sondeo real.

g) Séptimo estrato: estrato blando, continuo.

Presenta un echado de poniente a oriente. Su límite superior se encuentra cerca del sondeo SPE-4 aproximadamente a 14.5 m de profundidad y su límite máximo inferior alcanza 17 m de profundidad en la esquina poniente del terreno. Su espesor varía de 1 a 2.5m, siendo éste máximo en la zona cercana al sondeo SPE-3. El valor esperado del contenido de agua en este estrato se encuentra entre 100 y 150%, en tanto que el valor esperado de N oscila entre 8 y 20. El nivel máximo de la incertidumbre en este estrato es de 30% para el w y de 11 golpes para el SPT en las zonas más alejadas a un sondeo real.

h) Octavo estrato: estrato firme, continuo.

Su límite máximo superior se ubica a 16 m de profundidad. Su espesor varía de 0.5 a 2.5 m. En la zona delimitada por los sondeos SM-1, SPE-1, SM-2 y SPE-2 este estrato adquiere su mayor espesor, en tanto que cerca de los sondeos SPE-3, SM-5, SPE-4 y SM-6, presenta un adelgazamiento. El valor esperado del contenido de agua para este estrato está comprendido entre 0 y 50%, en tanto que el valor esperado de N oscila entre 20 y 50. El nivel máximo de la incertidumbre en este estrato es de 30% para el w y de 11 golpes para el SPT en las zonas más alejadas a un sondeo real.

i) Noveno estrato: estrato firme, semi-continuo,

En general se puede decir, que a más de 20 m de profundidad, el suelo presenta una resistencia media a alta. Bajo este nivel es evidente la presencia de un estrato rígido con un espesor casi constante (8.5 m) en la zona delimitada por los sondeos SM-5, SPE-4 y SM-6. De este se desprende un estrato uniforme

de espesor aproximadamente constante (3 m) que se extiende hacia el resto del terreno, con un límite máximo superior de 22m y un límite máximo inferior de 24 m. El valor esperado del contenido de agua para este estrato irregular está comprendido entre 0 y 50%, en tanto que el valor esperado de N oscila entre 45 y 50 golpes. Bajo el nivel de 24m, y hasta aproximadamente 28.5m de profundidad, los valores de resistencia son en general altos, pero es evidente el cruce de un cauce de material de mediana resistencia en la franja central del terreno, en las cercanías de los sondeos SM-3, SPE-2, SPE-3 y SM-4, con un valor esperado del contenido de agua comprendido entre 0 y 50%, y un valor de N que oscila entre 15 y 40 golpes. El nivel máximo de la incertidumbre en el estrato firme es de 20% para el w y de 11 golpes para el SPT en las zonas más alejadas a un sondeo real.

Resulta interesante comparar lo anterior con la interpretación de la campaña de exploración geotécnica basada en representaciones en gran medida "artísticas" de la continuidad estratigráfica del subsuelo (Inciso 8.1 y figuras 48 y 49 de CFE, 1998). Si bien algunos rasgos estratigráficos coinciden, especialmente en cuanto a los cortes suroeste-noreste, por lo contrario la interpretación estratigráfica difiere notablemente para los cortes en la dirección noroeste-sureste, en particular, la geoestadística pone claramente en evidencia las discontinuidades de los estratos y sus echados.

3.4 Análisis comparativo

3.4.1 Estratigrafía

A continuación se presentan algunos de los puntos más importantes que se pueden señalar respecto a las diferencias entre las condiciones del subsuelo de los sitios señalados.

- Las diferencias más importantes que podrían aportar elementos de decisión entre un sitio o el otro, se encuentran concentradas básicamente en la denominada formación arcillosa superior (FAS).
- En el sitio Sosa Texcoco el espesor de esta FAS llega a ser hasta de 15 m de espesor. En el sitio Tecámac tiene un espesor del orden de los 12 m.
- En ambos sitios la FAS se compone de un estrato arcilloso superficial, al que le subyacen capas de suelos granulares y estratificaciones arcillosas de menor espesor y compresibilidad que la capa superior.
- El estrato arcilloso superficial en el caso de Sosa Texcoco presenta espesores de entre 7.5 y 11 m, mientras que en Tecámac el espesor es de 6 m máximo.
- El contenido de agua de esta capa arcillosa superficial fluctúa entre 200 y 500% para el sitio Sosa Texcoco. En Tecámac varía entre 120 y 300%.
- La resistencia al corte de este estrato arcilloso superficial es menor en el sitio Sosa Texcoco, presenta cohesiones entre 0.3 y 0.4 kg/cm², entre los 2 y 5 m de profundidad. En estos mismos niveles para el sitio Tecámac se presenta un ligero aumento de la resistencia hasta valores entre 0.5 y 0.6 kg/cm².
- Las relaciones de vacíos para las arcillas superficiales en Sosa Texcoco se encuentran entre 9 y 12. En Tecámac los valores se reducen de manera importante hasta variar entre 3 y 7 máximo.
- La compresibilidad de las arcillas superficiales en Sosa Texcoco es extraordinariamente alta. Los módulos de compresibilidad alcanzan valores de 0.6 cm²/kg, mientras que en Tecámac los valores máximos son de 0.2 cm²/kg.
- Los valores del OCR obtenidos en las arcillas superficiales en Sosa Texcoco hacen ver que las arcillas más compresibles, localizadas entre los 3 y 6 m de profundidad se encuentran normalmente consolidadas (OCR=1). En Tecámac las arcillas más compresibles, localizadas entre los 2.5 y 4.5 m de profundidad, se encuentran preconsolidadas (2<OCR<4), situación que puede ser aprovechada para tener menores asentamientos.

3.4.2 Análisis geoestadístico

Como resultado de los análisis geoestadísticos de ambos predios, se encontraron las siguientes semejanzas y diferencias:

- Dados el tipo, profundidad y cantidad de sondeos ejecutados en cada predio, se determinó realizar los análisis geoestadísticos de la manera siguiente:

Sitio Sosa Texcoco (De 0 a 60 m de profundidad). Debido a la diferencia clara de contenido de agua que presentaba el subsuelo, se realizaron los análisis en dos horizontes, de 0 a 15 m, cuyo valor varía entre 200 y 400% y de 15 a 60 m, que varía entre 50 y 150%. Se usó la información de cinco sondeos mixtos. En el predio se realizaron 12 sondeos de cono eléctrico, 8 a 60 m de profundidad y los 4 restantes a 30 m. De 0 a 15 m de profundidad se utilizaron diez sondeos y de 15 a 60 m ocho sondeos.

Sitio Tecámac (De 0 a 30 m de profundidad). Con los parámetros de contenido de agua (w) y resistencia a la penetración estándar (N). Se usó la información de seis sondeos mixtos y cuatro de penetración estándar.

- En ambos sitios se observó que para el contenido de agua (w) existe una tendencia a disminuir con la profundidad, de manera que se propuso una ecuación que gobernara esta tendencia, al ajustar un hiperplano a los datos de las realizaciones (sondeos). Los coeficientes de espacio x , y , z correspondientes a la ecuación de tendencia lineal global, muestran que la relación de decremento de w con la profundidad z es de 2.15% y de 2.75% por metro para Sosa Texcoco y Tecámac respectivamente, mientras que los coeficientes de espacio x, y son cercanos a cero. Por tanto la variación de w a una misma profundidad en diferentes puntos en planta es muy pequeña respecto a su variación vertical.
- Para Sosa Texcoco, de manera similar que para el w , se obtuvo una ecuación general de tendencia global de la resistencia de cono, de la cual se concluye que para la profundidad z , esta variable disminuye 0.52% por metro y para los parámetros x , y son prácticamente igual a cero.
- Para Tecámac se obtuvo que la variable de resistencia N disminuye 1.29% por metro y también los parámetros x , y son prácticamente igual a cero.
- Para todos los casos se obtuvieron modelos de correlación horizontal y vertical, los cuales fueron utilizados posteriormente para la estimación condicional.
- Para evaluar las propiedades del suelo en cualquier punto del espacio tridimensional a partir de los datos disponibles, se recurrió al método de *estimación lineal multivariable*. Con éste se definieron cortes longitudinales y transversales formados por sondeos virtuales contiguos a cada 10 m. Cortes similares fueron construidos con la desviación estándar de cada propiedad, la cual indica la incertidumbre asociada a la estimación.
- Con los modelos físicos construidos para simplificar la interpretación de los cortes virtuales (para ver las propiedades en forma tridimensional) se pudieron identificar los diferentes estratos y su continuidad. También se detectaron las zonas donde faltaba información (zonas de mayor incertidumbre).

- Para el sitio Sosa Texcoco se consideraron únicamente suelos “blandos” y “firmes”, correspondientes a valores de w mayores de 100% y menores de 50% respectivamente. Para tratar de uniformizar la descripción de los materiales existentes, para el parámetro de penetración estándar se consideró que los suelos “blandos” corresponden a suelos con resistencia menor a 10 golpes y los firmes a resistencia mayor a 20 golpes.
- Cabe aclarar que la resistencia a la penetración estándar tiene sus extremos acotados, 0 golpes para la menor resistencia y 50 golpes para la mayor. Esto tiene el inconveniente que no existe continuidad para suelos compactos que sin duda tienen una resistencia mayor a 50 golpes.
- Para Tecámac, con la finalidad de identificar de manera práctica las zonas más o menos convenientes para el asentamiento de los edificios se consideraron también suelos “blandos” y “firmes”. Con relación al w , esta clasificación es igual que para Sosa Texcoco, es decir, corresponde a valores mayores de 100% y menores de 50% respectivamente. Respecto a la resistencia de cono, los primeros corresponden a resistencia menor de 20 kg/cm² y los segundos a una mayor a 50 kg/cm².
- Debido a la presencia de lentes muy duros, la resistencia de cono tiene cambios muy bruscos para profundidades relativamente pequeñas. Puede variar de 3 a 100 kg/cm² en 50 cm de profundidad.

3.4.3 Condiciones ingenieriles

3.4.3.1 Comparación entre los comportamientos esperados de las cimentaciones para ambos sitios

Aquí se presenta la comparación entre el comportamiento esperado del arreglo hipotético propuesto, el cual se utilizó en ambos sitios. De la comparación se destacan los siguientes puntos:

- El centro de una de las cuatro estructuras del arreglo, cuando éste se desplanta sobre la superficie natural del terreno ($D_f = 0.0$ m), sufriría un asentamiento diferido con el tiempo de 1.60 m en el caso de Sosa Texcoco y de 0.25 m en el caso de Tecámac. Los asentamientos diferenciales máximos entre el centro y la esquina de una de las estructuras serían de 1.15 m para el caso de Sosa Texcoco y de 0.21 m para el sitio Tecámac. Existe pues una relación de 6 a 1 aprox., en la magnitud de los asentamientos de un sitio a otro.
- Cuando el arreglo se desplanta a 2 m de profundidad, el centro de una de las cuatro estructuras sufriría un asentamiento diferido con el tiempo de 0.94 m en el caso de Sosa Texcoco y de 0.09 m en el caso de Tecámac. Los asentamientos diferenciales máximos entre el centro y la esquina de una de las estructuras serían de 0.63 m para el caso de Sosa Texcoco y de 0.07 m para el sitio Tecámac. Existe pues una relación de 10 a 1 aproximadamente, en la magnitud de los asentamientos de un sitio a otro.

3.4.3.2 Posible comportamiento del subsuelo para diferentes tipo de cimentación

Primeramente conviene aclarar que en el momento de realizar el presente estudio no se tiene una propuesta de proyecto de la planta de tratamiento para ninguno de los dos sitios, por lo que se desconoce la localización de las principales estructuras.

Una definición estratigráfica es indispensable para la determinación de la(s) zona(s) donde más convenga la ubicación de los edificios de la planta de tratamiento.

Para el sitio Tecámac la ubicación de los sondeos fue aceptablemente distribuida en toda la superficie del predio.

Dadas las dimensiones del predio del sitio Sosa Texcoco y las condiciones esperadas del subsuelo, se considera que la cantidad de cinco sondeos de tipo mixto fue insuficiente, puesto que se dejó sin recuperación de muestras (alteradas e inalteradas) una gran área del terreno, sobretudo en la zona sur-oriente del mismo. Esto es patente cuando vemos la incertidumbre (desviación estándar) en los cortes virtuales correspondientes. A pesar de lo anterior, con la estratigrafía definida (basada en el contenido de agua y la resistencia de cono) se pueden determinar la(s) zona(s) donde más convenga la ubicación de los edificios de la planta.

Para ambos sitios, se observan cuatro características generales que afectan la selección de los sistemas de cimentación y los niveles de desplante correspondientes.

- 1) Se observa interestratificación de suelos blandos y rígidos.
- 2) Para Tecámac se ha encontrado una tendencia general en varios estratos continuos y semi-continuos a presentar un echado con dirección poniente a oriente.
- 3) Es común encontrar una gran variabilidad en los espesores de los estratos, tanto en suelos blandos como firmes.
- 4) Se observa una gran erraticidad en la formación de los estratos. En algunas zonas los estratos pierden continuidad por adelgazamiento de su espesor, o simplemente por cambio brusco de propiedades (asociado a la presencia de lentes de diferentes materiales).

A continuación se discuten algunas de las principales aplicaciones ingenieriles de las características del medio sobre el diseño de la cimentación de las estructuras de los edificios de la planta. Los criterios generales presentados deberán corroborarse con la elaboración de los sondeos y pruebas adicionales requeridos, una vez que se haya definido la ubicación en planta de los edificios al nivel de anteproyecto.

Respecto a los posibles sistemas de cimentación de la planta, los resultados del estudio estratigráfico presentado sugieren los comentarios preliminares siguientes:

a) Cimentaciones someras.

Es posible que, por lo menos para algunas estructuras, sea aceptable recurrir a una cimentación superficial o semi-superficial.

Este tipo de cimentación no deberá desplantarse en los estratos arcillosos blandos que se ubican prácticamente en la superficie, cuyas características podrían inducir un comportamiento inadecuado por escasa capacidad de carga y alta deformabilidad tanto instantánea como diferida por consolidación.

Una opción más viable podrá ser el desplante de este tipo de edificios en el primer estrato firme, por medio de zapatas o micropilotes. Deberá tomarse en cuenta que el espesor de este estrato es muy variable y puede resultar escaso y ocasionar problemas de punzonamiento, por lo que esta condición deberá verificarse.

b) Cimentaciones compensadas

El sistema de cimentación compensada presenta ciertas ventajas, ya que evita tanto asentamientos excesivos como emersiones. Sin embargo, si se pretende adoptar este sistema, se tendrán que considerar todos los aspectos analizados en la referencia (Auvinet, G., Alberro, J, Hernández, R., 1998). Por otra parte, deberán analizarse los problemas generados por la heterogeneidad del subsuelo en planta; deberá cuidarse en particular que el suelo en el que se desplante las estructuras presente características similares en toda el área, ya que no sería aceptable que parte quedara en terreno compresible y parte en suelo duro.

c) Cimentaciones basadas en pilotes de fricción.

Del estudio realizado se deduce que resulta indeseable el uso del sistema de cimentación basado en pilotes de fricción, debido a la erraticidad con la que se definen los diferentes estratos, así como a la gran variabilidad de los espesores de los mismos. En un grupo de pilotes de fricción existiría el peligro de que algunos se apoyaran en estratos o lentes resistentes y el resto en arcilla, lo que podría provocar asentamientos diferenciales muy importantes.

d) Cimentaciones basadas en pilotes de punta.

Algunos estratos presentan características adecuadas para el apoyo de pilotes de punta. Sin embargo, el diseño deberá considerar la interacción de los pilotes con los suelos compresibles sobreyacentes a la capa de apoyo que podría generar fricción negativa y provocar una emersión relativa que afecte el comportamiento de las instalaciones hidráulicas si este fuera el caso. Deberá tomarse en cuenta también la interacción dinámica de los pilotes con el suelo y la superestructura, para el medio específico donde se ubicara el edificio, debido a la actividad sísmica de la zona.

4 CONCLUSIONES

- En los estudios geotécnicos tradicionales siempre es necesario definir un “modelo estratigráfico” representativo de todo el predio en estudio, o de una parte de él, dependiendo de las condiciones topográficas, estratigráficas, y de distribución de estructuras, con el cual se realizan los análisis geotécnicos necesarios (capacidad de carga, asentamientos, estabilidad de taludes, etc.) para el diseño y construcción de las estructuras de cimentación.
- Las técnicas convencionales empleadas en la geotecnia para la presentación de los datos relativos a las propiedades del suelo incluyen los perfiles geotécnicos y los cortes estratigráficos que generalmente se construyen bajo un criterio subjetivo, lo cual conduce a que su elaboración sea un tanto artística. En algunos casos, se emplea alguna técnica de interpolación que ayuda a reducir el grado de subjetividad. Las técnicas de interpolación que existen son muy variadas; en general, todas tienen un fundamento teórico matemático adecuado pero carecen de fundamento físico y en particular no toman en cuenta el concepto de correlación espacial.
- Por otro lado, en la mayoría de los proyectos de ingeniería el presupuesto asignado para el estudio de mecánica de suelos es limitado, por lo que es necesario que el ingeniero geotécnico seleccione en forma adecuada los sitios, la cantidad y el tipo de exploración, así como programar eficientemente las pruebas de laboratorio. Además, es indispensable obtener el máximo provecho de esta información al momento del diseño geotécnico. Este provecho, en primer término, se puede obtener por medio de la experiencia; sin embargo, también es posible (y recomendable) utilizar cualquier tipo de herramienta que permita optimizar la información disponible.
- Primeramente, podría pensarse en la *estadística descriptiva*, pero tiene la limitante de que al describir estadísticamente una propiedad del suelo, a partir de una muestra, los datos se mezclan y por tanto se pierde todo control sobre su procedencia (ubicación). El enfoque de la estadística clásica resulta demasiado simple si se pretende realizar inferencias estadísticas. La técnica más simple para describir la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos de un punto a otro de un medio dado consiste en recurrir al formalismo de las variables aleatorias, o bien, como lo propone la *geoestadística*, de los campos aleatorios.
- El *análisis geoestadístico* es una de las herramientas de optimización, el cual recurre a los métodos probabilistas, que junto con los análisis ingenieriles convencionales, proveen los medios para definir las estrategias de adquisición de datos y sobre todo cuantificar el grado de incertidumbre residual tomando en cuenta la información disponible. Estos métodos facilitan la caracterización geotécnica del sitio, y permiten la cuantificación de la variabilidad y heterogeneidad de la estratigrafía y de las propiedades de los suelos.
- La *geoestadística* es una herramienta que puede aplicarse a la geotecnia para obtener una caracterización racional de las propiedades del suelo en un sitio de interés. Permite evaluar si las muestras y registros obtenidos en la campaña de reconocimiento fueron suficientes y representativos, conocer la relación espacial que existe entre las diferentes propiedades del suelo analizadas, estimar valores puntuales o medios en zonas donde no fue posible obtener muestras y registros y, además, permite evaluar de manera explícita la incertidumbre asociada a cada uno de los valores estimados.

- La *geoestadística*, a diferencia de la estadística y del enfoque de variable aleatoria simple, permite analizar datos de fenómenos naturales distribuidos en el tiempo o en el espacio (como es el caso del presente trabajo), para lo cual se toma en cuenta la posición relativa que guardan los datos de la muestra.
- Para desarrollar un *análisis geoestadístico* se recurre al uso de la *teoría de la probabilidad*, la cual permite seguir un razonamiento inductivo al hacer uso de un lenguaje particular, y de algunas de sus herramientas más prácticas, las cuales pueden utilizarse una vez que se establece un cierto número de parámetros, los cuales se obtienen al aplicar los principios básicos de estimación que se enuncian en la *estadística*.
- La referencia de las propiedades del suelo analizadas a un sistema coordinado espacial y la aleatoriedad con la que se presentan en diferentes puntos en el medio permite asociar la variabilidad de las propiedades del suelo a la teoría de los *campos aleatorios*, dentro de la cual se enmarca el tratamiento de toda la información sujeta al *análisis geoestadístico*.
- En esta tesis se presentaron los fundamentos teóricos que sustentan un *análisis geoestadístico*, se propuso una metodología simple que permitiera su desarrollo, y una aplicación práctica que permitiera visualizar el alcance que puede tener el uso de la geoestadística en la geotecnia, al presentar los casos de los dos probables sitios (Sosa Texcoco y Tecámac) donde se pretende construir la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Texcoco Norte, localizadas en el norte de la zona lacustre del Valle de México.
- La metodología seguida para el *análisis geoestadístico* consiste, en términos generales, en lo siguiente:

Adquisición de la información

- Clasificación de la información. Partiendo de los resultados de la exploración de campo y de los trabajos de laboratorio, incluyó utilizar los parámetros del subsuelo que eran representativos del predio y que se tenían en cantidad suficiente. En este caso, se utilizó el contenido de agua (w) para ambos sitios y la resistencia de cono eléctrico (q_c) y a la penetración estándar (SPT) para los sitios Sosa Texcoco y Tecámac respectivamente.
- Captura de la información. Se utilizó la hoja de cálculo Excel para la captura de la información en forma de columnas.
- Generación de base de datos digital. Se capturaron todos los parámetros disponibles del subsuelo con la finalidad de tenerlos listos en caso de que se requirieran para un análisis adicional.

Análisis de la información

- Descripción gráfica de la información. Consistió en la generación de perfiles estratigráficos de cada propiedad con la profundidad para determinar tendencias de variación. Así como la

generación de histogramas para conocer la variabilidad del conjunto de datos, en cuanto a su rango, los valores que ocurren con mayor frecuencia y el grado de dispersión alrededor de los valores medios del conjunto.

- Descripción numérica de la información. Se calcularon los parámetros estadísticos de tendencia central (media, mediana y moda) y de dispersión (desviación estándar y varianza) de cada sondeo.
- Análisis de las propiedades del suelo y estimación condicional. Para evaluar las propiedades en cualquier punto del medio a partir de los datos disponibles, se recurrió al método de *estimación lineal multivariable*.

Interpretación de resultados

- Graficación de cortes virtuales de las propiedades del suelo. Con el procedimiento de estimación condicional se pueden determinar los parámetros del suelo en cualquier punto del medio. En este caso, se definieron tres cortes longitudinales y tres transversales formados por sondeos virtuales contiguos a cada 10 m, a lo largo y ancho del terreno
 - Interpretación ingenieril de los resultados. Para cada sitio de interés se realizó la interpretación considerando ambas propiedades analizadas, incluyendo: determinación de la estratigrafía, comparación entre los comportamientos esperados de diferentes tipos de cimentación y el posible comportamiento del subsuelo ante éstos.
- En el presente trabajo, como herramienta de visualización, se utilizó el gráfico de superficie de contorno de la hoja de cálculo de Excel, el cual proporciona gráficas bastante aceptables para representar los diferentes parámetros obtenidos del *análisis geoestadístico*; sin embargo, se considera que es conveniente desarrollar técnicas para mejorar la visualización de resultados, basadas en software especializado para ese fin.
- Todos los programas utilizados fueron realizados en el lenguaje de programación Basic, lo cual implica realizar una gran cantidad de “corridos” para obtener los resultados. Asimismo, se requiere un arduo trabajo adicional con el fin de ordenar los archivos y hacerlos disponibles para su visualización. Con base en lo anterior, se considera indispensable que los programas utilizados sean traducidos a lenguajes de programación más amigables y rápidos (como puede ser el Visual Basic o el Visual C++), con el fin de optimizar el proceso de cálculo. De hecho, actualmente está en proceso de formulación de un trabajo de este tipo (Dávalos, 2002).
- En esta tesis se estudiaron dos sitios del norte de la zona lacustre del Valle de México. Se recomienda que para tener un panorama más completo de las características estratigráficas del subsuelo en toda la zona lacustre, se realicen *análisis geoestadísticos* adicionales en otros sitios de la misma.
- Con la finalidad de analizar la utilidad de la *geoestadística*, a continuación se presentan algunas ventajas y limitaciones:

Ventajas

- Permite sistematizar un proceso de análisis.
- Una vez obtenida una serie de sondeos y cortes virtuales de un área determinada, es muy fácil realizar otros en diferentes sitios de interés dentro de la misma, debido a que toda la información ya está procesada.
- Con la traducción de los programas a paquetes con software más amigable se puede optimizar el tiempo de cálculo.
- Se puede realizar un *análisis geoestadístico* durante el proceso de exploración en campo y durante la ejecución de pruebas de laboratorio, con el fin de tomar decisiones “sobre la marcha” y obtener el mayor provecho durante estas actividades.
- Se puede evaluar la incertidumbre asociada a cada uno de los valores estimados.
- Es posible obtener sondeos virtuales en puntos específicos, incluso en sitios donde existen sondeos reales (en este caso, el sondeo virtual es exactamente igual al sondeo real).
- Con un *análisis geoestadístico* es posible optimizar la información del estudio geotécnico tradicional.

Limitaciones

- Es posible utilizar un *análisis geoestadístico* en sitios relativamente homogéneos. Es menos útil en suelos en los cuales las dimensiones de las heterogeneidades son del mismo orden que las del dominio de estudio.
- Es necesaria una importante cantidad de datos para tener resultados aceptables.

5 REFERENCIAS

- Alberro, J. Hernández R., 1990, "*Fuerzas de filtración y fracturación hidráulica*", Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM, No 528.
- Auvinet, G., 1984, "*Estructura de los medios granulares*", Tesis doctoral, DEPMI, UNAM, México
- Auvinet, G., 1988, "*Proceso estocásticos*", Notas para estudiantes del curso, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM
- Auvinet, G., Alberro, J. Hernández, R., 1998, "*Planta de tratamiento de aguas residuales Texcoco Norte. Evaluación de soluciones basadas en cimentaciones compensadas*", Instituto de Ingeniería UNAM.
- Auvinet, G., Fry J.J., & Rossa, O., 1991, "*Reliability of homogeneous earth fills*", Proceedings, Sixth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, CERRA-ICASP, Mexico, D.F.
- Auvinet, G. & Abaziou, L., 1994, "*Application of Random field theory to control of compaction of earth embankments*", Sciences de la Terre, N° 32, 449-460, Nancy, France.
- Auvinet G., 1999, "*Influencia de un error de medición de tipo multiplicativo sobre la percepción de un campo aleatorio*", Documento interno, Instituto de Ingeniería, UNAM
- Auvinet, G. Arias A., 1991, "*Propagación de grietas*", Memoria del simposio sobre Agrietamiento de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F.
- Auvinet, G., Medina, Z., 1999, "*Interpretación geoestadística de los resultados de la campaña de reconocimiento geotécnico del sitio Tecámac*", Instituto de Ingeniería UNAM.
- Auvinet G, Méndez E. & Juárez M, 2000, "*Actualización de la zonificación geotécnica del D.F. y del Valle de México e interrelación con los datos de información sísmica*", Proyecto: 0558. Instituto de Ingeniería, UNAM
- Azzouz, R. & Bacconnet, C., 1988, "*Optimisation d'une campagne de reconnaissance par géostatistique*", Proceedings, Symposium on Reliability-based Design in Civil Engineering, Lausanne, Vol. 1, 269-276.
- Benjamín, J. & Cornell, A. 1970, "*Probability, Statistics and Decision for Engineers*", McGraw Hill.
- Briaud, J., 1988, "*The Pressuremeter Test*", Diseño de cimentaciones a partir ensayos de campo, Federal Highway Administration, Washington, D.C., EUA.

- CFE, 1997, Informe 97-47-GS. "Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Texcoco Norte, Sitio Caracol Sosa Texcoco, Ecatepec, Estado de México". Elaborado por la CFE para la CNA.
- CFE, 1998, Informe 98-74-GS. "Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Texcoco Norte, Sitio Tecámac, Estado de México". Elaborado por la CFE para la CNA.
- Charbonneau, H.C. & Webster, G.L., 1983, "Control de calidad", Interamericana, México D.F.
- Cochran, W.G., 1977, "Sampling techniques", John Wiley and Sons Inc. Versión en castellano: 1985, "Técnicas de muestreo", Trans Editions Inc. CECSA, México.
- Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR), 1987, "Manual de diseño geotécnico", Volumen 1, Estudios geotécnicos y Diseño del metro en cajón.
- Deutsch, C.V., & Journel, A.G., 1992, "GSLIB: Geostatistical Software Library", Oxford University Press, New York
- Fenton, G.A., 1996, "Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering" ASCE Uncertainty'96 Conference, Madison, Wisconsin.
- Fogli, 1980, "L'approche de Monte Carlo dans les problèmes de sécurité", Thèse de Docteur Ingénieur, INSA de Lyon, France
- González Espíndola, J.L., 1998, "Confiabilidad de taludes, Análisis tridimensional", Tesis de Maestría en Ingeniería (Mecánica de Suelos), DEPFI, UNAM, México, D.F.
- Instituto Nacional de la Investigación Científica, 1952, "Estudios relativos al comportamiento del subsuelo del valle de México", México, D.F.
- Journel, A.G., 1977, "Géostatistique minière", Centre de Géostatistique, Fontainebleau, France.
- Marsal, R. J. y Mazari M. , 1959, "El subsuelo de la ciudad de México", Facultad de Ingeniería, UNAM
- Marsal R. J. y Graue R. , 1969, "El subsuelo del lago Texcoco ", Volumen Nabor Carrillo, S.H. y C.P., Nacional Financiera S. A.
- Matheron, G., 1965, "Les variables régionalisées et leur estimation", Masson & Cie, Editeurs, France.
- Mood, A., & Graybill, F., 1963. "Introduction to the theory of statistics". McGraw-Hill Kogakusha, New York, USA.
- Mooser F., 1970, "Condiciones geológicas acerca del pozo Texcoco PP-1", Quinta Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Tomo II, SMMS.

Mooser F., Montiel A., Zúñiga A., 1996, "*Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla*", Primera Edición, Comisión Federal de Electricidad.

Papoulis, A., 1984, "*Probability, Random Variables and Stochastic Processes*", McGraw hill, USA.

Soulié, M., Favre, M. & Konrad, J.M., 1983, "*Analyse géostatistique d'un noyau de barrage tel que construit*", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp 453-467

Spiegel, M.R., 1961, "*Theory and Problems of Statistics*", Schaum Publishing Company, New York.

Vanmarcke, E.H., 1983, "*Random fields: Analysis and Synthesis*", MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Tabla 1 Parámetros estadísticos básicos de los perfiles verticales del contenido de agua, w%, de 0 a 60 m de profundidad

Sondeo	Coordenadas modificadas ¹		Media w%[*]	Desviación estándar w%[*]	Coeficiente de variación[*]	Número de muestras	Número de muestras por metro
	X	Y					
SM-1	115	510.31	92.56	67.50	0.729	240	4.00
SM-2	123.17	114.39	96.32	68.86	0.700	164	2.73
SM-3	460.84	108.6	121.13	81.42	0.672	154	2.57
SM-4	598.09	713.35	87.01	48.24	0.554	253	4.22
SM-5	316.91	331.73	111.95	83.73	0.748	314	5.23

[*] Considerando que el número de muestras por metro es muy diferente en todos los sondeos y con la finalidad de que la falta de esta información no afecte los valores de la media, desviación estándar y coeficiente de variación, estos parámetros se calcularon con valores interpolados a cada 0.25 m

Referenciadas al (0,0) que corresponde a la esquina sur-poniente del terreno

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Tabla 2. Parámetros estadísticos básicos de los perfiles verticales del contenido de agua, w%, de 0 a 15 m de profundidad

Sondeo	Coordenadas modificadas ¹		Media w(%) ^[*]	Desviación estándar w(%) ^[*]	Coeficiente de variación ^[*]	Número de muestras	Número de muestras por metro
	X	Y					
SM-1	115	510.31	137.02	108.25	0.790	240	4.00
SM-2	123.17	114.39	166.93	95.93	0.575	164	2.73
SM-3	460.84	108.6	201.79	104.33	0.517	154	2.57
SM-4	598.09	713.35	86.27	55.55	0.644	253	4.22
SM-5	315.91	331.73	182.53	119.12	0.653	314	5.23

[*] Considerando que el número de muestras por metro es muy diferente en todos los sondeos y con la finalidad de que la falta de esta información no afecte los valores de la media, desviación estándar y coeficiente de variación, estos parámetros se calcularon con valores interpolados a cada 0.25 m

¹ Referenciadas al (0,0) que corresponde a la esquina sur-poniente del terreno

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Tabla 3 Parámetros estadísticos básicos de los perfiles verticales del contenido de agua, w%, de 15 a 60 m de profundidad

Sondeo	Coordenadas modificadas ¹		Media w(%)[*]	Desviación estándar w(%)[*]	Coeficiente de variación[*]	Número de muestras	Número de muestras por metro
	X	Y					
SM-1	115	510.31	77.41	35.49	0.458	240	4.00
SM-2	123.17	114.39	74.54	32.09	0.431	164	2.73
SM-3	460.84	108.6	92.36	44.72	0.484	154	2.57
SM-4	598.09	713.35	87.29	45.43	0.520	253	4.22
SM-5	315.91	331.73	86.92	46.12	0.531	314	5.23

[*] Considerando que el número de muestras por metro es muy diferente en todos los sondeos y con la finalidad de que la falta de esta información no afecte los valores de la media, desviación estándar y coeficiente de variación, estos parámetros se calcularon con valores interpolados a cada 0.25 m

¹ Referenciadas al (0,0) que corresponde a la esquina sur-poniente del terreno

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Tabla 4 Ecuaciones de tendencia lineal del contenido de agua, w% con la profundidad, por sondeo (información a cotada a 60 m de profundidad).

Sondeo	Coordenadas modificadas		Ecuación
	x	y	
SM-1	115	510.31	$w(z) = 1.9781z + 167.07$
SM-2	123.17	114.39	$w(z) = -3.4209z + 195.83$
SM-3	460.84	108.6	$w(z) = -3.7609z + 253.31$
SM-4	598.09	713.35	$w(z) = -0.4461z + 115.01$
SM-5	315.91	331.73	$w(z) = -2.7295z + 215.41$

Ecuaciones de tendencia lineal del contenido de agua con la profundidad global, hiperplano (información a cotada a 60 m de profundidad).

Todos los sondeos $w(x,y,z) = 0.0374x - 0.0774y - 2.1540z + 200.8518$

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Tabla 5 Parámetros estadísticos básicos de los perfiles verticales de la resistencia de cono, q_c , kg/cm^2 , de 0 a 60 m de profundidad

Sondeo	Coordenadas modificadas ¹		Media resistencia de cono q (kg/cm^2)	Desviación estándar de resistencia de cono q (kg/cm^2)	Coeficiente de variación de pruebas	Número de pruebas	Número de pruebas por metro
	x	y					
SC-1	115.02	108.14	24.47	22.06	0.902	300	5.00
SC-3	457.18	107.75	39.03	38.27	0.980	331	5.52
SC-4	604.78	108.74	34.81	32.68	0.939	432	7.20
SC-6	317.09	314.85	38.50	37.24	0.967	403	6.72
SC-8	108.57	511.49	38.19	38.94	1.020	442	7.37
SC-10	449.56	505.2	42.97	39.91	0.929	393	6.55
SC-11	597.33	706.67	43.68	41.48	0.950	362	6.03
SC-12	606.18	304.62	38.53	36.99	0.960	419	6.98

¹ Referenciadas al (0,0) que corresponde a la esquina sur-poniente del terreno

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Tabla 6 Parámetros estadísticos básicos de los perfiles verticales de la resistencia de cono, q_c kg/cm², de 0 a 15 m de profundidad

Sondeo	Coordenadas modificadas ¹		Media resistencia de cono q_c (kg/cm ²)	Desviación estándar resistencia de cono q_c (kg/cm ²)	Coeficiente de variación de q_c	Número de pruebas	Número de pruebas por metro
	x	y					
SC-1	115.02	108.14	10.35	18.06	1.745	300	5.00
SC-3	457.18	107.75	14.42	28.23	1.958	331	5.52
SC-4	604.78	108.74	14.06	29.97	2.132	432	7.20
SC-6	317.09	314.85	23.39	37.89	1.620	403	6.72
SC-8	108.57	511.49	20.18	36.29	1.798	442	7.37
SC-10	449.56	505.2	17.75	31.22	1.759	393	6.55
SC-11	597.33	706.67	28.78	44.76	1.556	362	6.03
SC-12	606.18	304.62	17.95	36.61	2.039	419	6.98

¹ Referenciadas al (0,0) que corresponde a la esquina sur-poniente del terreno

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Tabla 7 Parámetros estadísticos básicos de los perfiles verticales de la resistencia de cono, q_c kg/cm², de 15 a 60 m de profundidad

Sondeo	Coordenadas modificadas ¹		Media resistencia de cono q (kg/cm ²)	Desviación estándar resistencia de cono q_c (kg/cm ²)	Coeficiente de variación de de variación	Número de pruebas	Número de pruebas por metro
	x	y					
SC-1	115.02	108.14	29.45	21.19	0.720	300	5.00
SC-3	457.18	107.75	47.78	37.57	0.786	331	5.52
SC-4	604.78	108.74	41.91	30.50	0.728	432	7.20
SC-6	317.09	314.85	43.84	35.55	0.811	403	6.72
SC-8	108.57	511.49	44.51	37.89	0.851	442	7.37
SC-10	449.56	505.2	51.72	38.89	0.752	393	6.55
SC-11	597.33	706.67	48.90	39.00	0.797	362	6.03
SC-12	606.18	304.62	45.63	34.41	0.754	419	6.98

¹ Referenciadas al (0,0) que corresponde a la esquina sur-poniente del terreno

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Tabla 8 Ecuaciones de tendencia lineal de la resistencia de cono, q_c Kg/cm², con la profundidad, por sondeo (información acotada a 60 m de profundidad).

Sondeo	Coordenadas modificadas x	y	Ecuación
SC-1	115.02	108.14	$q_c(z) = 0.3549z + 7.3354$
SC-3	457.18	107.75	$q_c(z) = 0.6589z + 5.0315$
SC-4	604.78	108.74	$q_c(z) = 0.6207z + 4.7082$
SC-6	317.09	314.85	$q_c(z) = 0.5146z + 8.3061$
SC-8	108.57	511.49	$q_c(z) = 0.2331z + 18.39$
SC-10	449.56	505.2	$q_c(z) = 0.6442z + 5.9244$
SC-11	597.33	706.67	$q_c(z) = 0.4014z + 14.241$
SC-12	606.18	304.62	$q_c(z) = 0.676z + 3.7632$

Ecuaciones de tendencia lineal de la resistencia de cono, q_c kg/cm² con la profundidad global, hiperplano (información a cotada a 60 m de profundidad).

Todos los sondeos $q_c(x,y,z) = 0.0034x + 0.0066y + 0.5166z + 4.9601$

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TECAMAC.

Tabla 9 Parámetros estadísticos básicos de los perfiles verticales de la prueba de penetración estándar N (SPT)

Sondeo	Coordenadas modificadas ¹		Media N (No estándar golpes)	Desviación N (No. golpes)	Coeficiente de variación de muestras	Número de muestras	Número de muestras por metro
	x	y					
SM-1	1350	146	21.87	18.96	0.867	71	2.37
SM-2	1275	950	15.39	18.62	1.210	69	2.30
SM-3	982	561	22.97	21.37	0.930	66	2.20
SM-4	543	561	22.56	19.53	0.866	63	2.10
SM-5	182	132	29.62	21.00	0.709	65	2.17
SM-6	171	900	15.84	20.63	1.302	69	2.97
SPE-1	1354	546	27.45	20.60	0.750	67	2.23
SPE-2	746	171	23.30	19.11	0.820	67	2.23
SPE-3	725	861	23.90	16.29	0.682	67	2.23
SPE-4	179	554	26.21	19.75	0.754	66	2.20

¹ Referenciadas al (0,0) que corresponde a la esquina sur-poniente del terreno

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TECAMAC.

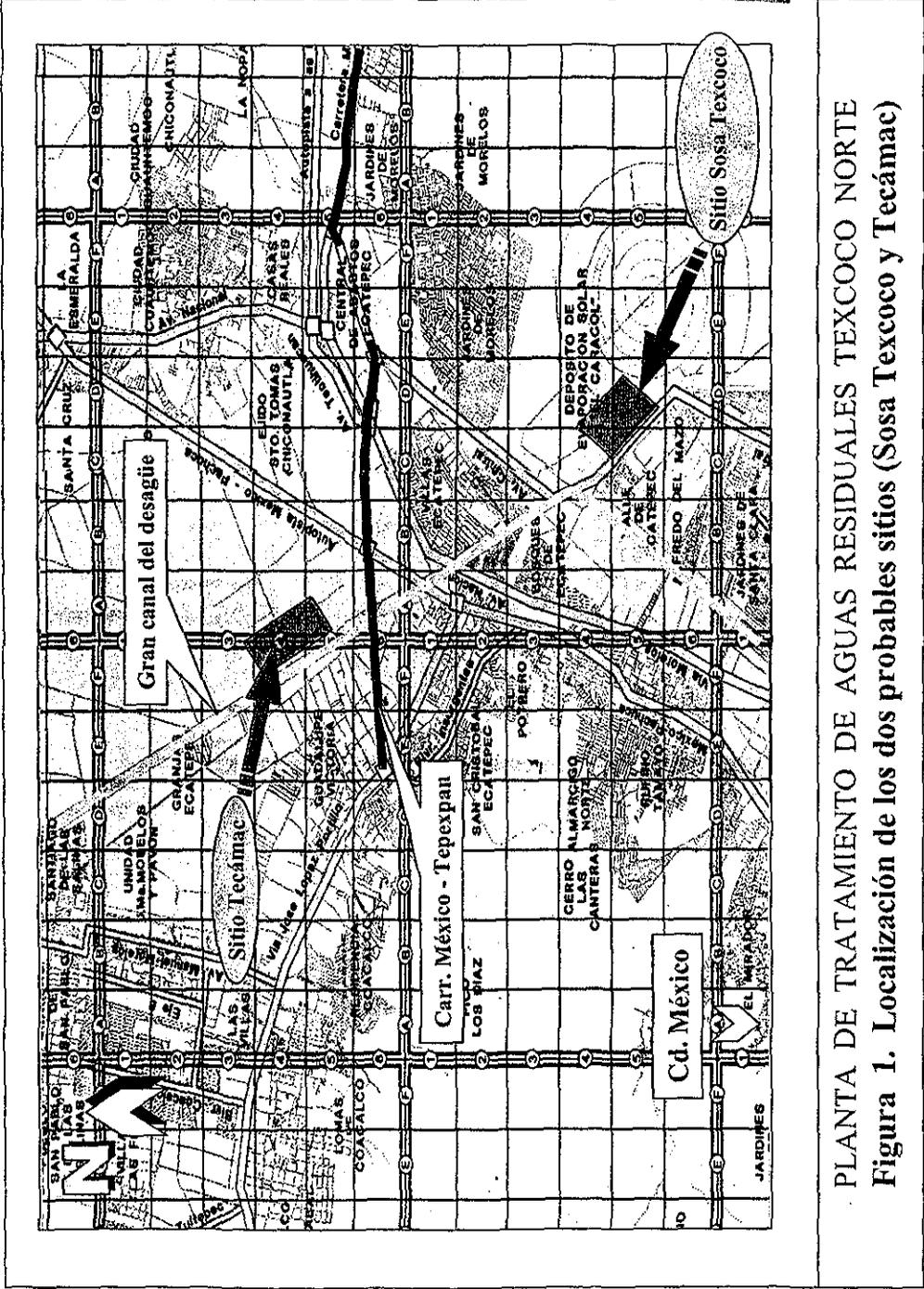
Tabla 10 Ecuaciones de tendencia lineal de la prueba de penetración estándar N (SPT) con la profundidad, por sondeo (información a cotada a 30 m de profundidad).

Sondeo	Coordenadas modificadas		Ecuación
	x	y	
SM-1	1350	146	$N(z) = 1.7494z - 4.9282$
SM-2	1275	950	$N(z) = 0.3245z + 10.071$
SM-3	982	561	$N(z) = 1.5710z - 2.5888$
SM-4	543	561	$N(z) = 0.9714z + 6.1214$
SM-5	182	132	$N(z) = 1.4312z + 6.3598$
SM-6	171	900	$N(z) = 1.4555z - 5.6329$
SPE-1	1354	546	$N(z) = 1.5417z + 4.1198$
SPE-2	746	171	$N(z) = 1.2482z + 4.2247$
SPE-3	725	861	$N(z) = 1.0882z + 7.4121$
SPE-4	179	554	$N(z) = 1.5738z + 2.5127$

Ecuación de tendencia lineal de la prueba de penetración estándar con la profundidad global, hiperplano (información a cotada a 30 m de profundidad).

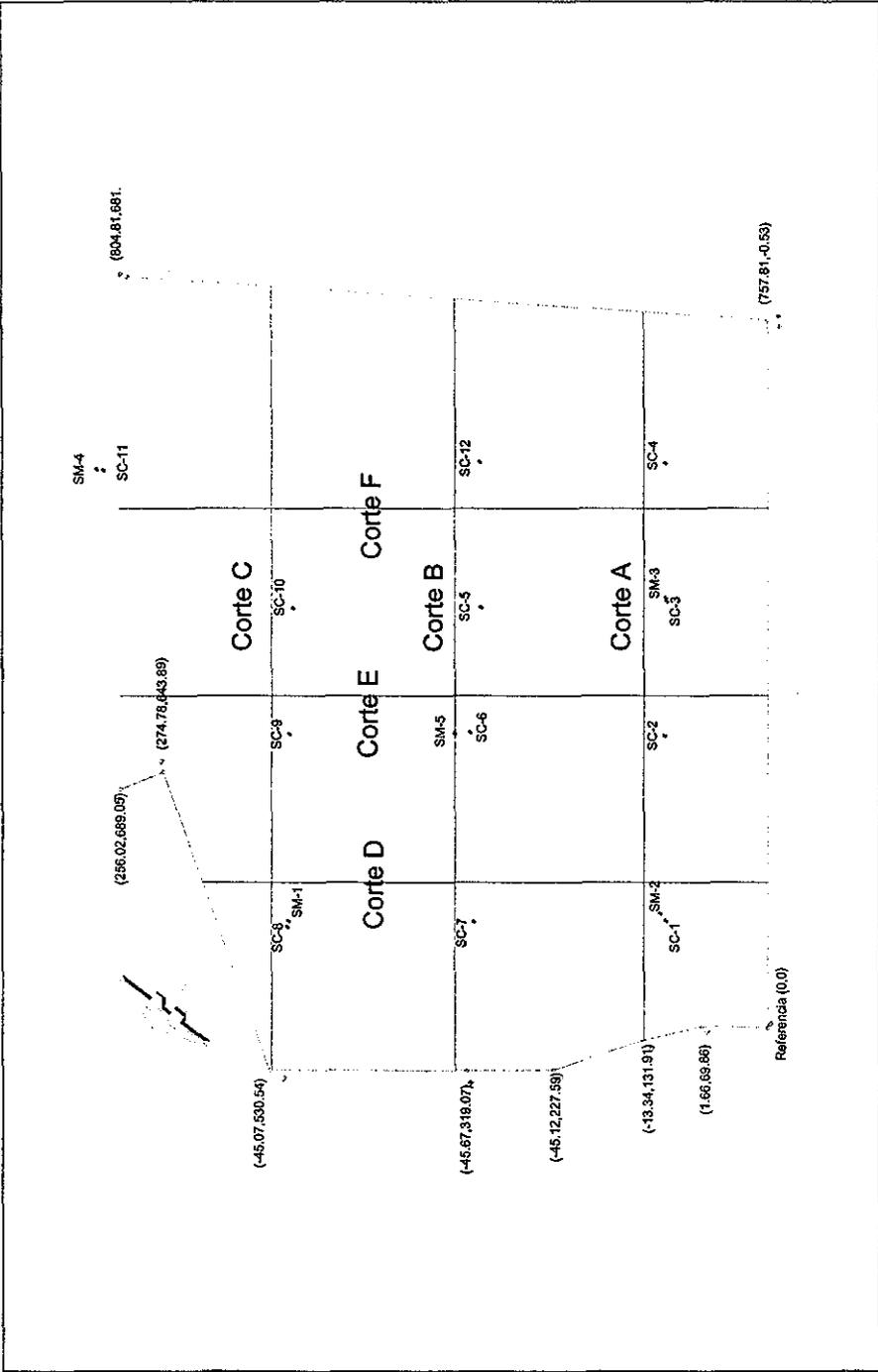
Todos los sondeos $N(x,y,z) = -0.00143x - 0.00892y + 1.28847z + 8.54100$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



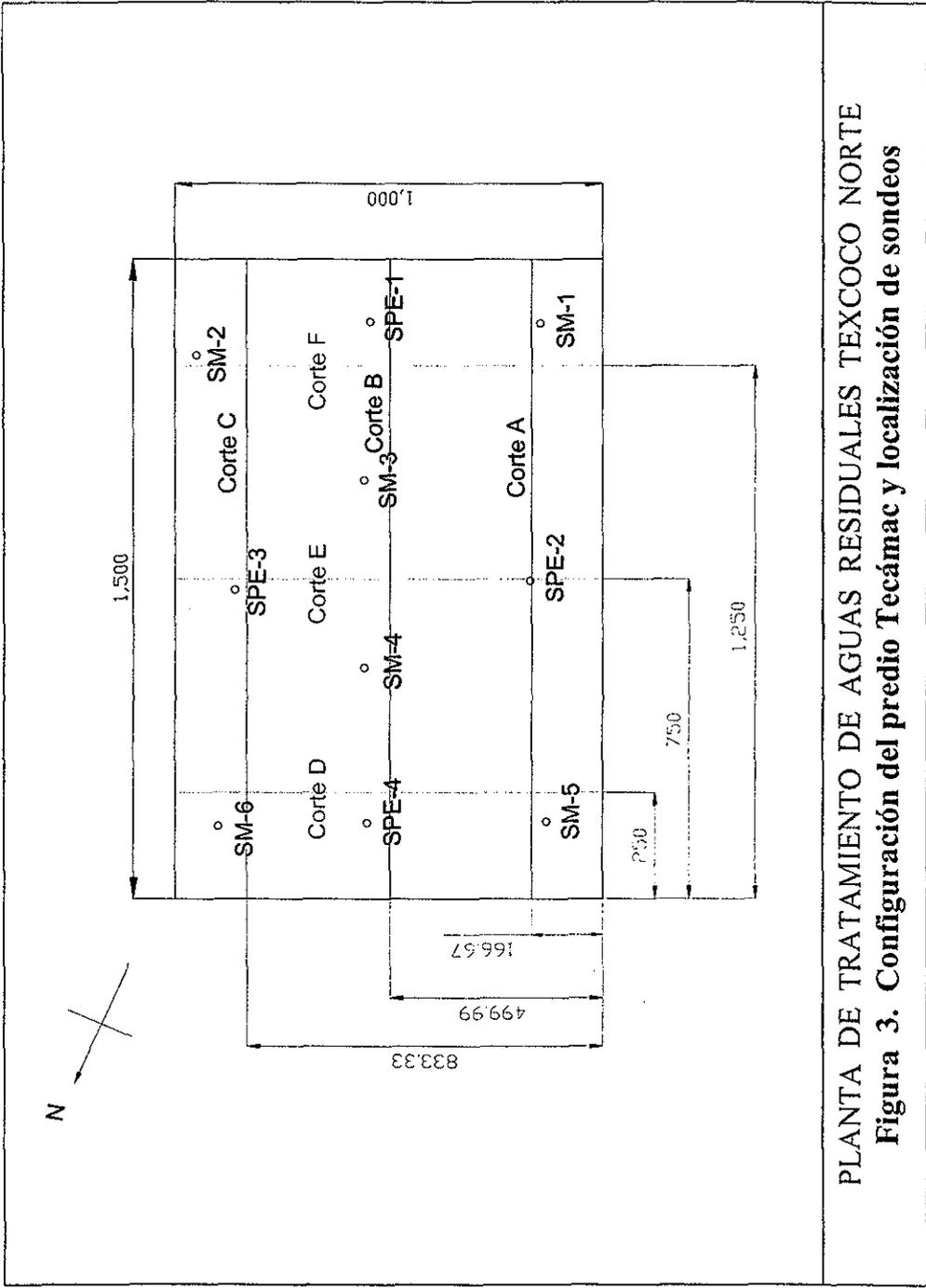
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXCOCO NORTE
 Figura 1. Localización de los dos probables sitios (Sosa Texcoco y Tecamac)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXCOCO NORTE
 Figura 2. Configuración del predio Sosa Texcoco y localización de sondeos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXCOCO NORTE
Figura 3. Configuración del predio Tecámac y localización de sondeos

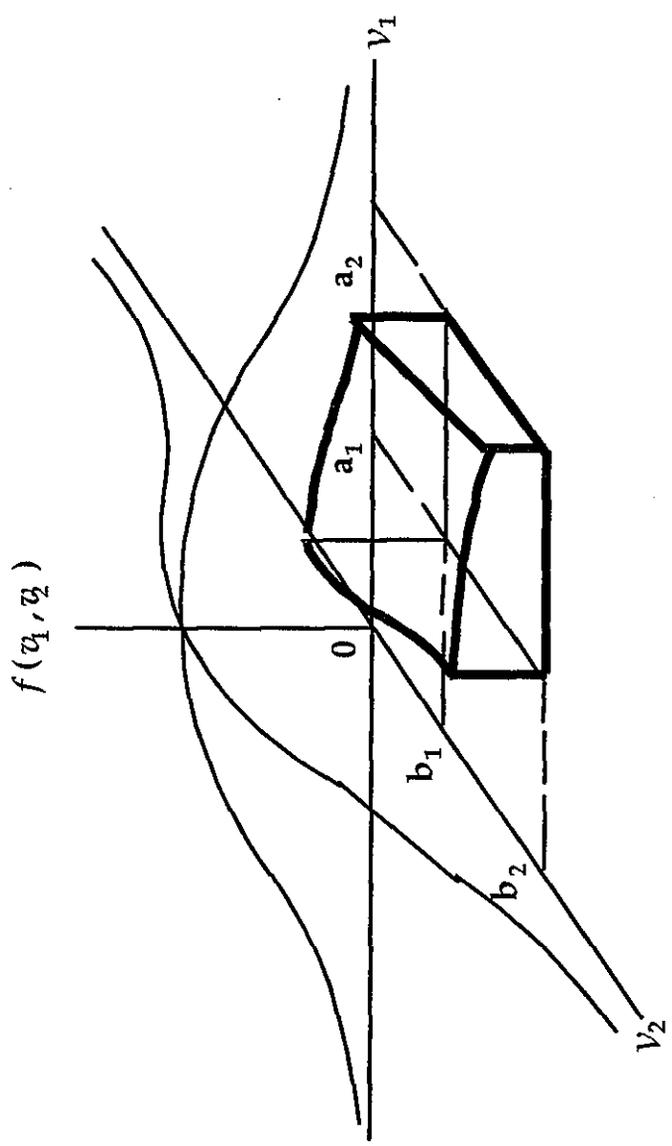
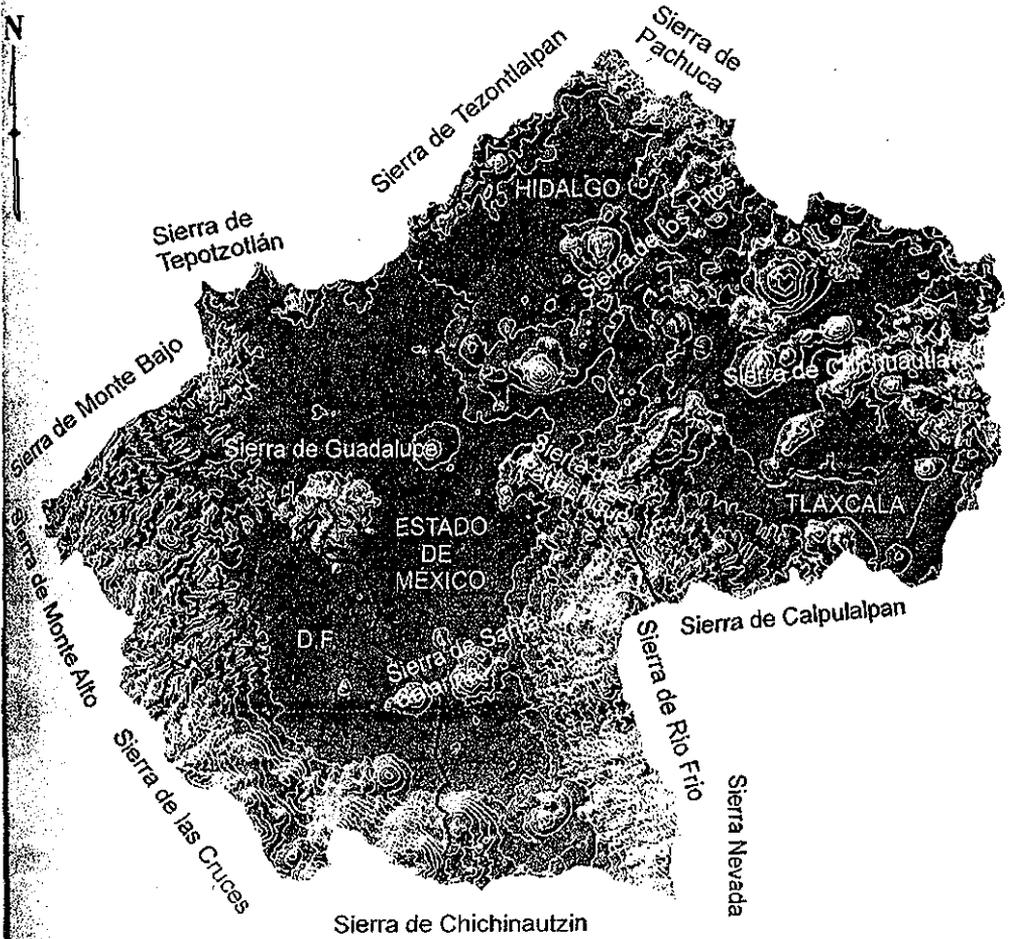


Figura 4. Probabilidad de que V_1 y V_2 queden dentro de determinados intervalos

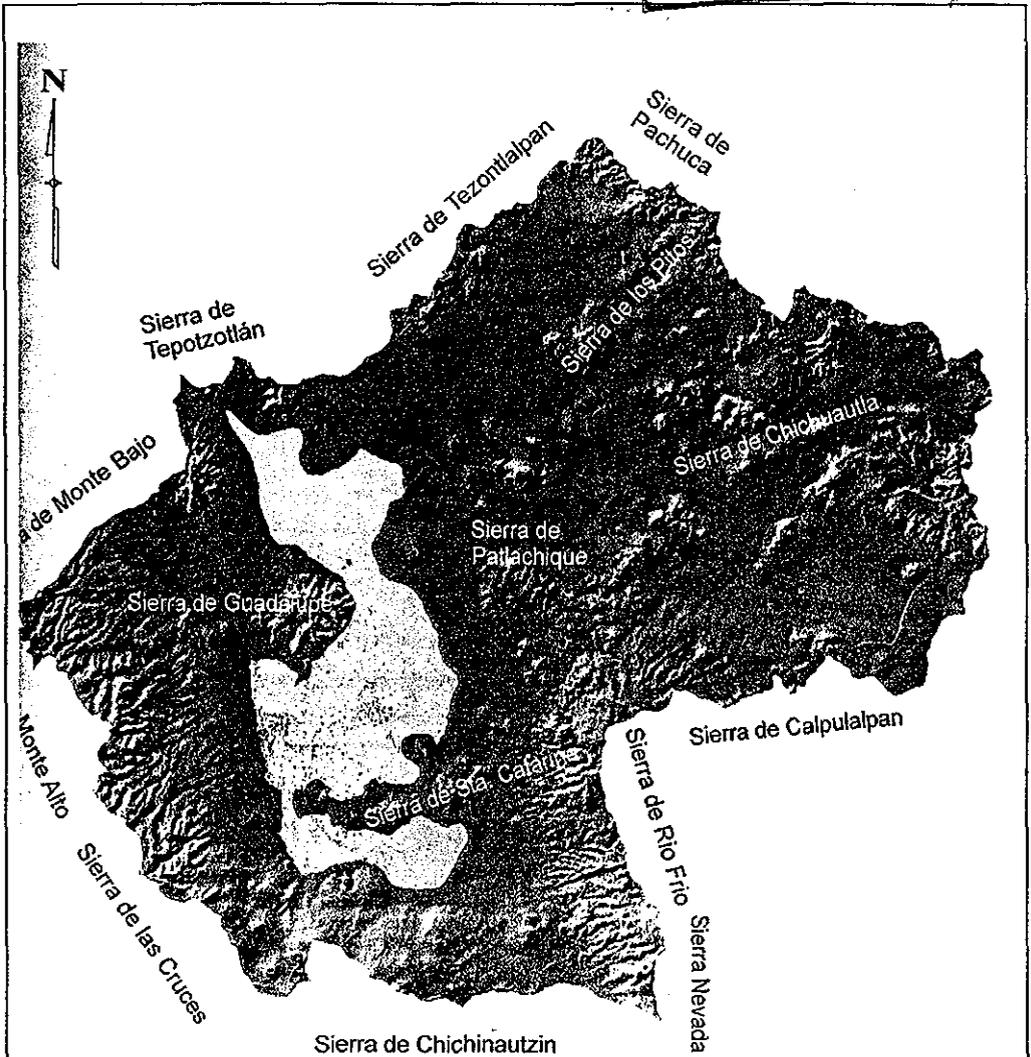
TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Referencia: "Actualización de la zonificación geotectónica del D.F. y del Valle de México e interrelación con los datos de información sísmica", Proyecto: 0558. Instituto de Ingeniería, UNAM

Gabriel Auvinet, Edgar Méndez y Moisés Juárez, 2000

Figura 5. Morfología de la Cuenca de México

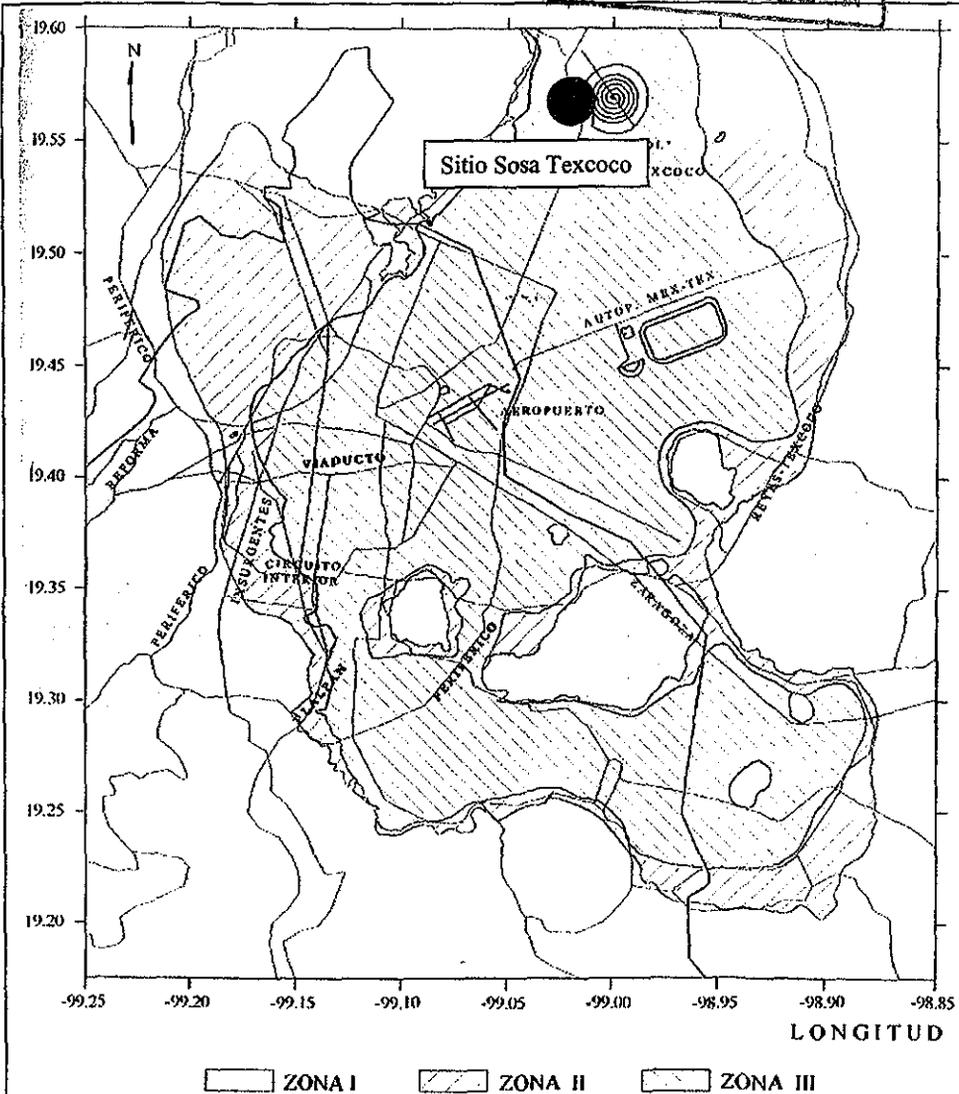


Referencia: "Actualización de la zonificación geotécnica del D.F. y del Valle de México e interrelación con los datos de información sísmica", Proyecto: 0558. Instituto de Ingeniería, UNAM

Gabriel Auvinet, Edgar Méndez y Moisés Juárez, 2000

Figura 6 . Condiciones de la zona lacustre de la ciudad de México en el siglo XVI.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Referencia: "Actualización de la zonificación geotécnica del D.F. y del Valle de México e interrelación con los datos de información sísmica", Proyecto: 0558. Instituto de Ingeniería, UNAM

Gabriel Auvinet, Edgar Méndez y Moisés Juárez, 2000

Figura 6a . Zonificación geotécnica de la ciudad de México (Propuesta)

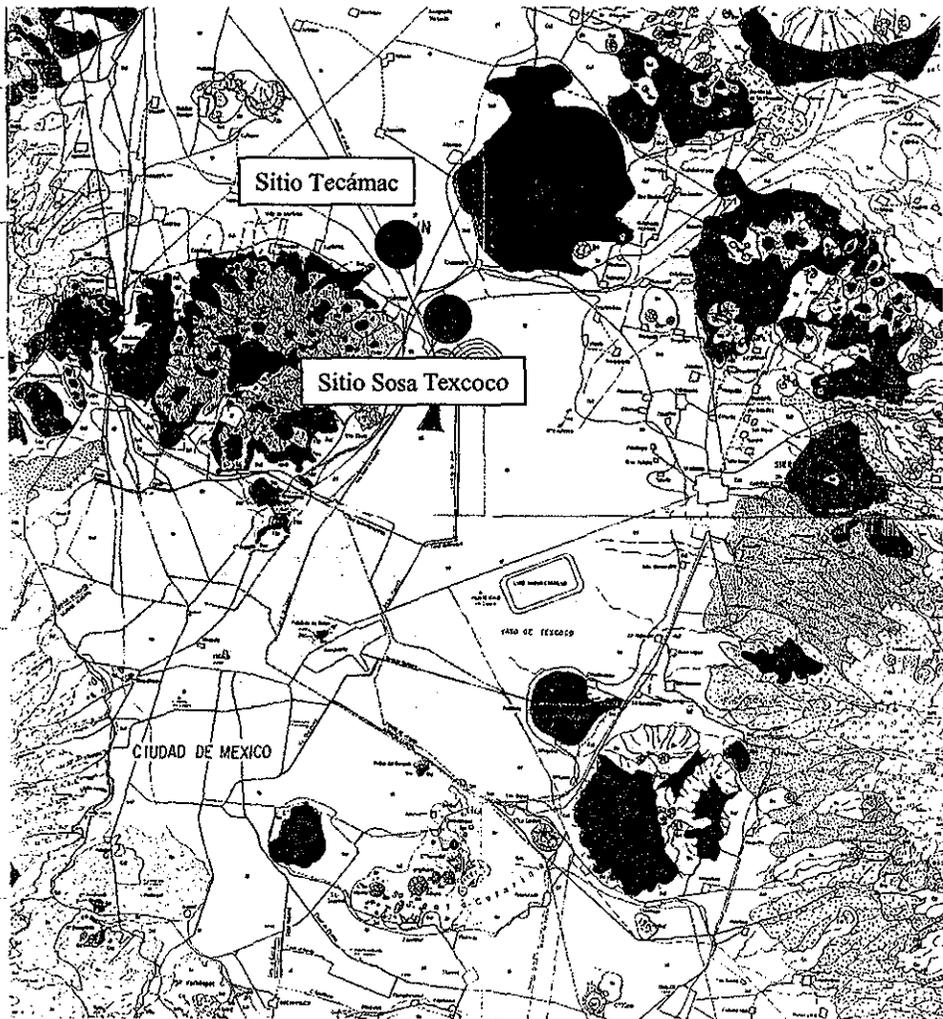


Figura 7 . Localización de los sitios de estudio en el puerto geológico formado por la Sierra de Guadalupe, al noroeste, y por el Cerro de Chiconautla al noreste

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

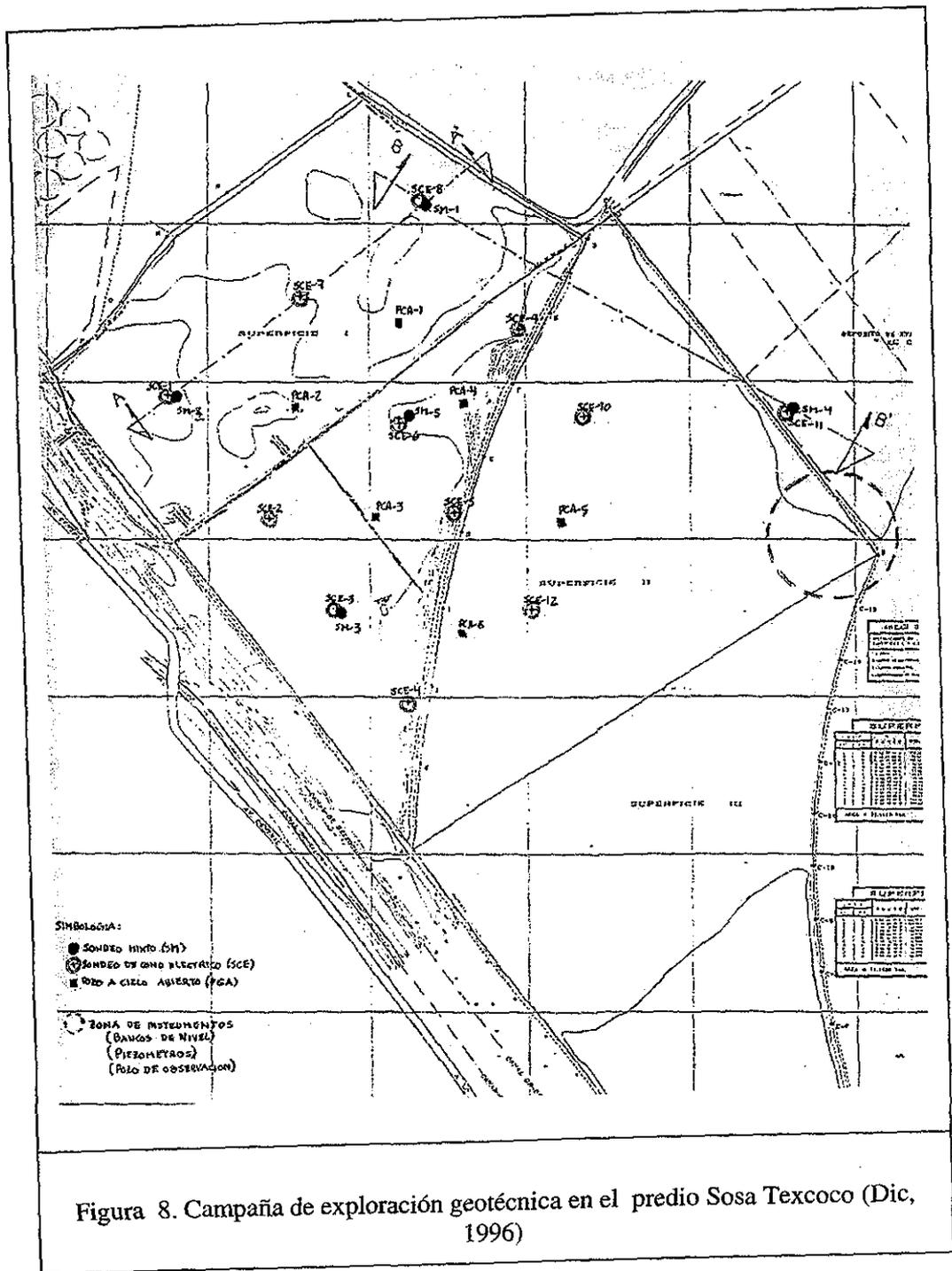


Figura 8. Campaña de exploración geotécnica en el predio Sosa Texcoco (Dic, 1996)

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

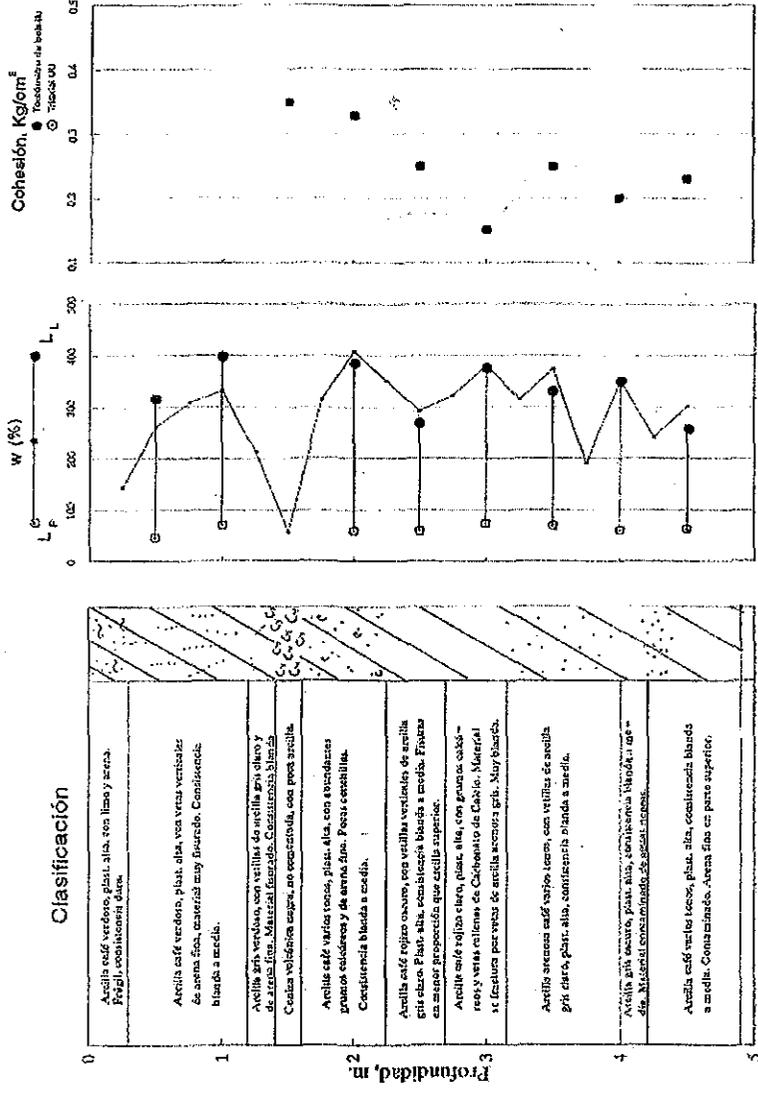


Figura 9 Perfil estratigráfico PCA-1 (Sosa Texcoco)

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

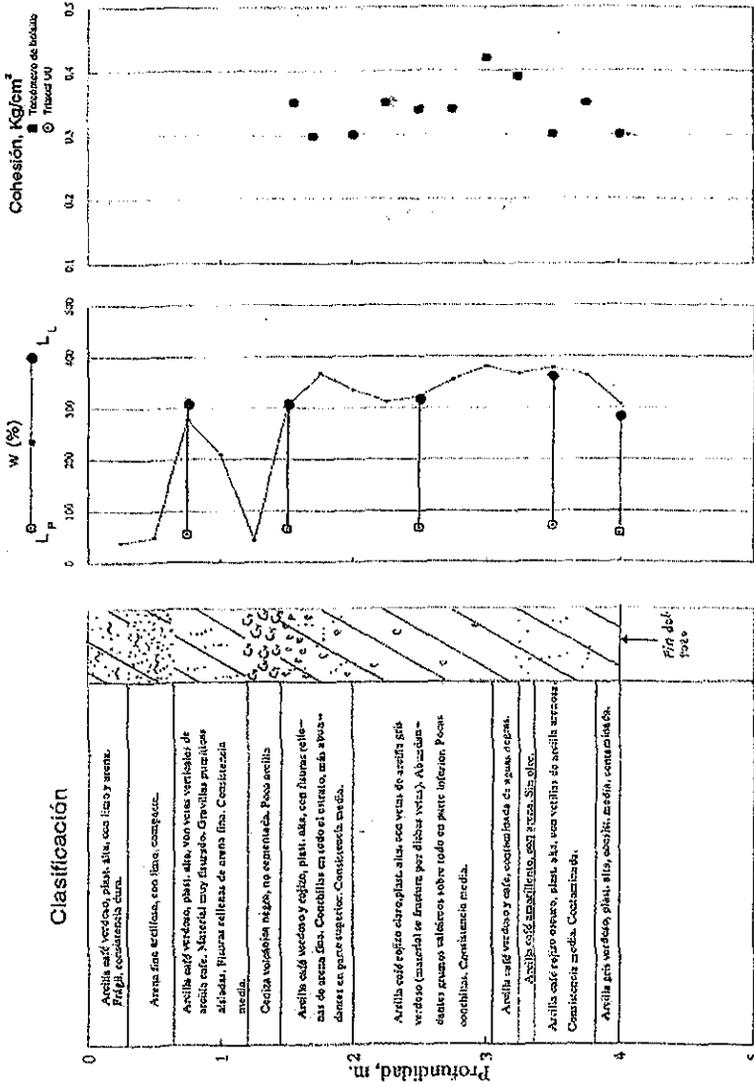


Figura 10 Perfil estratigráfico PCA-2 (Sosa Texcoco)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

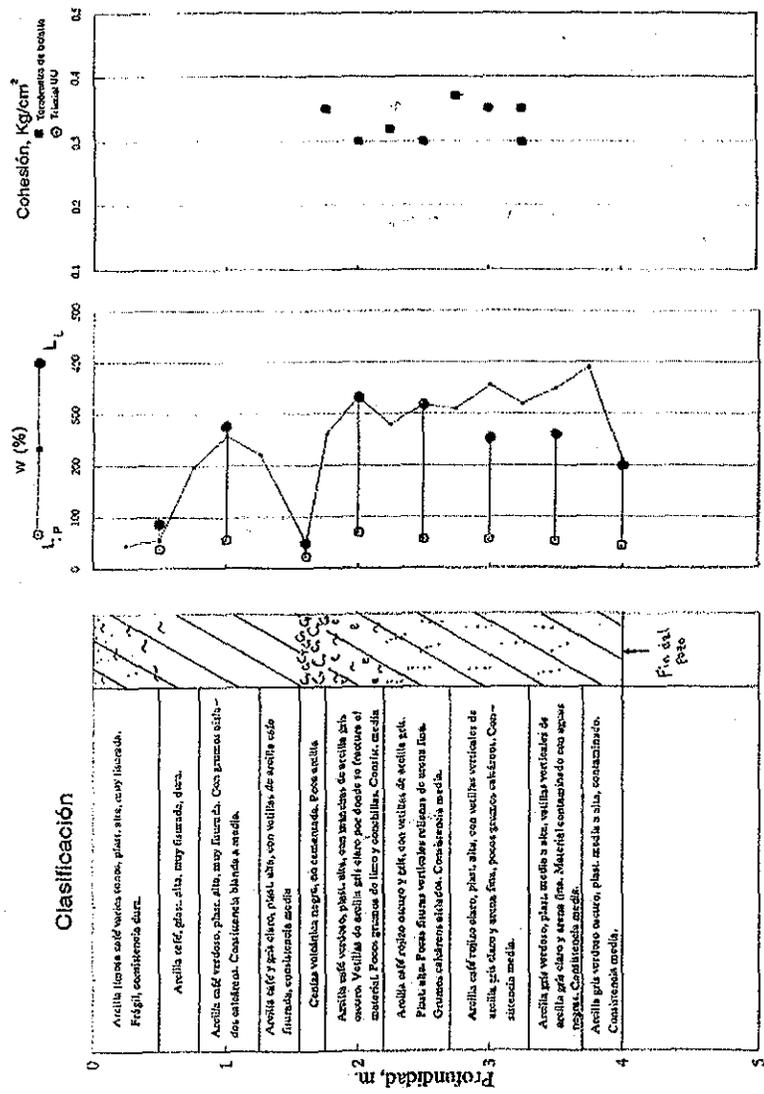


Figura 11 Perfil estratigráfico PCA-3 (Sosa Texcoco)

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

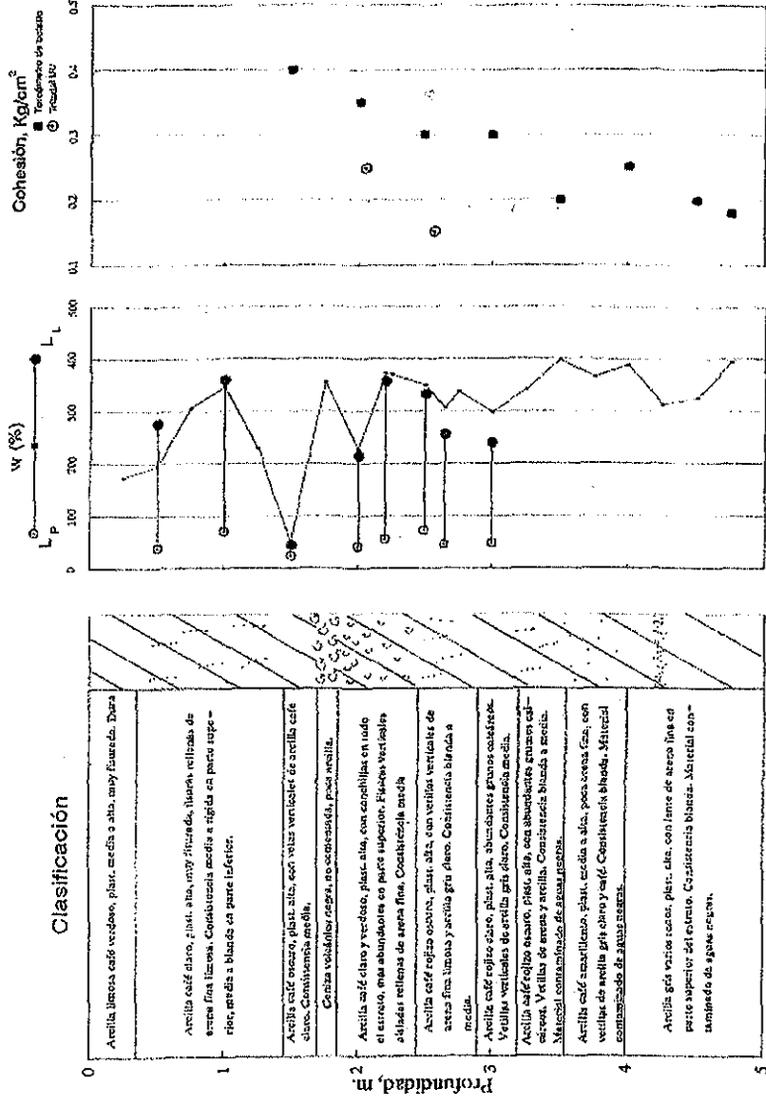


Figura 12 Perfil estratigráfico PCA-4 (Sosa Texcoco)

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

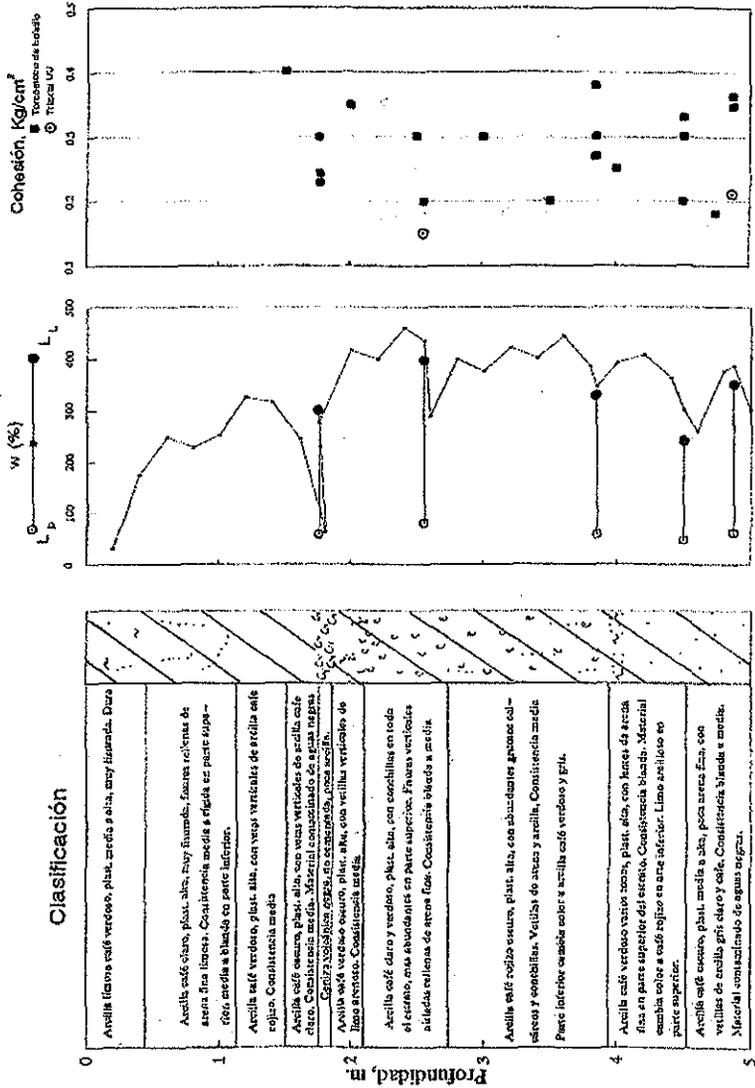


Figura 13 Perfil estratigráfico PCA-5 (Sosa Texcoco)

planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

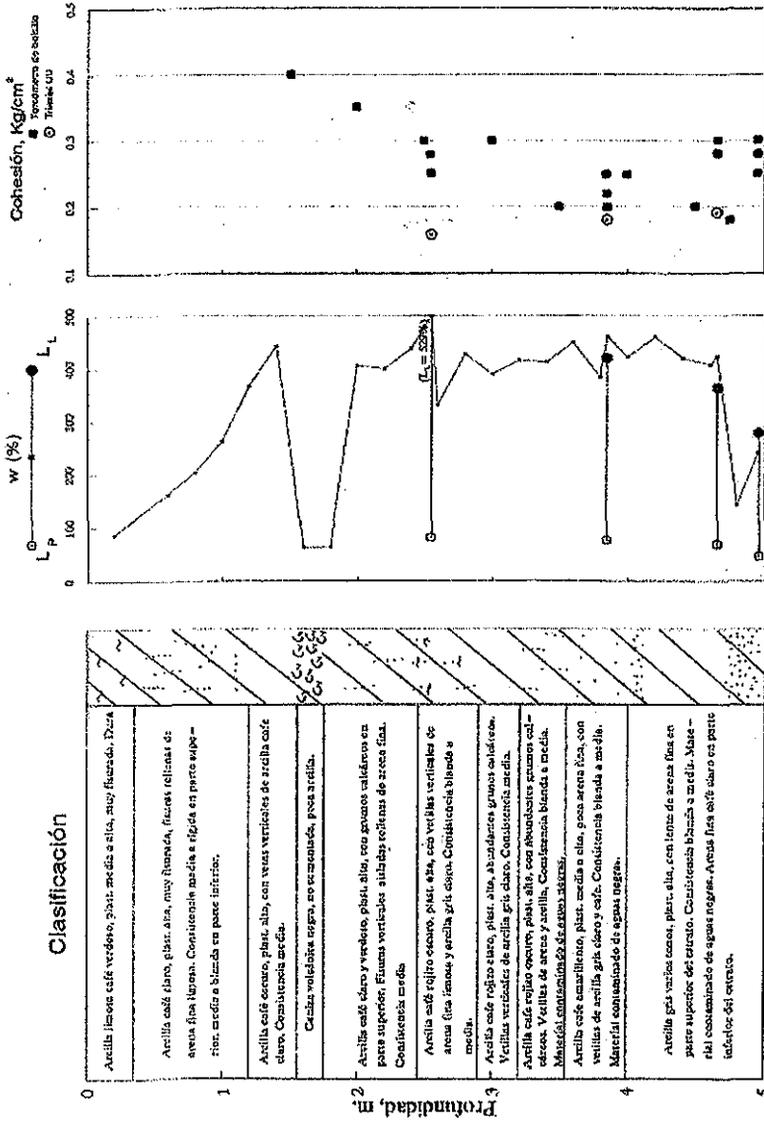
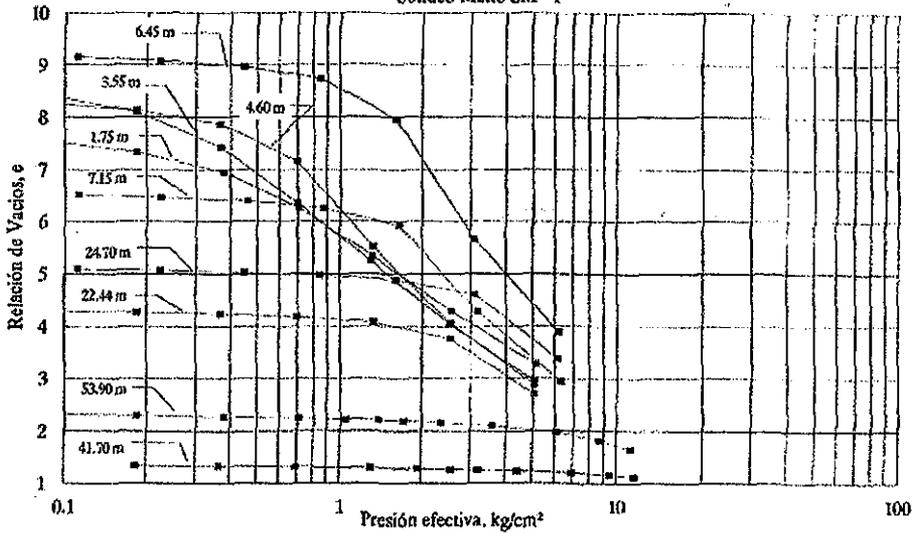


Figura 14 Perfil estratigráfico PCA-6 (Sosa Texcoco)

Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Sondeo Mixto SM-1



Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Sondeo Mixto SM-1

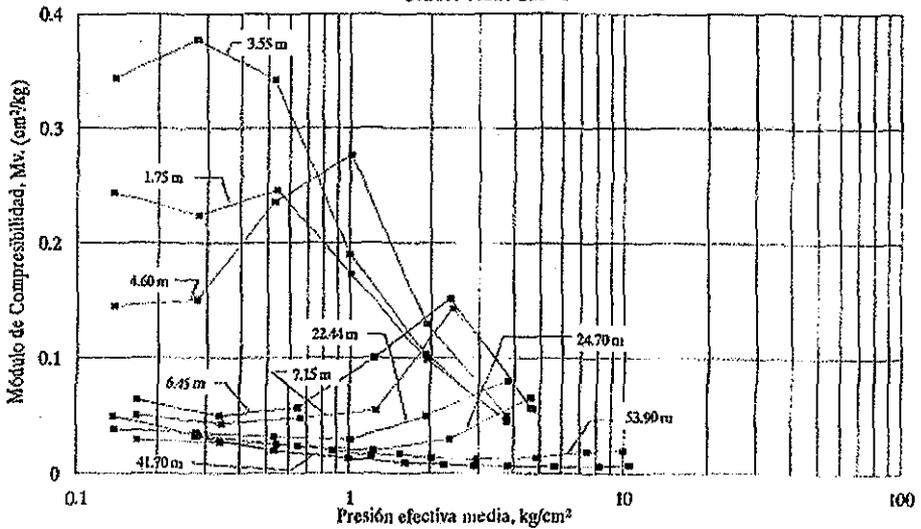
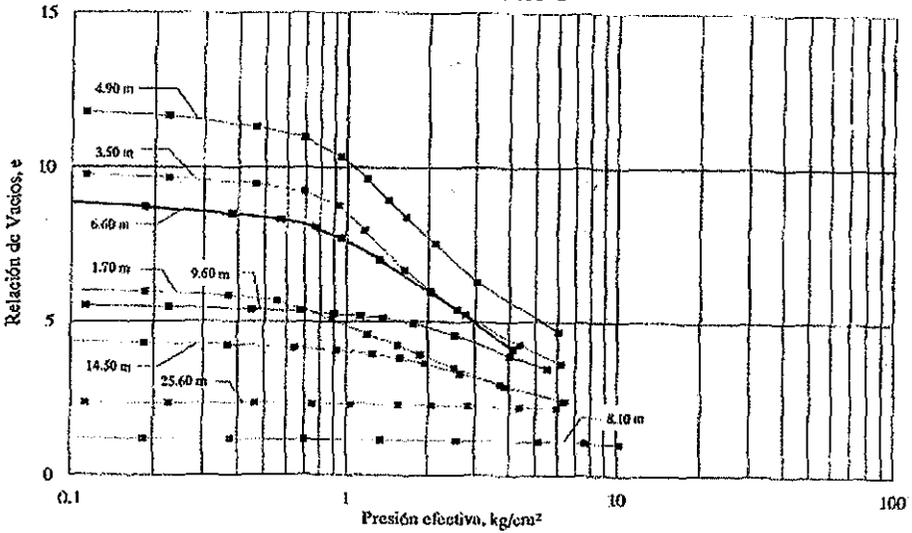


Figura 15. Curvas y módulos de compresibilidad del SM-1 (Sosa Texcoco)

Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Sondeo Mixto SM-2



Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Sondeo Mixto SM-2

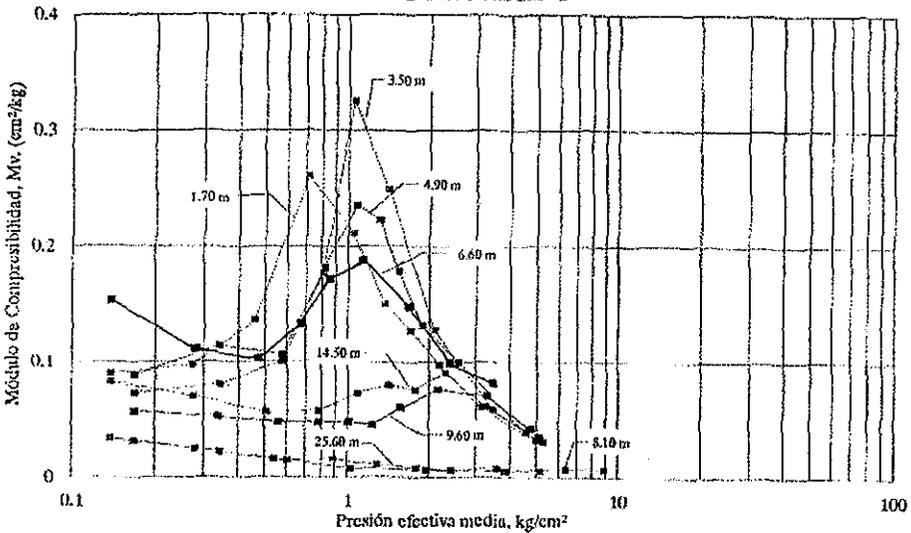
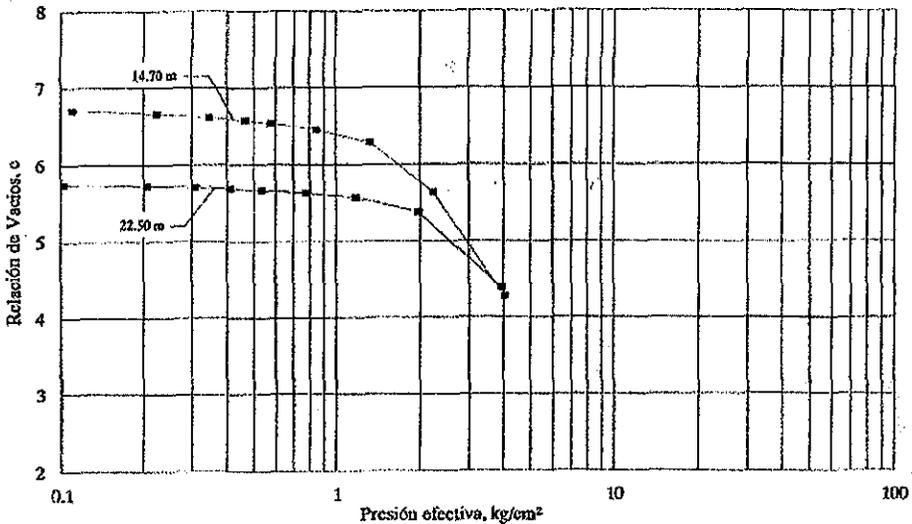


Figura 16. Curvas y módulos de compresibilidad del SM-2 (Sosa Texcoco)

Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Sondeo Mixto SM-3



Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Sondeo Mixto SM-3

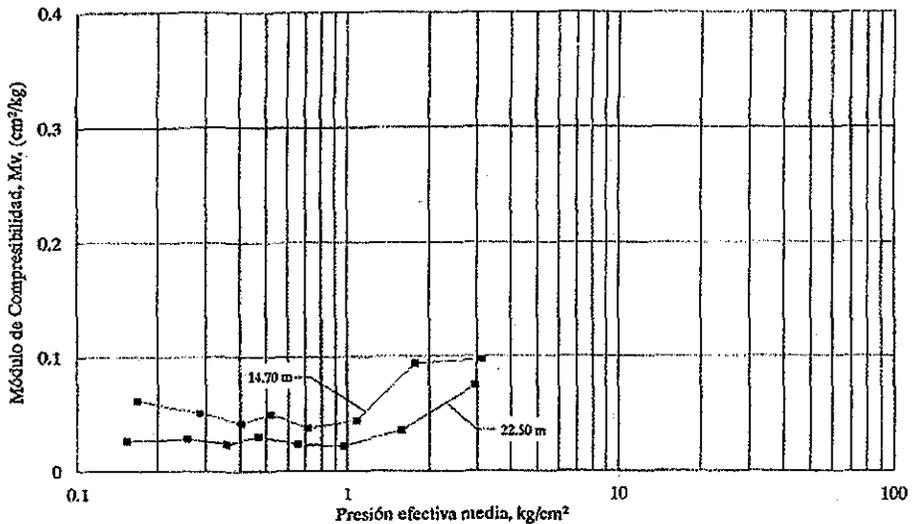
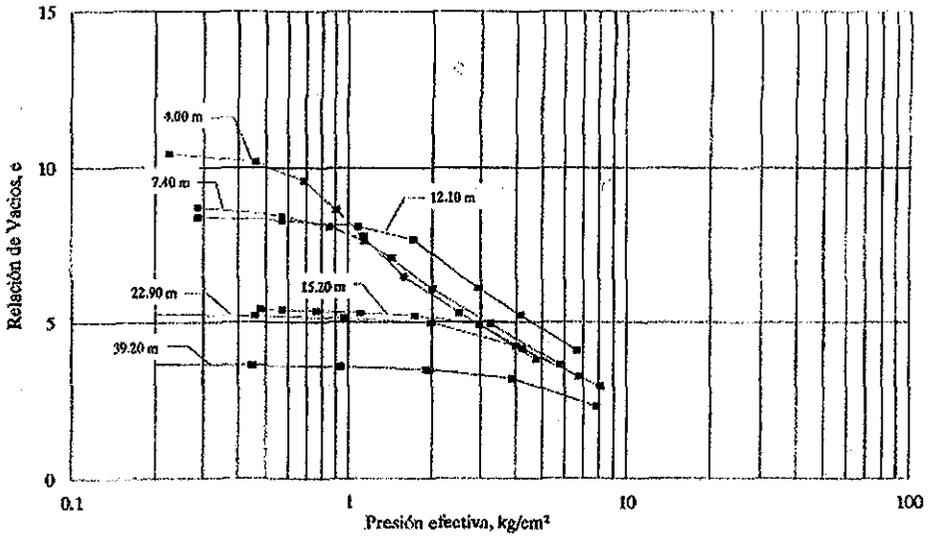


Figura 17. Curvas y módulos de compresibilidad del SM-3 (Sosa Texcoco)

Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Sondeo Mixto SM-4



Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Sondeo Mixto SM-4

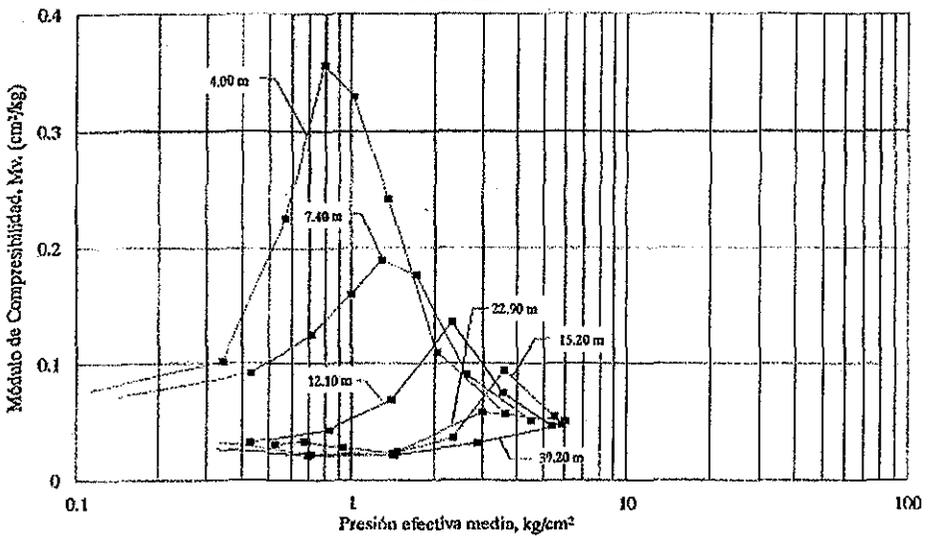
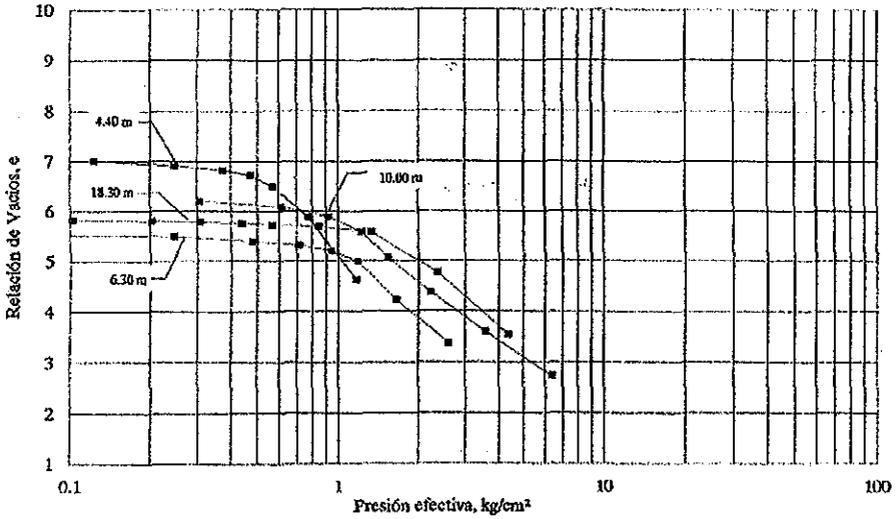


Figura 18. Curvas y módulos de compresibilidad del SM-4 (Sosa Texcoco)

Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Sondeo Mixto SM-5



Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Sondeo Mixto SM-5

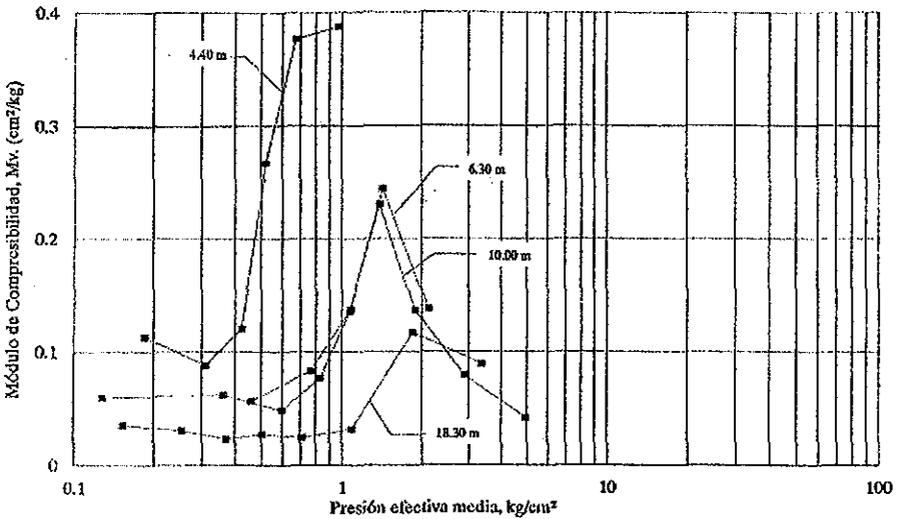
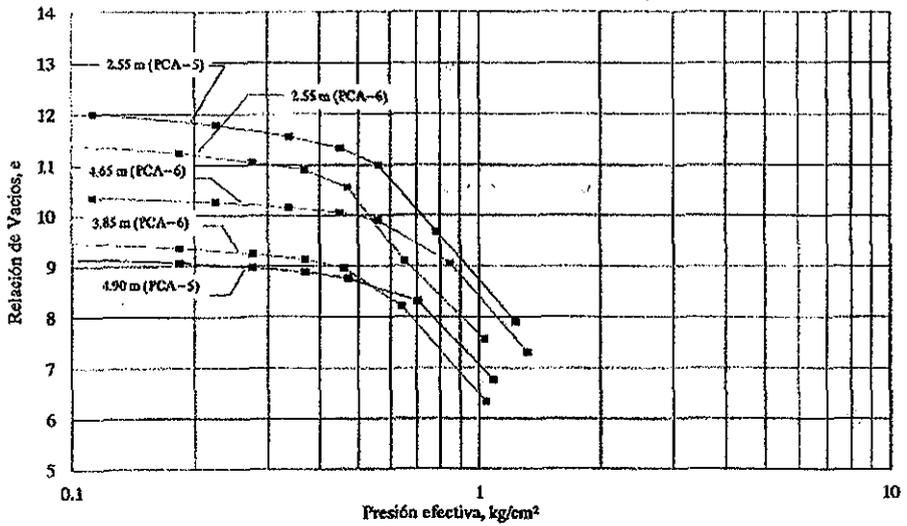


Figura 19. Curvas y módulos de compresibilidad del SM-5 (Sosa Texcoco)

TRABAJO CON
LINEA OPERATIVA

Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Pozos a cielo abierto PCA-3, PCA-5 Y PCA-6



Planta Tratamiento Aguas Texcoco Norte, CNA
Pozo a cielo abierto PCA-3, PCA-5 Y PCA-6

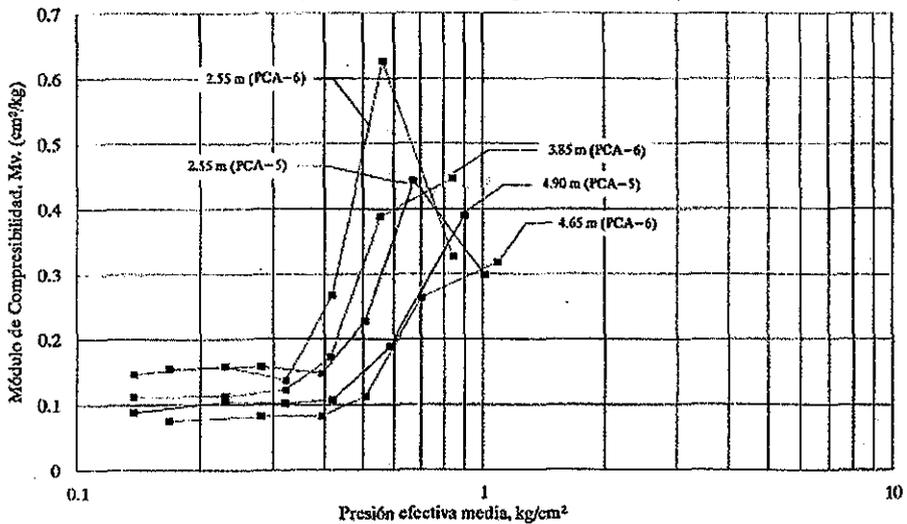


Figura 20. Curvas y módulos de compresibilidad del PCA-3, PCA-5 y PCA-6 (Sosa Texcoco)

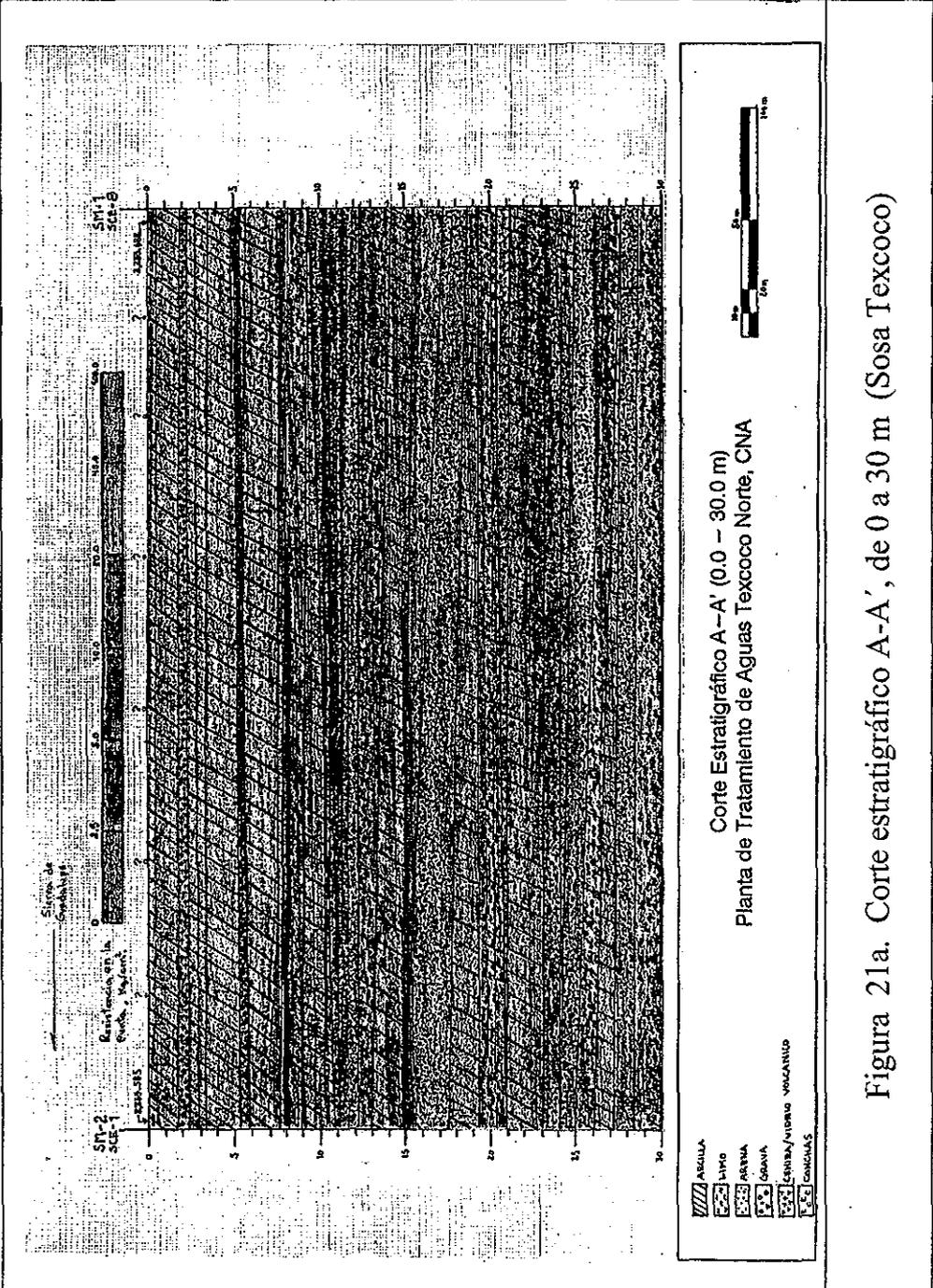


Figura 21a. Corte estratigráfico A-A', de 0 a 30 m (Sosa Texcoco)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

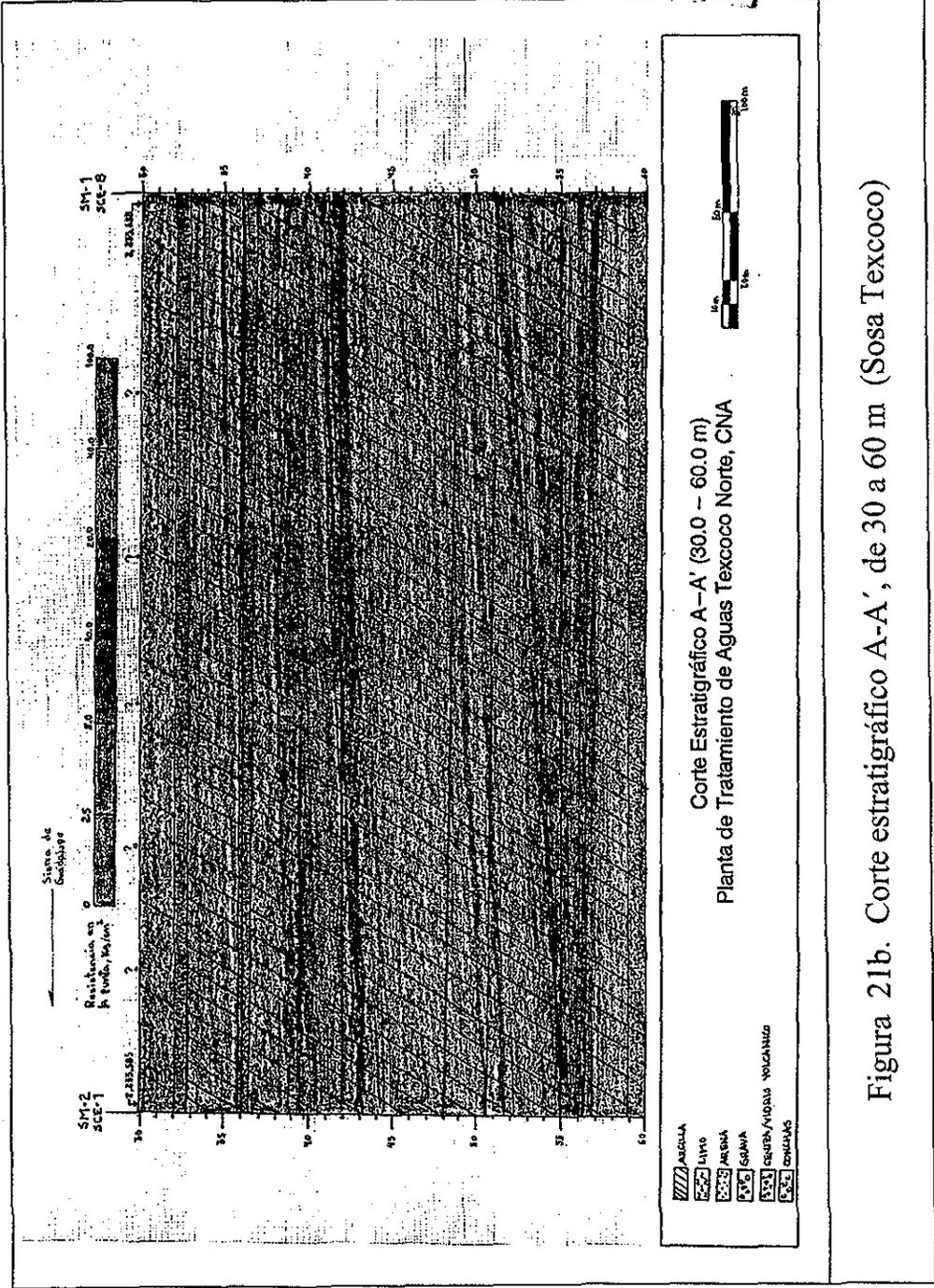


Figura 21b. Corte estratigráfico A-A', de 30 a 60 m (Sosa Texcoco)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

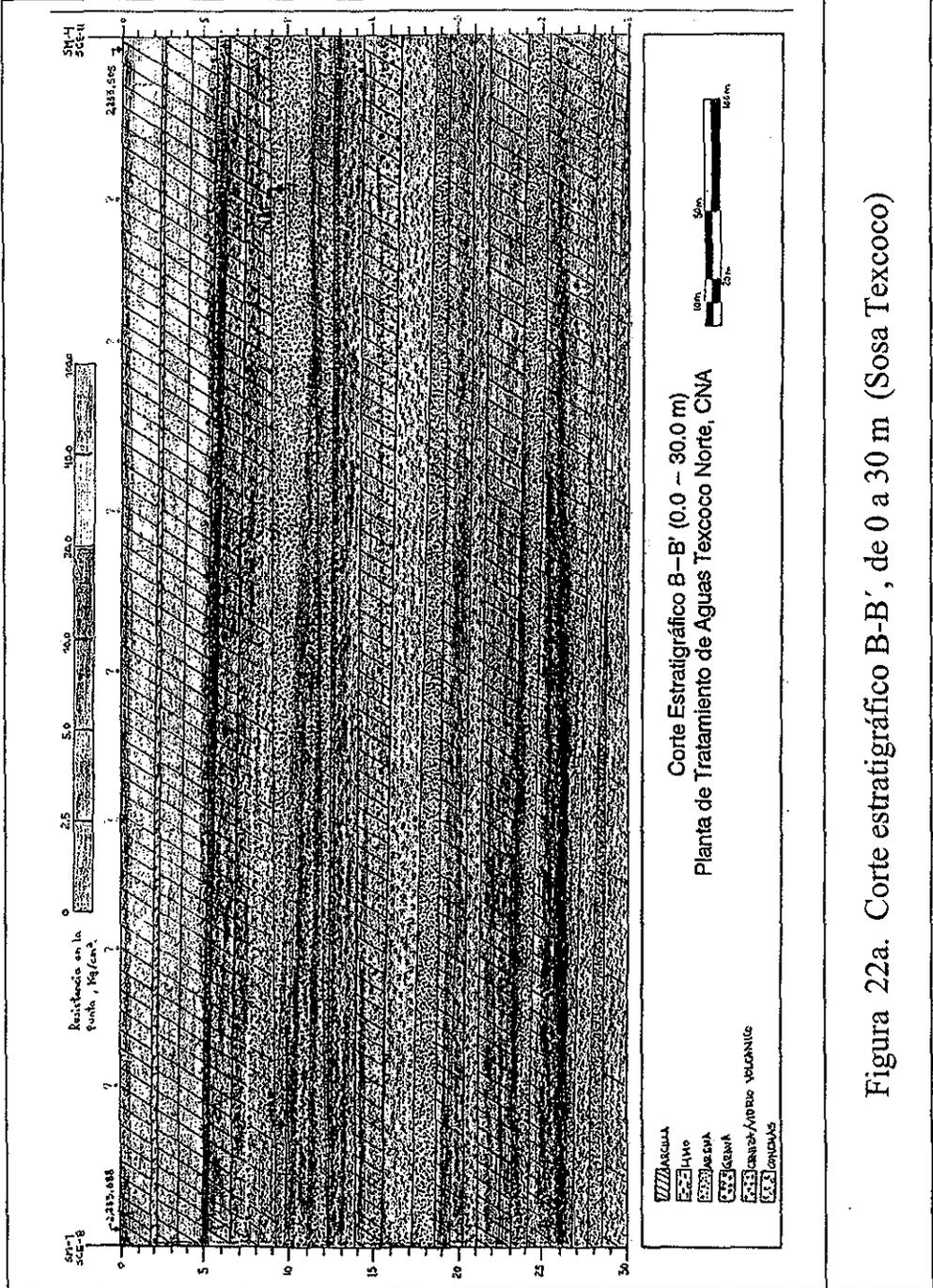


Figura 22a. Corte estratigráfico B-B', de 0 a 30 m (Sosa Texcoco)

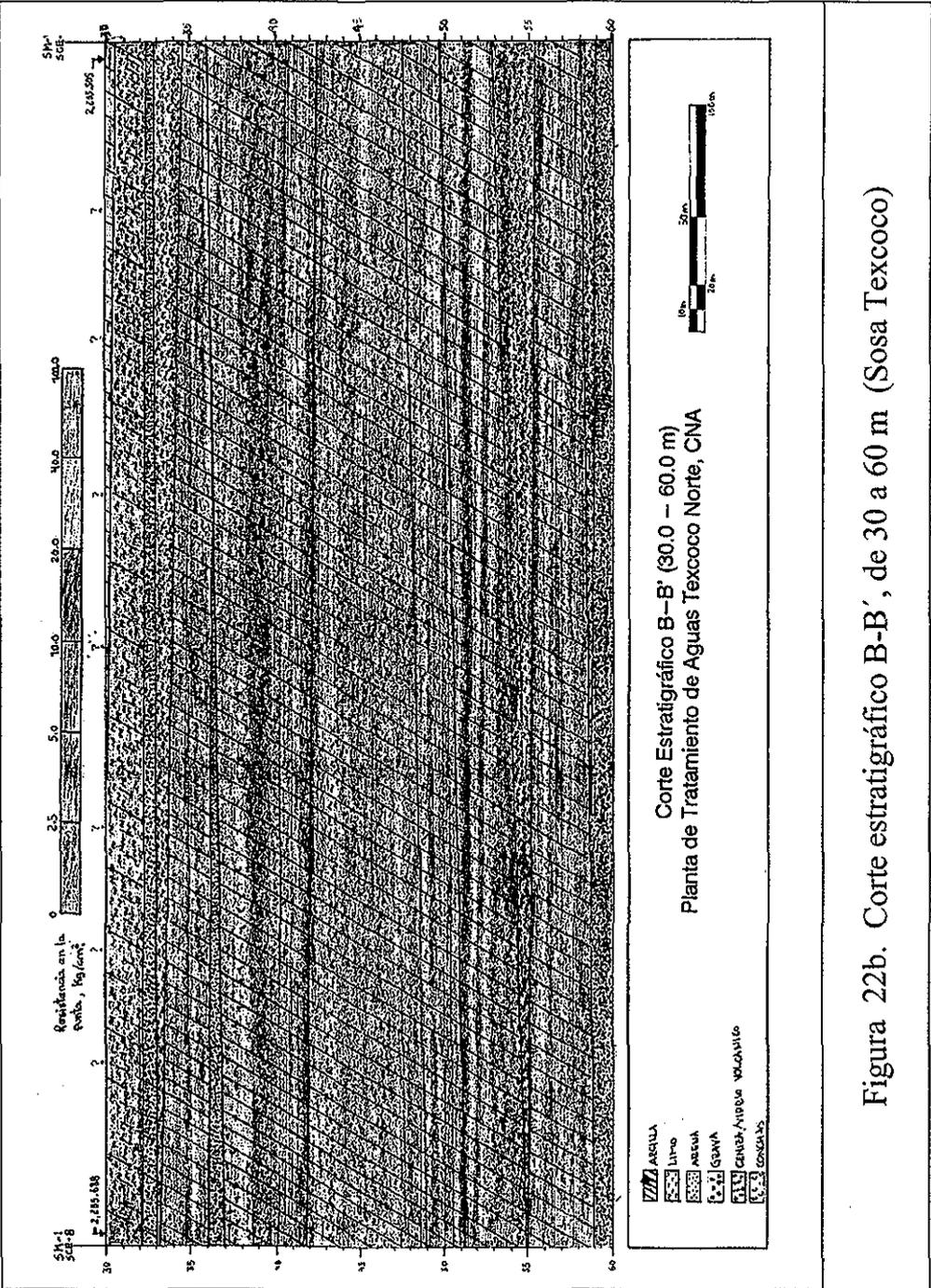


Figura 22b. Corte estratigráfico B-B', de 30 a 60 m (Sosa Texcoco)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

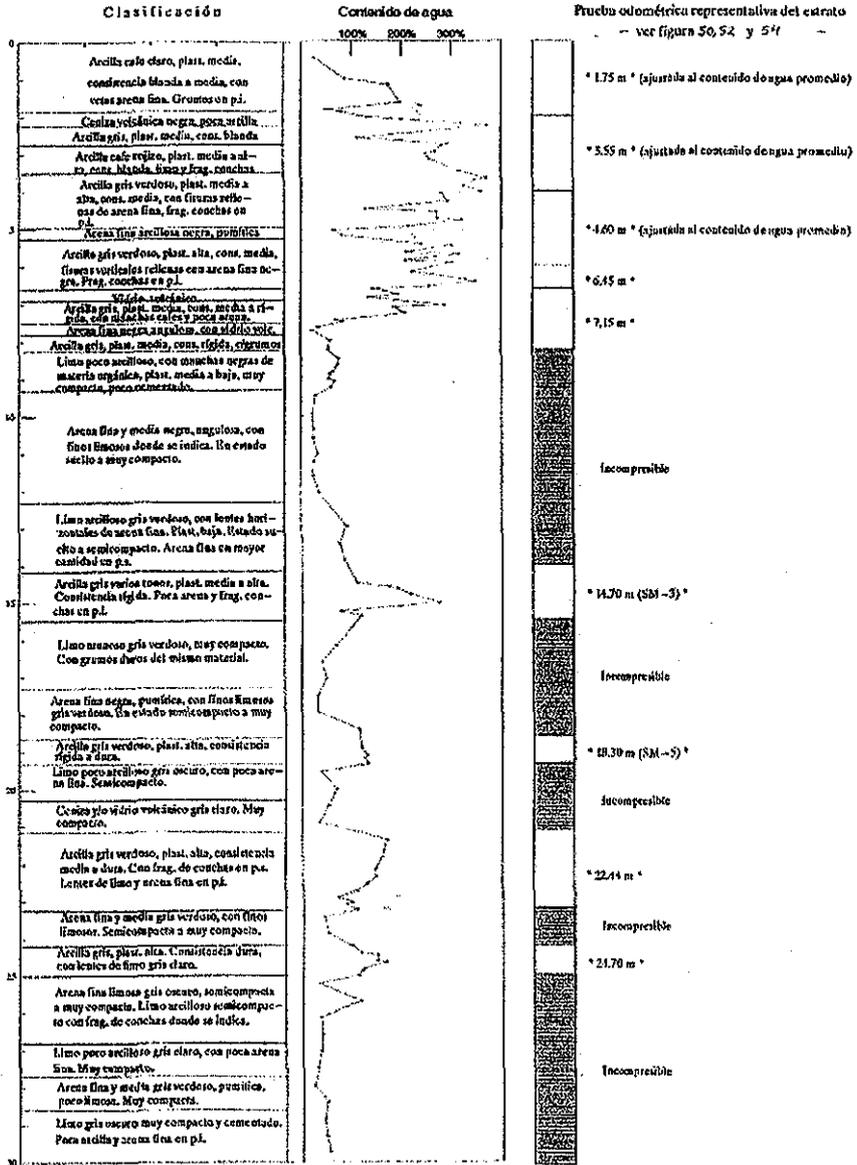


Figura 23a. Modelo estratigráfico del SM-1, de 0 a 30 m, para el cálculo de asentamientos (Sosa Texcoco)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

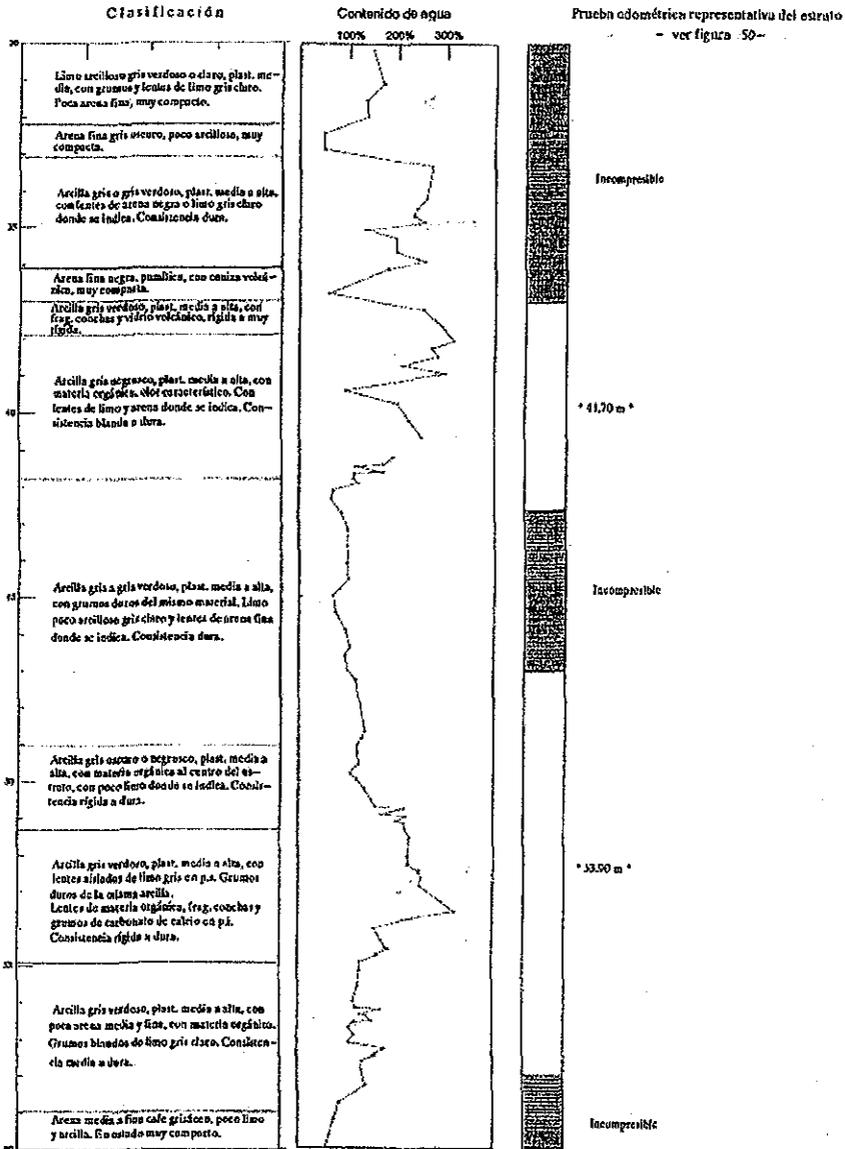
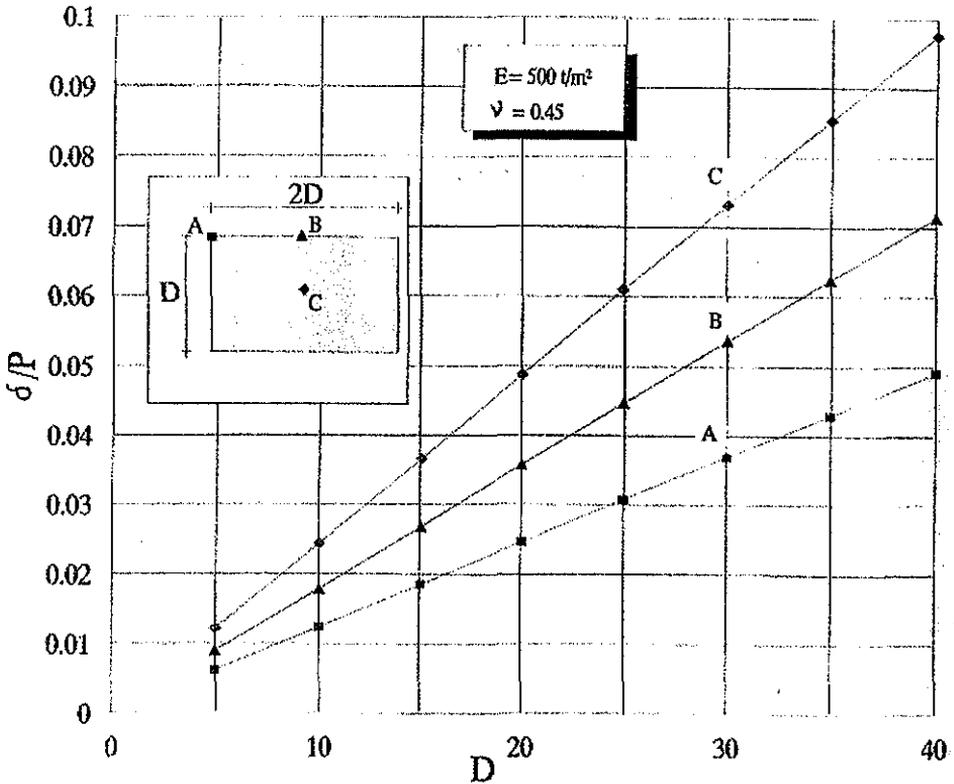


Figura 23b. Modelo estratigráfico del SM-1, de 30 a 60 m, para el cálculo de asentamientos (Sosa Texcoco)

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA



δ : Asentamiento (o expansión) elástico, m

P: Presión aplicada en el área considerada (carga o descarga), t/m^2

D: Dimensión lateral de la área considerada, m

ejemplo:

D=10 m

P= 6 t/m^2

$\delta A = 0.07$ m

$\delta B = 0.11$ m

$\delta C = 0.15$ m

Figura 24. Orden de magnitud de asentamientos (o expansiones) elásticos inmediatos inducidos por cargas (o descargas) superficiales (Sosa Texcoco)

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

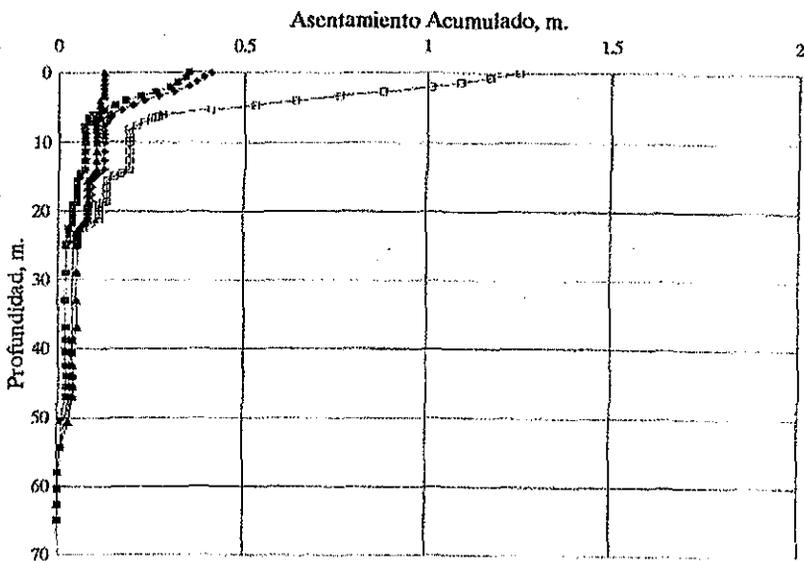
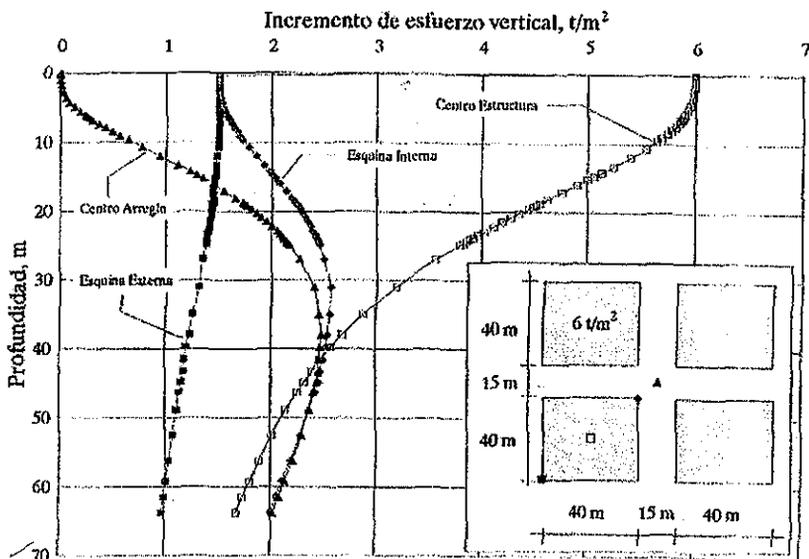


Figura 25. Distribución de esfuerzos y asentamientos, cimentación superficial (flexible) con modelo estratigráfico del SM-1 (Sosa Texcoco)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

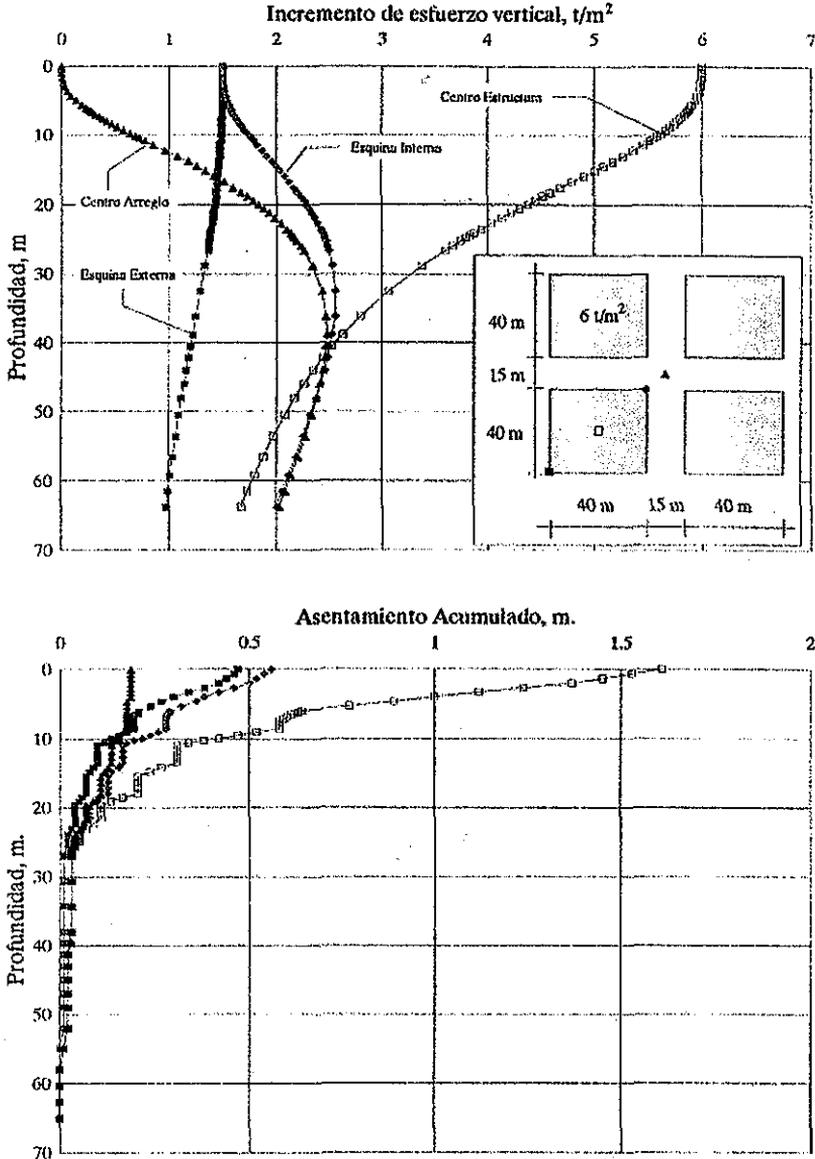


Figura 26. Distribución de esfuerzos y asentamientos, cimentación superficial (flexible) con modelo estratigráfico del SM-5 (Sosa Texcoco)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Planta de Tratamiento de Aguas Texcoco Norte, CNA

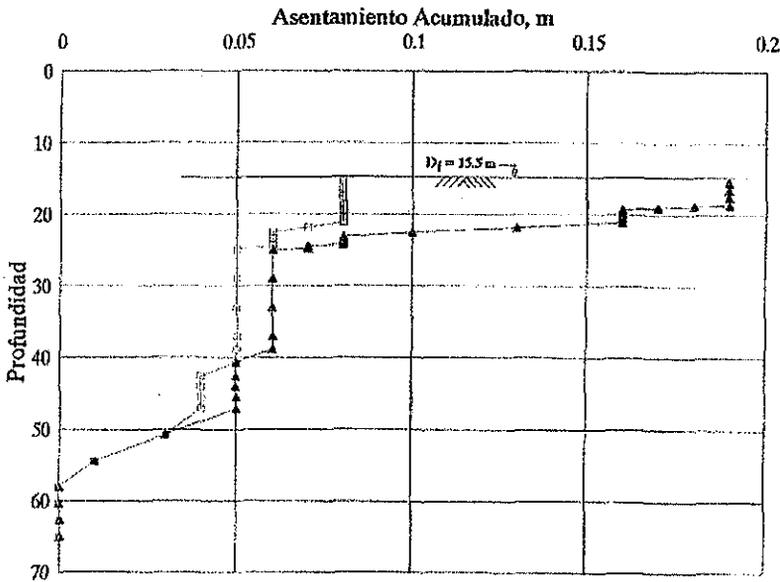
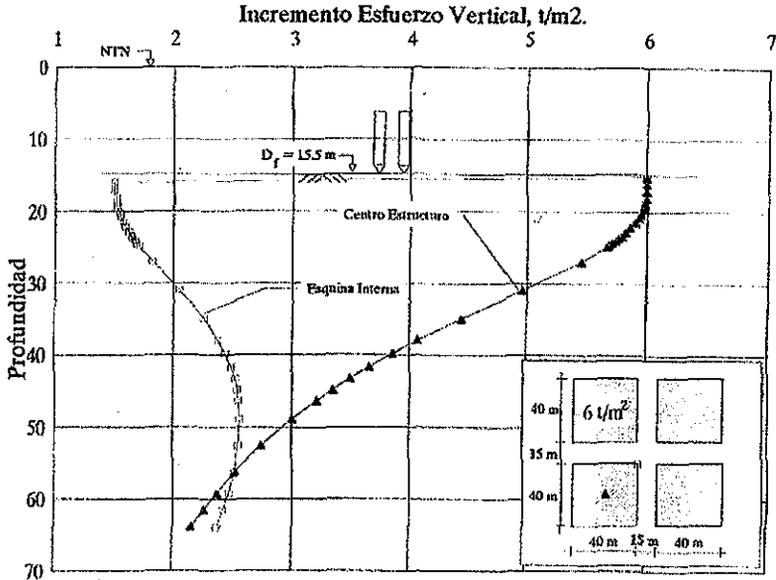


Figura 27. Distribución de esfuerzos y asentamientos, cimentación profunda a 15.5 m (flexible), con modelo estratigráfico del SM-1 (Sosa Texcoco)

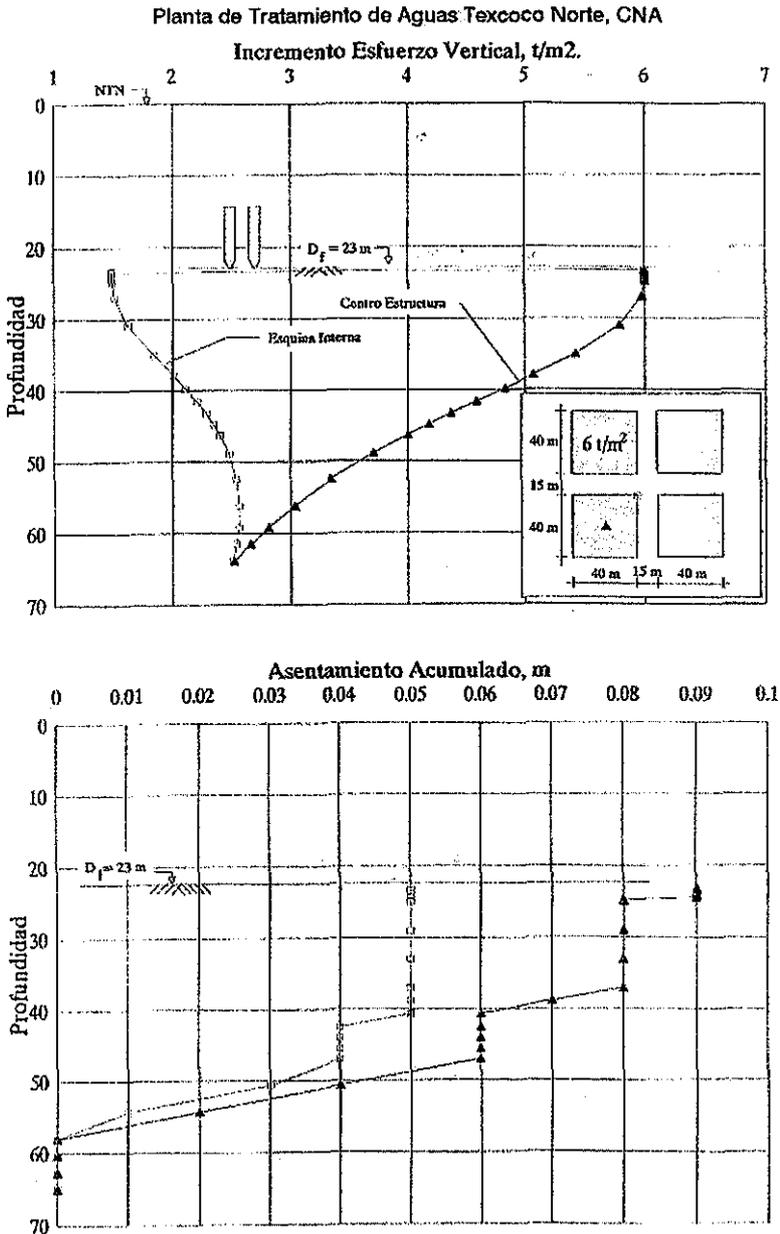


Figura 28. Distribución de esfuerzos y asentamientos, cimentación profunda a 23 m (flexible), con modelo estratigráfico del SM-1 (Sosa Texcoco)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

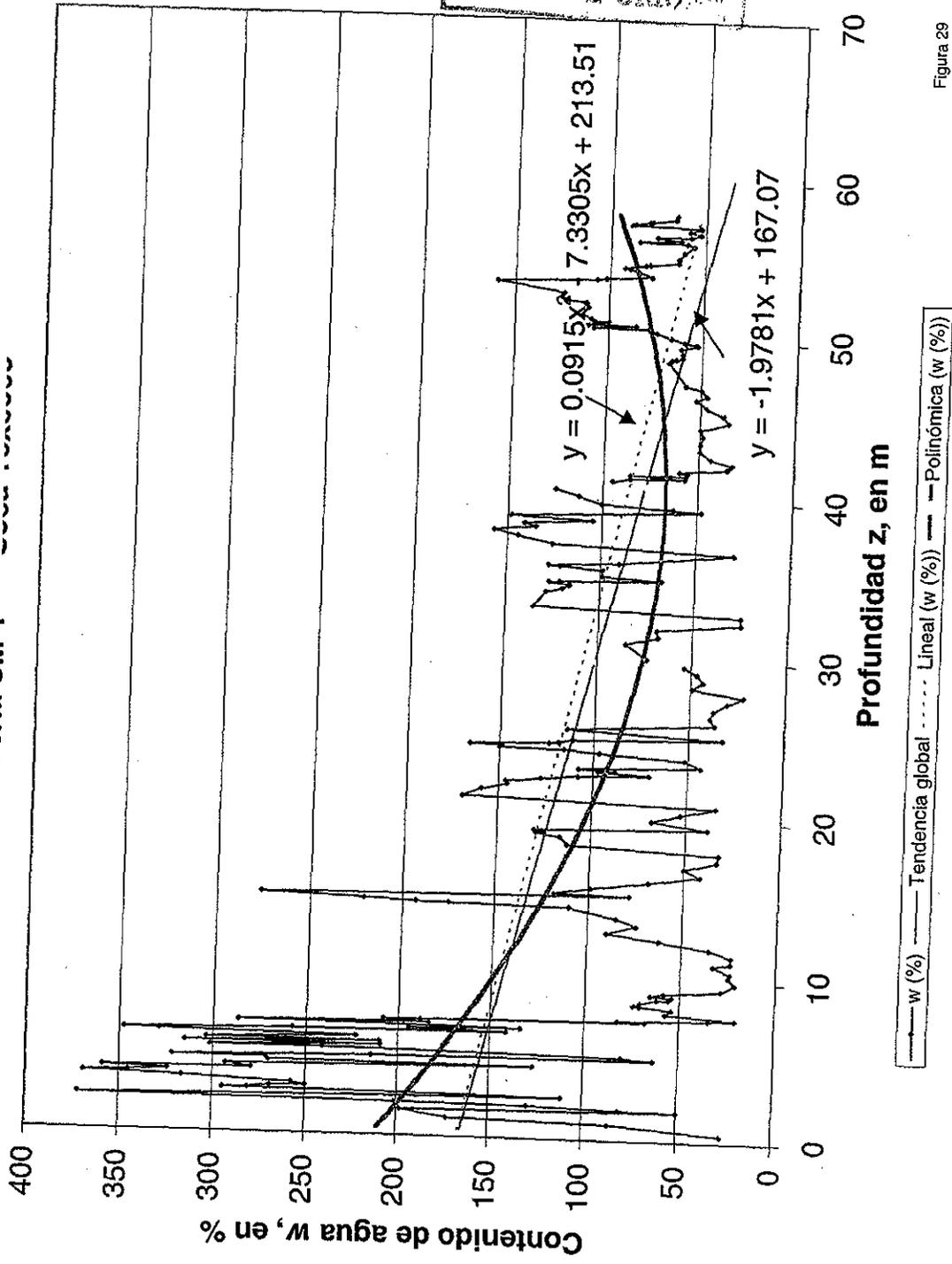


Figura 29

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

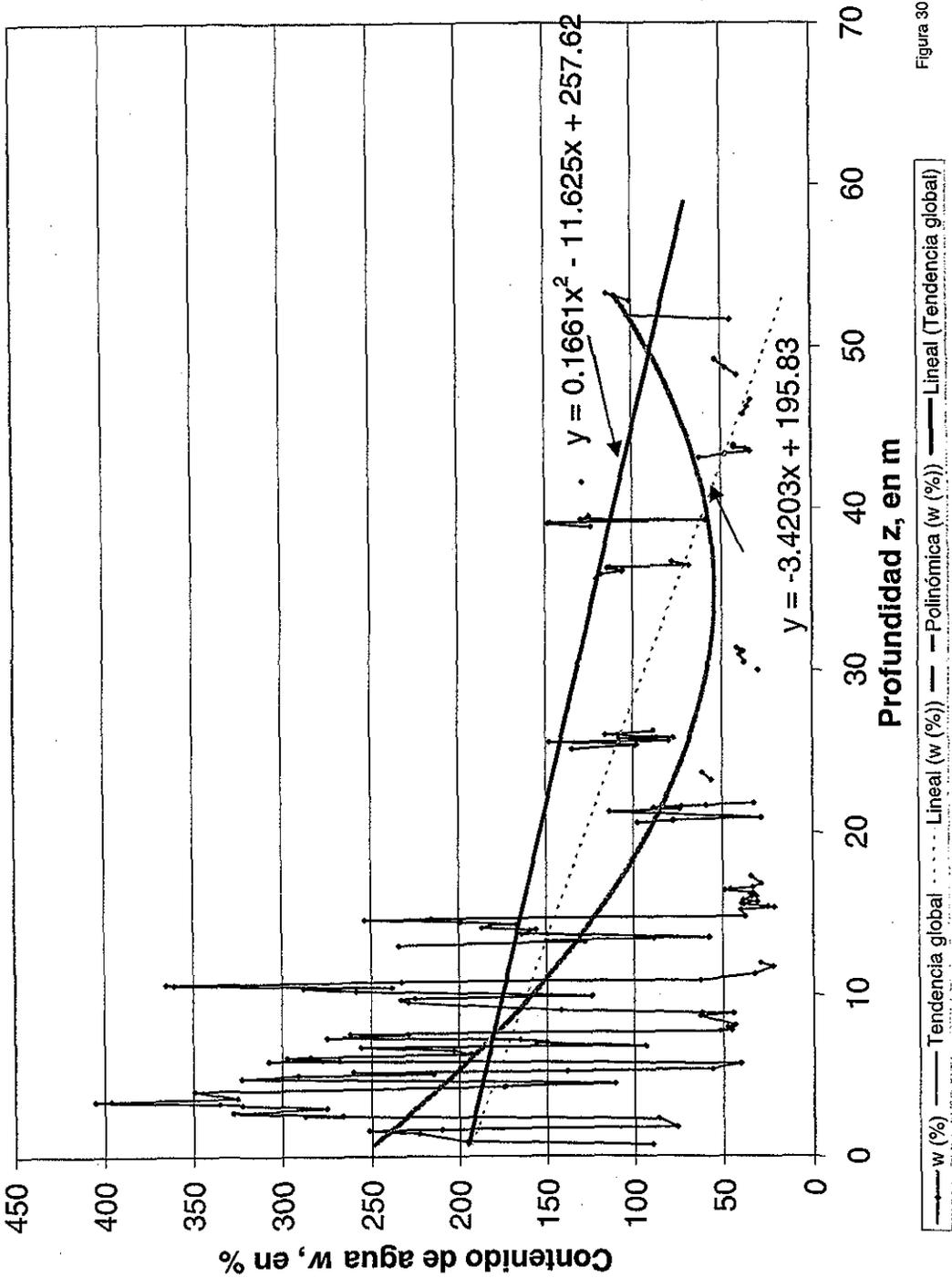


Figura 30

Perfil SM-3 Sosa Texcoco

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

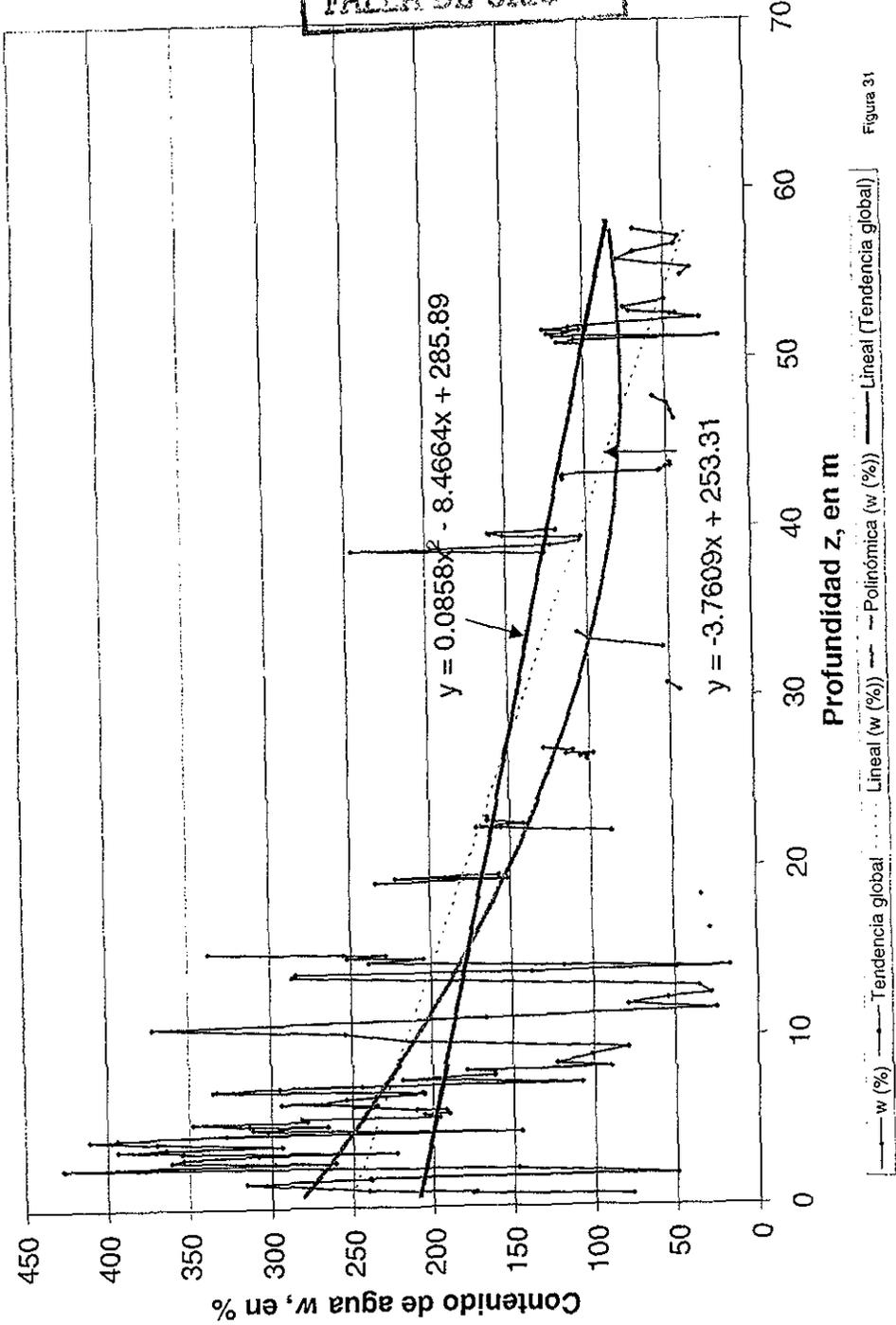
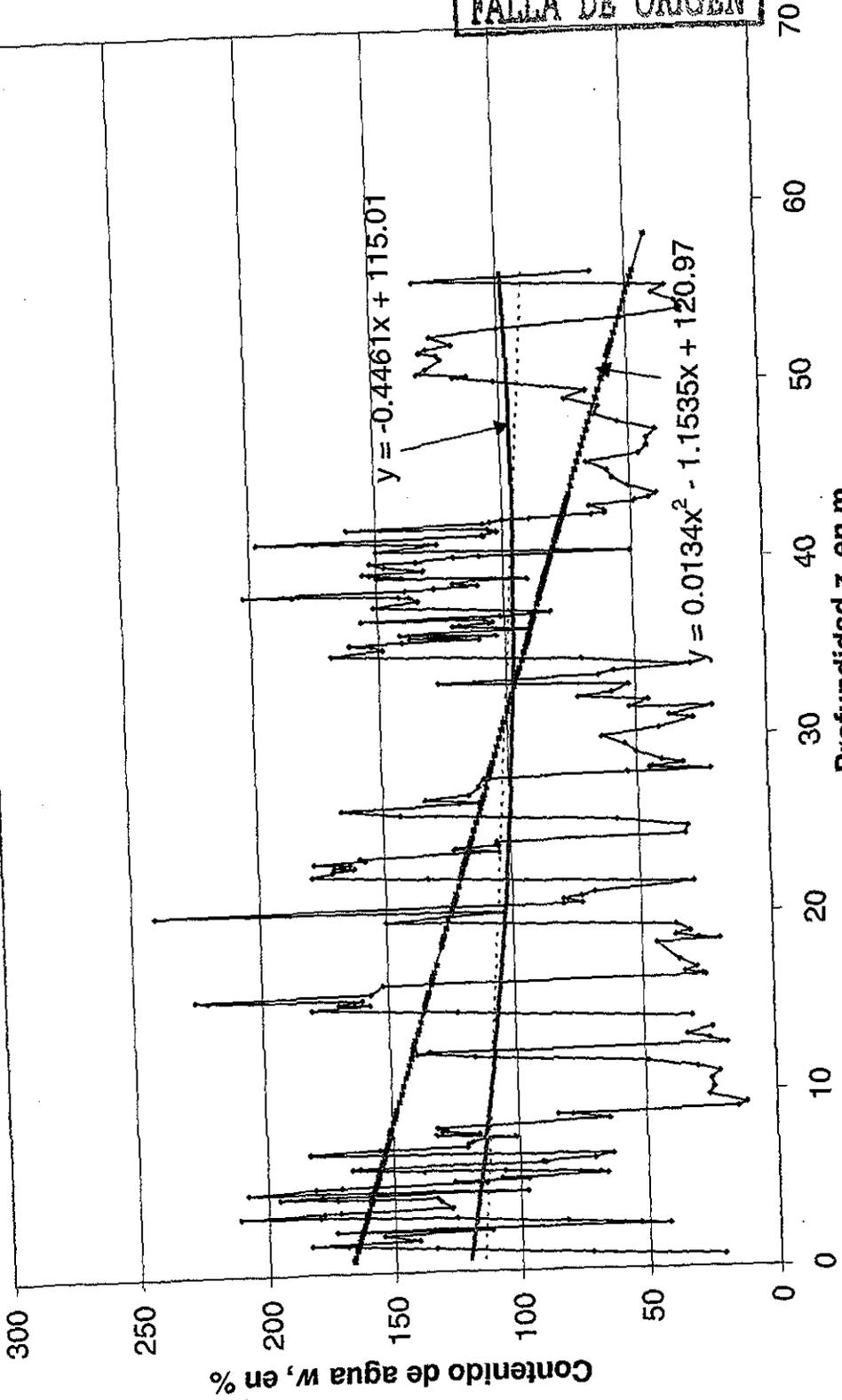


Figura 31

Perfil SM-4 Sosa Texcoco

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Serie1 ——— Tendencia global ····· Lineal (Serie1) ——— Polinómica (Serie1)

Figura 32

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FERTIL SIM-b Sosa Ixcococ

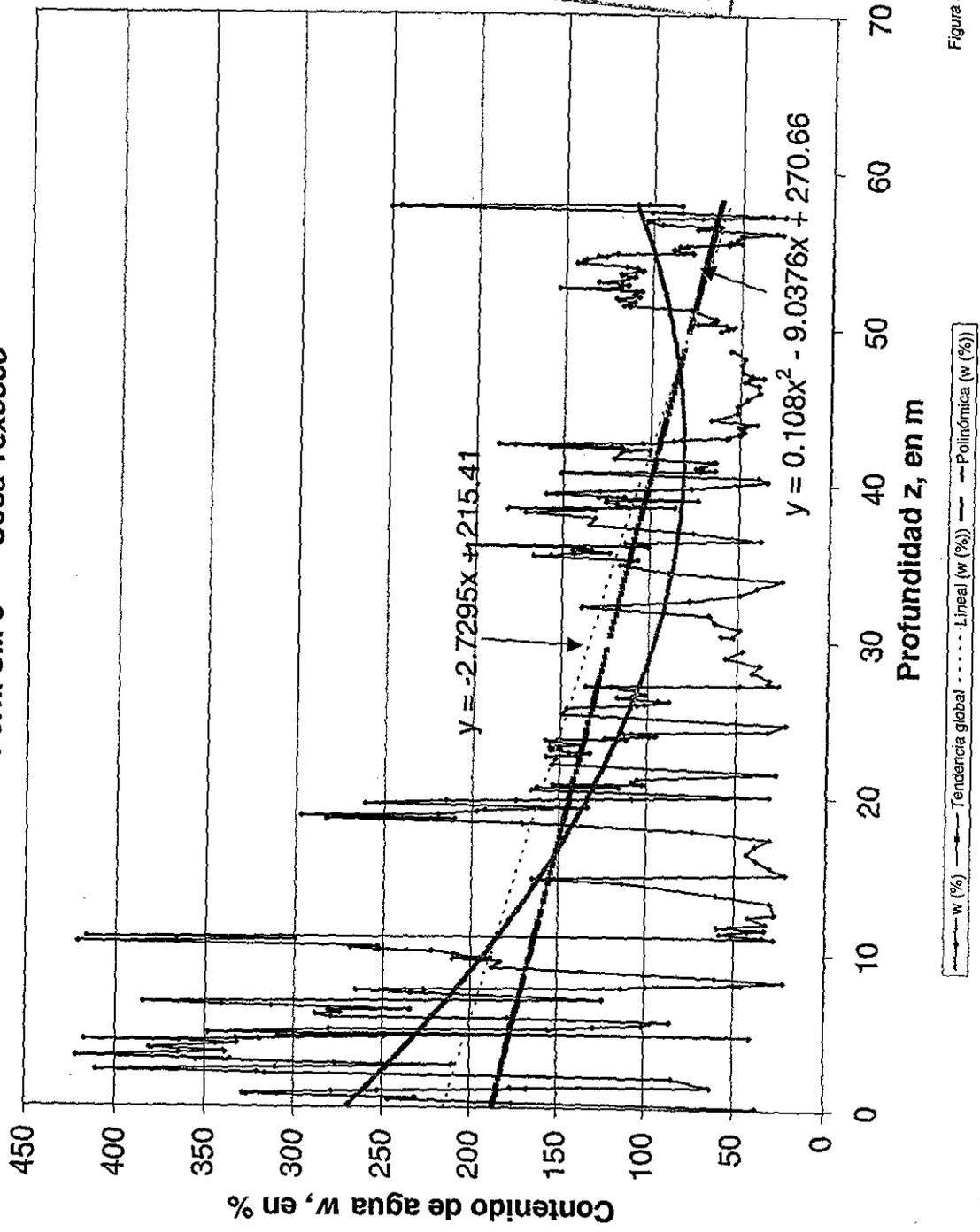
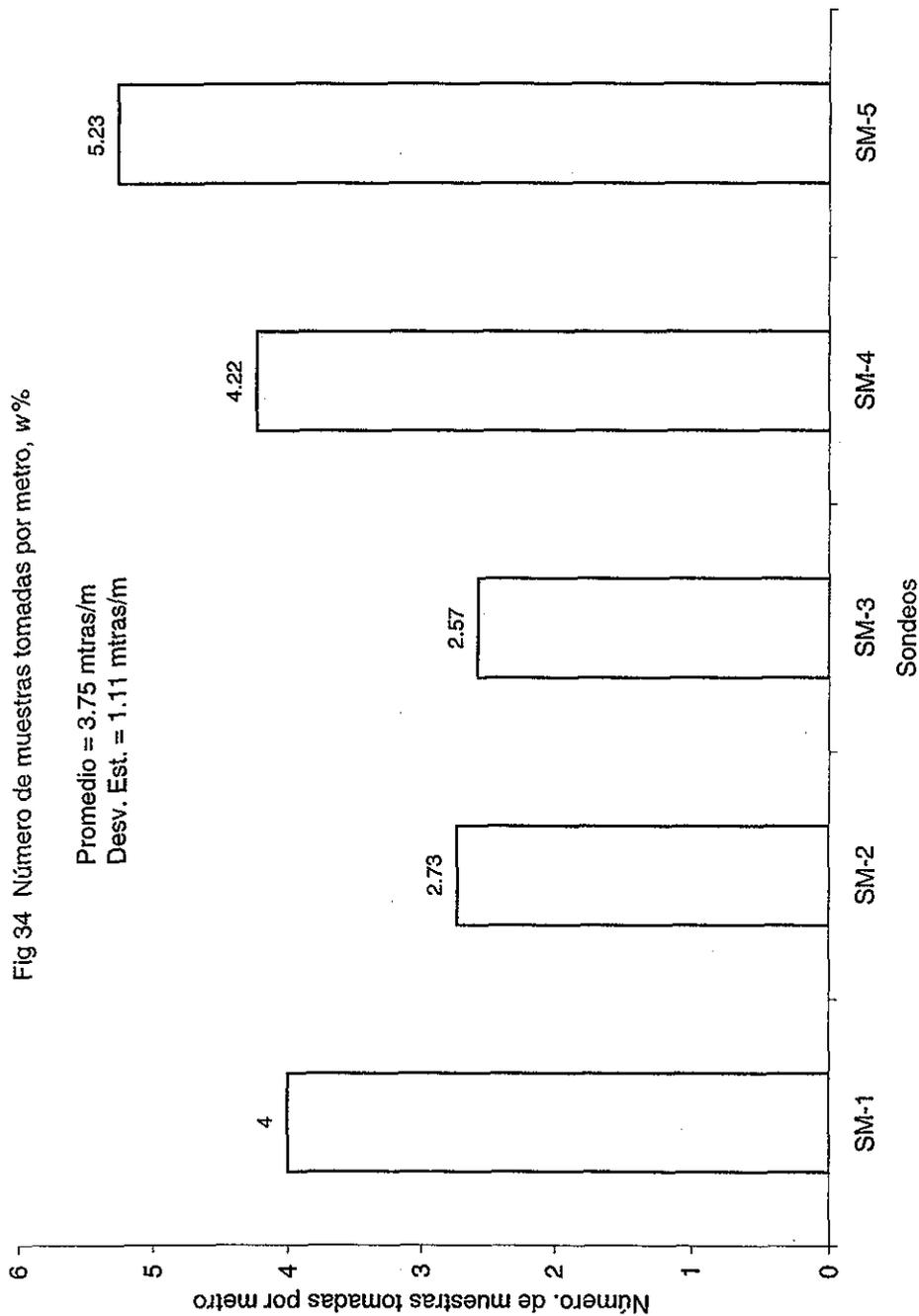


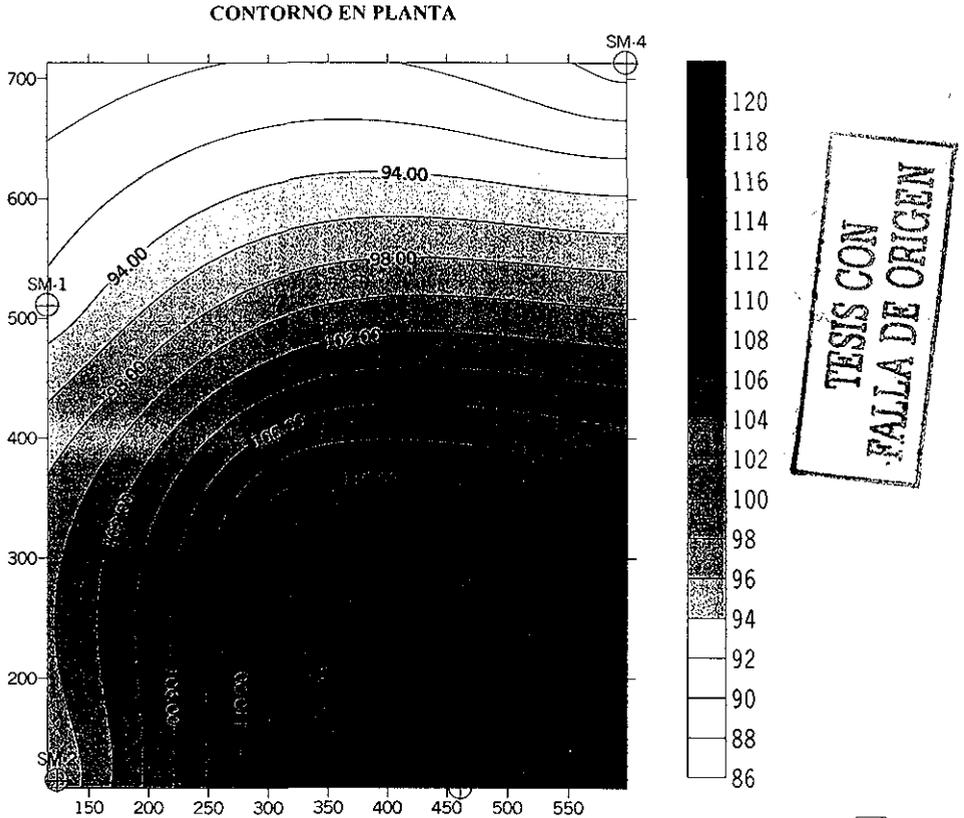
Figura 33

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE



ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO
 GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL
 SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

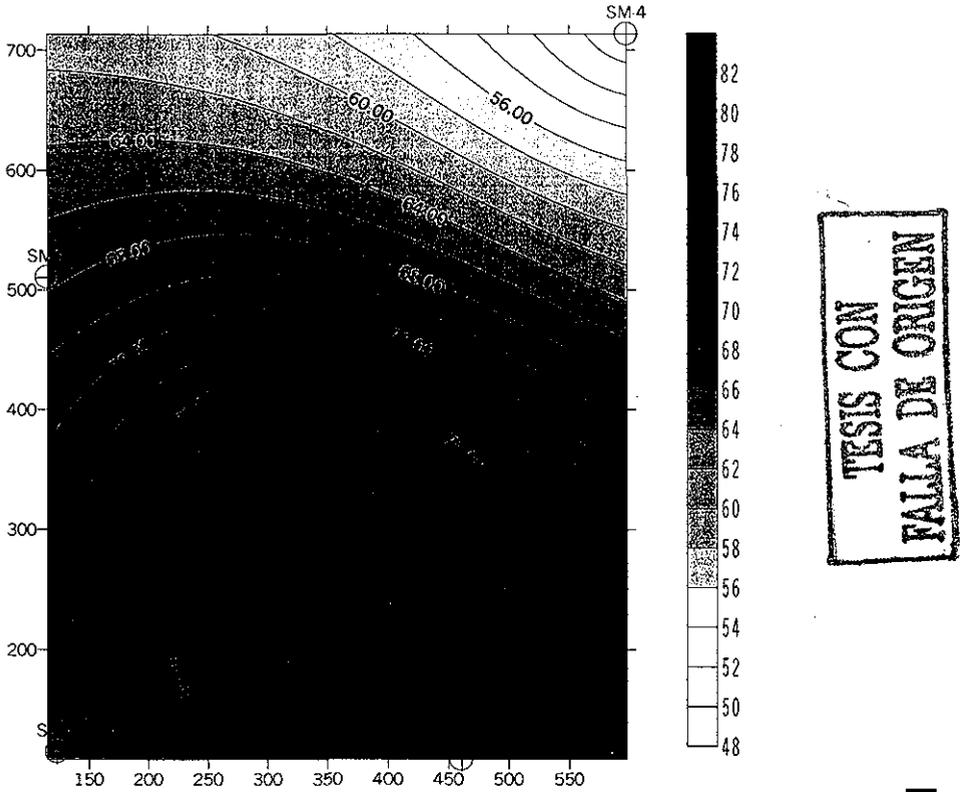
Fig 35 Tendencia global de la media del contenido de agua, w%



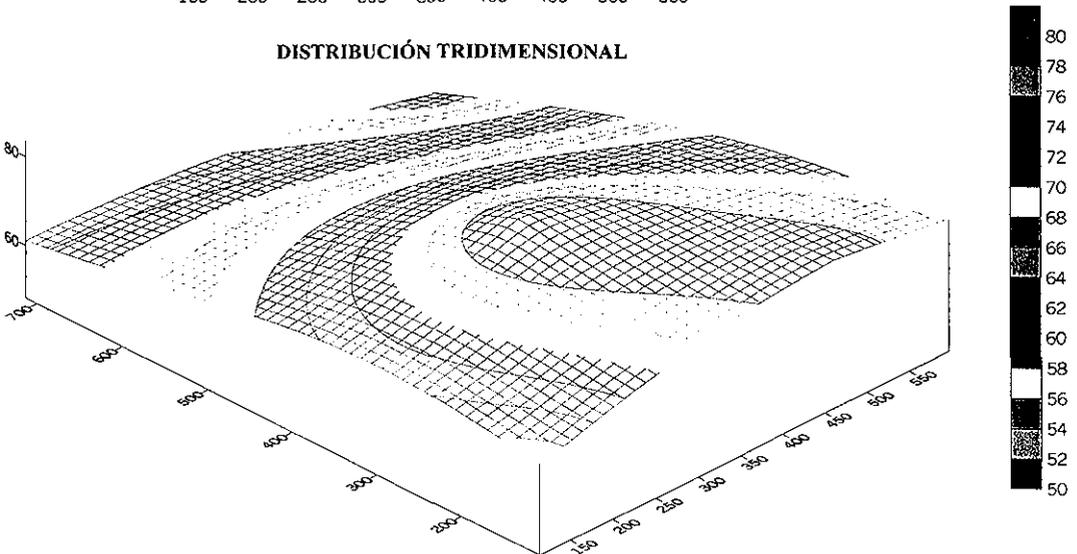
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Fig 36 Tendencia global de la desviación estándar del contenido de agua, w%

CONTORNO EN PLANTA

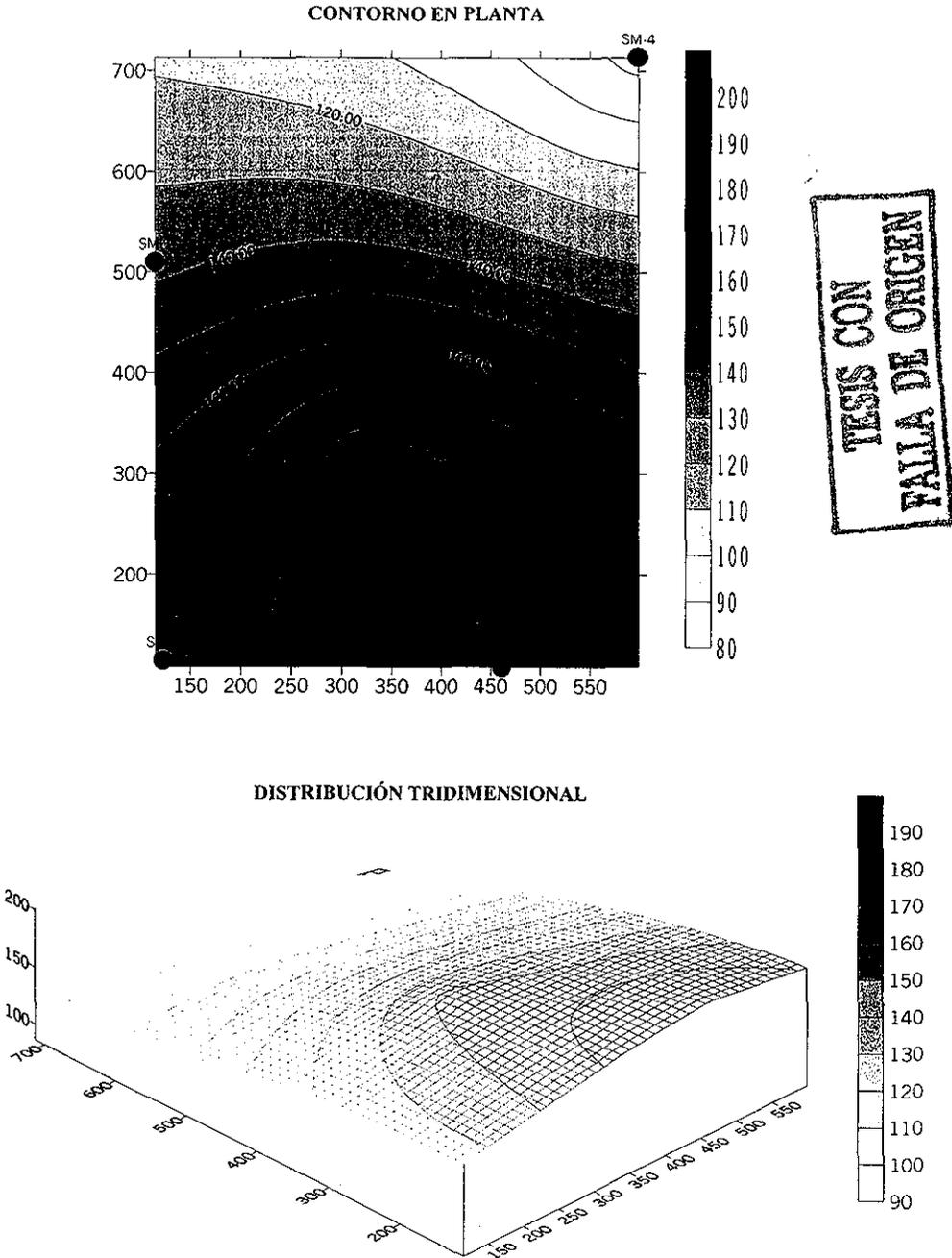


DISTRIBUCIÓN TRIDIMENSIONAL



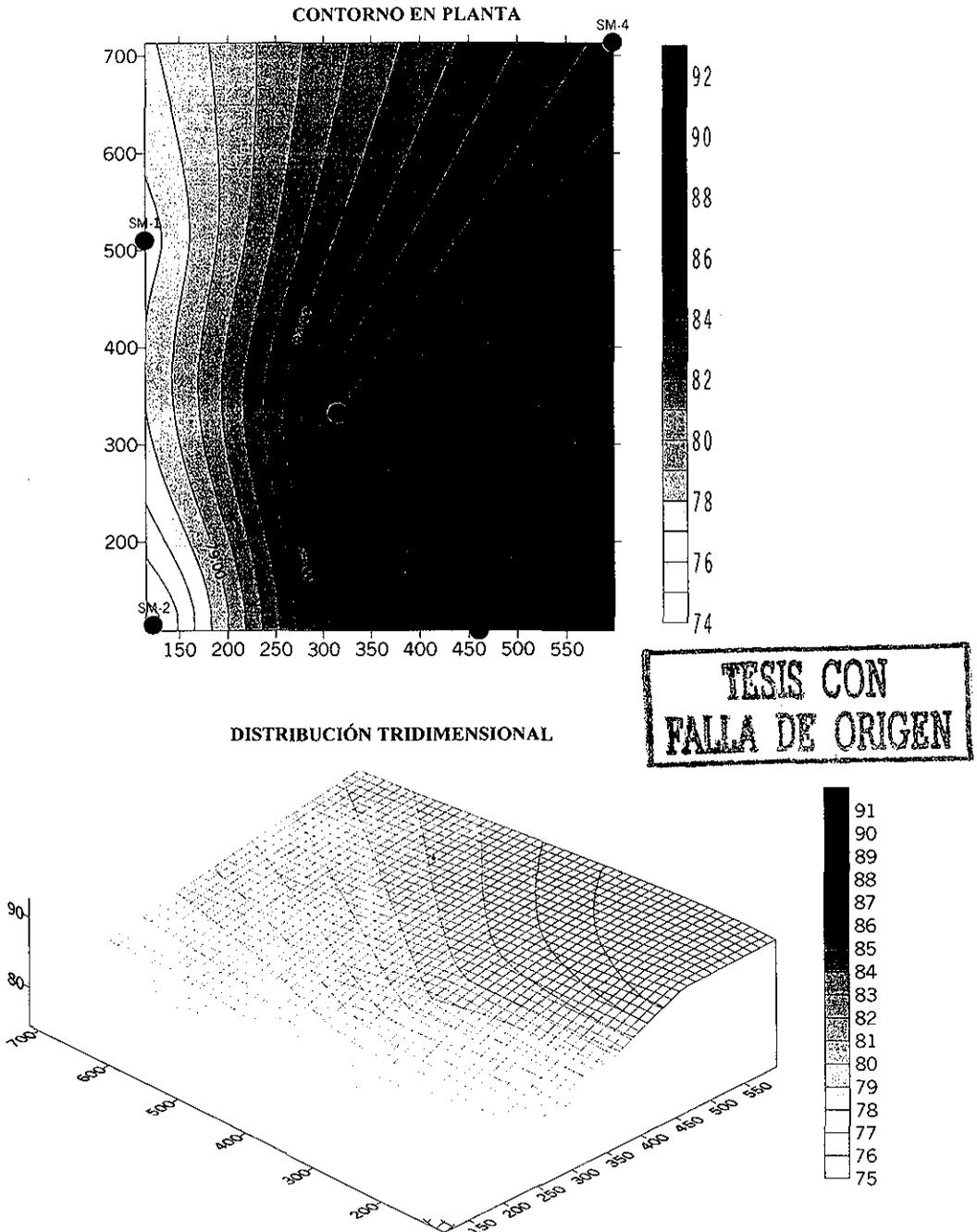
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO
GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL
SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Fig 37 Tendencia global de la media del contenido de agua, w%, de 0 a 15 m de profundidad



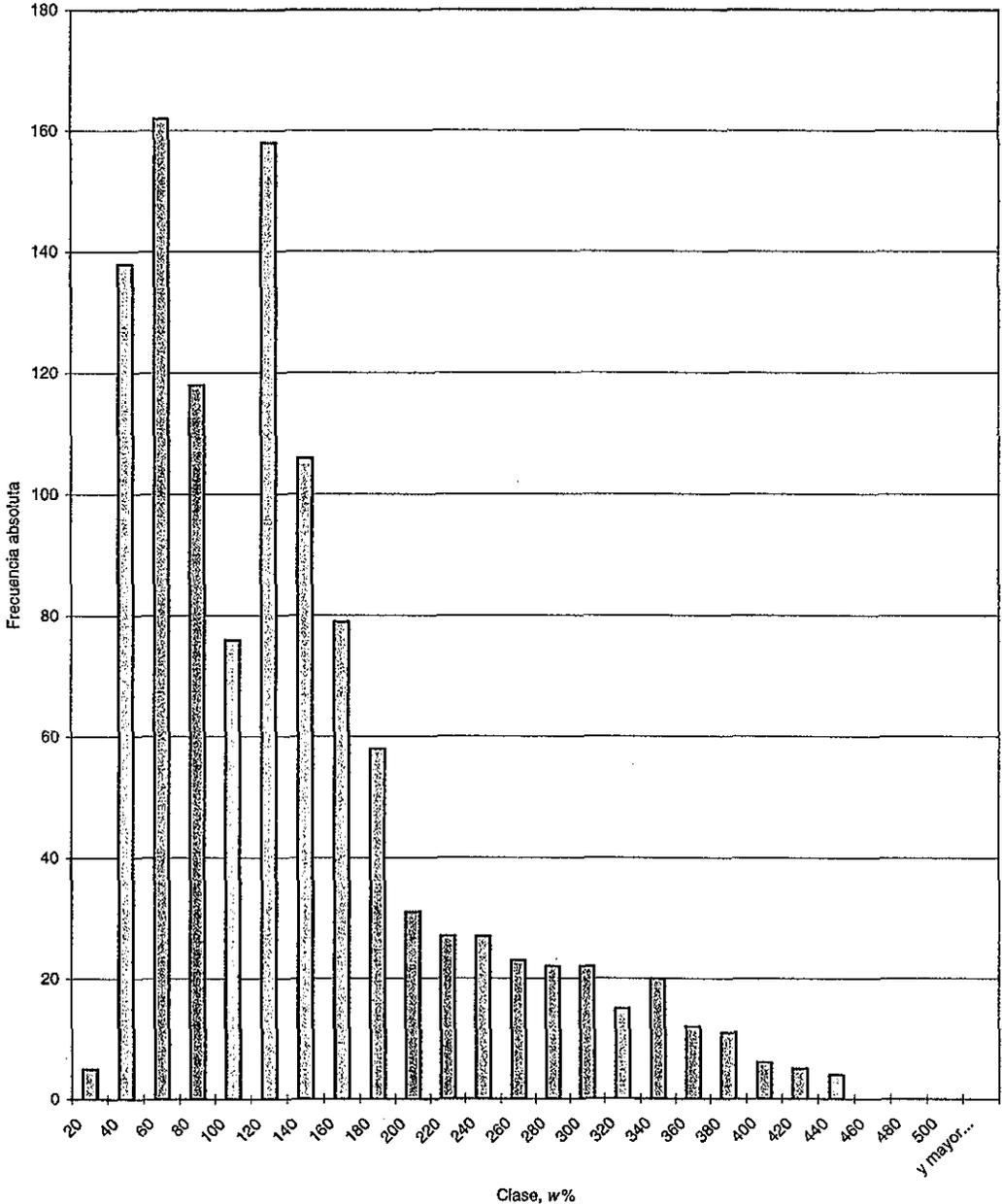
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO
 GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL
 SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Fig 38 Tendencia global de la media del contenido de agua, $w\%$, de 15 a 60 m de profundidad



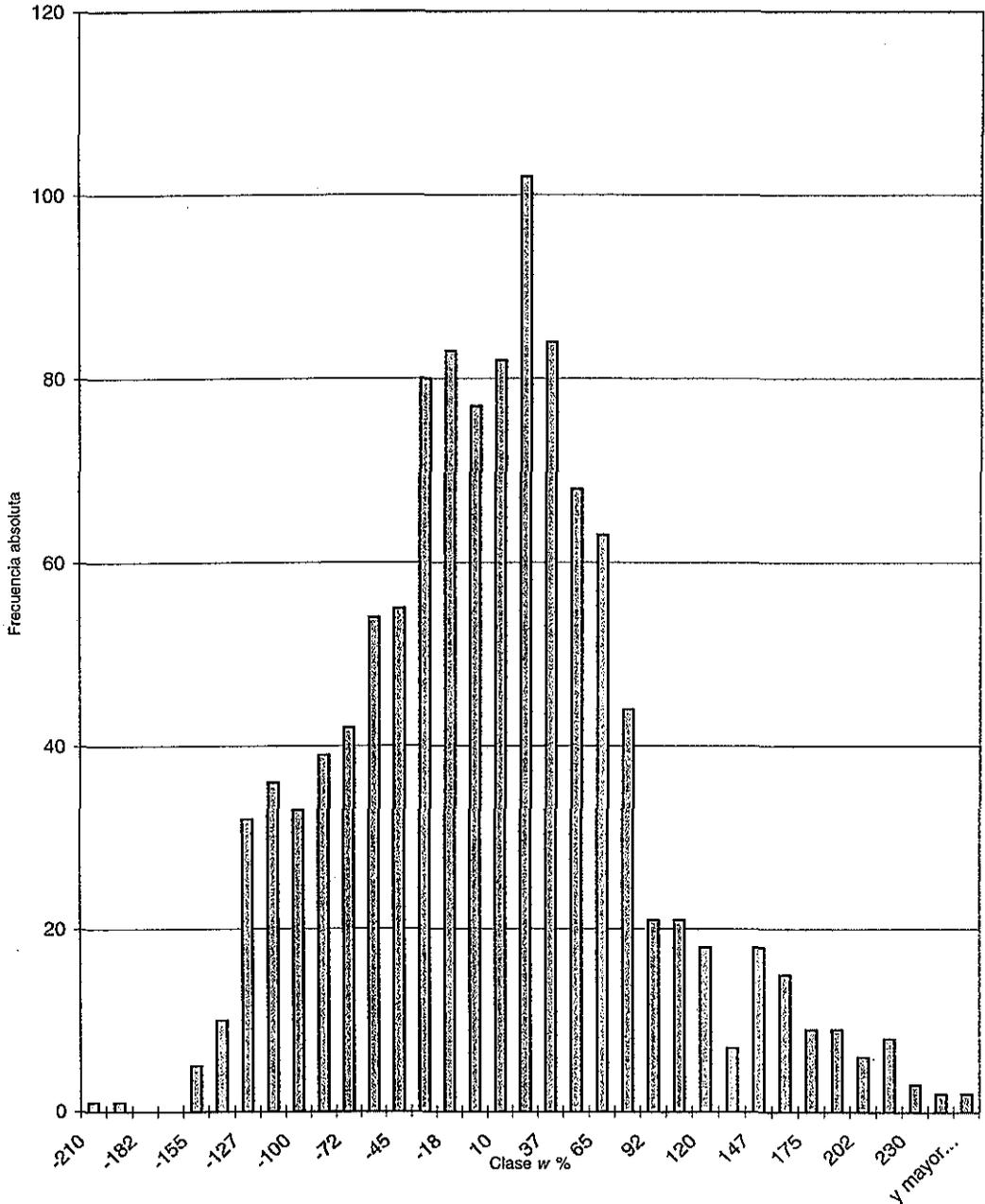
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA)

Fig 39 Histograma de la población global del contenido de agua, w%



**ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA
TEXCOCO)**

Fig 40 Histograma de la población global corregida (sin la tendencia) del contenido de agua, w %



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, w, SM-1, SOSA TEXCOCO

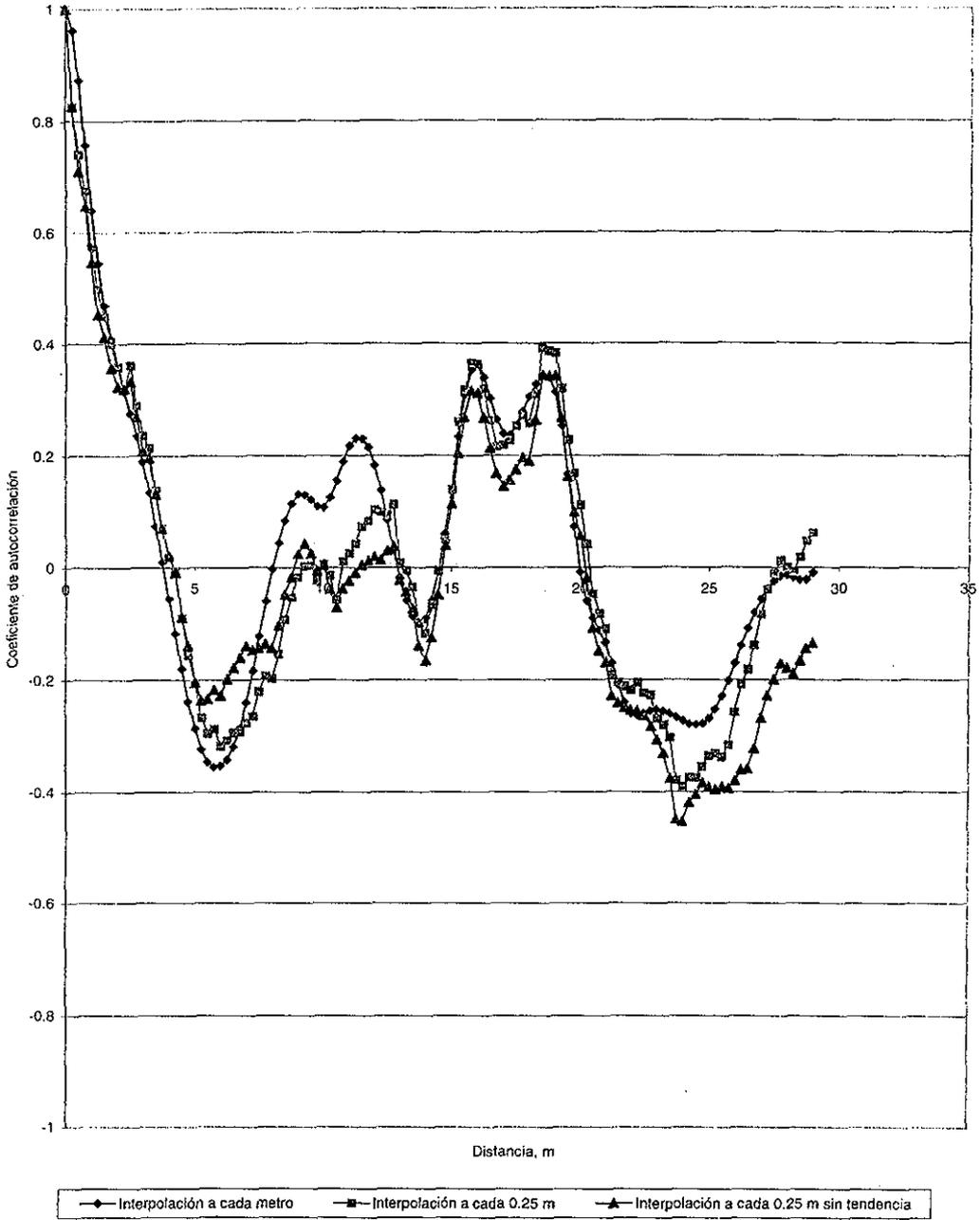


Figura 41

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, w , SM-2, SOSA TEXCOCO

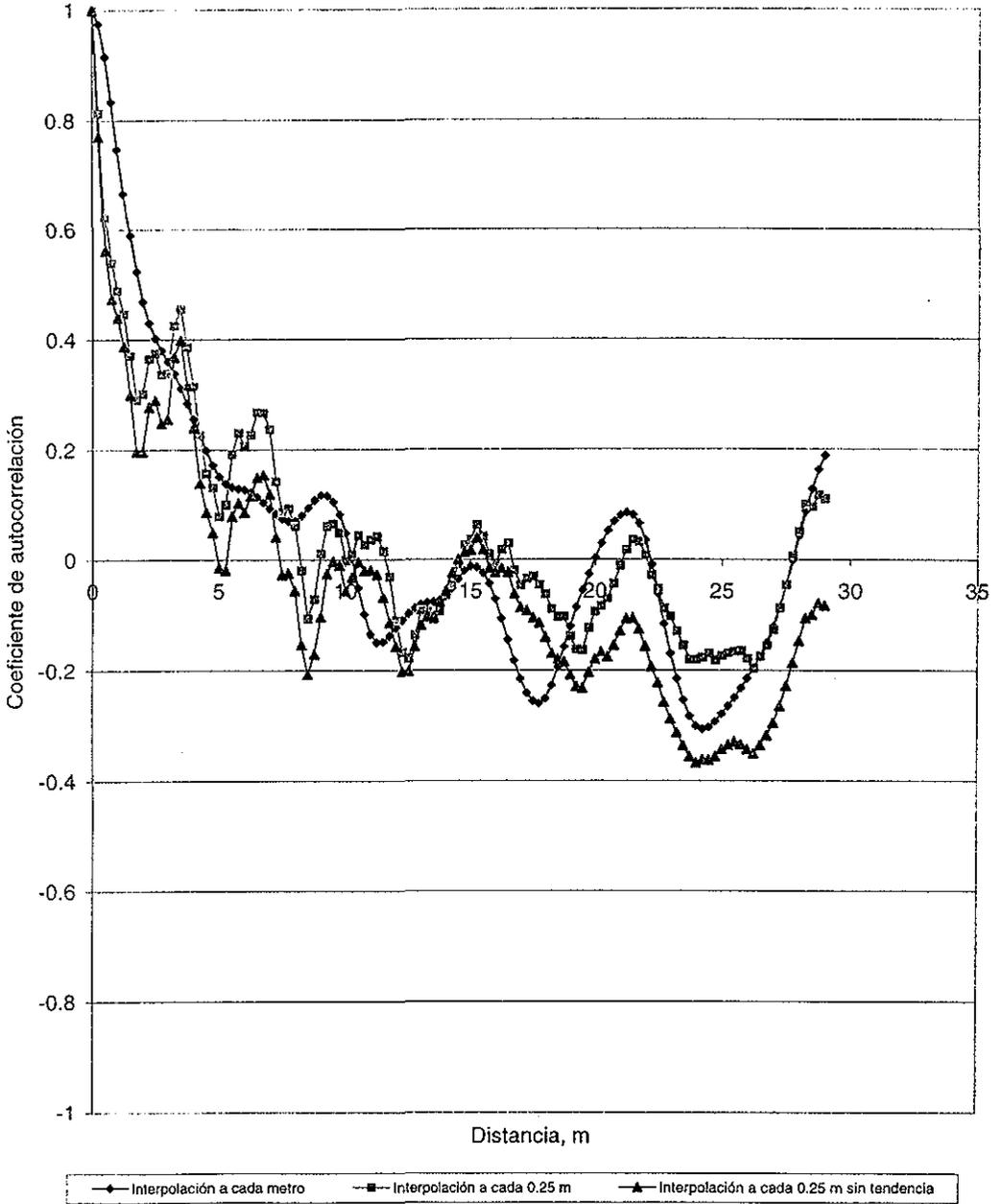


Figura 42

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN. w, SM-3, SOSA TEXCOCO

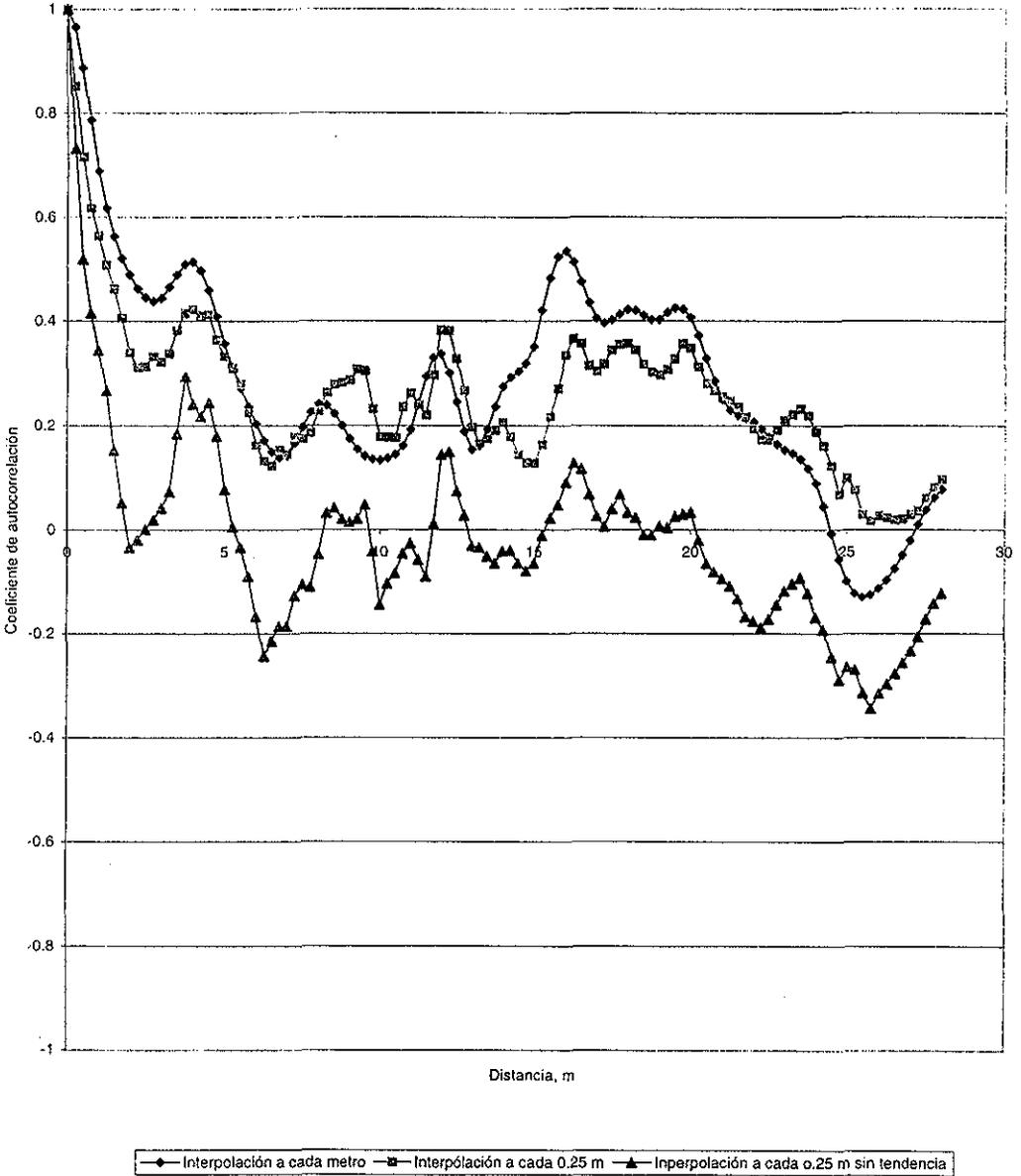


Figura 43

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, w, SM-4, SOSA TEXCOCO

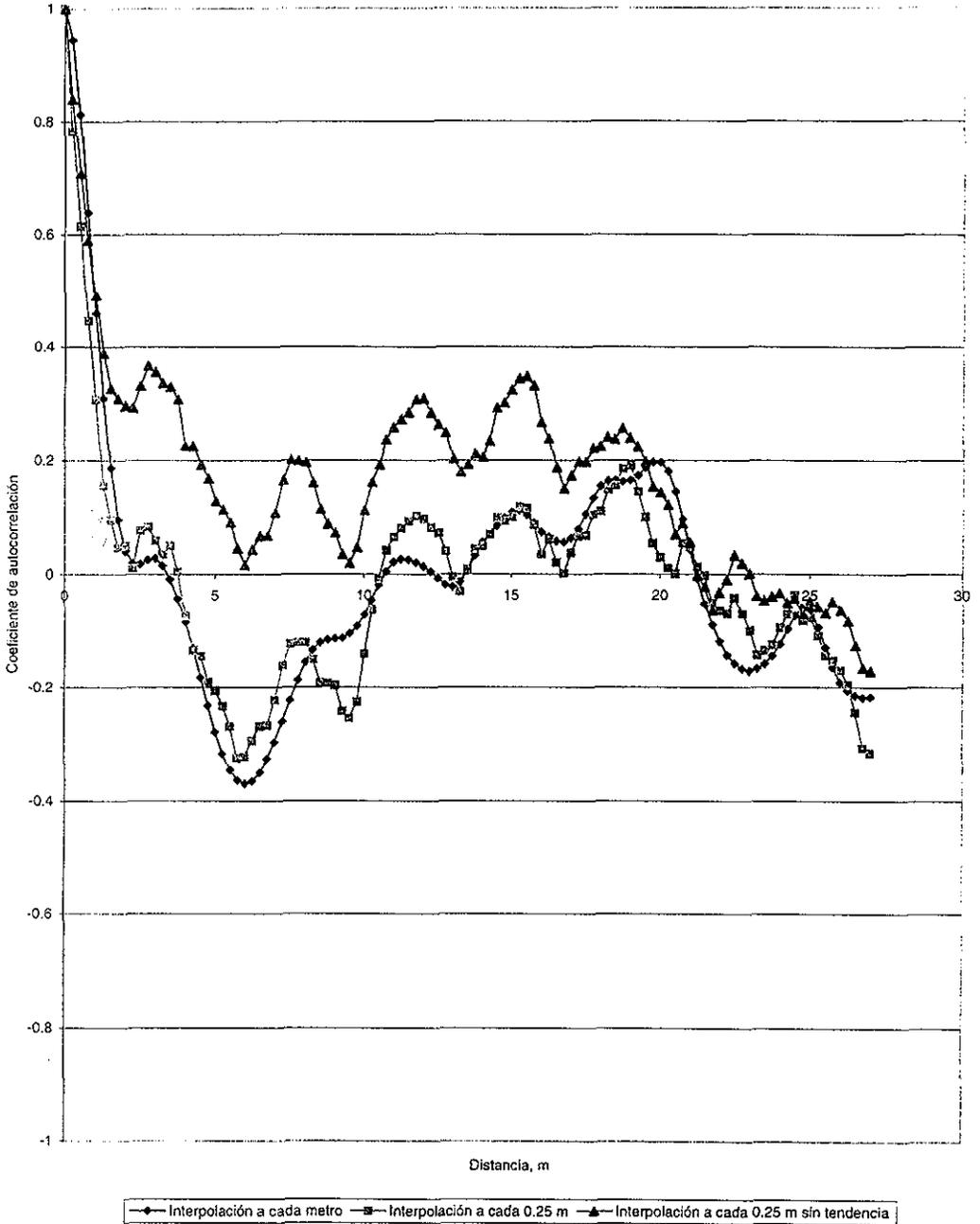


Figura 44

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, w. SM-5, SOSA TEXCOCO

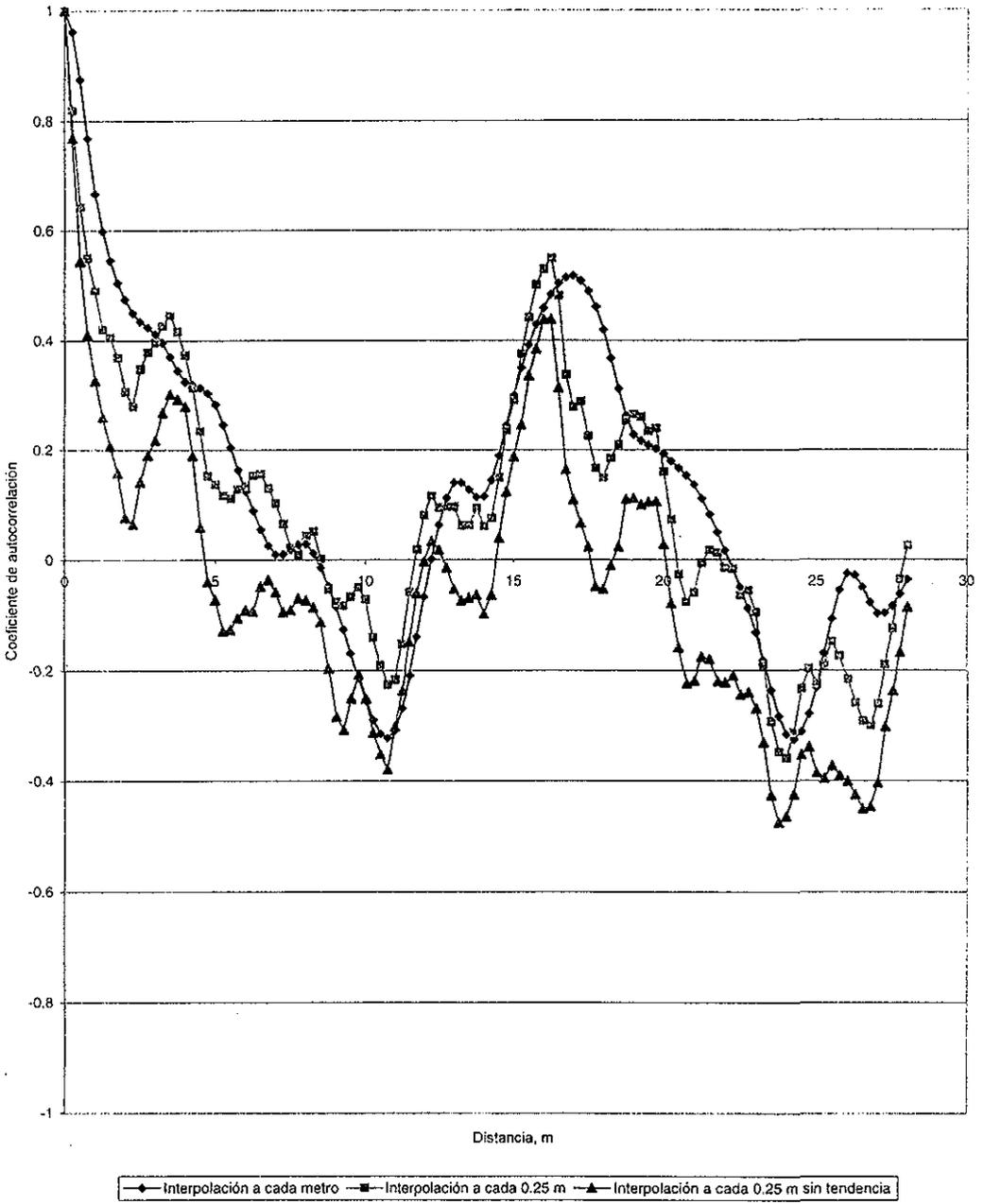
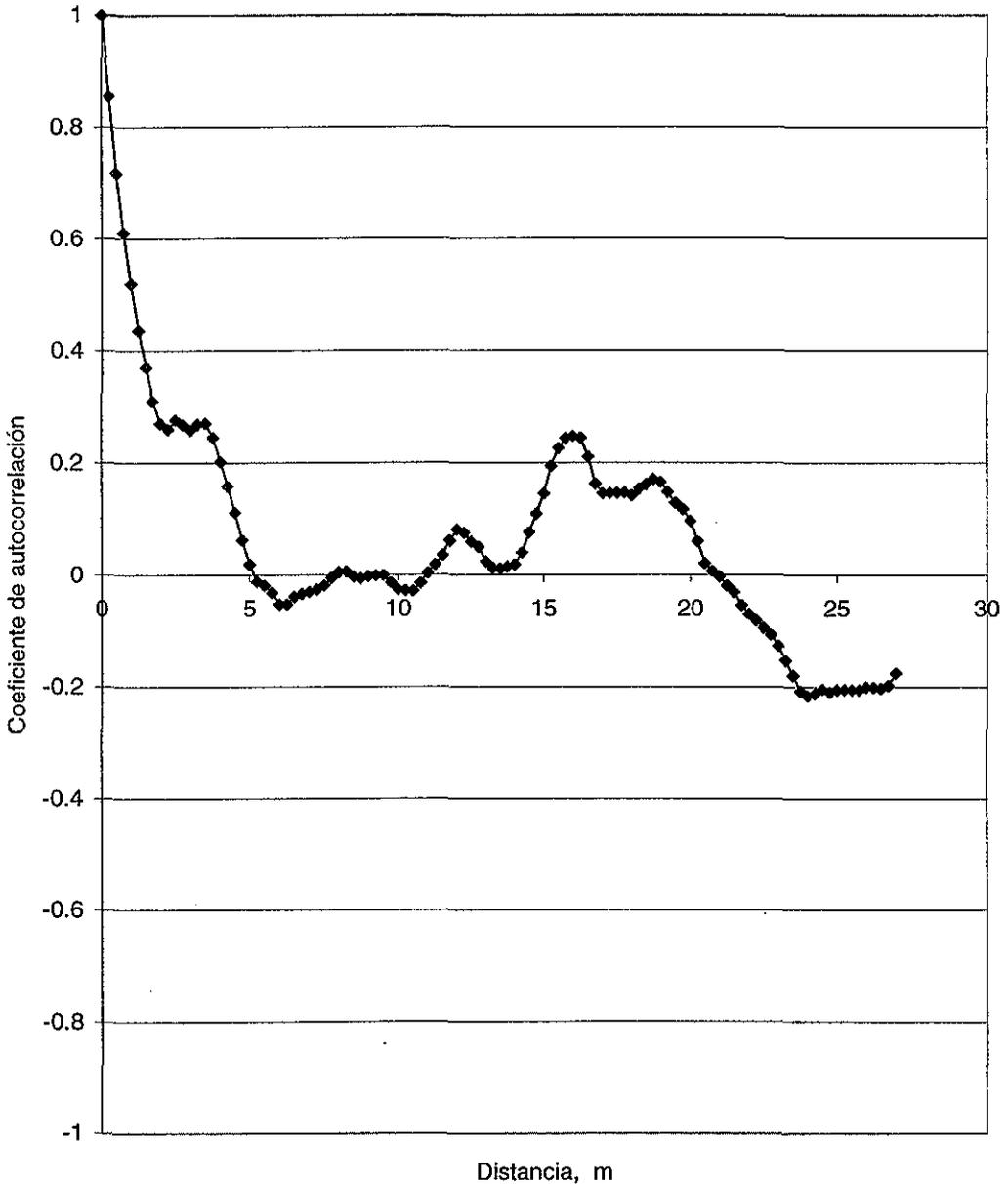


Figura 45

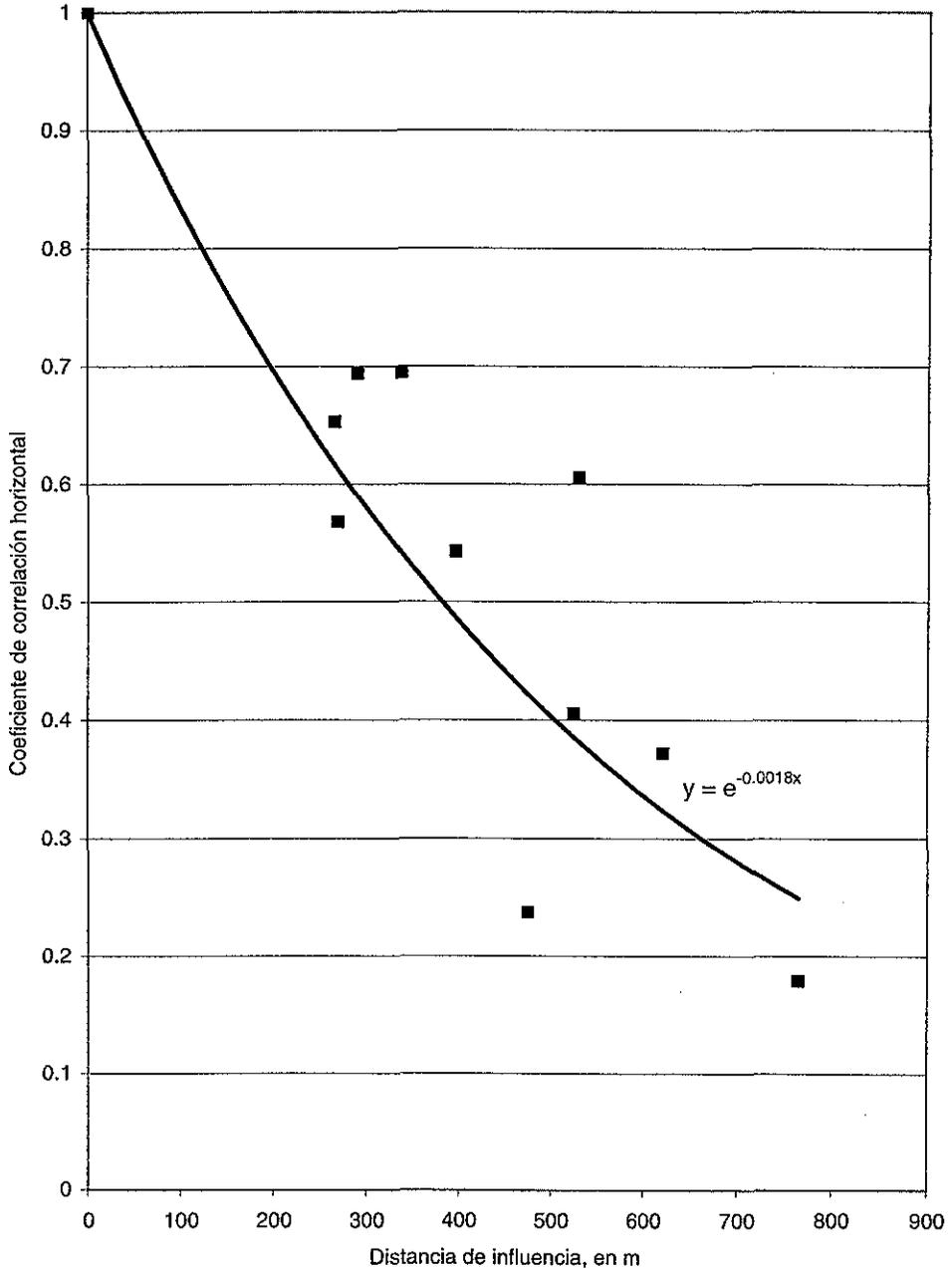
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Fig 46 Función "modelo" de la autocorrelación vertical del contenido de agua w%



ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTECNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

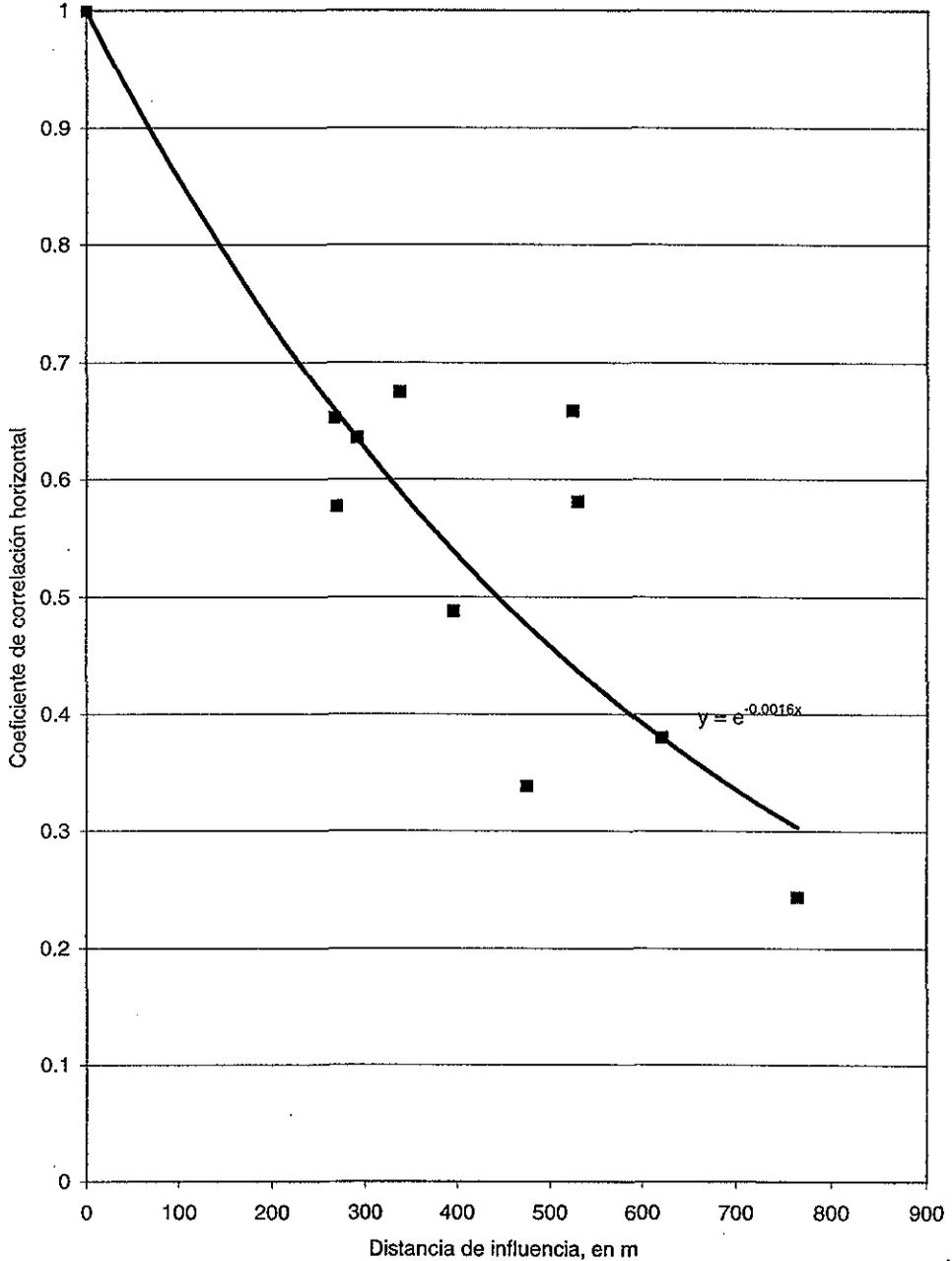
Fig 47 Función "modelo" de la correlación horizontal del contenido de agua w%



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

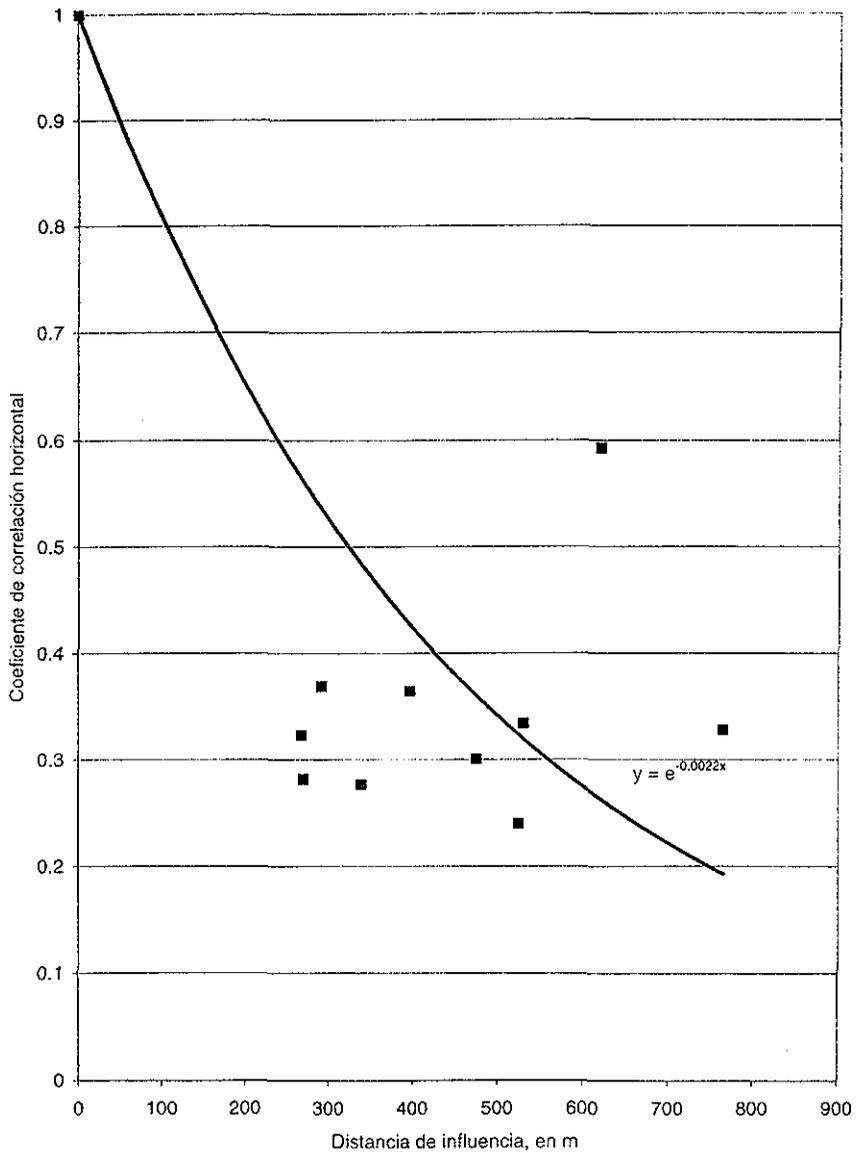
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTECNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Fig 48 Función "modelo" de la correlación horizontal del contenido de agua w%, de 0 a 15 m de profundidad



ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Fig 49 Función "modelo" de la correlación horizontal del contenido de agua w%, de 15 a 60 m de profundidad



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Perfil SC-1 Sosa Texcoco

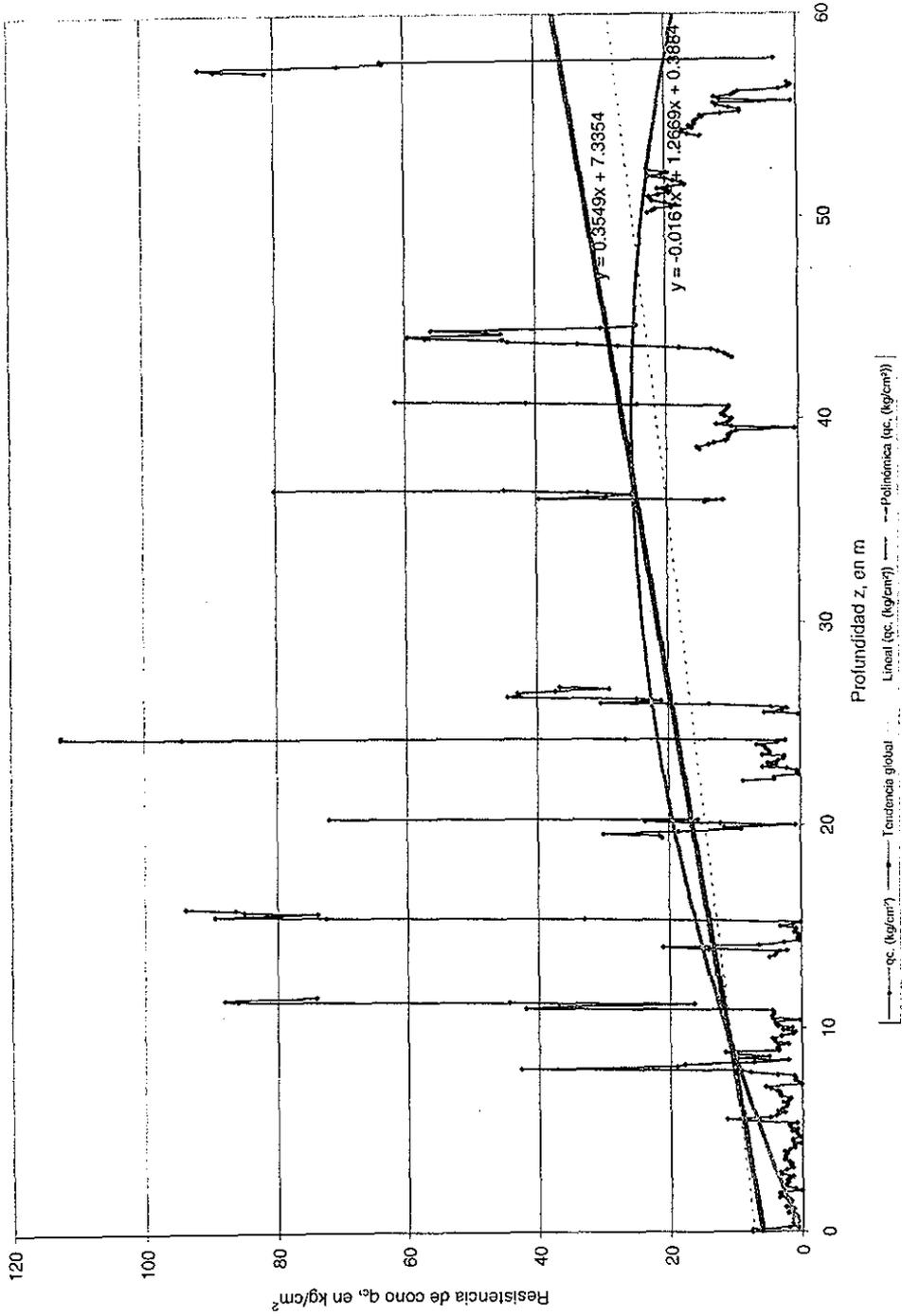


Figura 50

Perfil SC-3 Sosa Texcoco

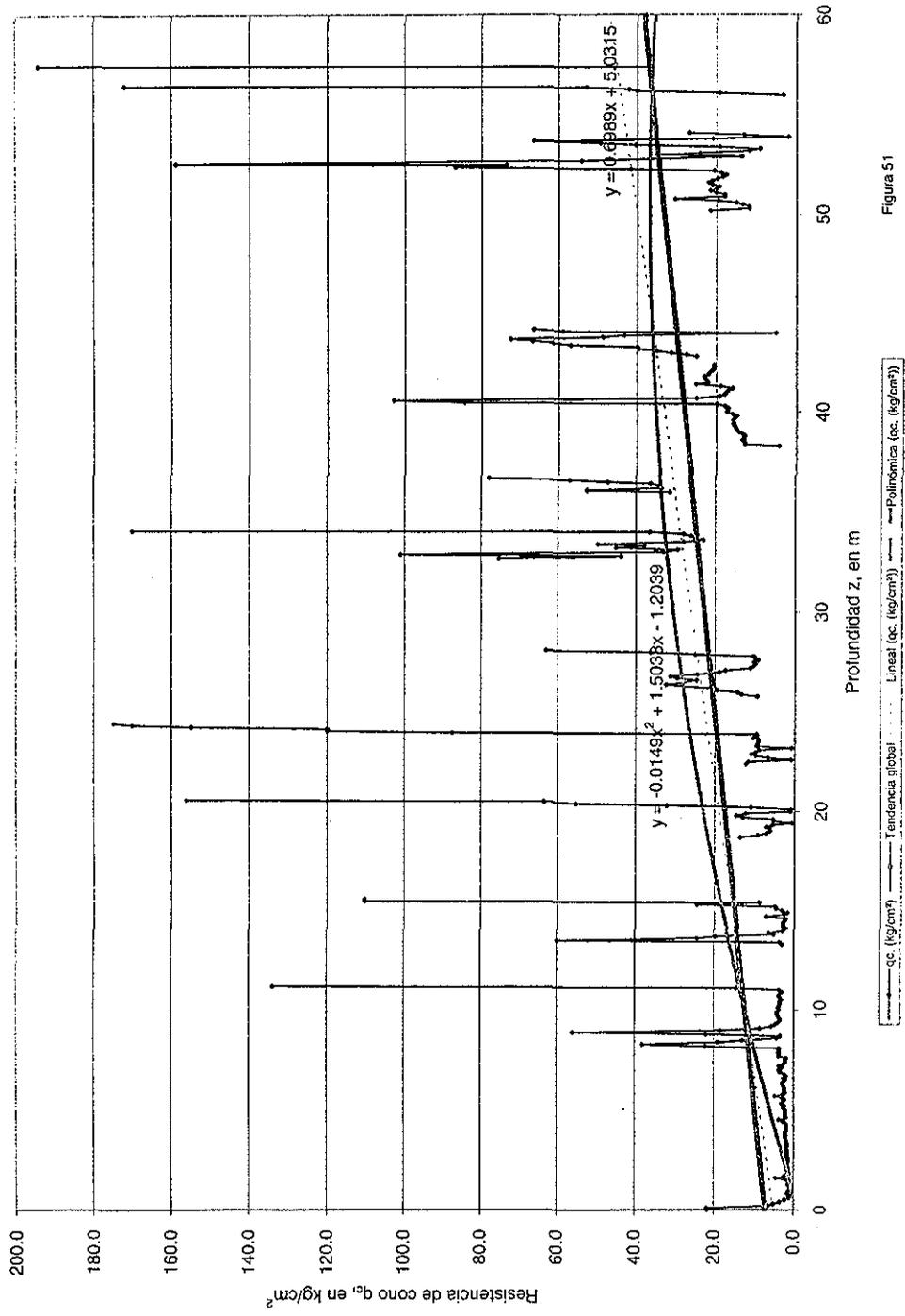


Figura 51

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Perfil SC-4 Sosa Texcoco

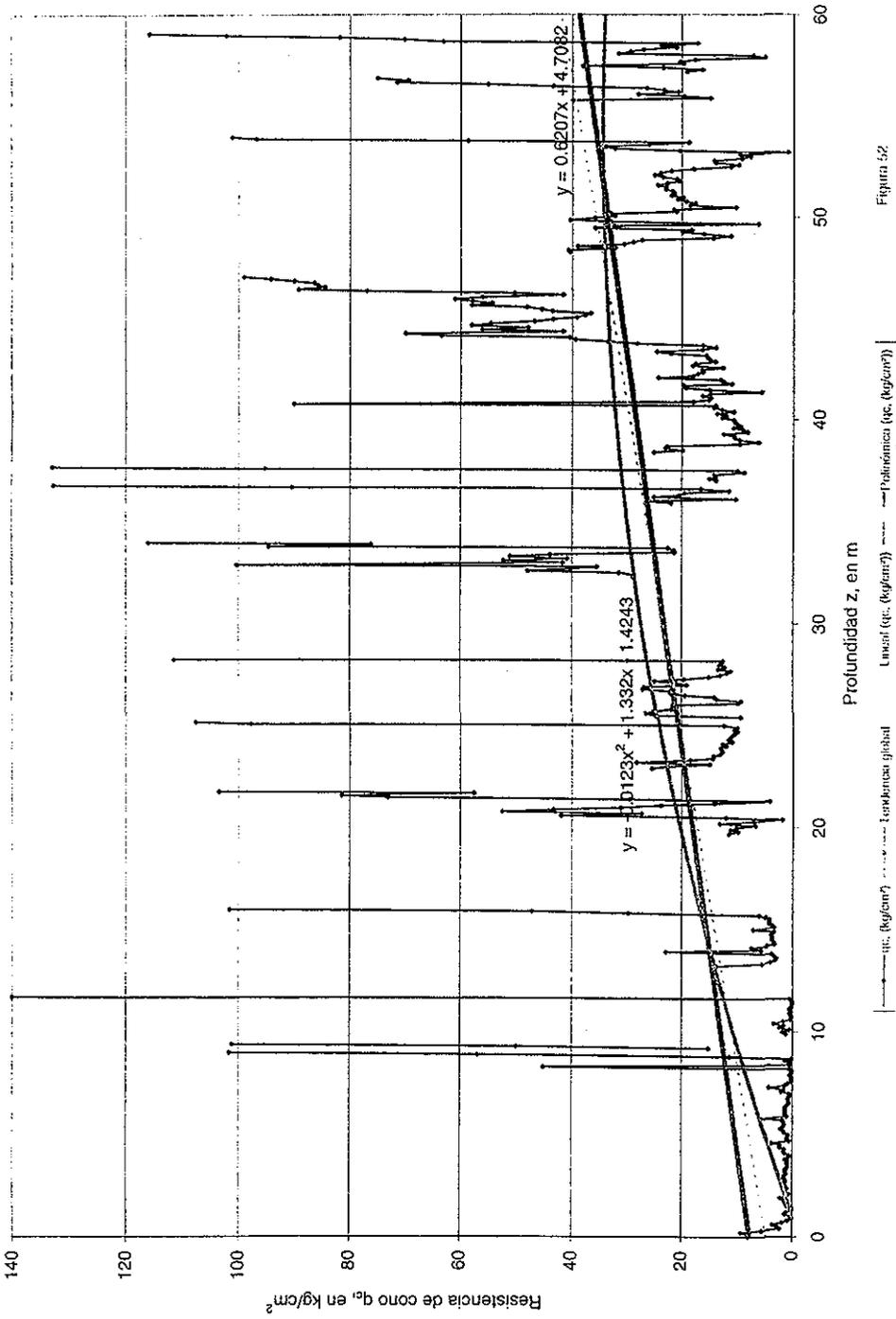


Figura 52

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Perfil SC-6 Sosa Texcoco

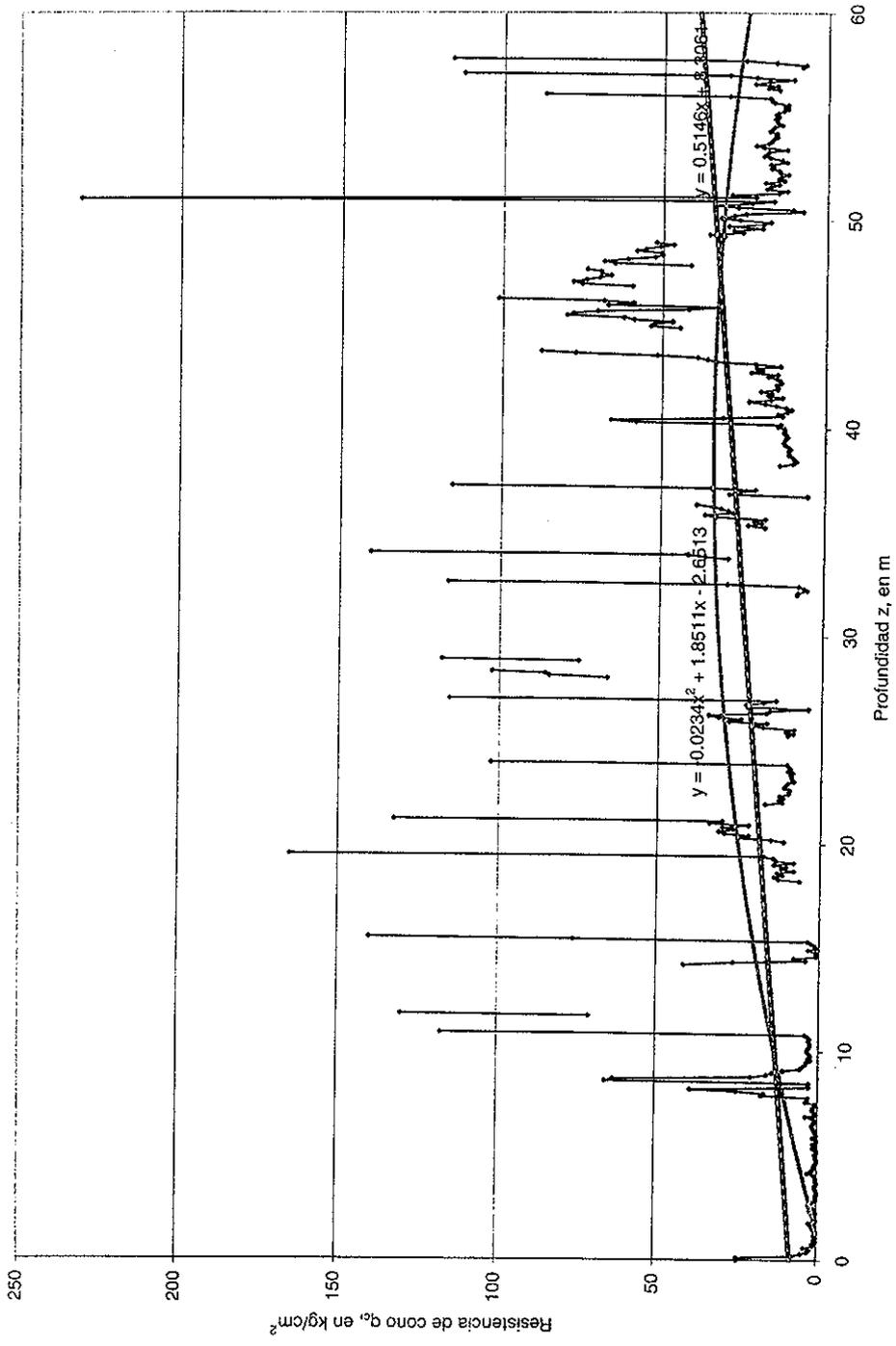


Figura 53

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Perfil SC-8 Sosa Texcoco

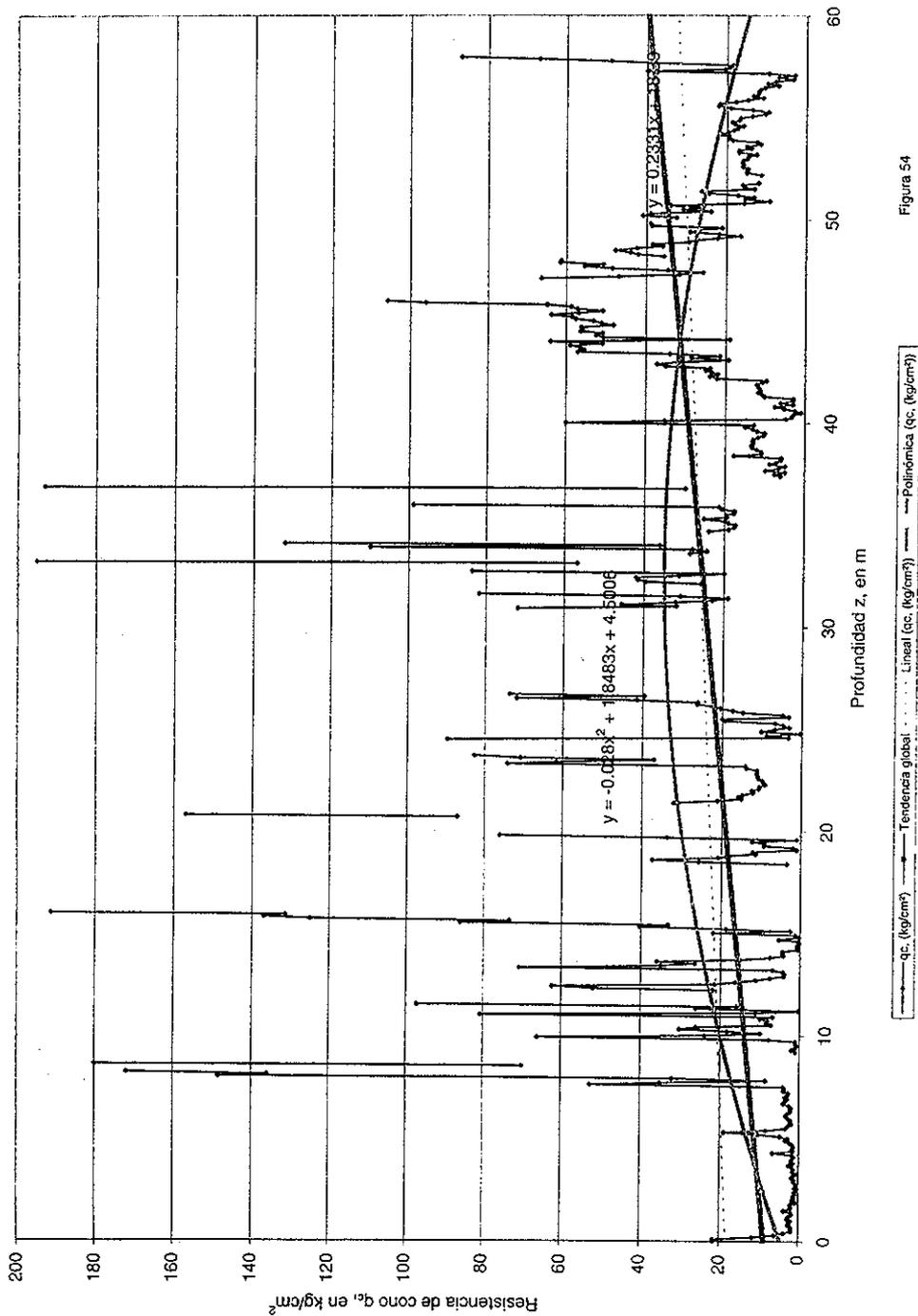


Figura 54

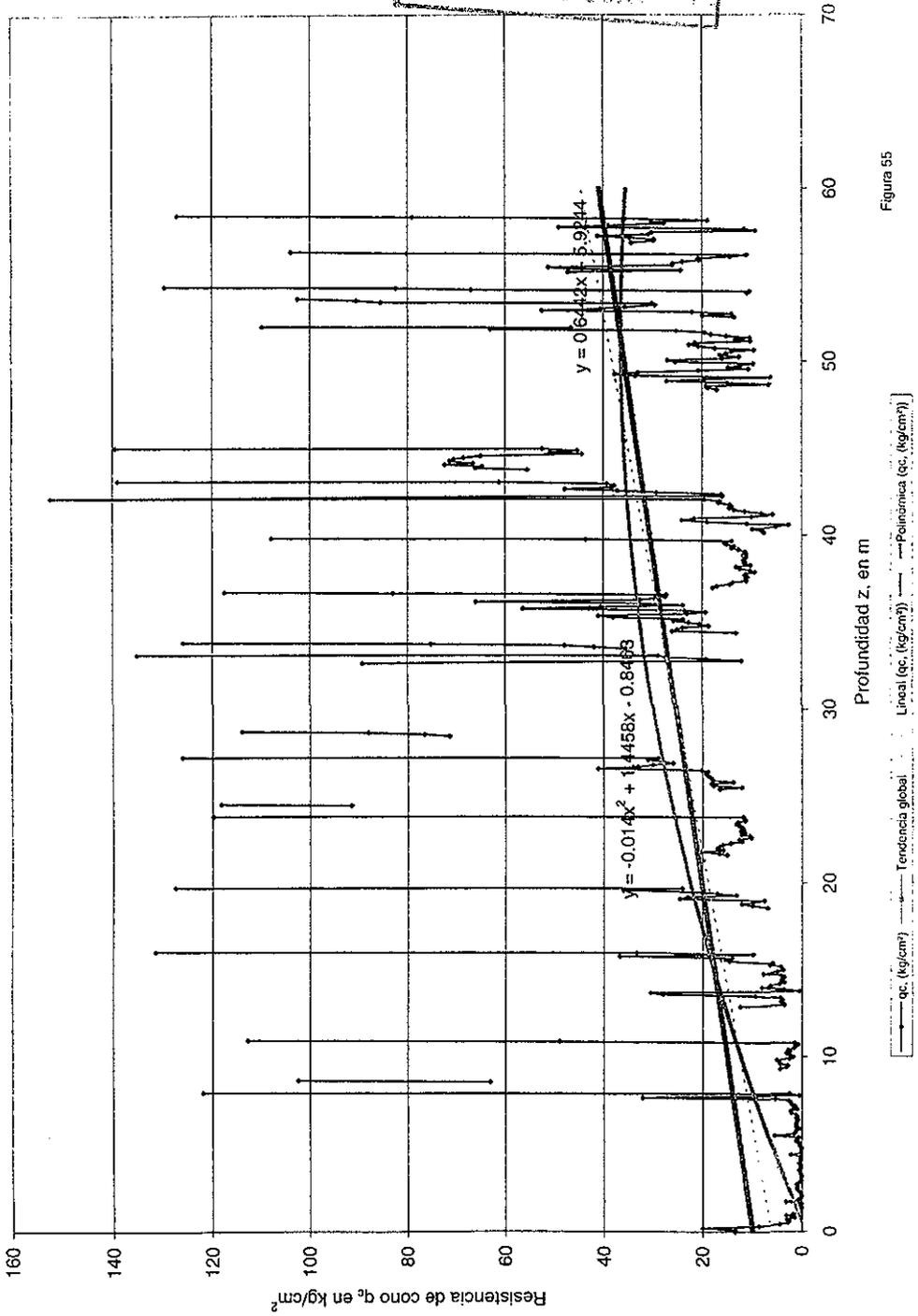


Figura 55

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Perfil SC-11 Sosa Texcoco

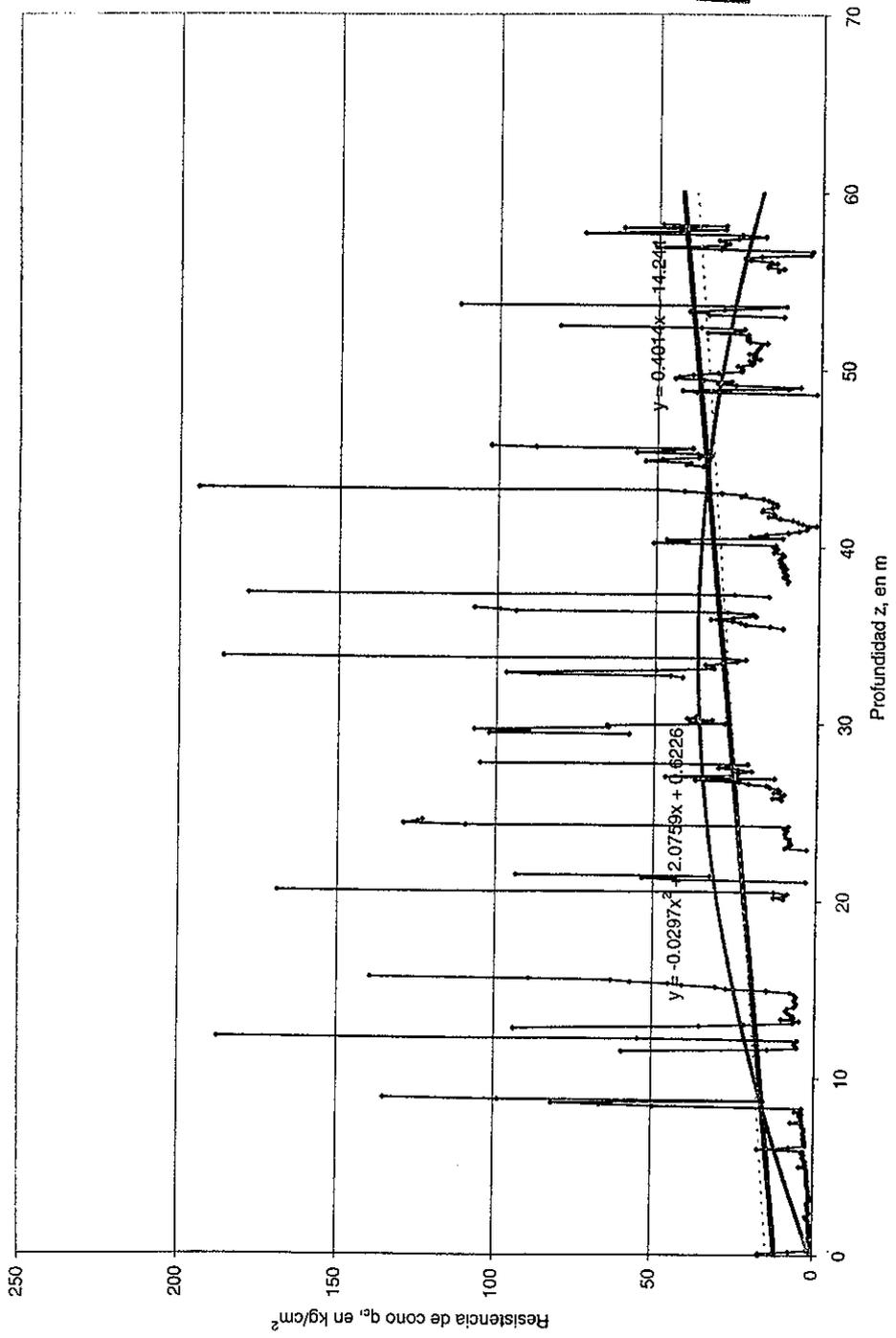
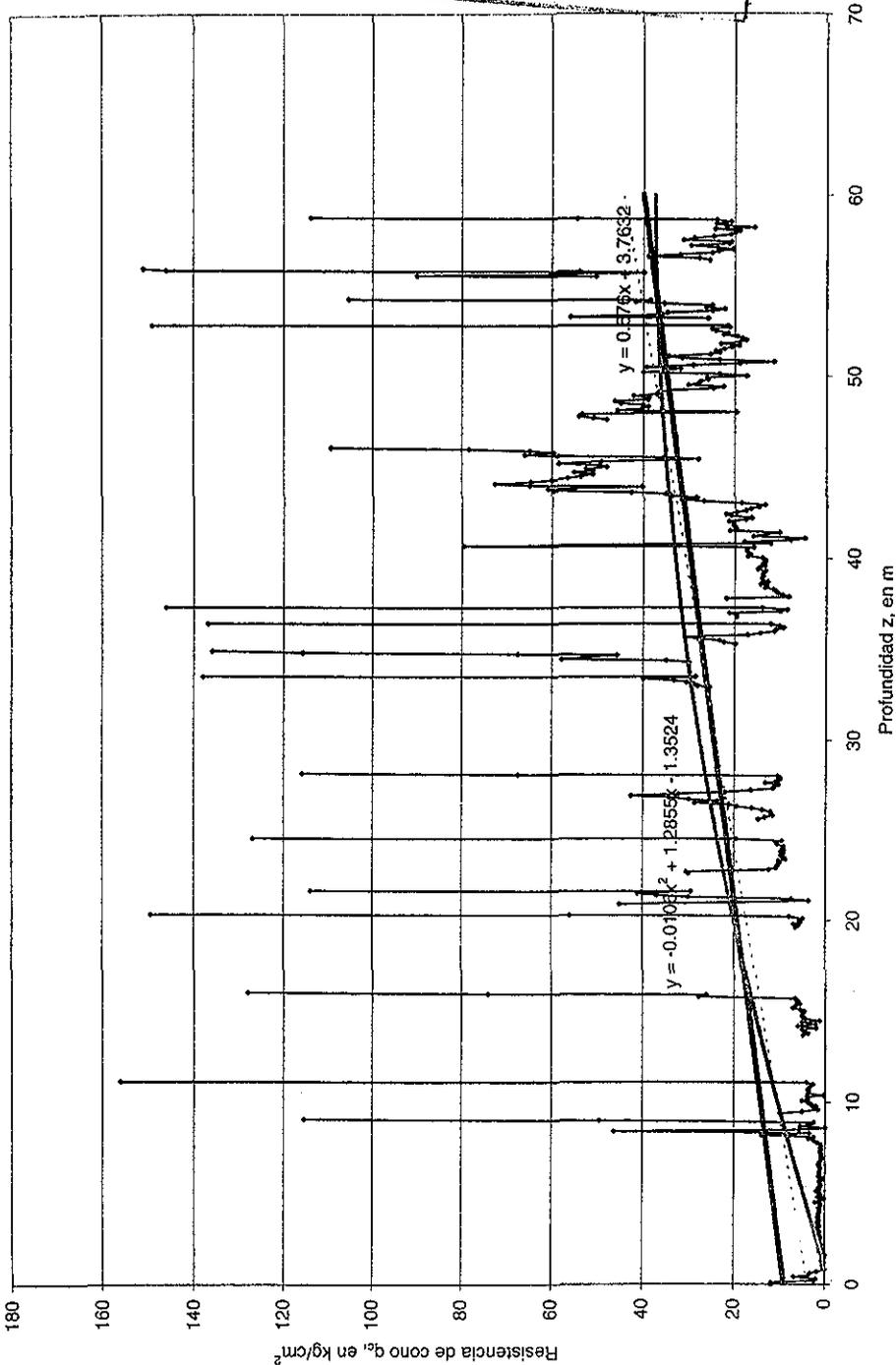


Figura 56

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



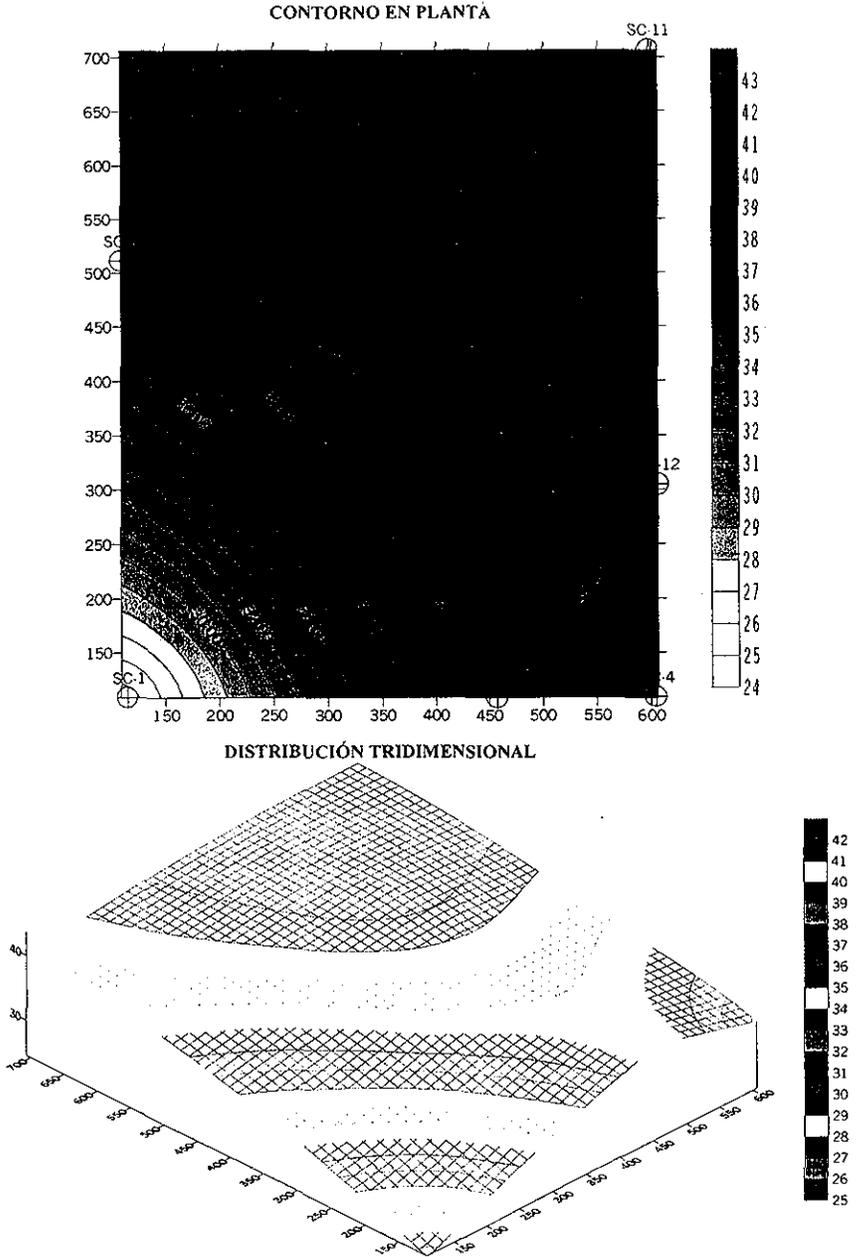
qc (kg/cm²) —●— Tendencia global ····· Líneaal (pc (kg/cm²)) - - - Polidromica (pc (kg/cm²))

Figura 57

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO
GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

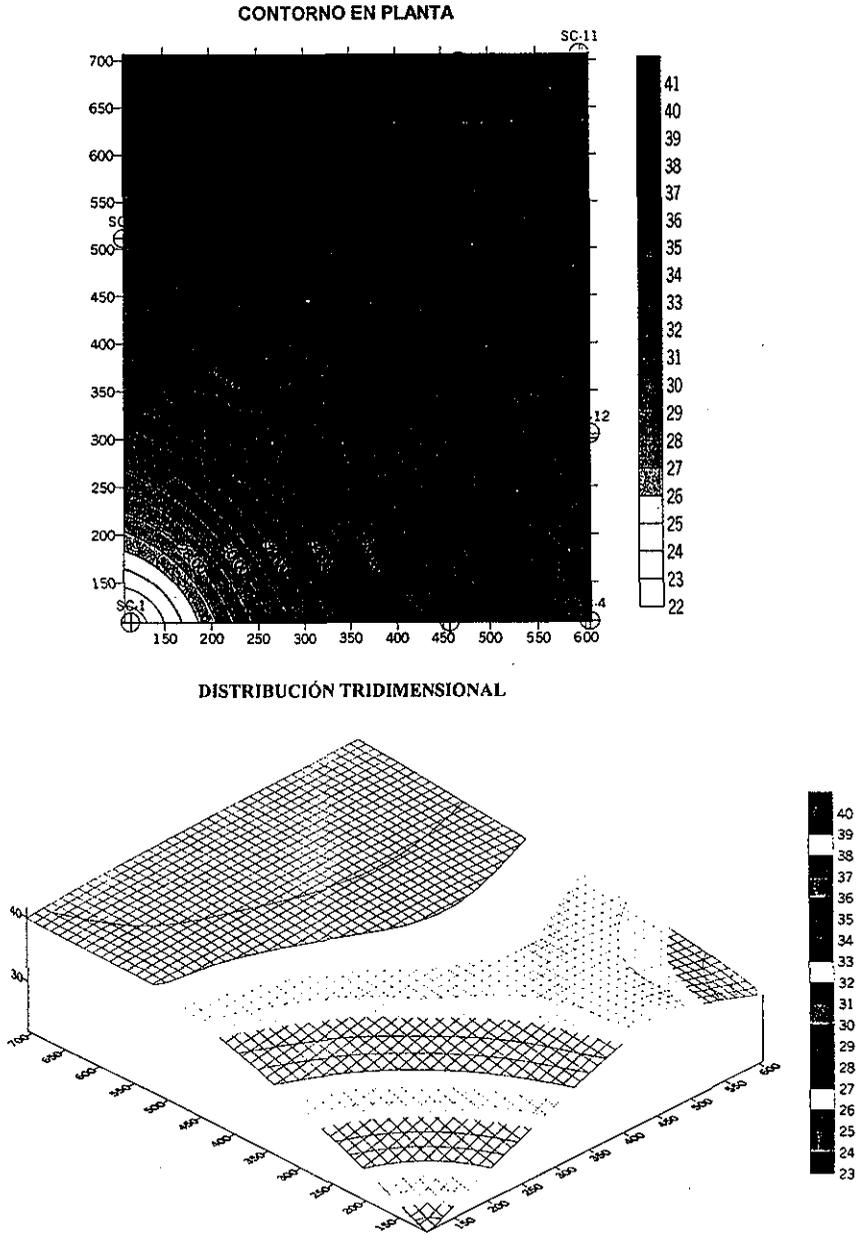
Fig 58 Tendencia global de la media de la resistencia de cono, q_c kg/cm²



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

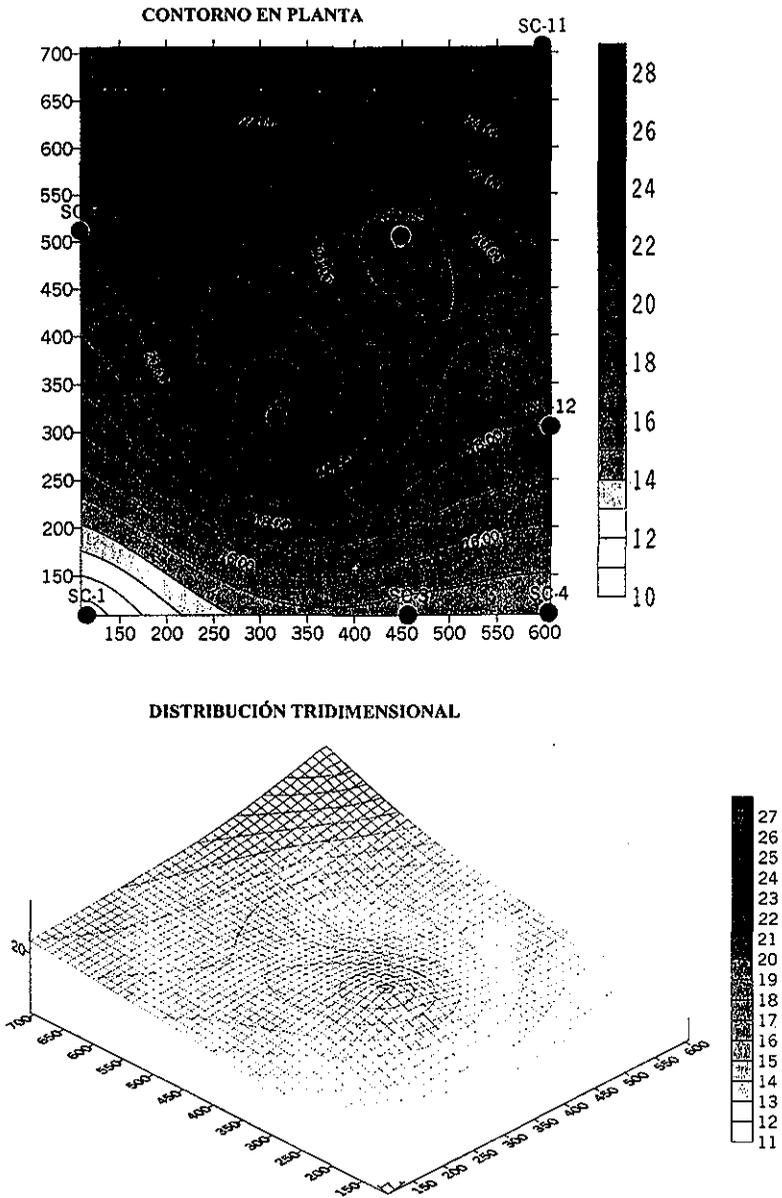
Fig 59 Tendencia global de la desviación estándar de la resistencia de cono, q_c kg/cm²



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

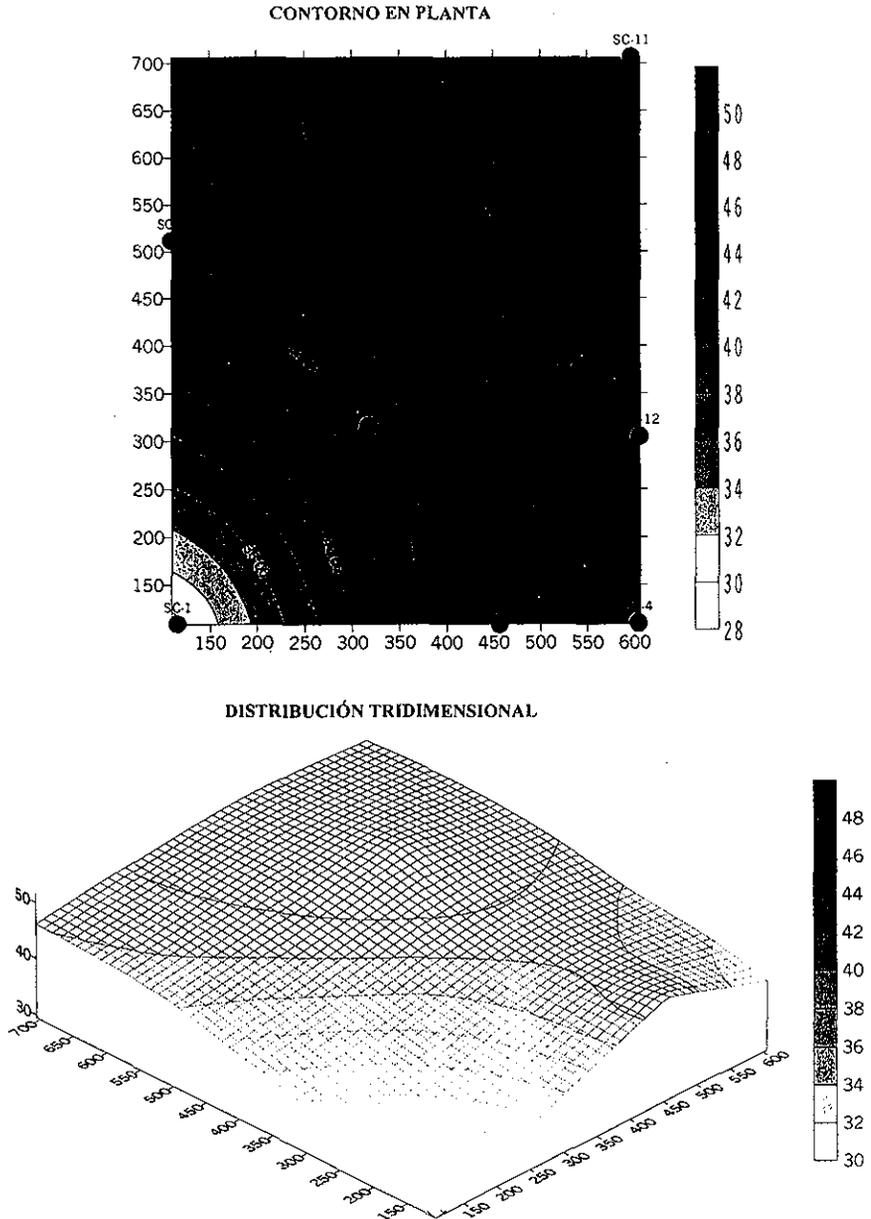
Fig 60 Tendencia global de la media de la resistencia de cono, q_c kg/cm², de 0 a 15 m de profundidad



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Fig 61 Tendencia global de la media de la resistencia de cono, q_c kg/cm², de 15 a 60 m de profundidad



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO NORTE (SOSA TEXCOCO)

Fig 62 Histograma de la población global de la resistencia de cono, q_c , kg/cm^2

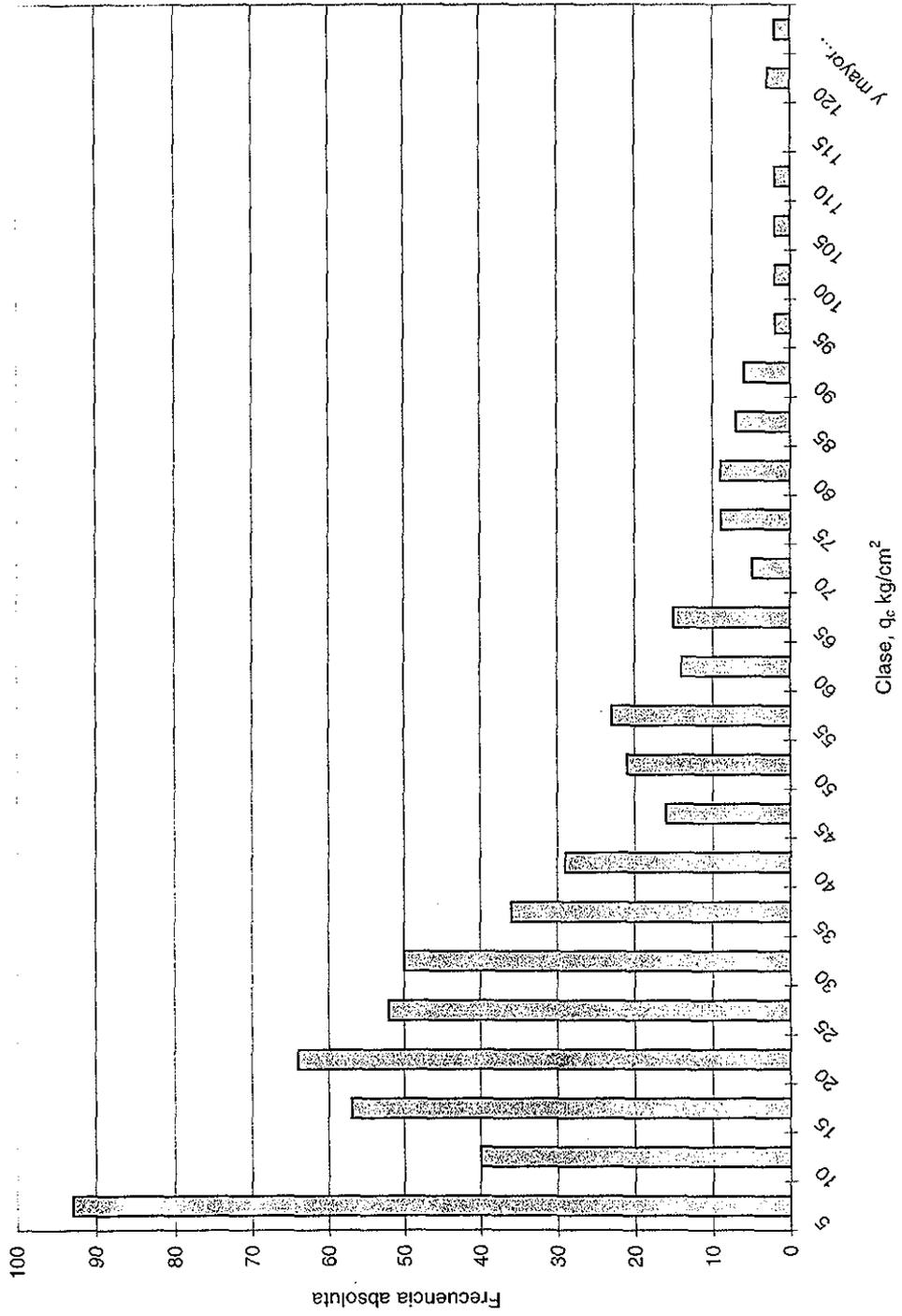
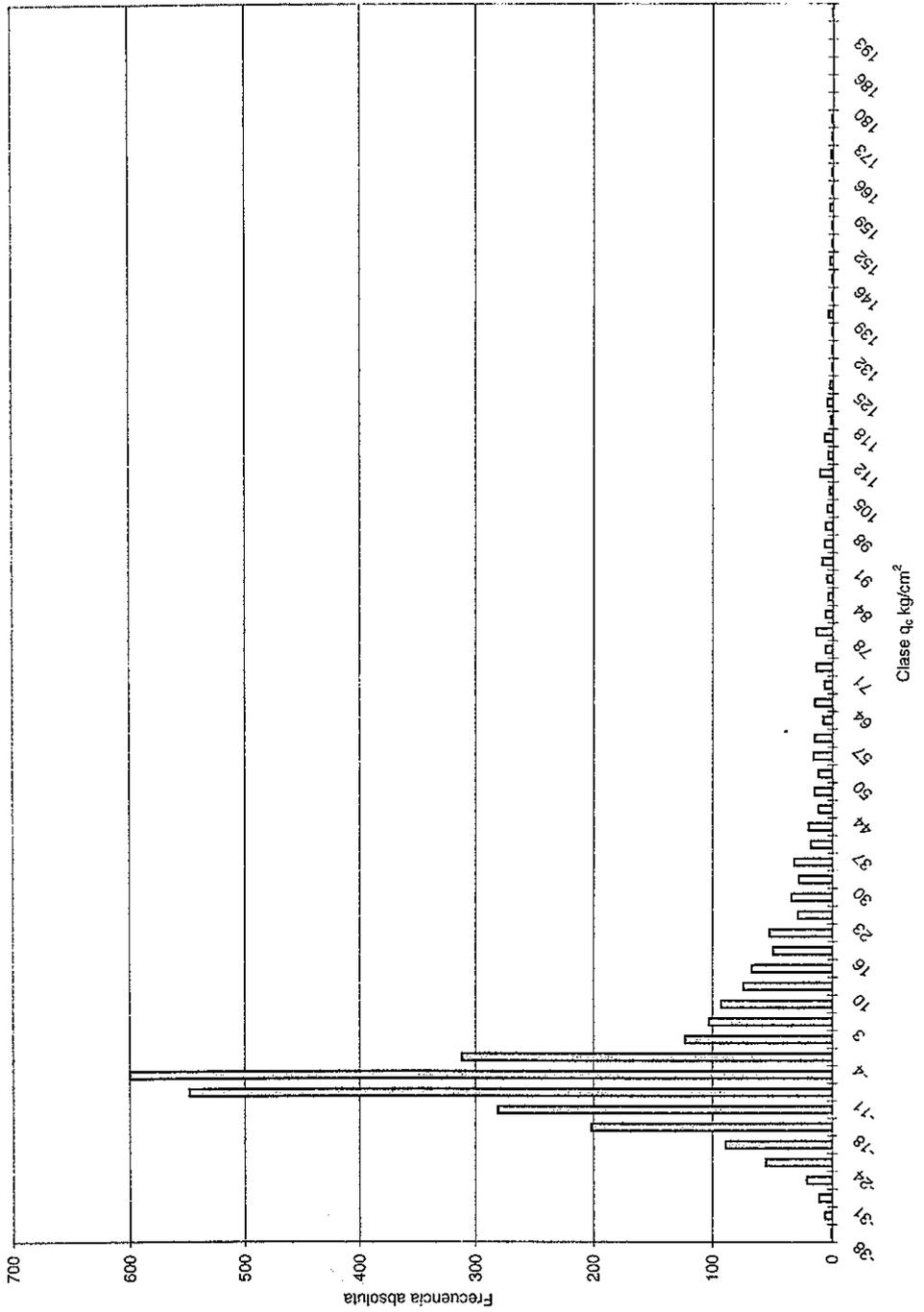
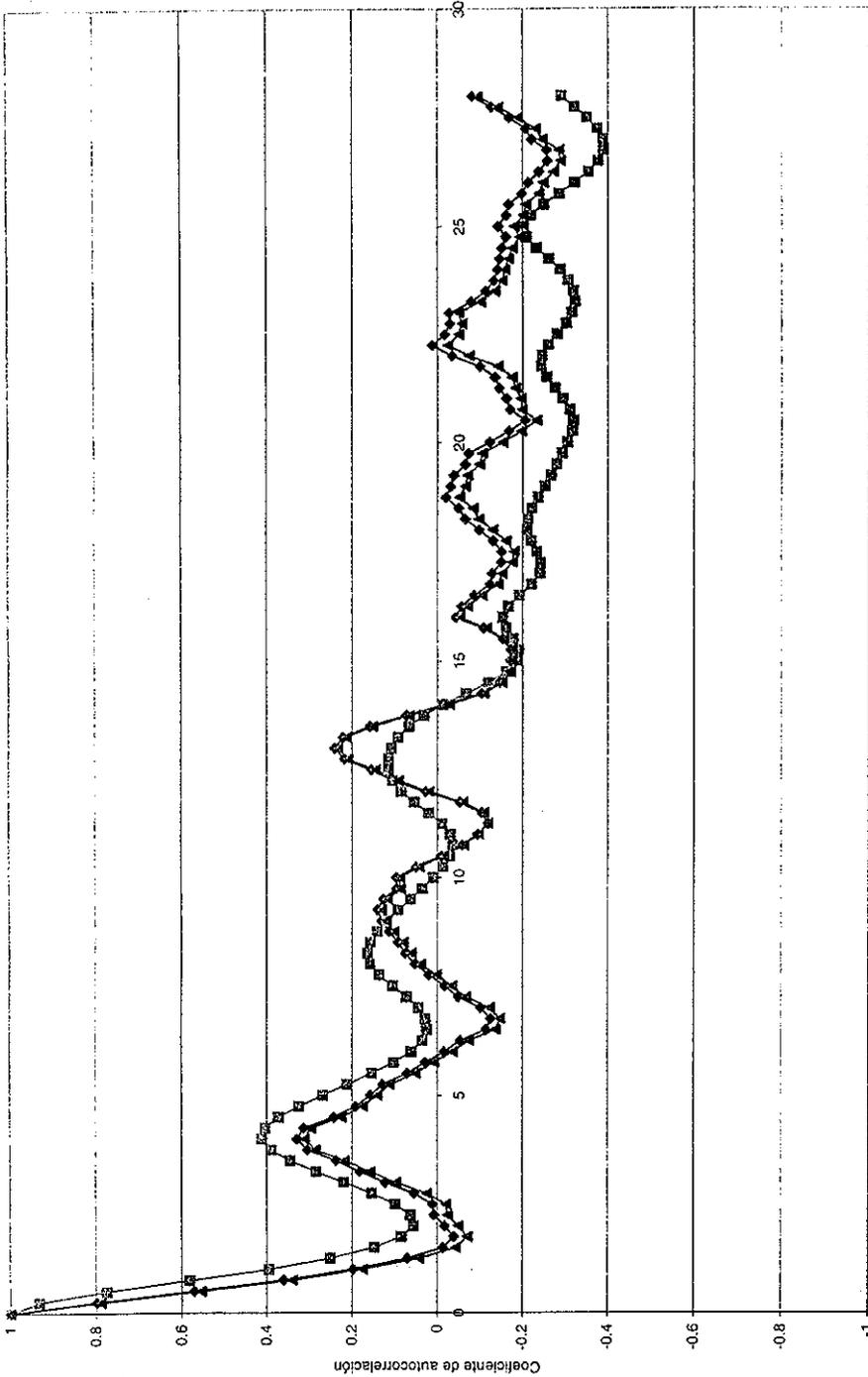


Fig 63 Histograma de la población global corregida (sin la tendencia) de la resistencia de cono, q_c kg/cm²



FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, q_c-3, SOSA TEXCOCO

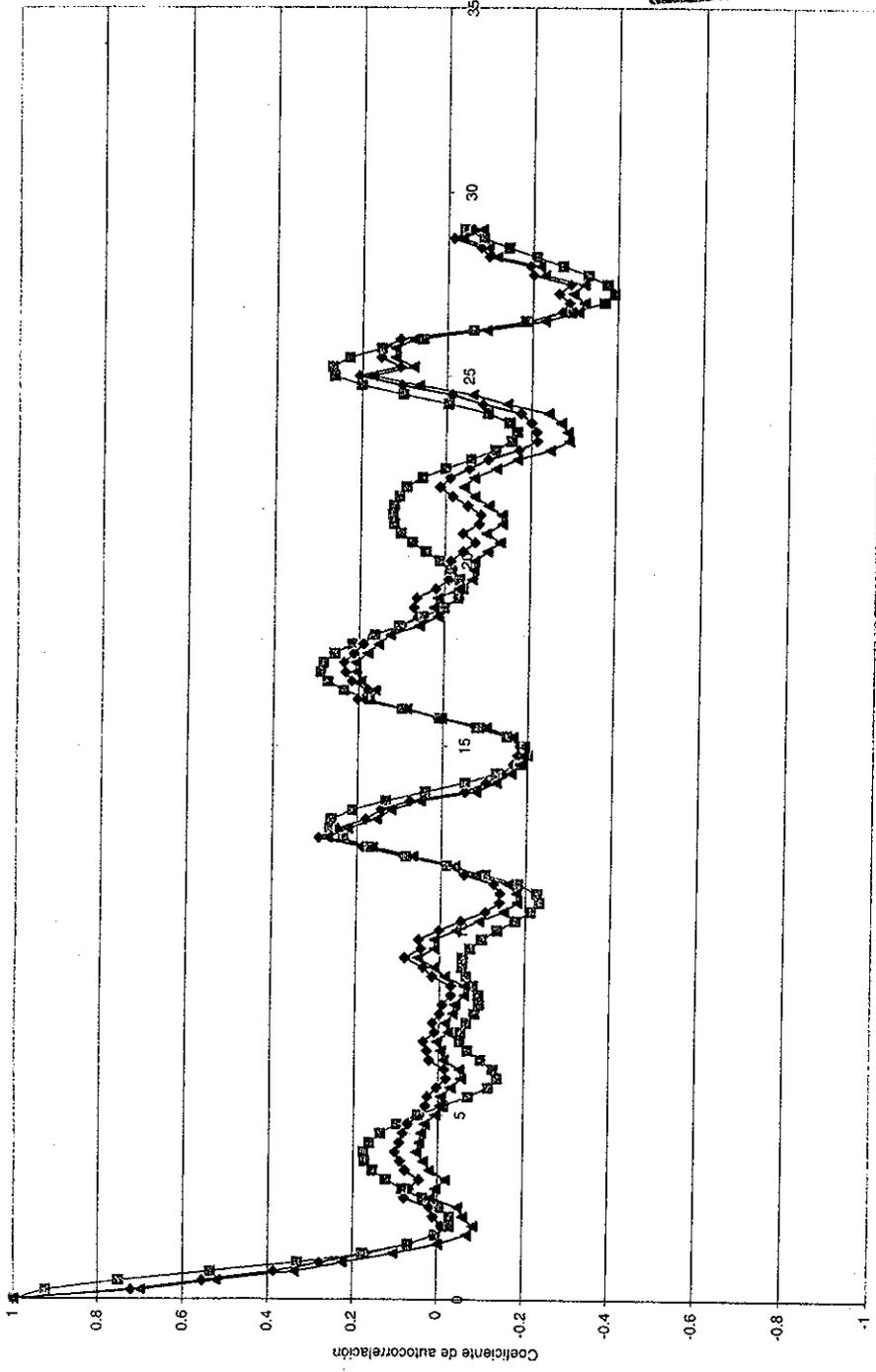


—◆— Interpolación a cada metro —■— Interpolación a cada 0.1 m —▲— Interpolación a cada 0.1 sin tendencia

Distancia, m

Figura 64

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, ρ_c , SC-4, SOSA TEXCOCO

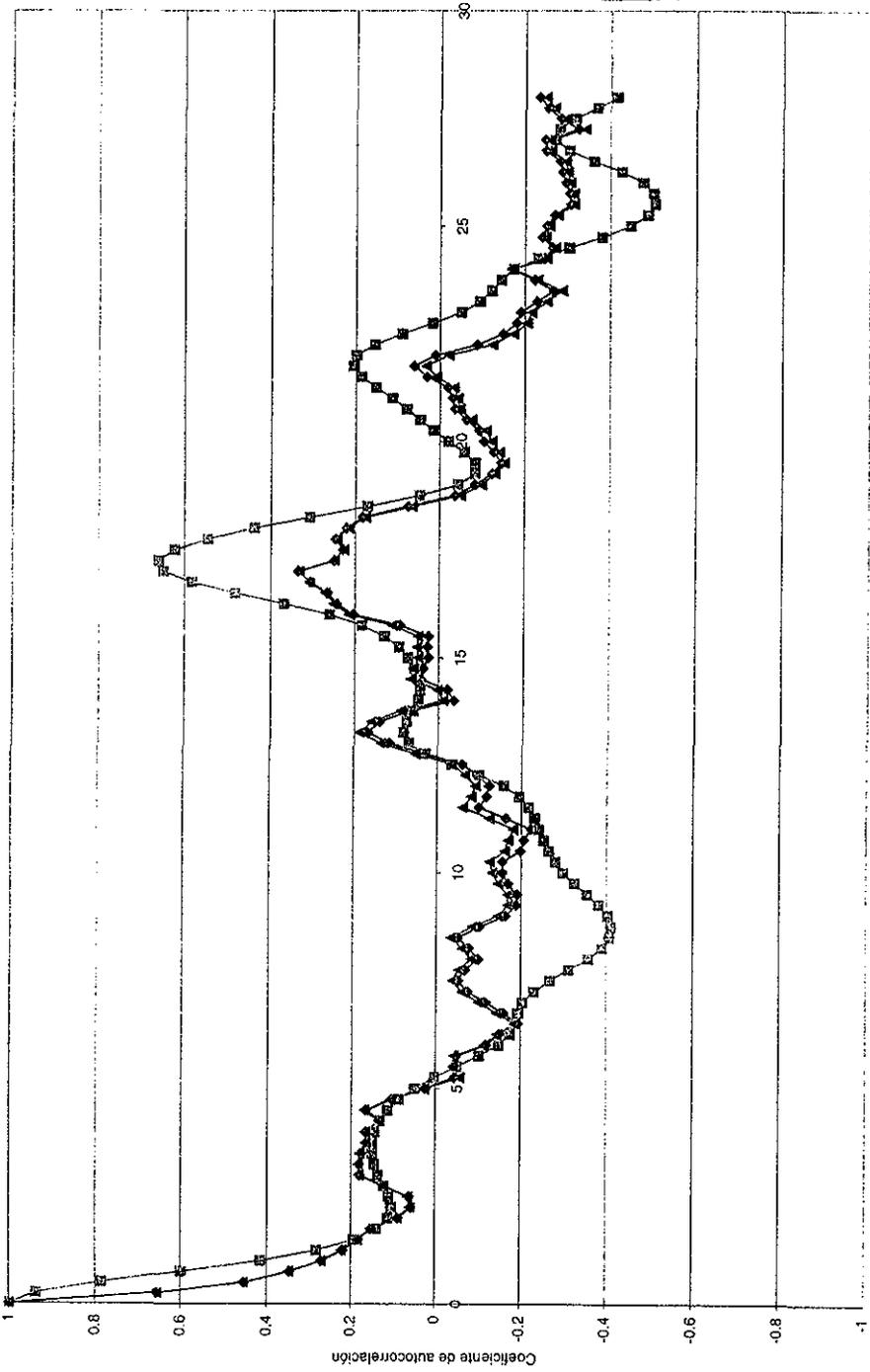


Distancia, m
—◆— Interpolación a cada metro —■— Interpolación a cada 0.1 m —▲— Interpolación a cada 0.1 m sin tendencia

Figura 65

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, ρ_c , SC-6, SOSA TEXCOCO

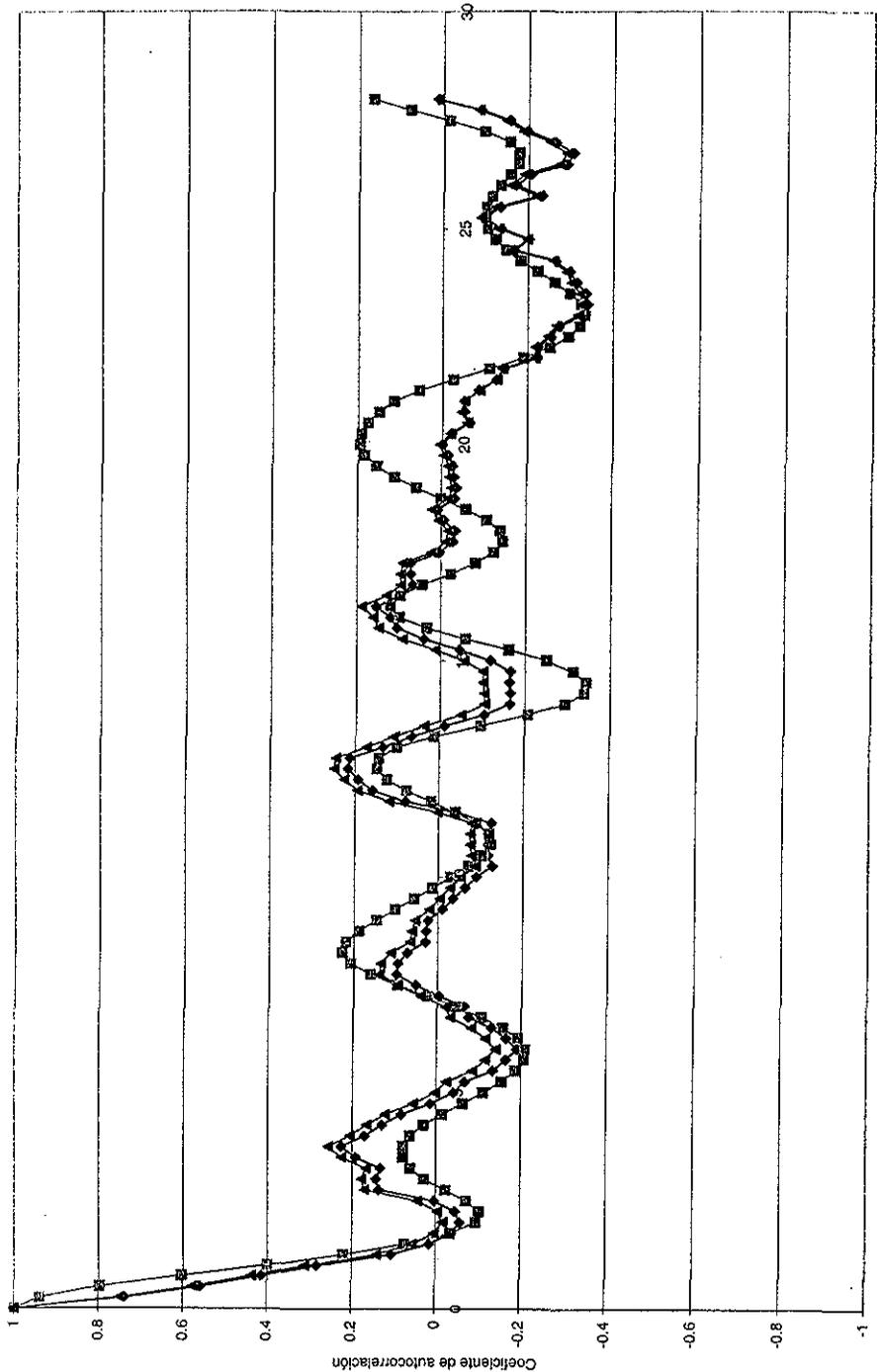


Distancia, m

Interpolación a cada metro
 Interpolación a cada 0.1 m

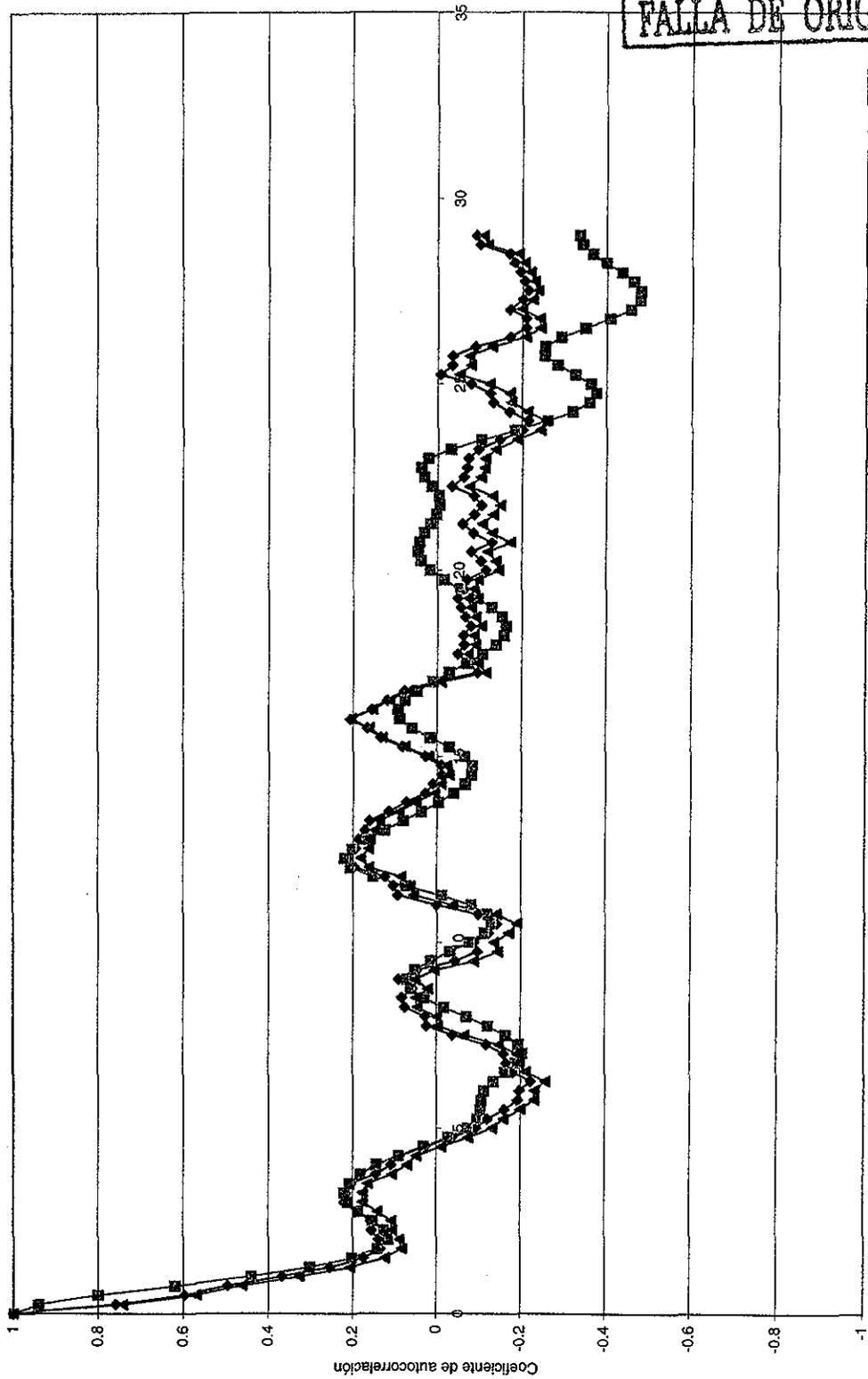
Figura 66

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, ρ_c , SC-8, SOSA TEXCOCO



—◆— Interpolación a cada metro
—■— Interpolación a cada 0,1 m
—▲— Interpolación a cada 0,1 m sin tendencia

Figura 67



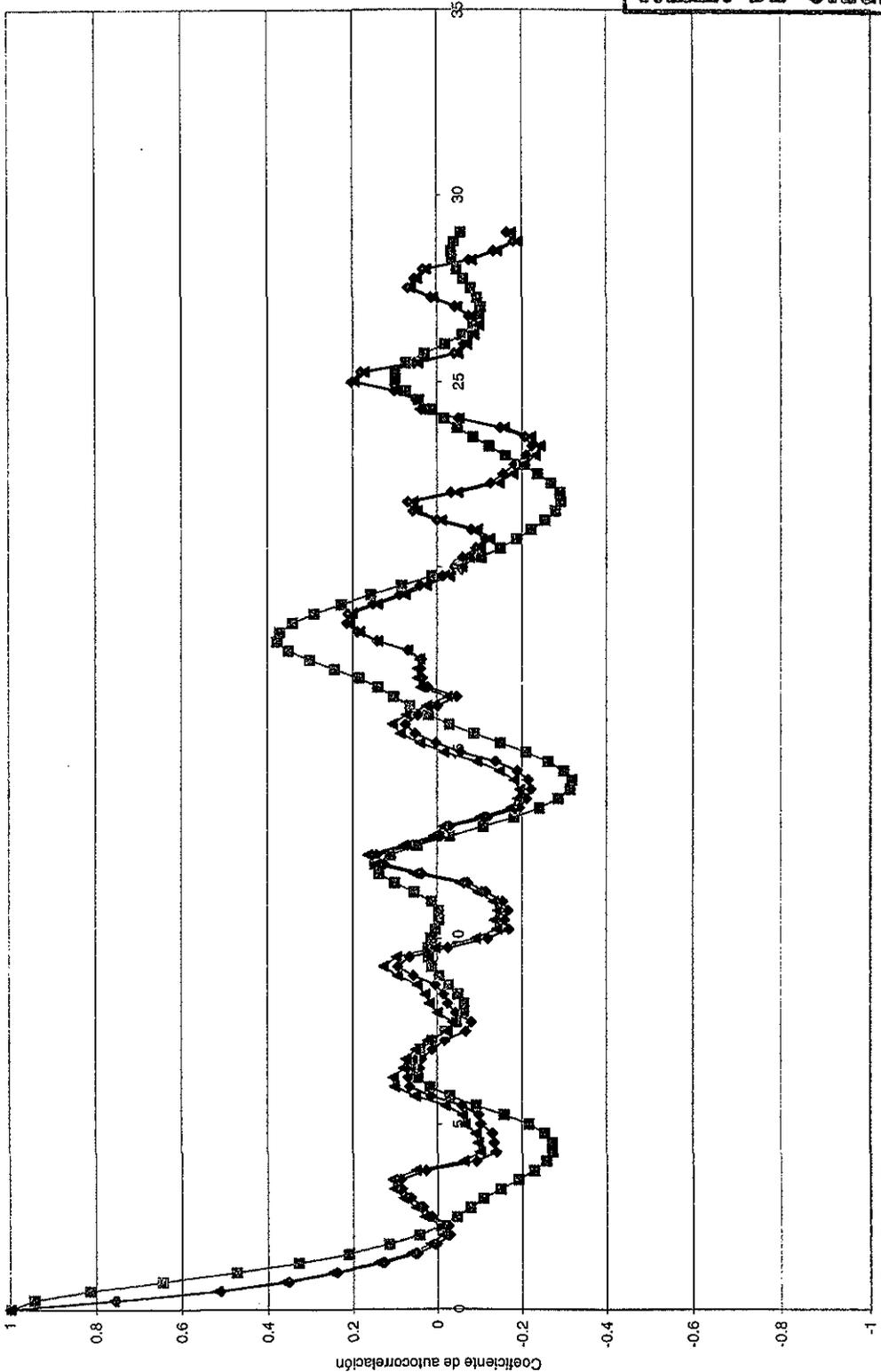
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Distancia, m

◆ Interpolación a cada metro
■ Interpolación a cada 0.1 m
▲ Interpolación a cada 0.1 m sin tendencia

Figura 68

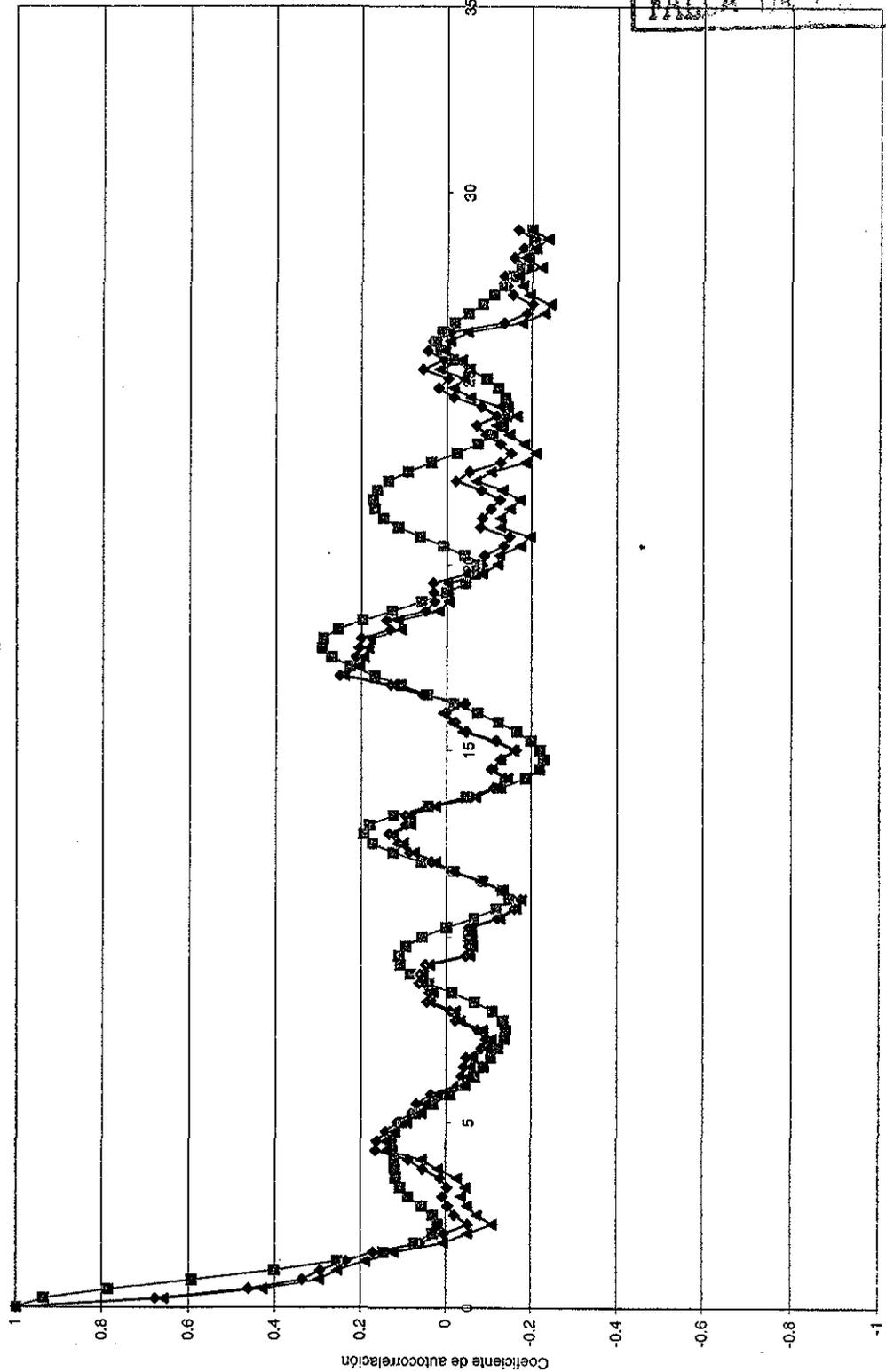
FUNCION DE AUTOCORRELACION, ρ_r , SC-11, SOSA TEXCOCO



Distancia, m
◆ Interpolación a cada 0.1 m ◻ Interpolación a cada 0.1 m sin tendencia ▲ Interpolación a cada 1 m

Figura 69

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

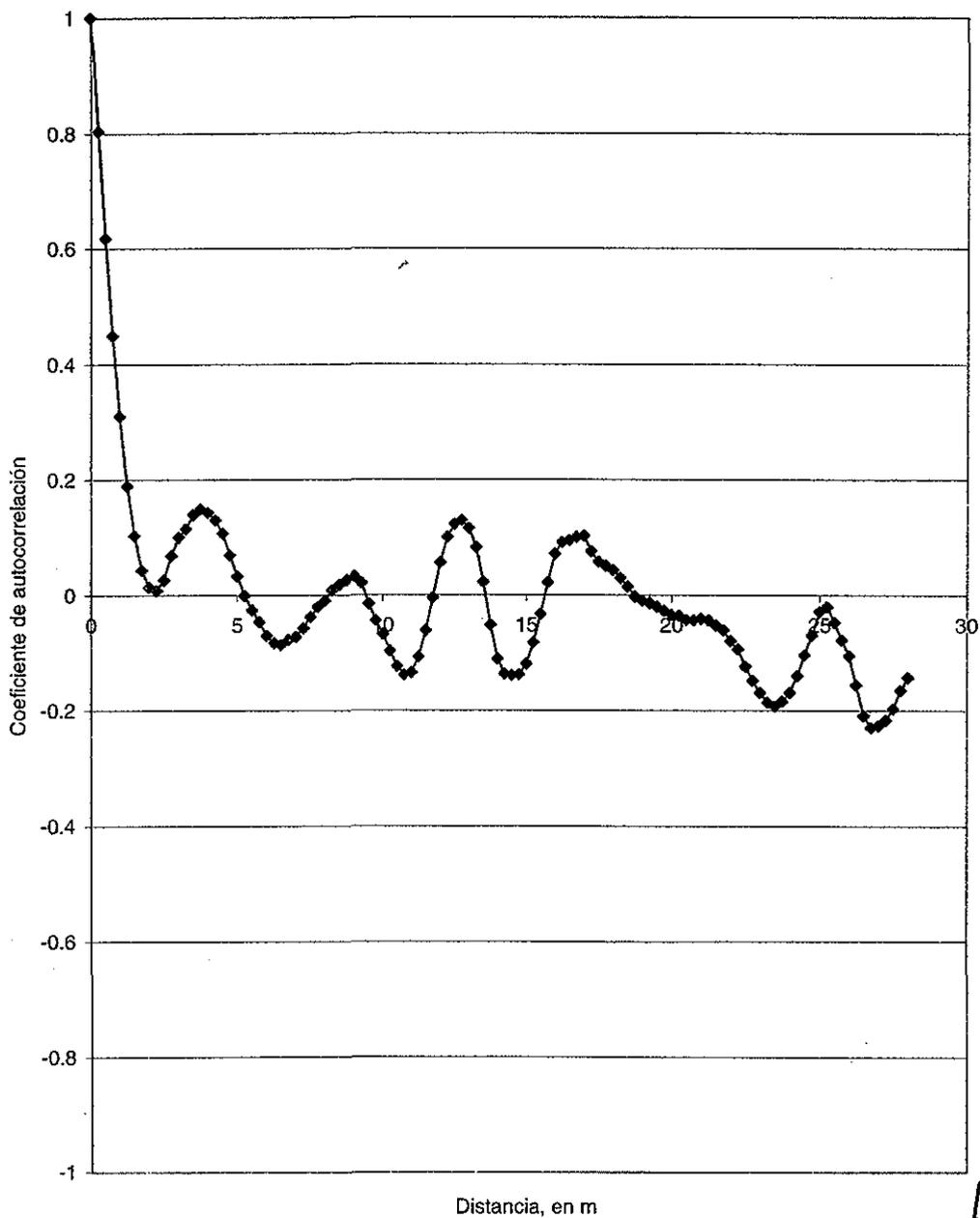


Distancia, m
◆ Interpolación a cada metro ■ Interpolación a cada 0.1 m ▲ Interpolación a cada 0.1 m sin tendencia

Figura 70

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TEXCOCO
NORTE (SOSA TEXCOCO)

Fig 71 Función "modelo" de la autocorrelación vertical de la resistencia de cono, q_c kg/cm^2



170

Fig 72 Función "modelo" de la correlación horizontal de la resistencia de cono, q_c , kg/cm²

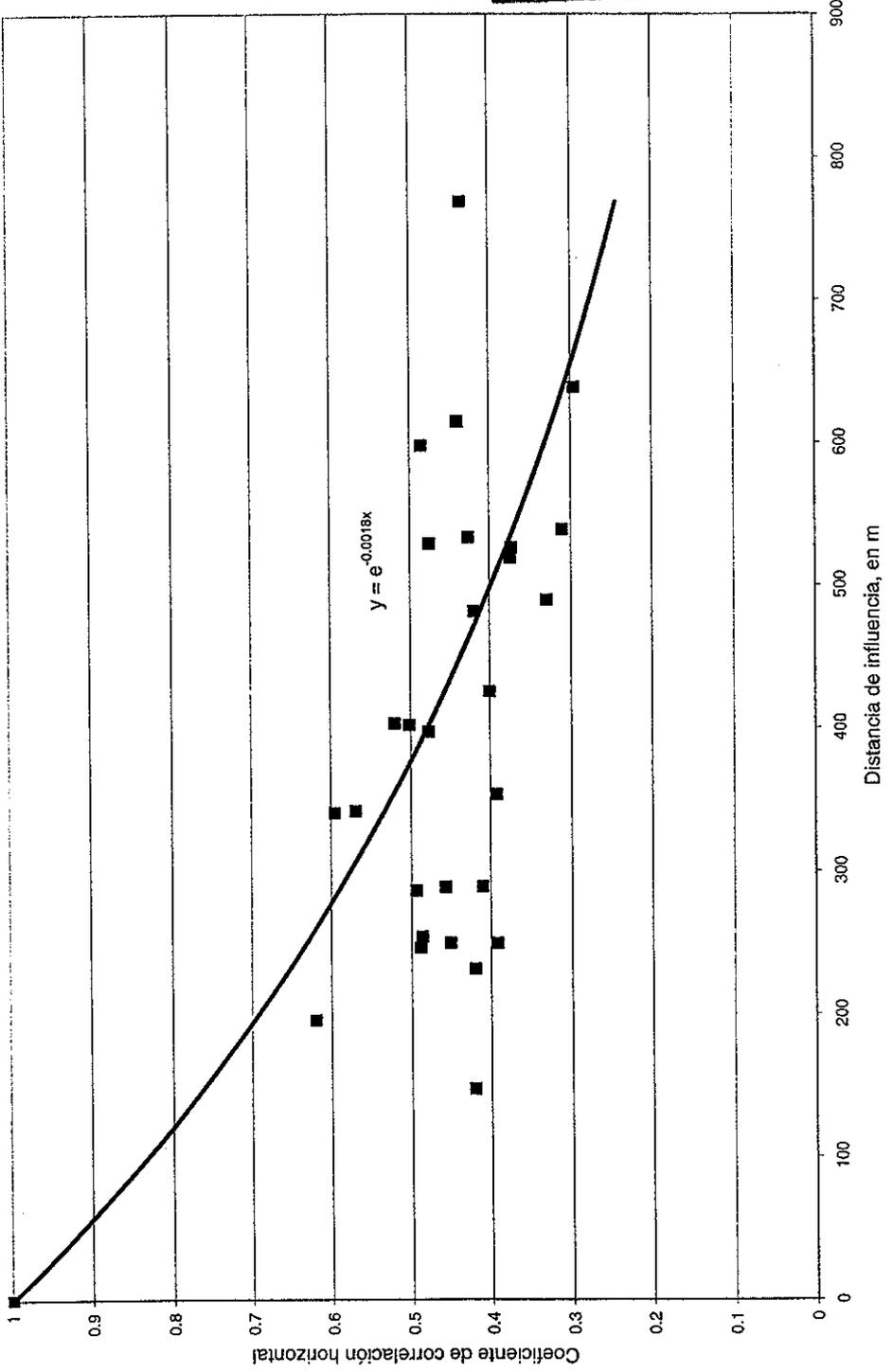


Fig 73 Función "modelo" de la correlación horizontal de la resistencia de cono, q_c , kg/cm^2 , de 0 a 15 m de profundidad

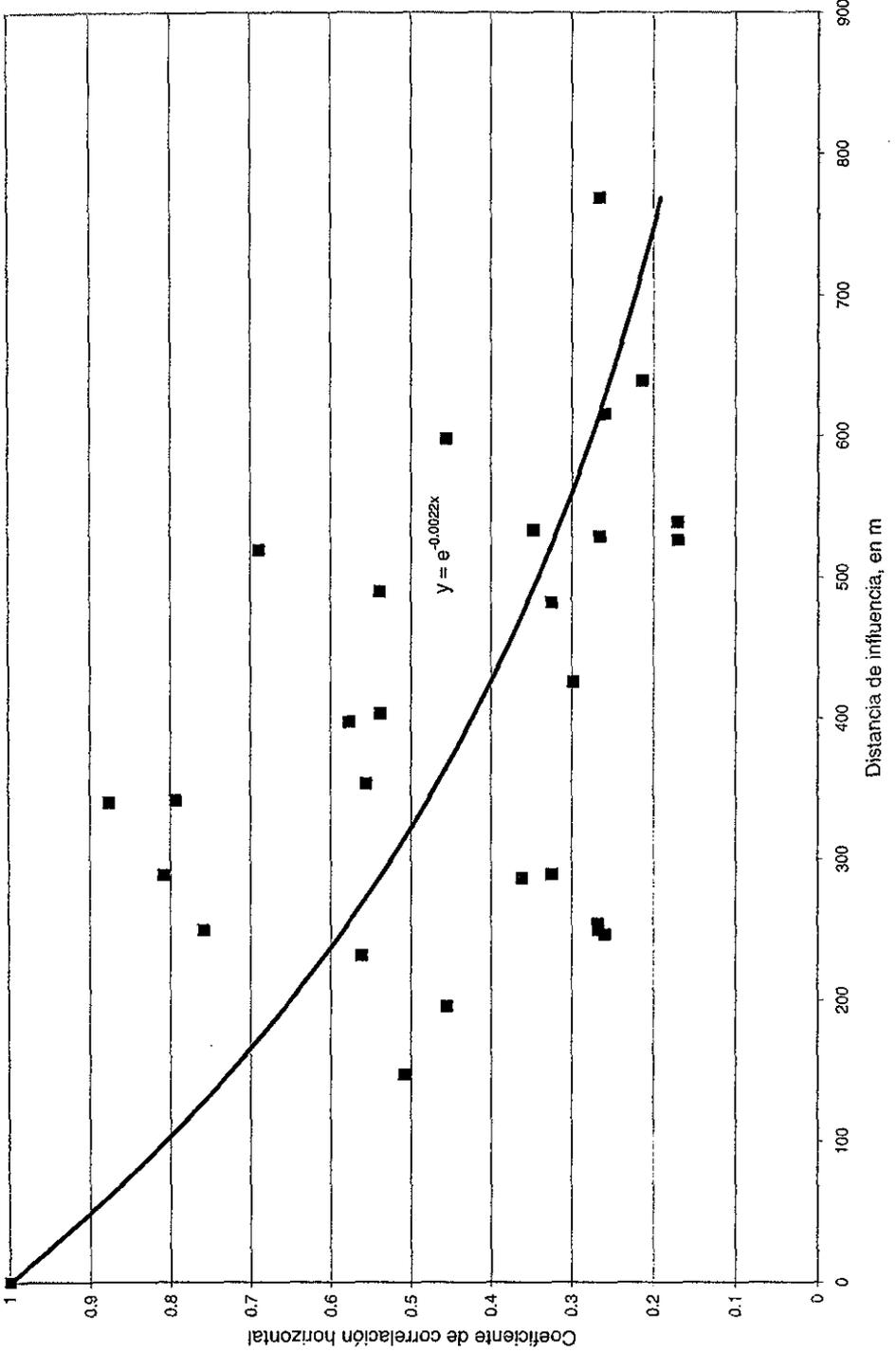
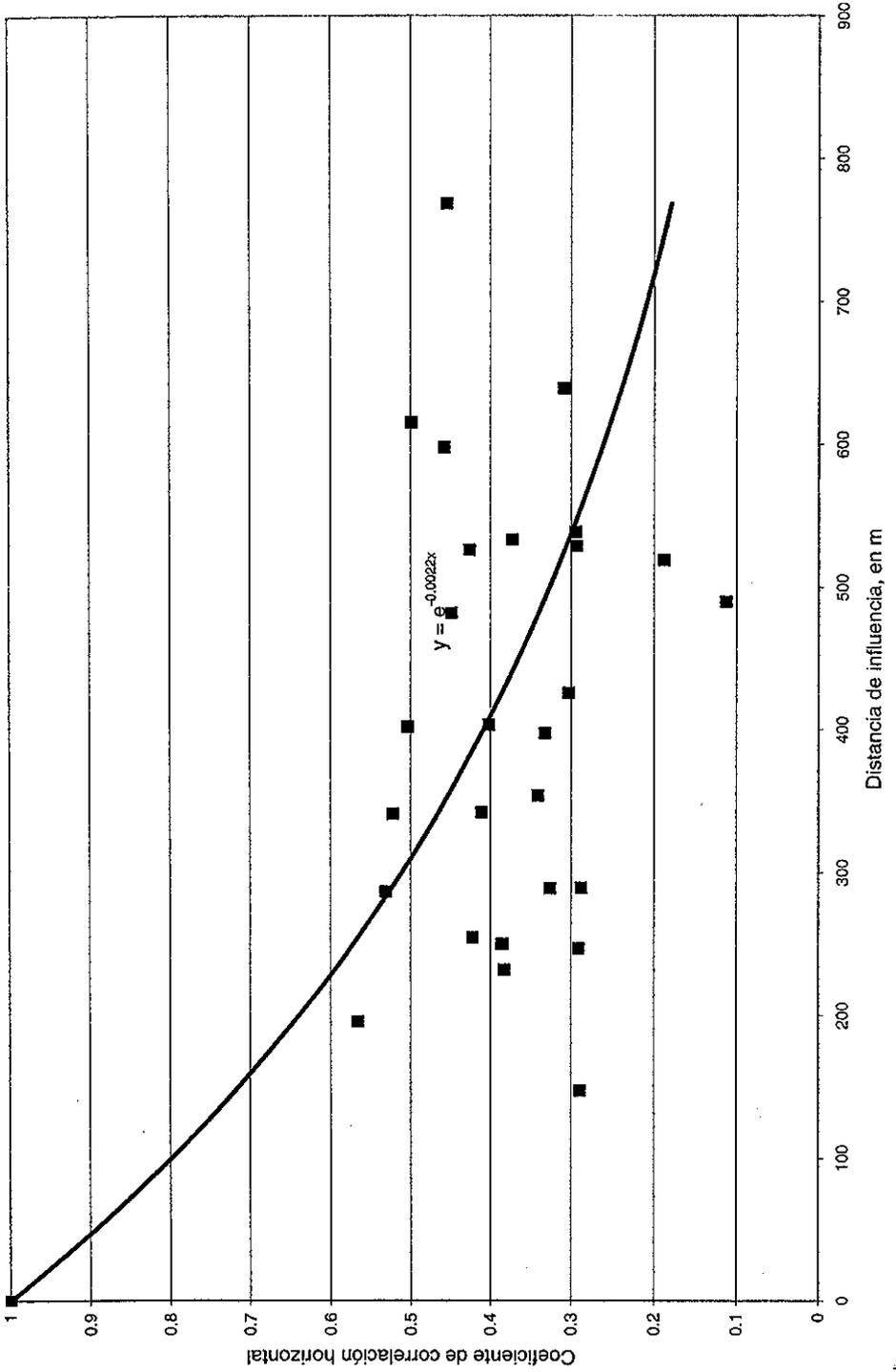
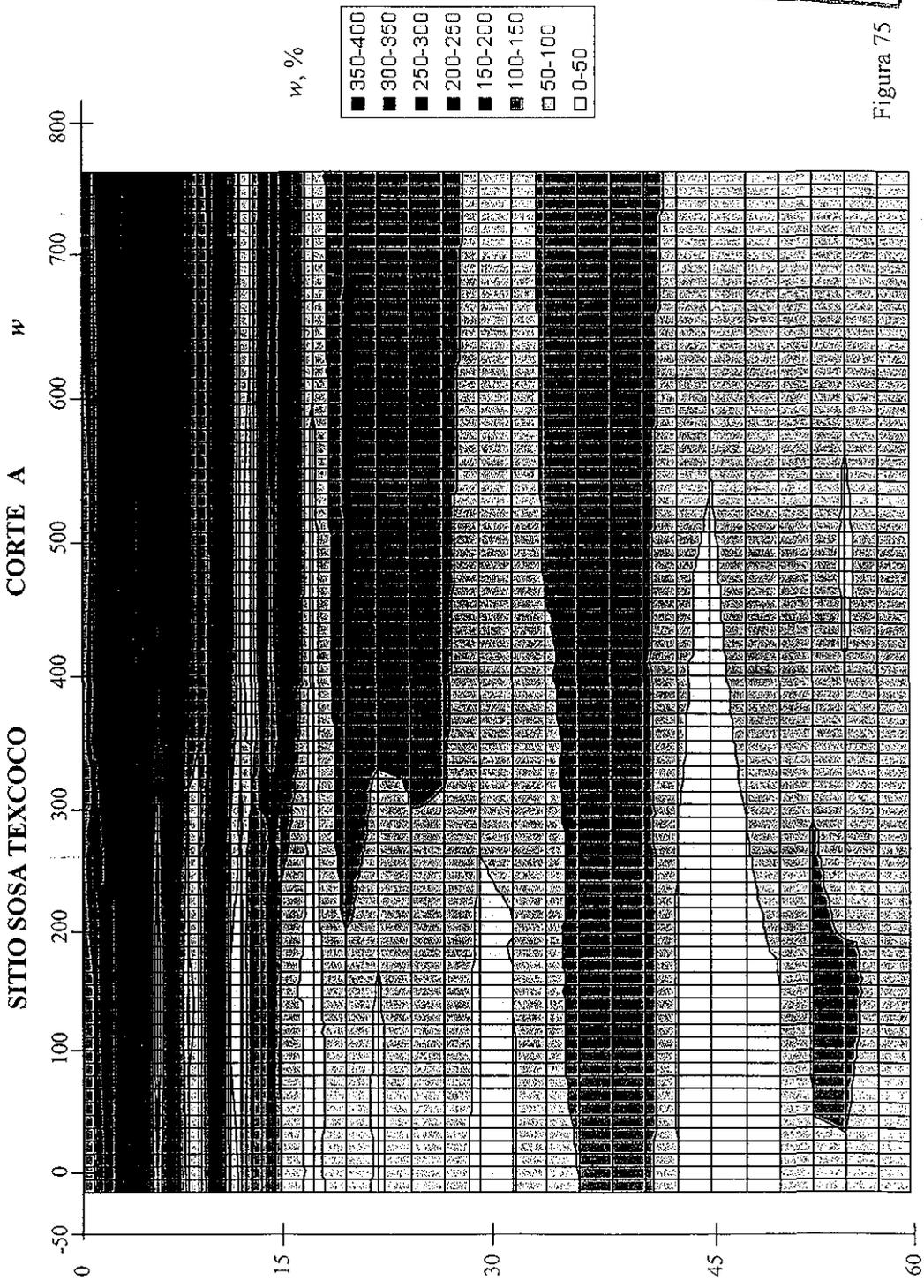


Fig 74 Función "modelo" de la correlación horizontal de la resistencia de cono, q_c , kg/cm^2 , de 15 a 60 m de profundidad



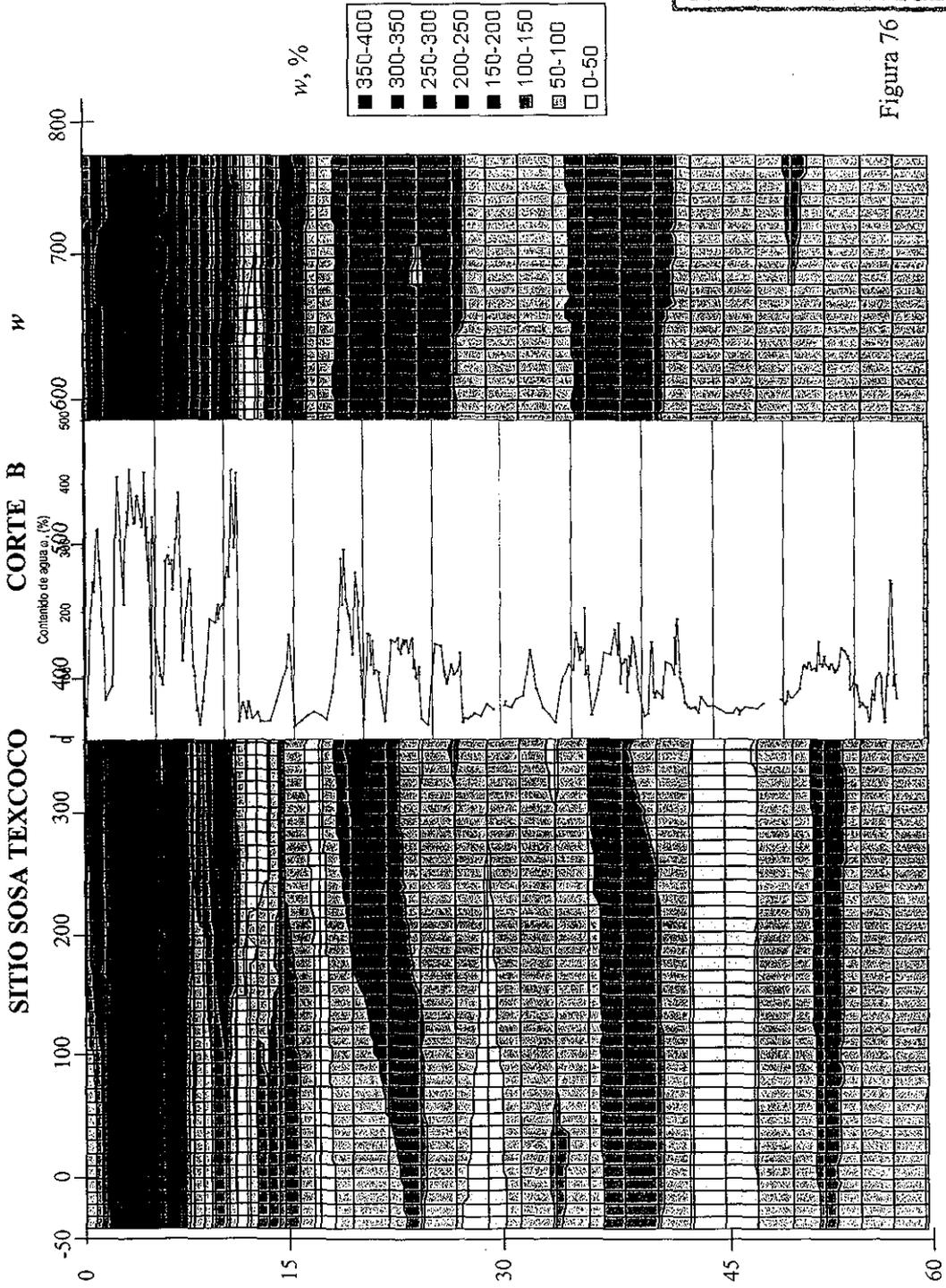
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 75



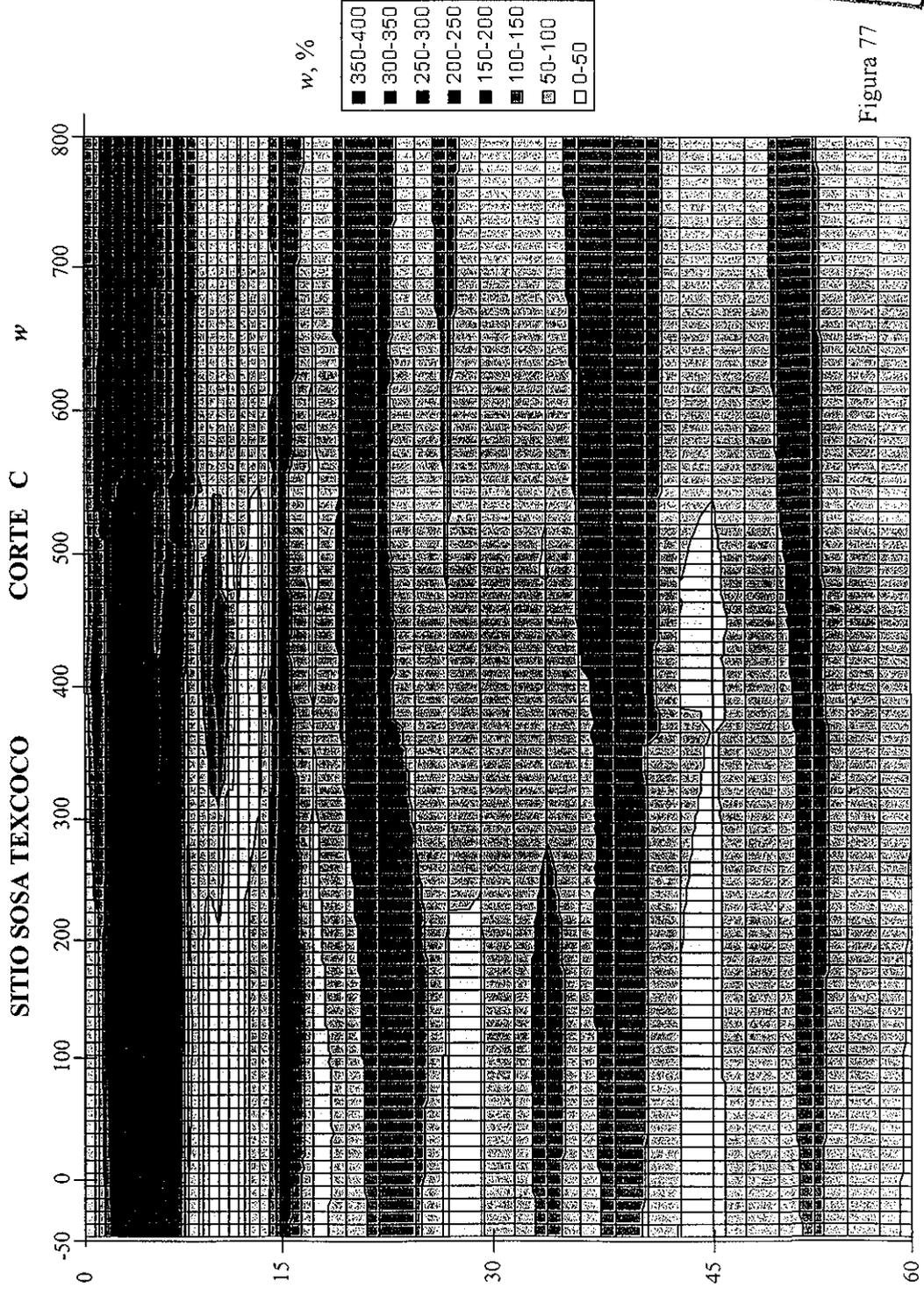
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 76



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 77



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

w, %

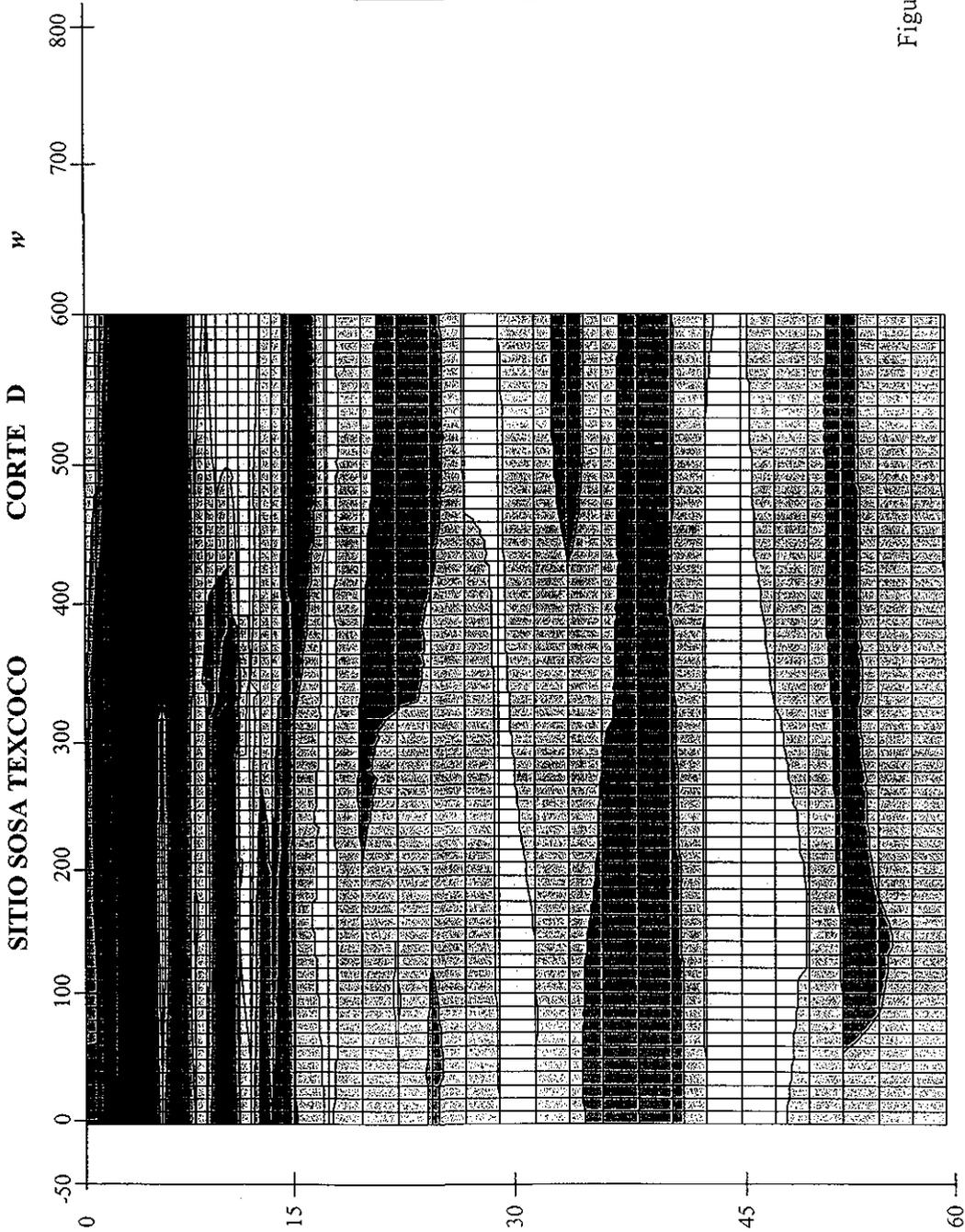
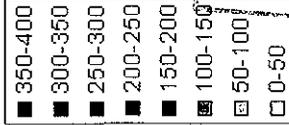


Figura 78

177

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

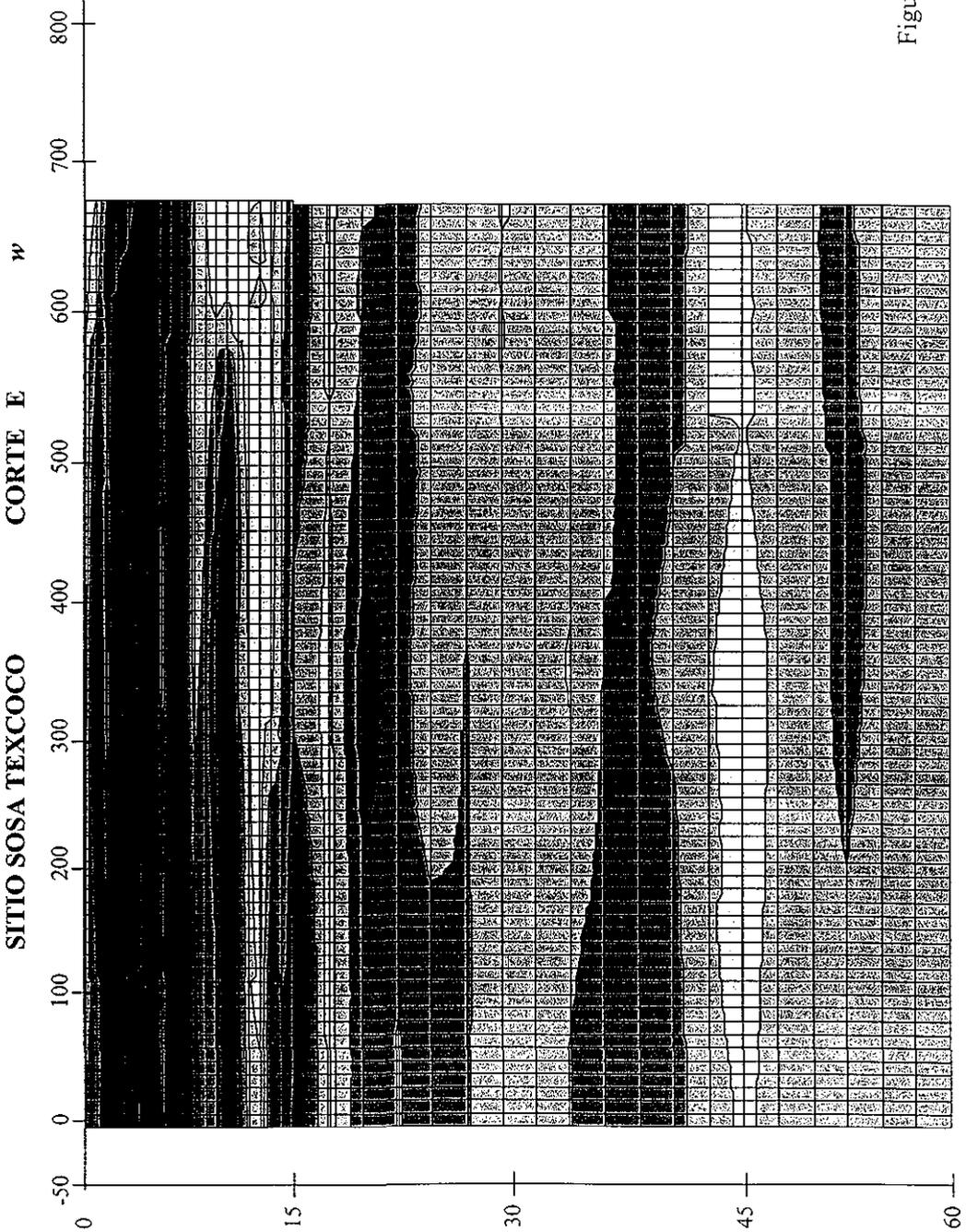
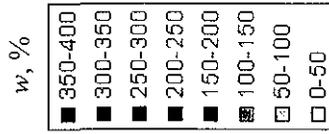


Figura 79

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

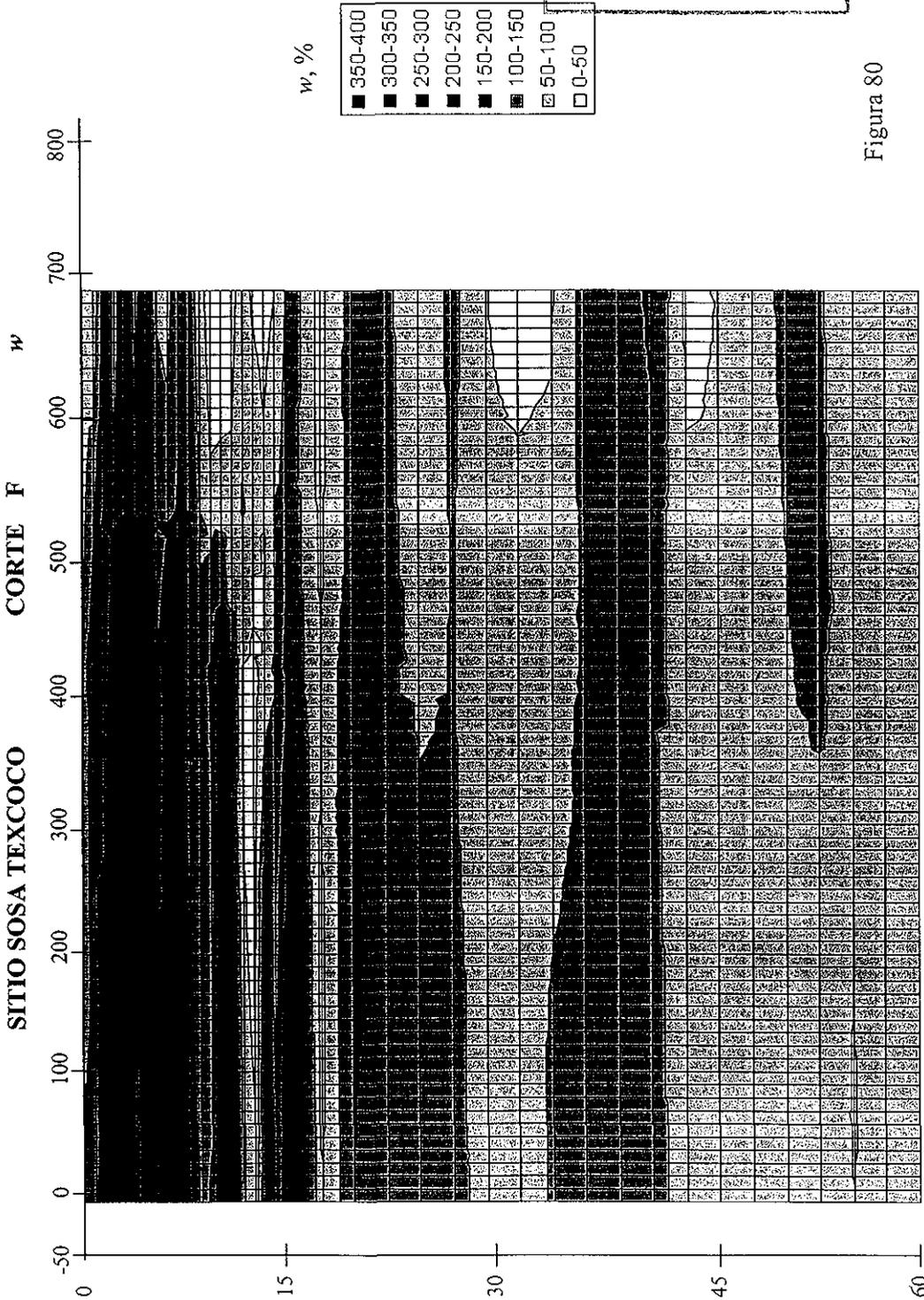


Figura 80

SITIO SOSA TEXCOCO CORTE A w DESV STD

800
700
600
500
400
300
200
100
0
-50

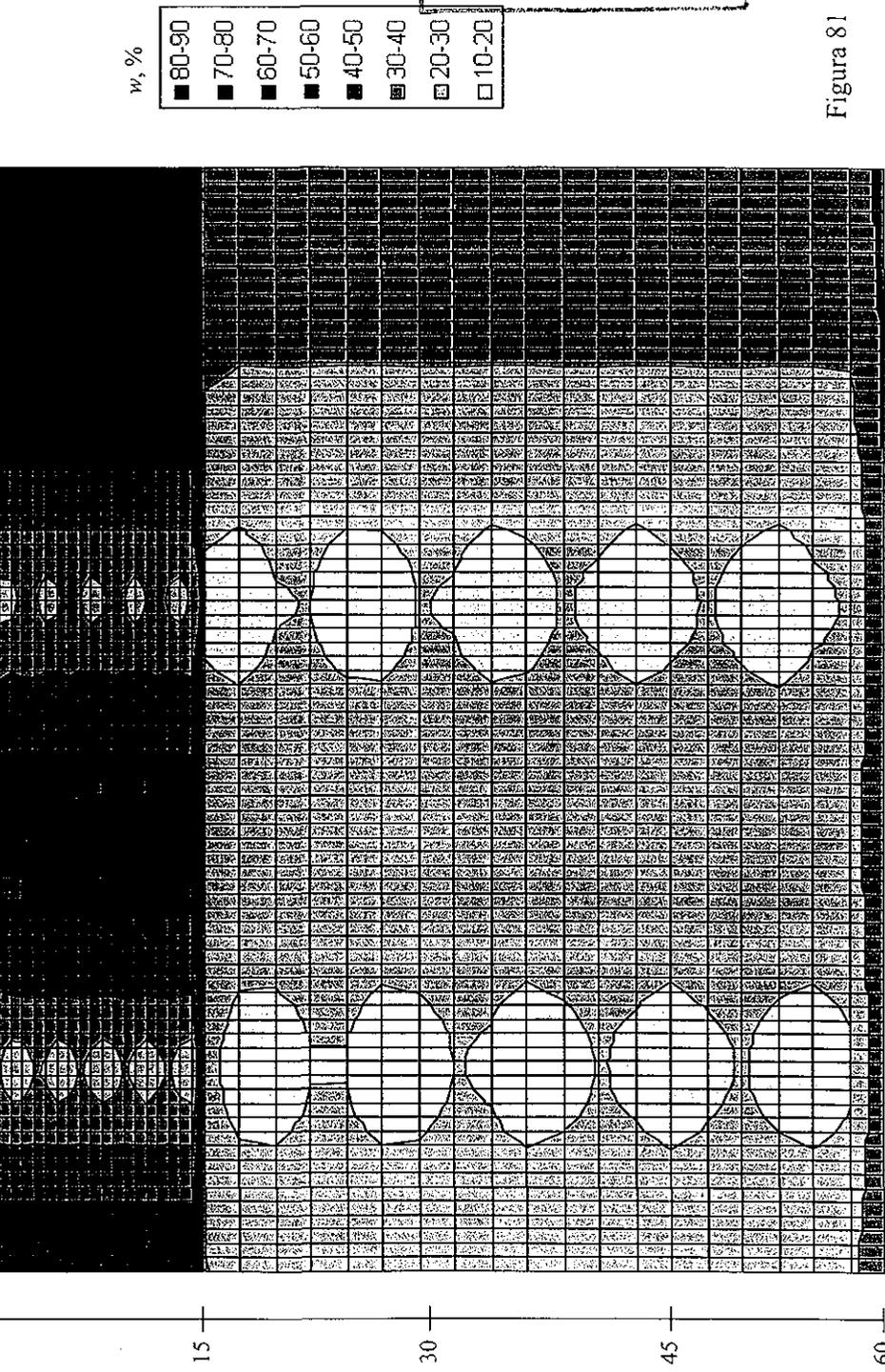
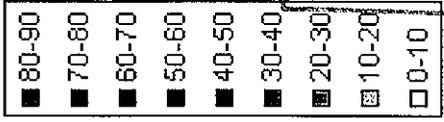


Figura 81

SITIO SOSA TEXCOCO CORTE B w DESV STD

800
700
600
500
400
300
200
100
0
-50

w, %



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

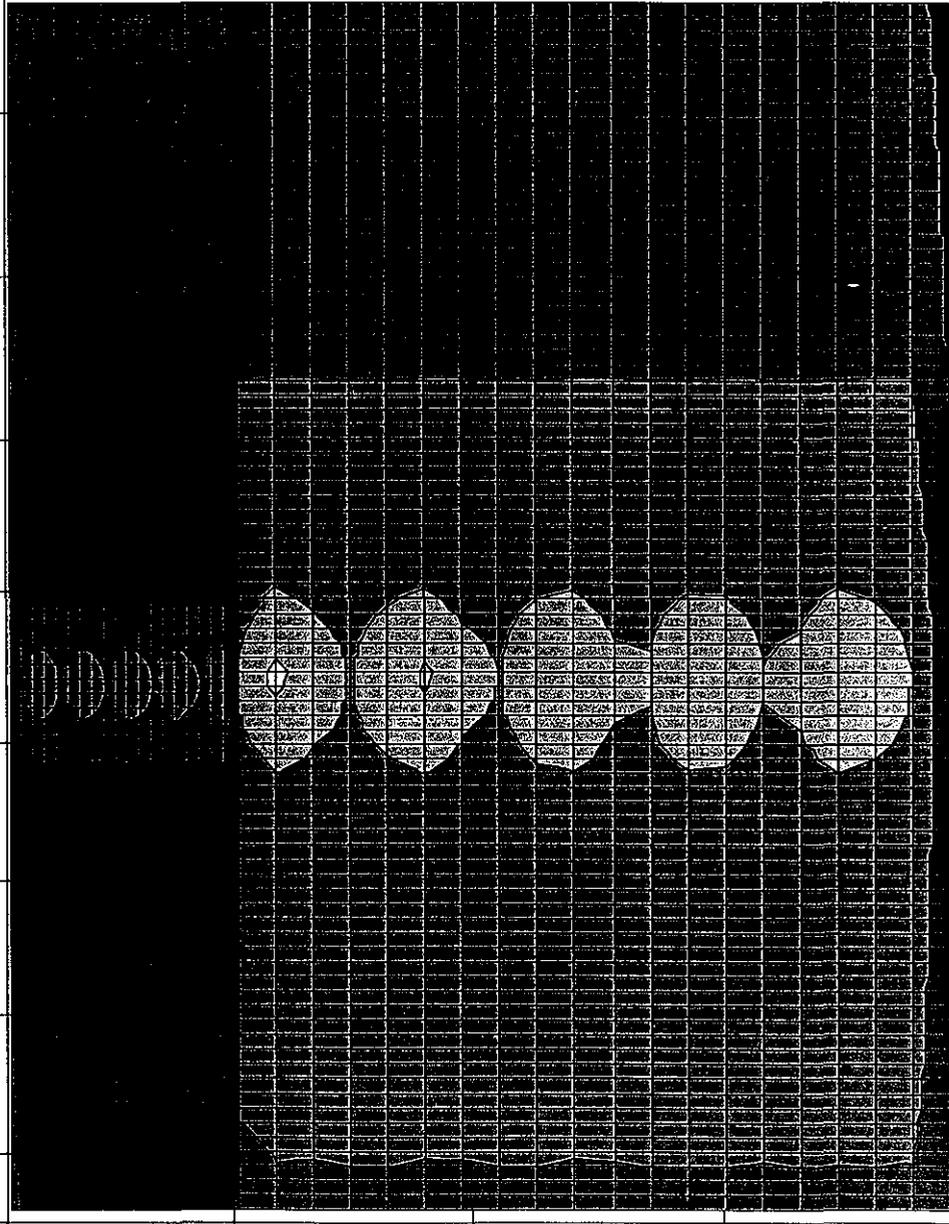


Figura 82

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

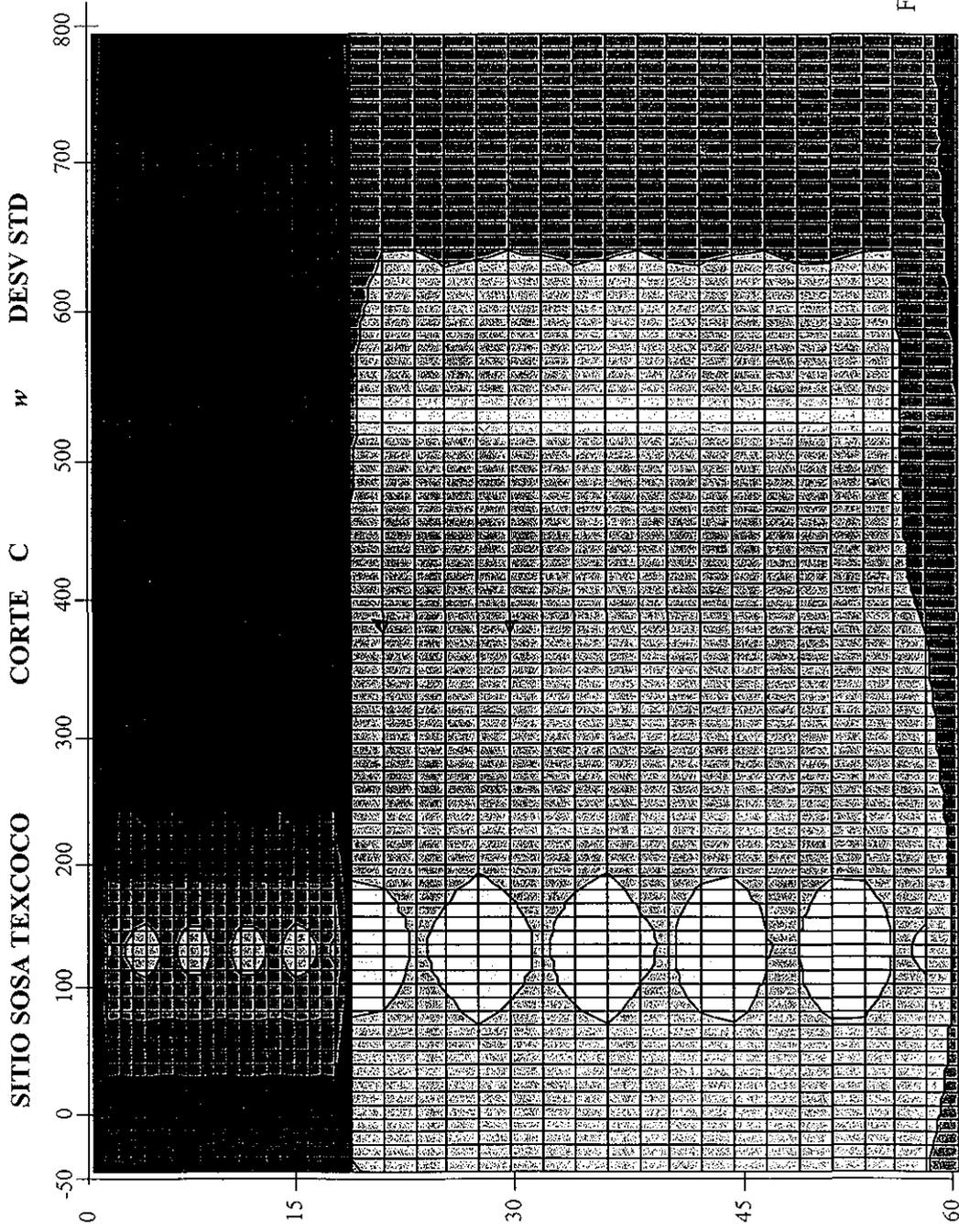
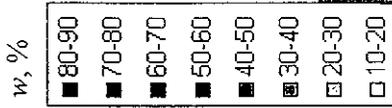


Figura 83

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

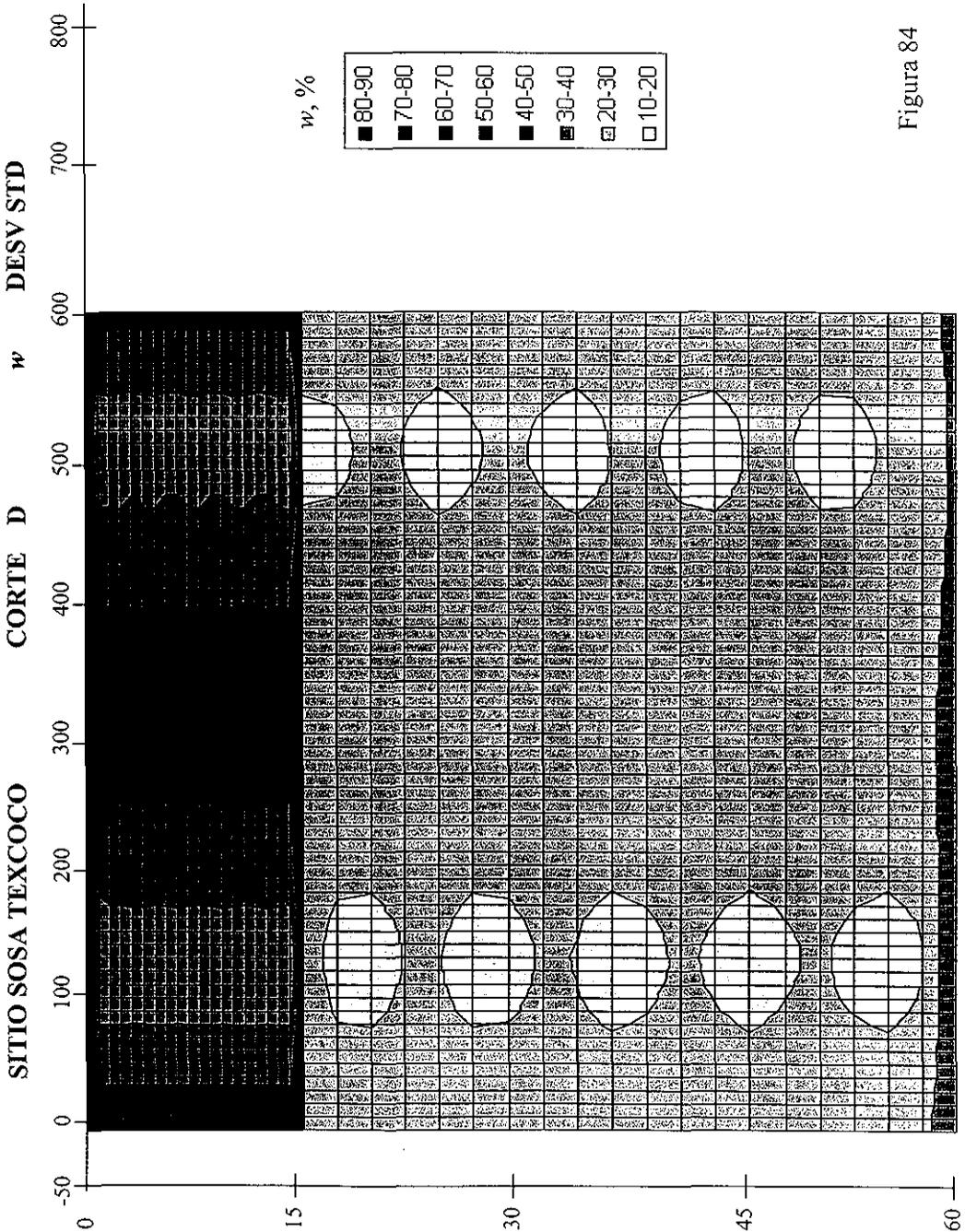


Figura 84

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

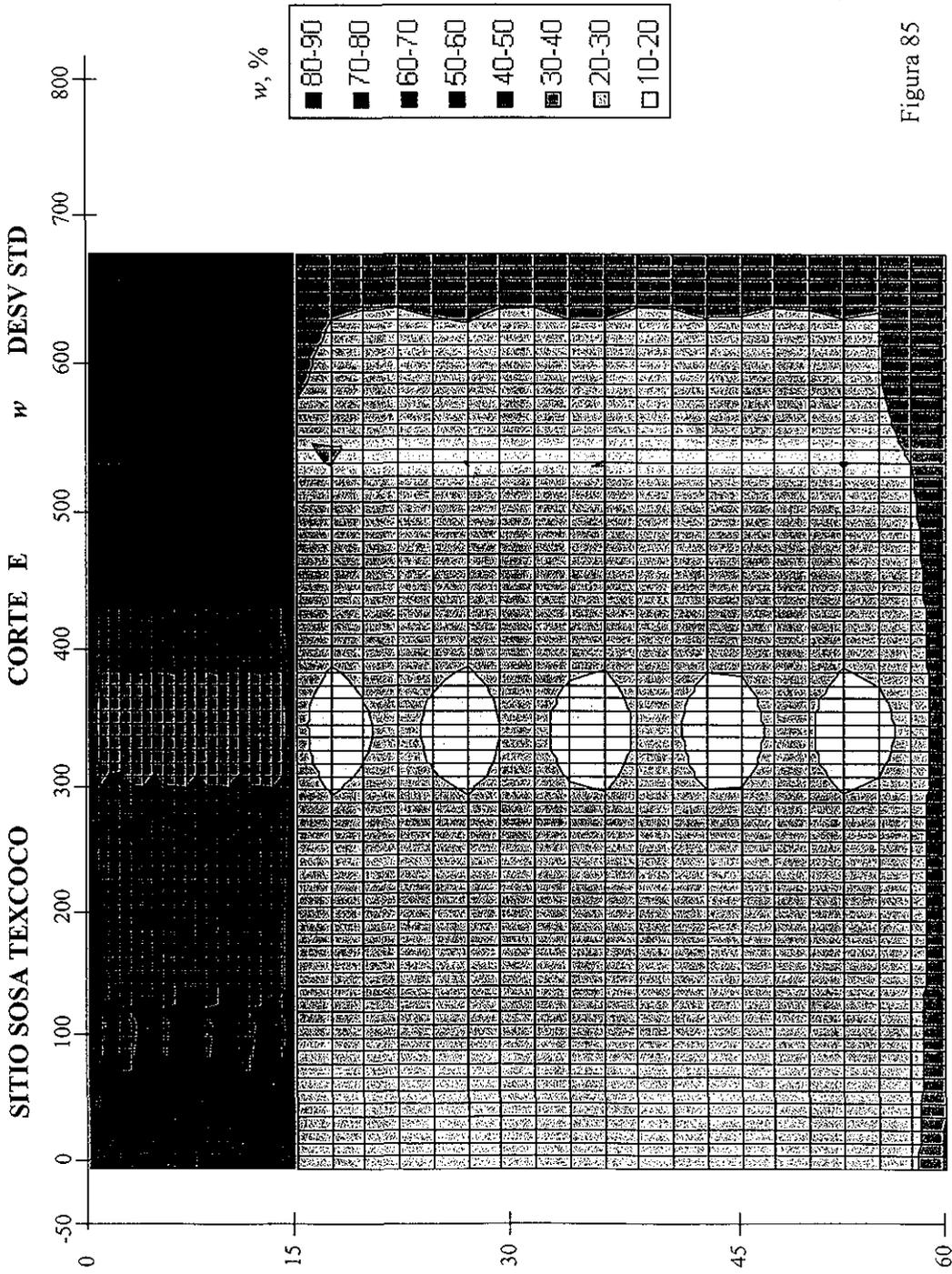


Figura 85

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

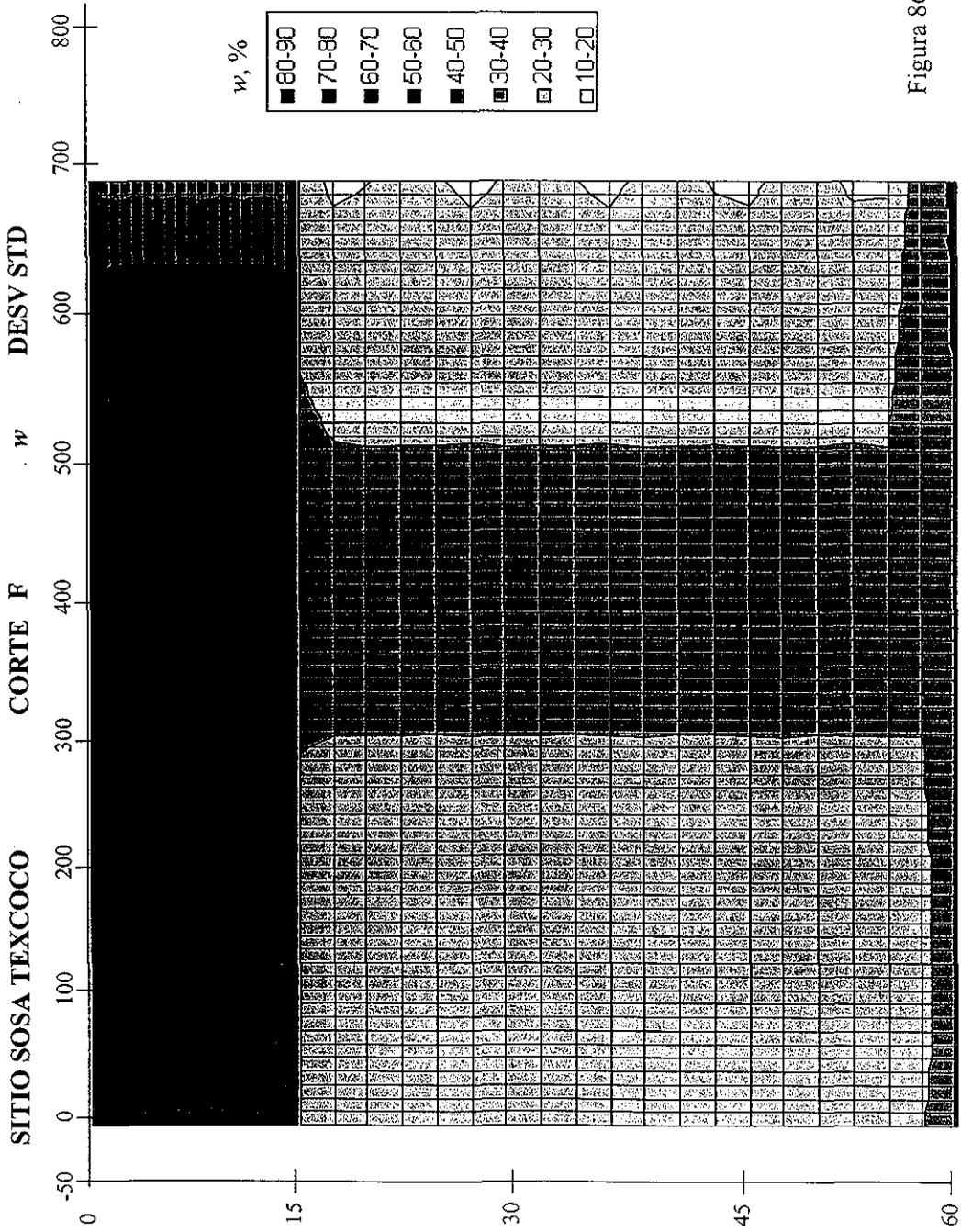


Figura 86

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 87

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

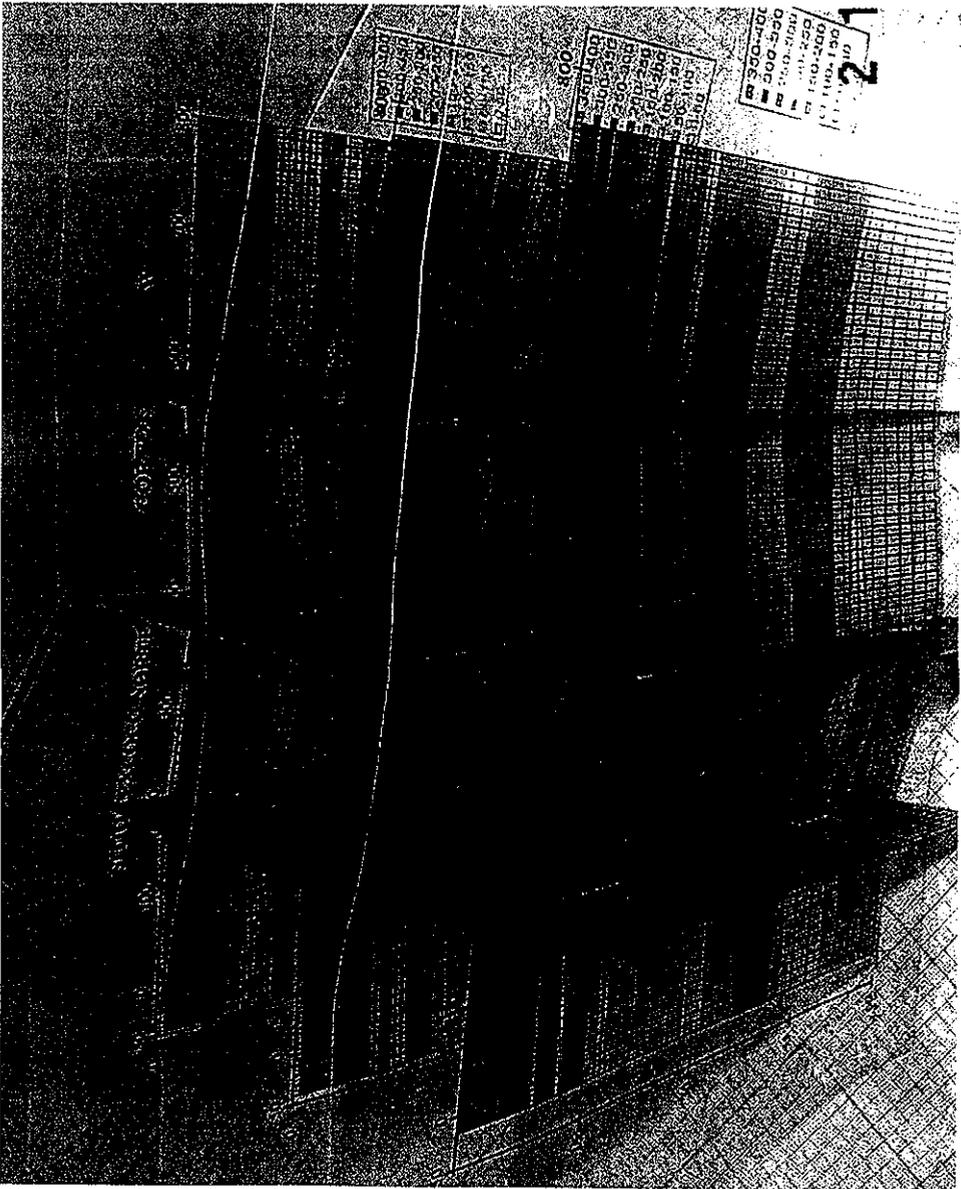


Figura 88

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 89

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

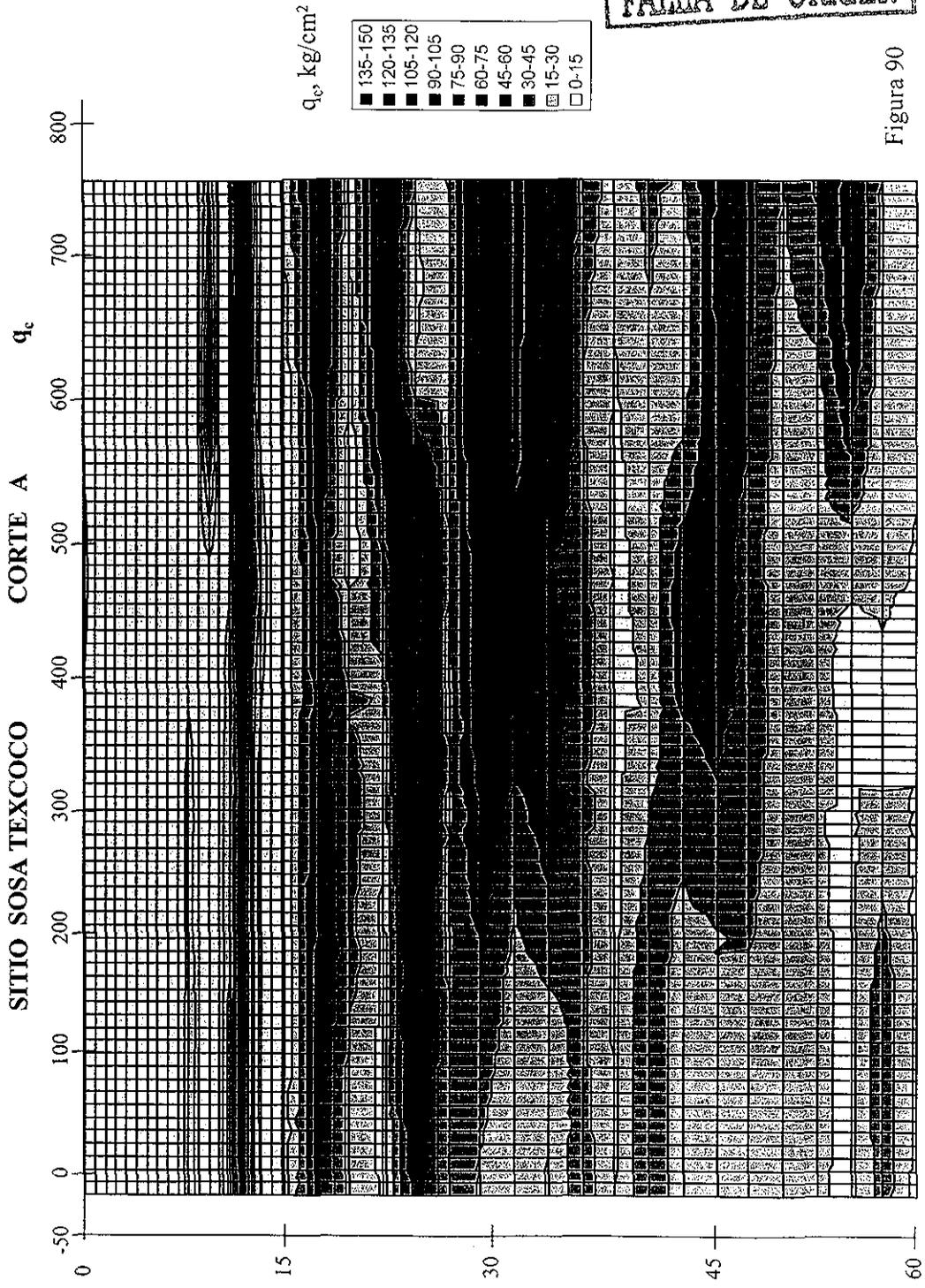


Figura 90

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

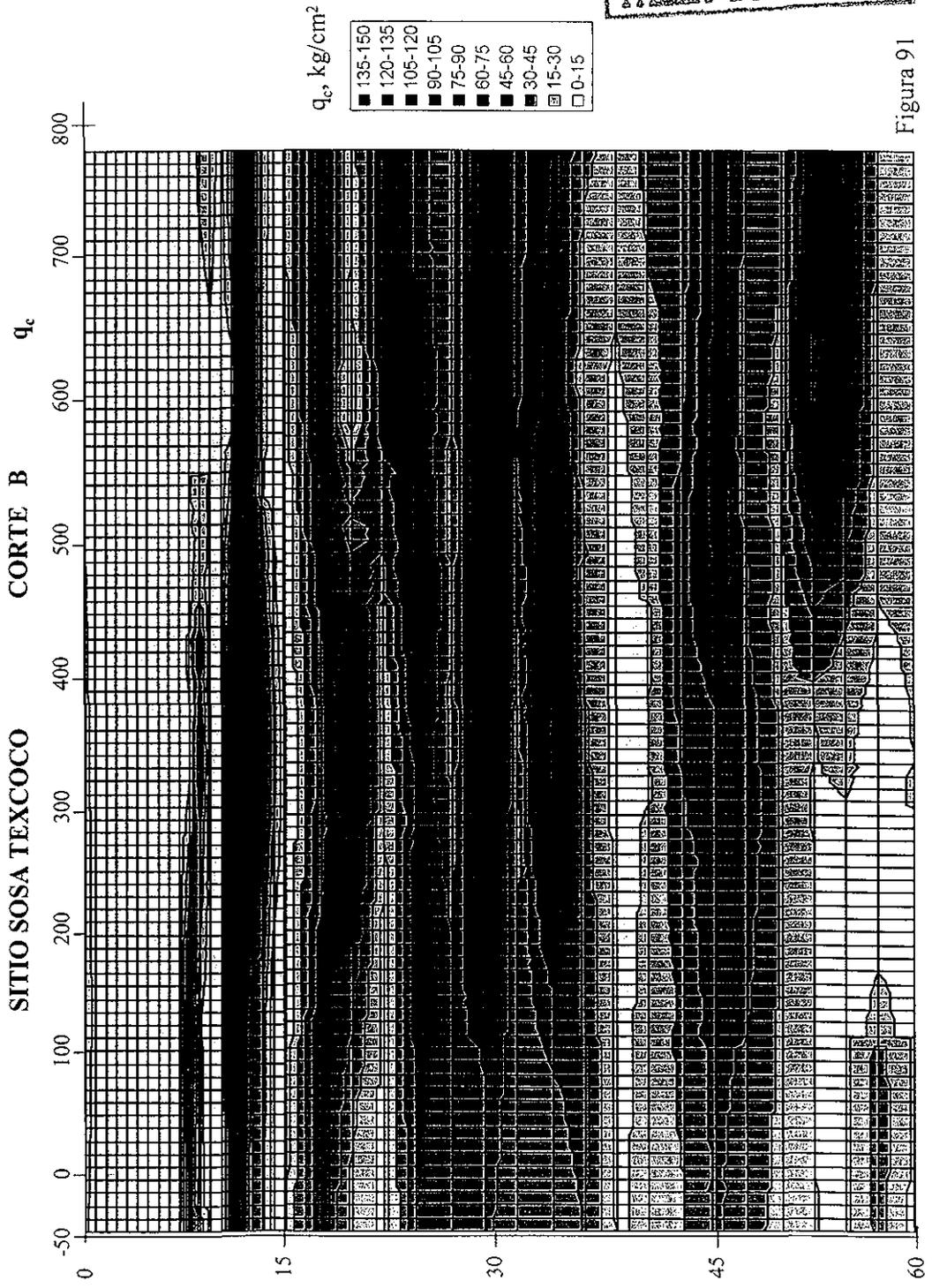


Figura 91

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

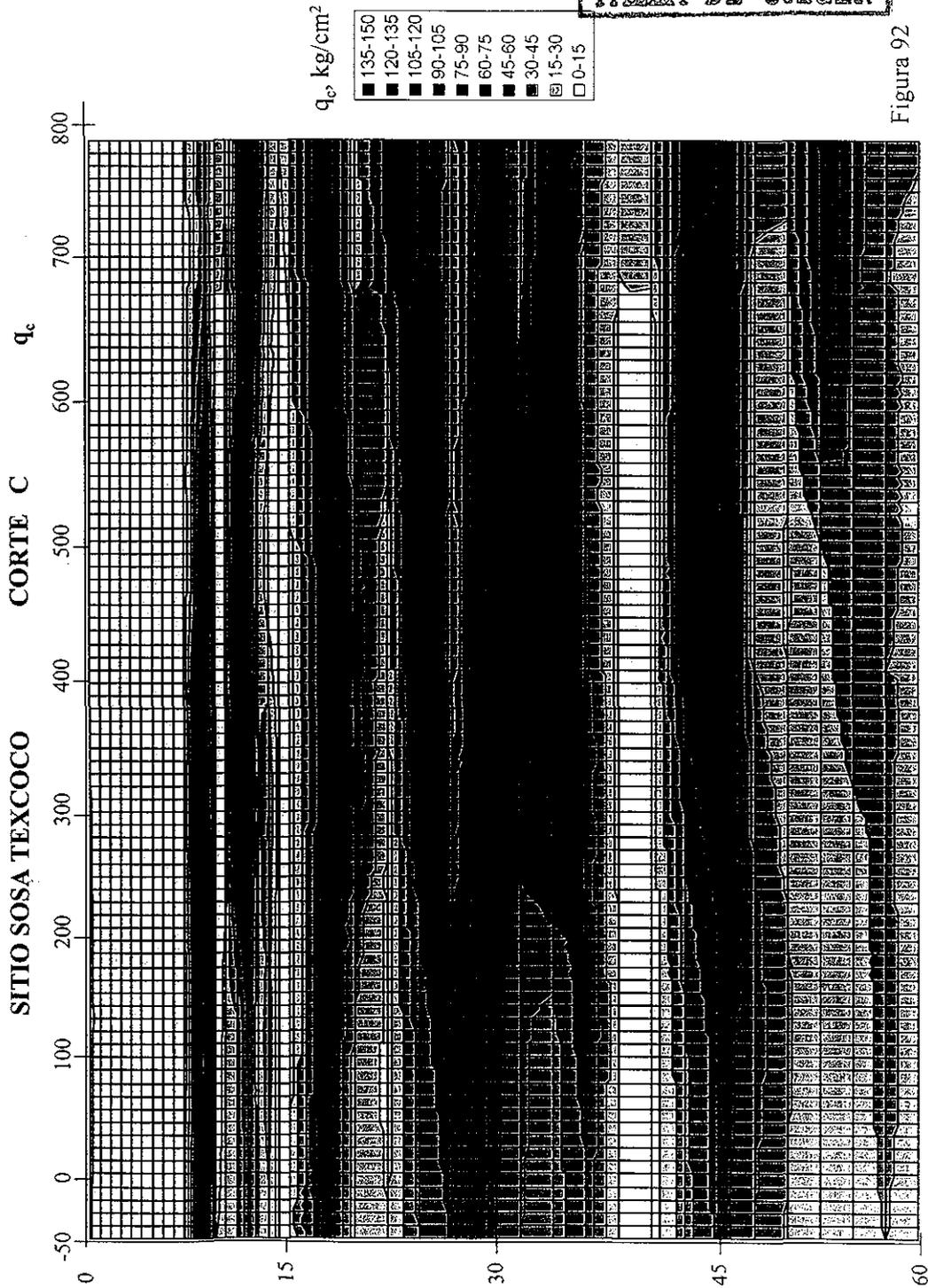


Figura 92

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

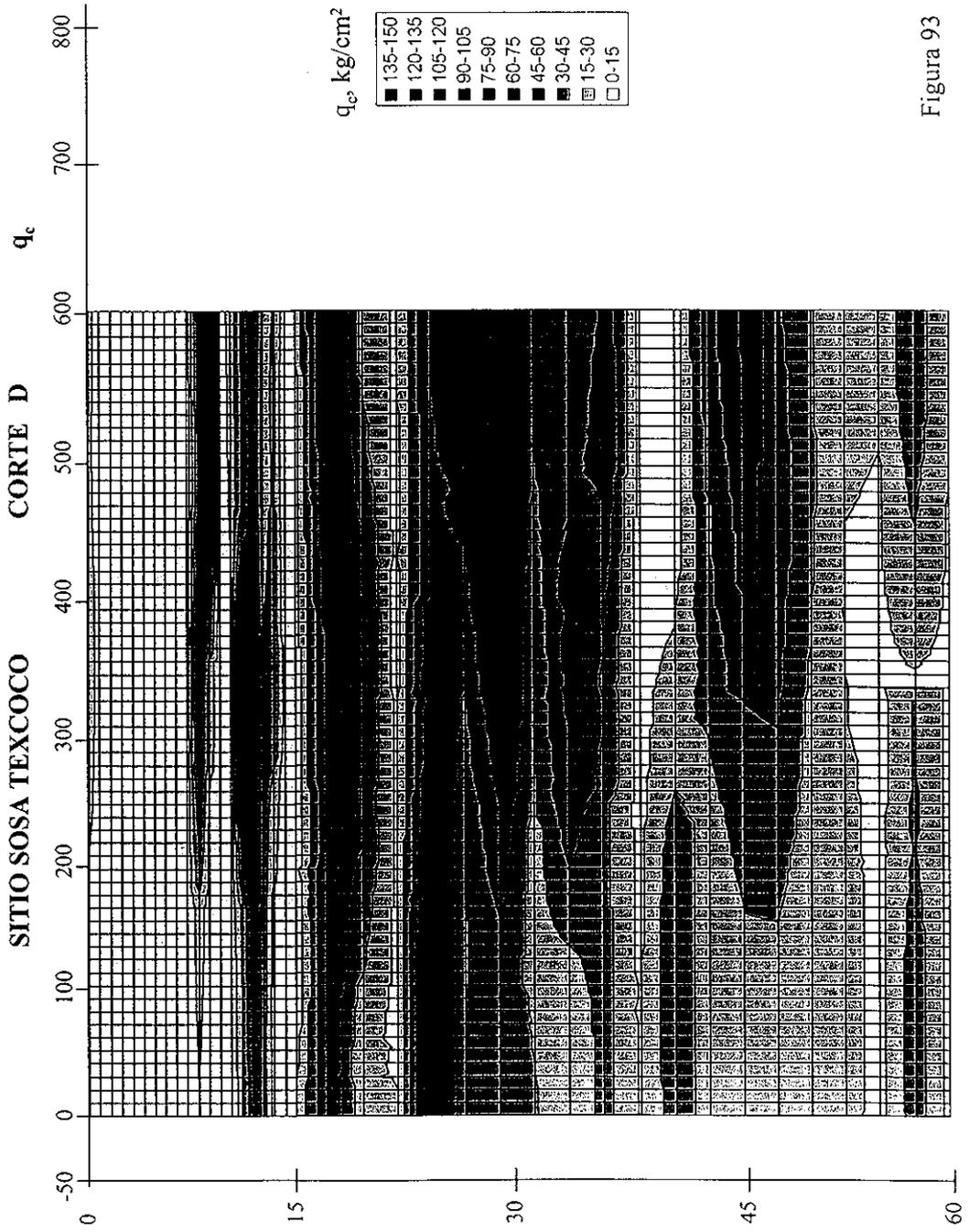


Figura 93

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

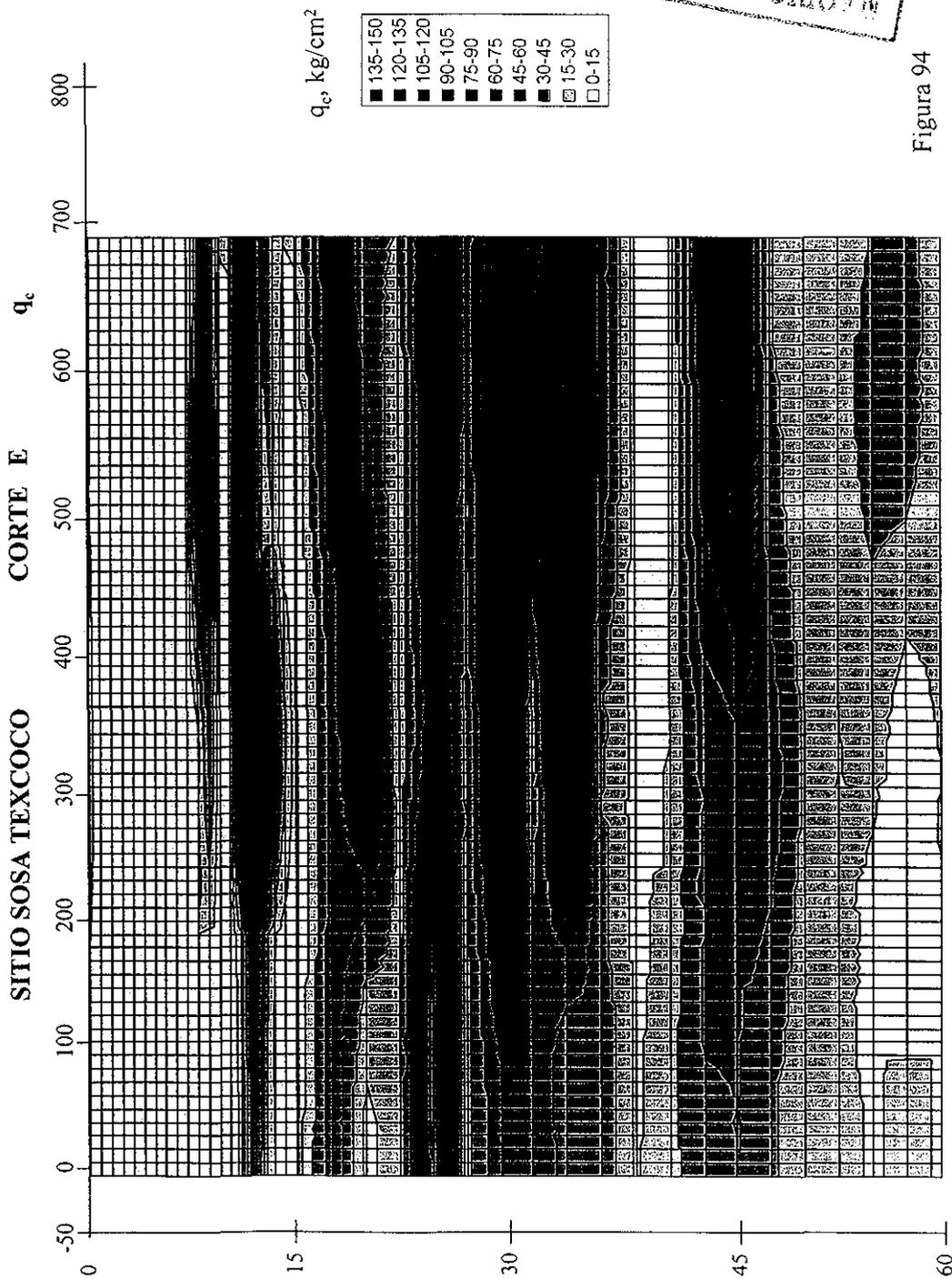


Figura 94

SITIO SOSA TEXCOCO

CORTE F

q_c

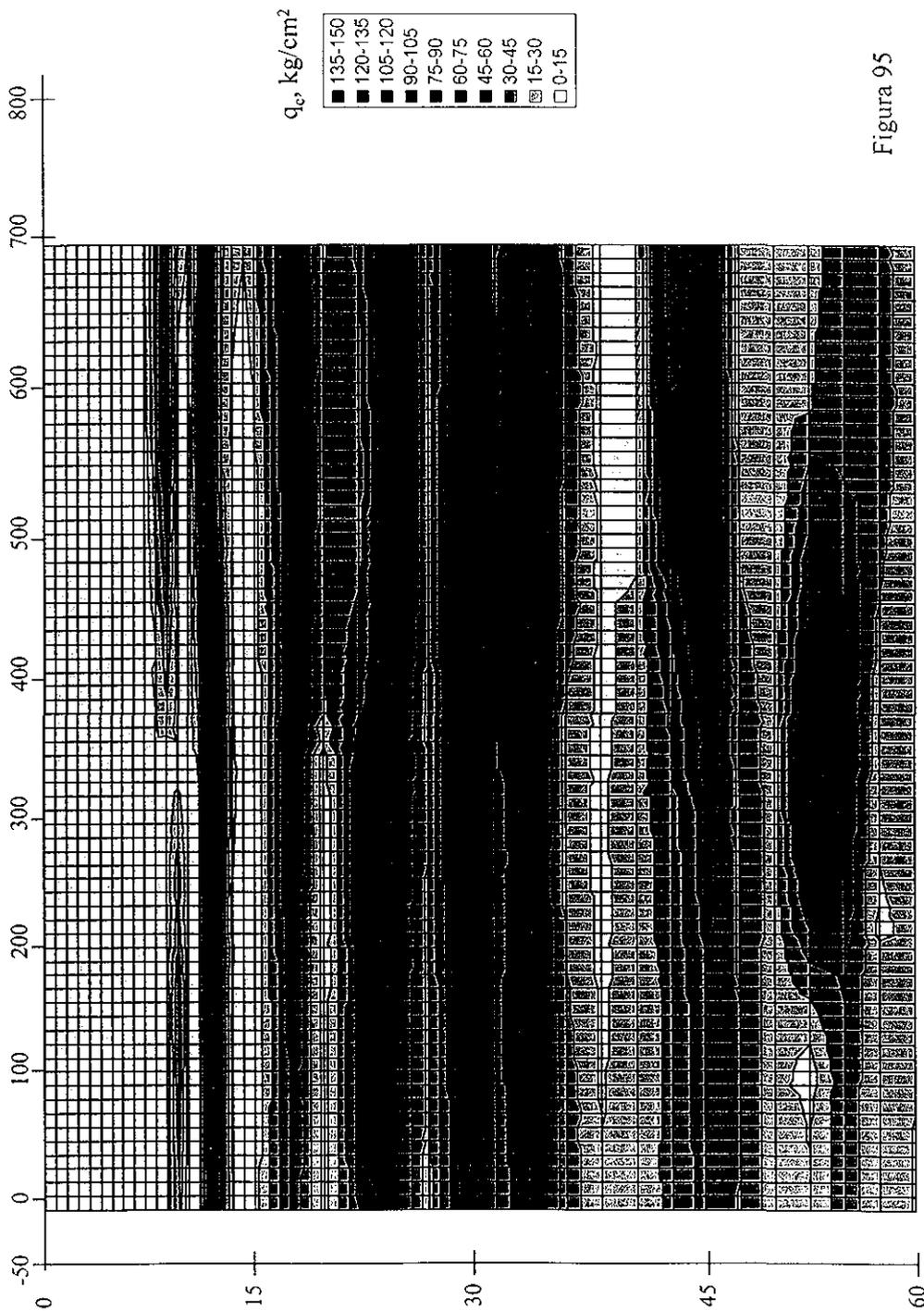


Figura 95

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

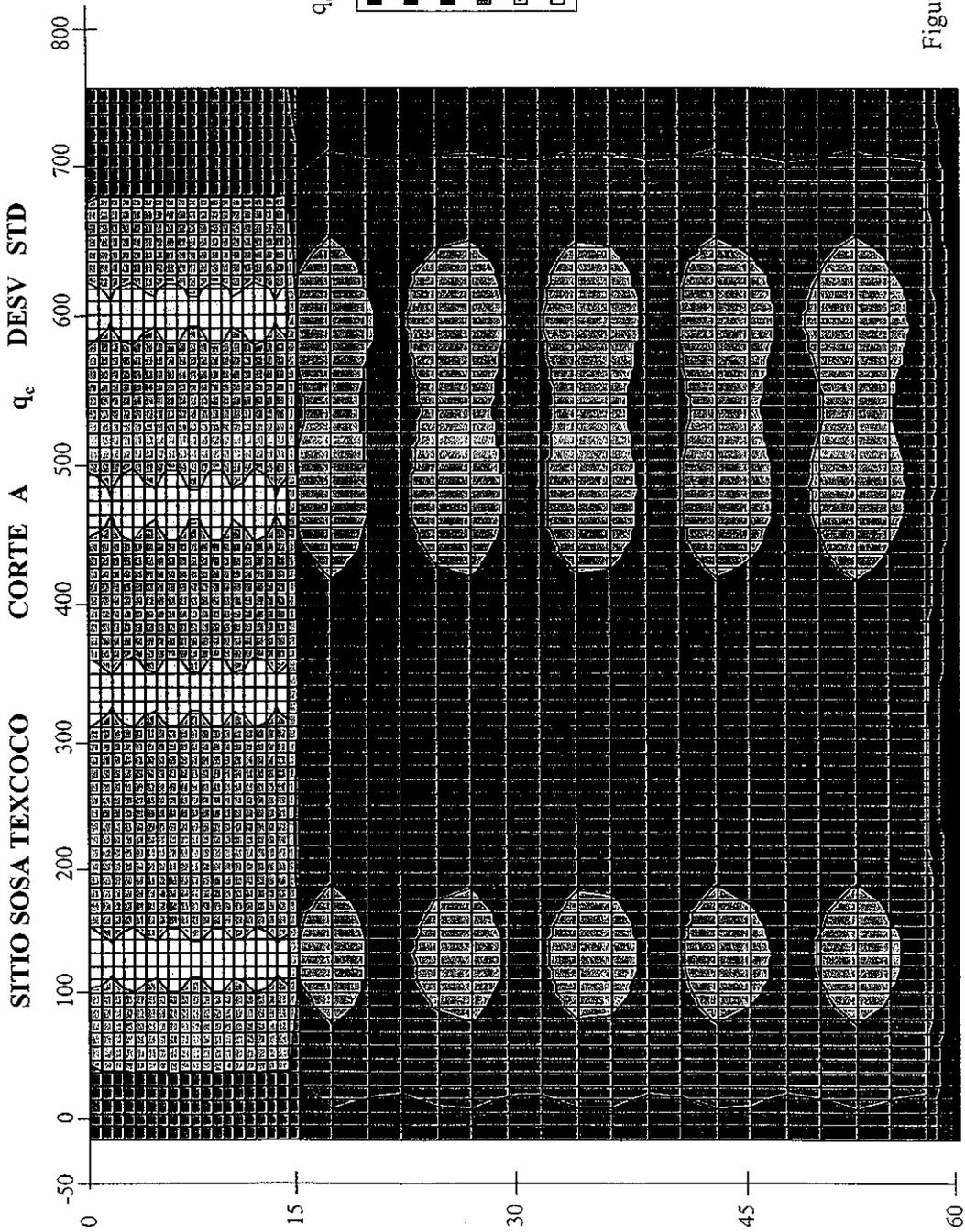
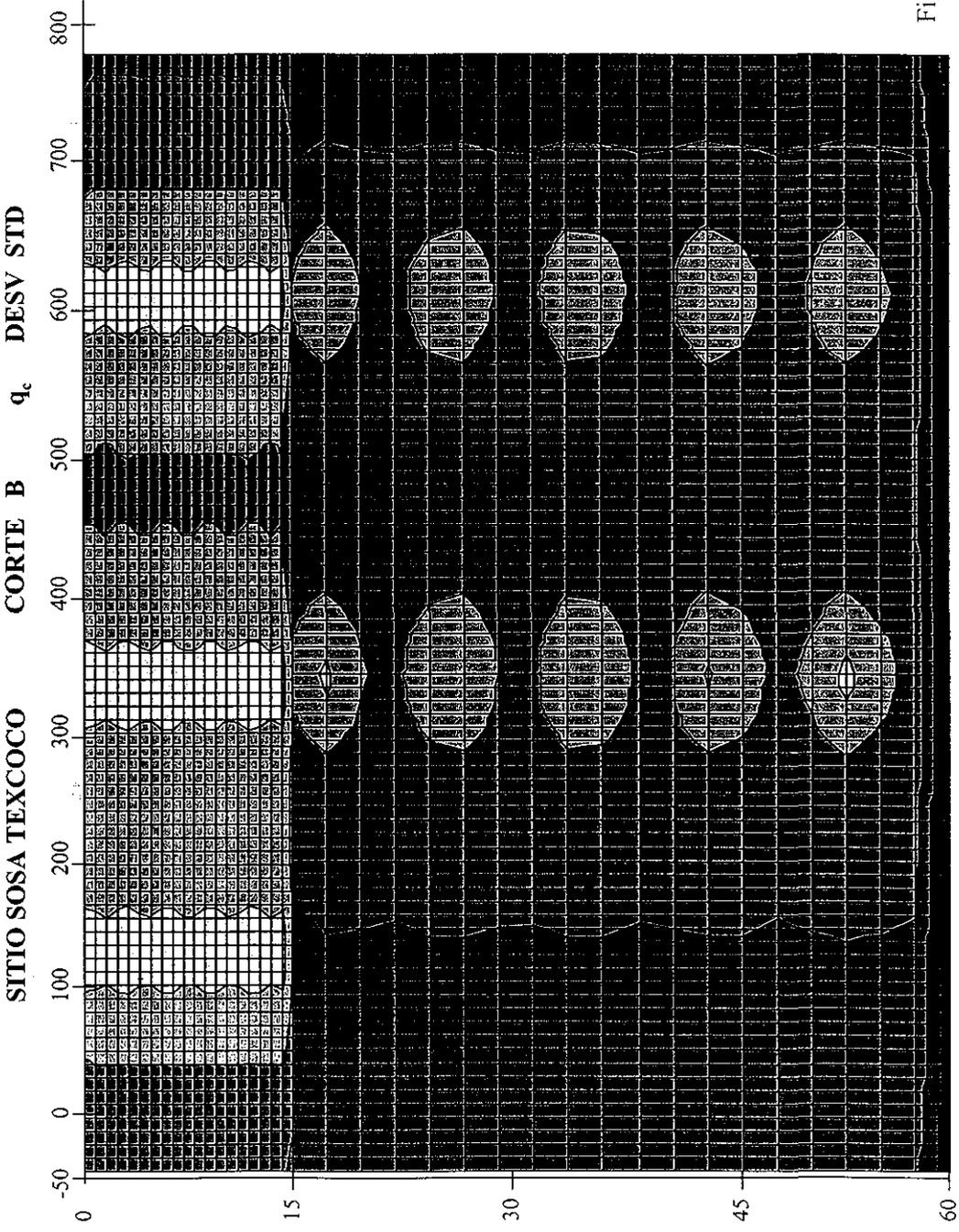


Figura 96

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



q_c , kg/cm²

- 30-35
- 25-30
- 20-25
- 15-20
- 10-15
- 5-10

SITIO SOSA TEXCOCO CORTE B DESV STD

800

700

600

500

400

300

200

100

0

-50

0

15

30

45

60

Figura 97

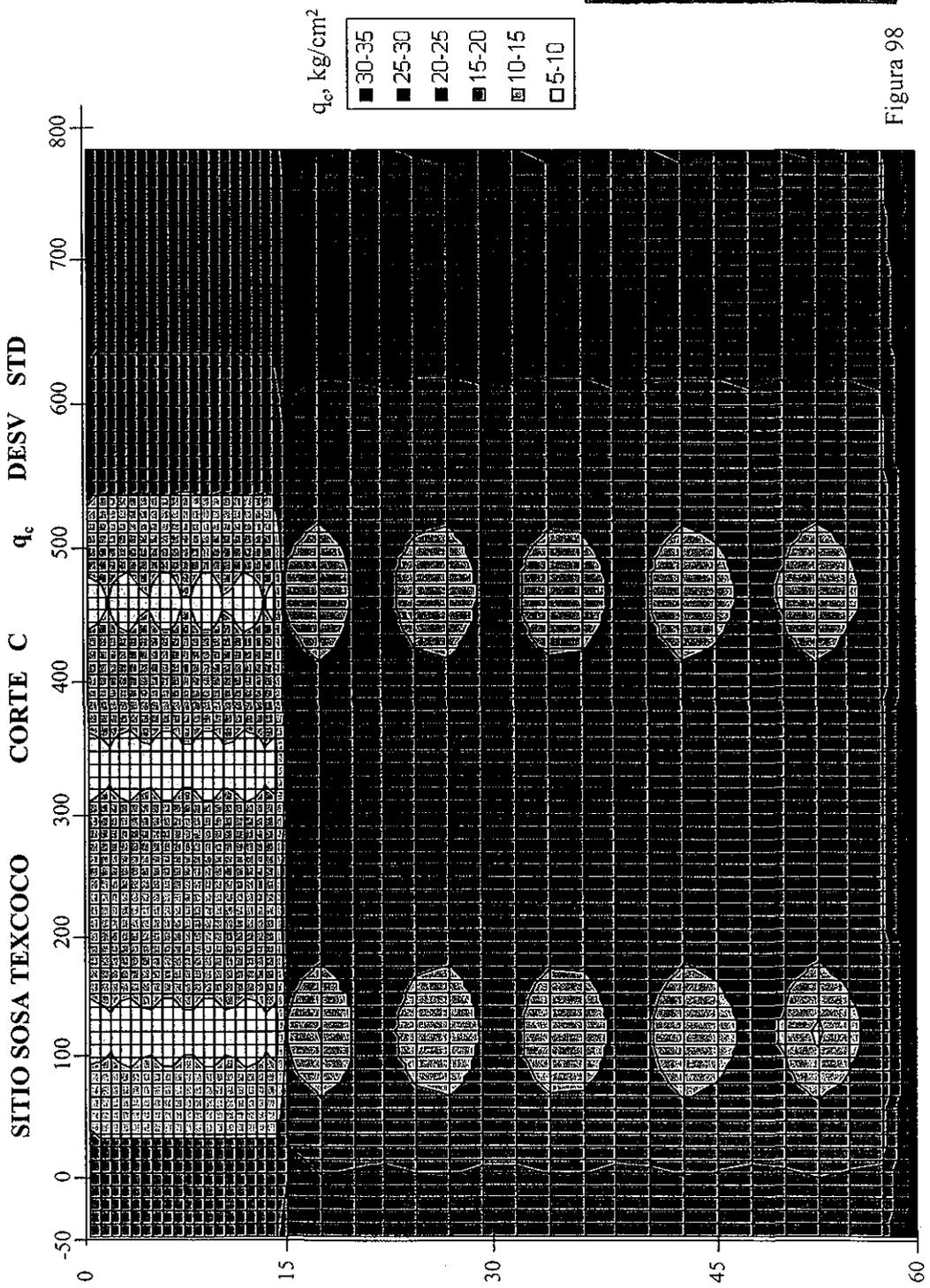


Figura 98

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

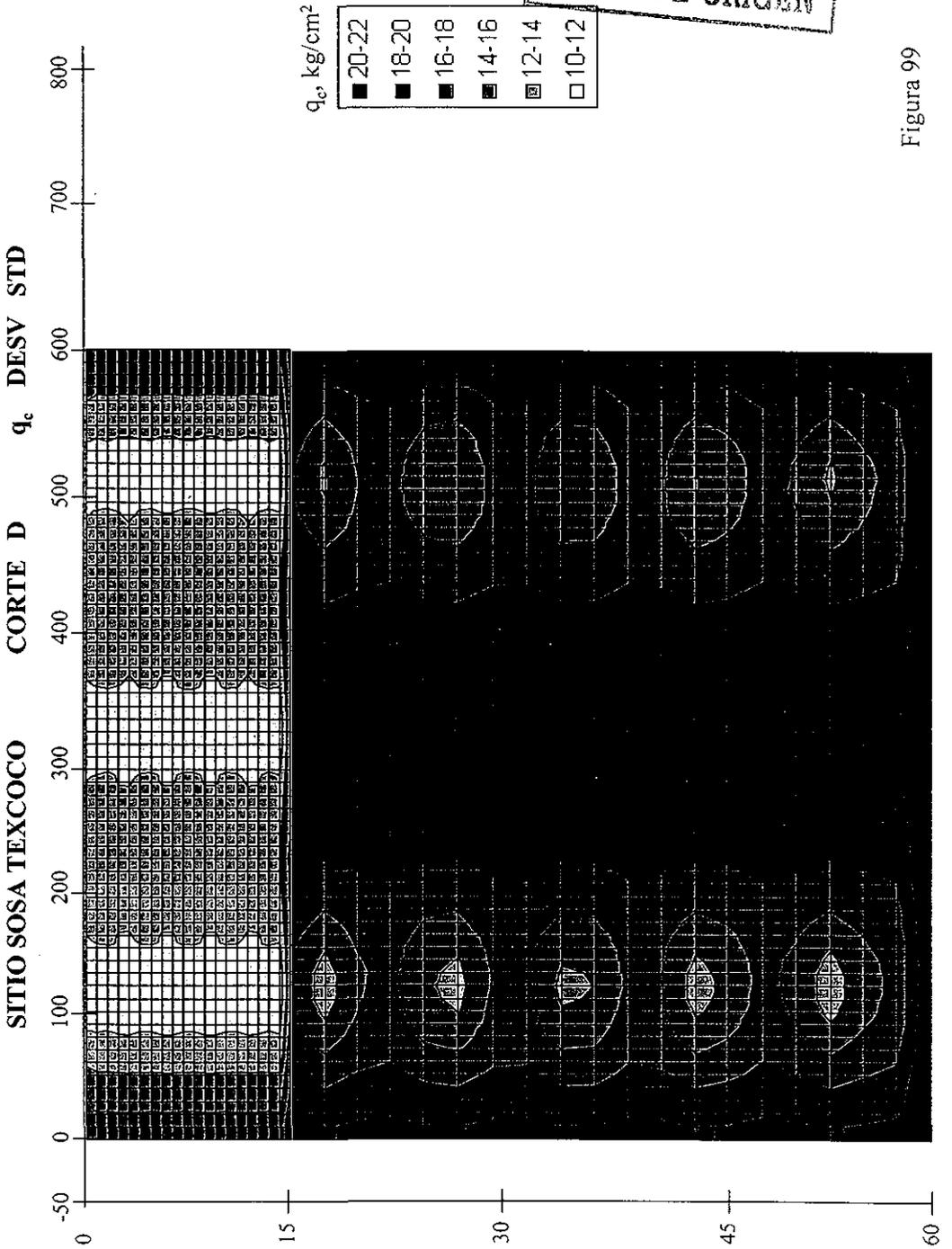


Figura 99

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

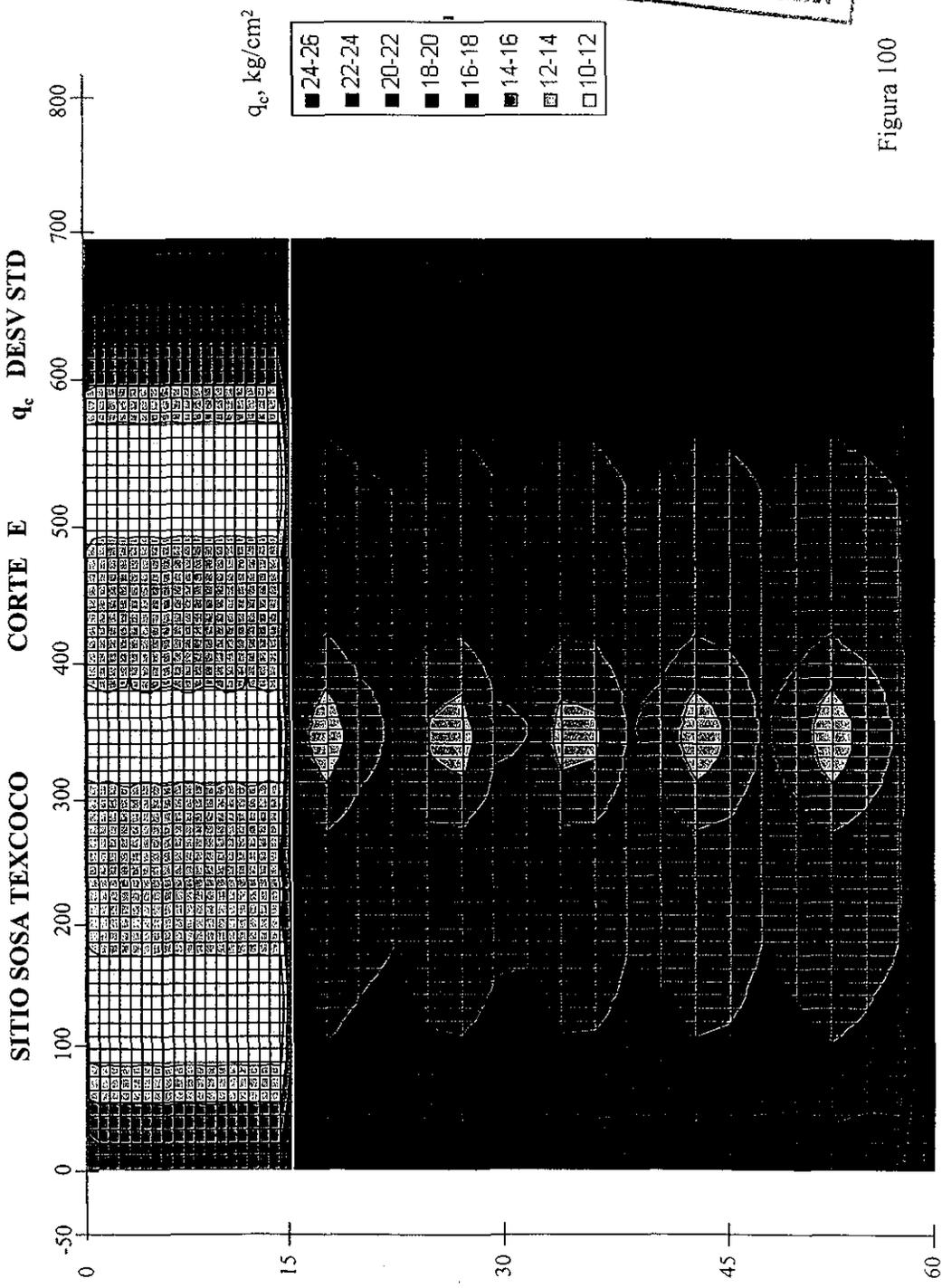


Figura 100

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

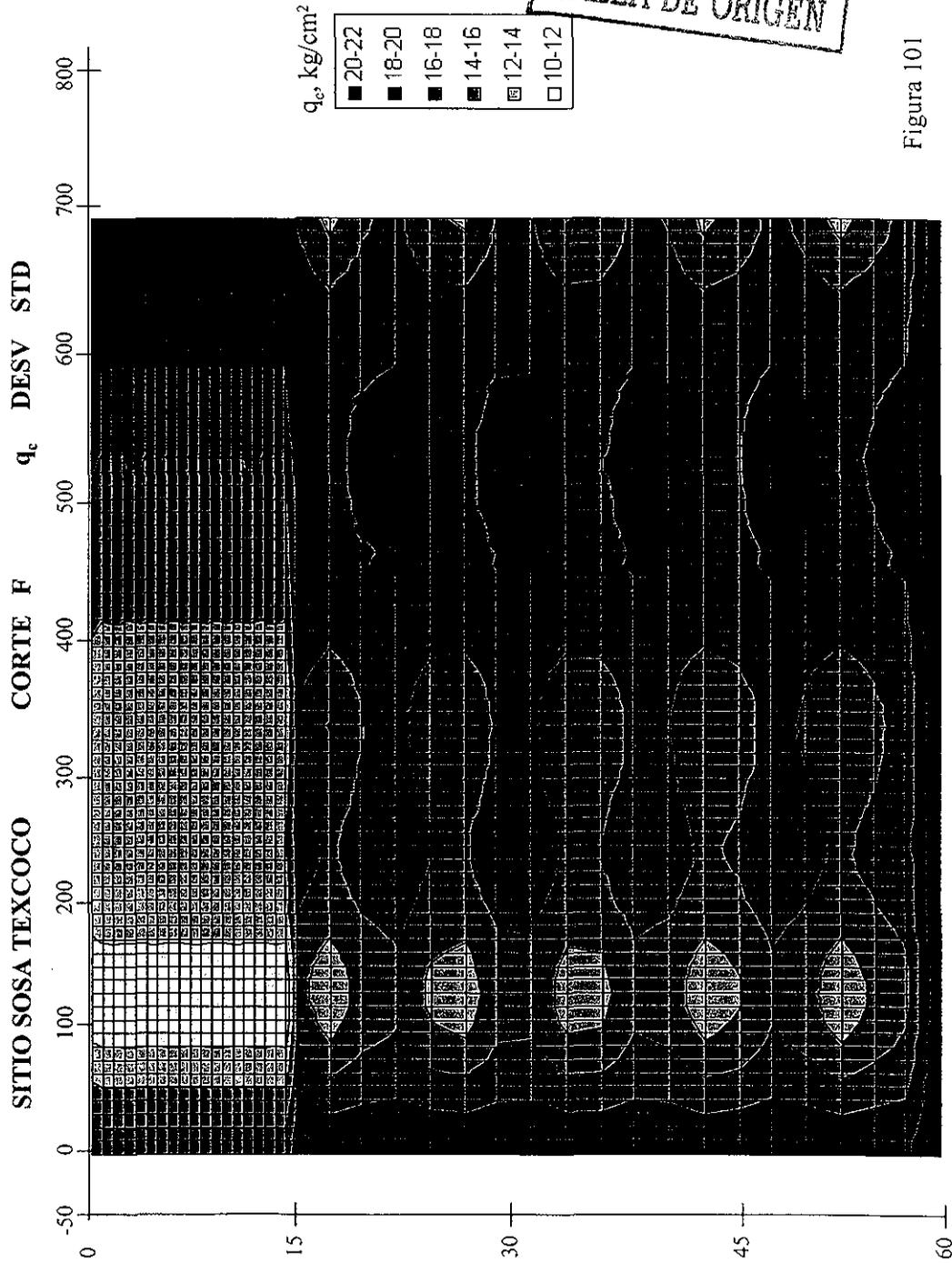
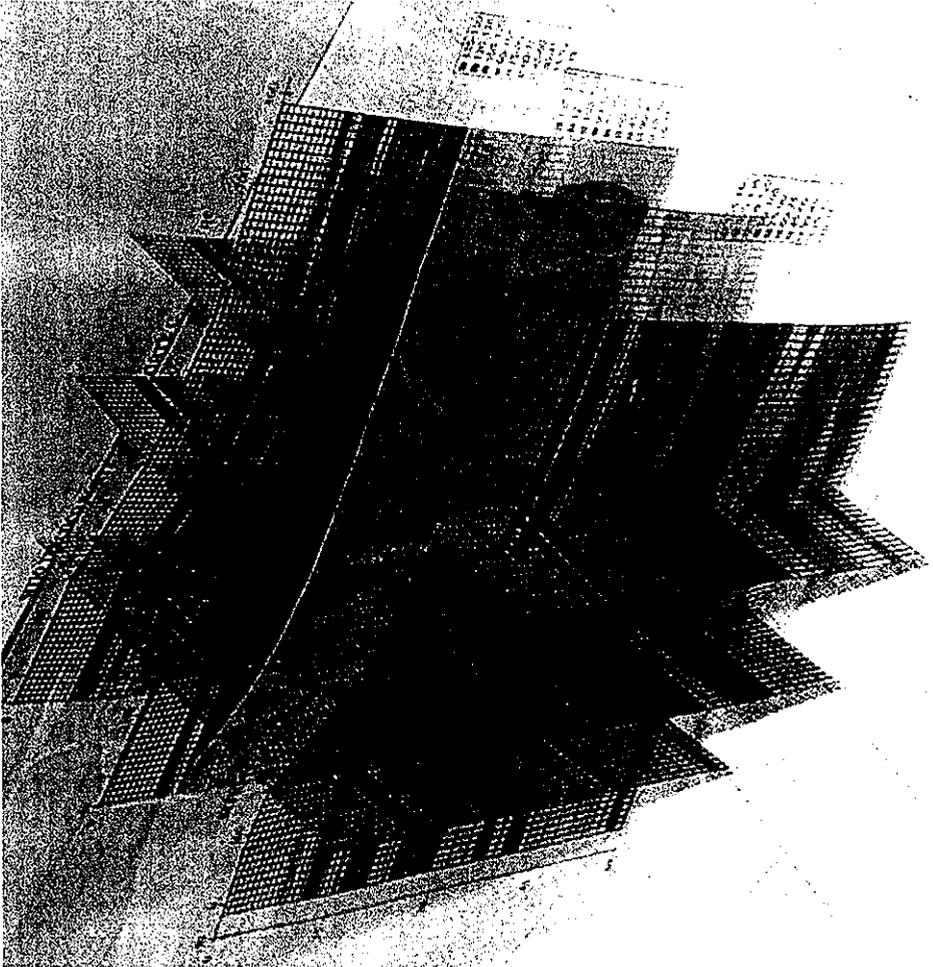


Figura 101

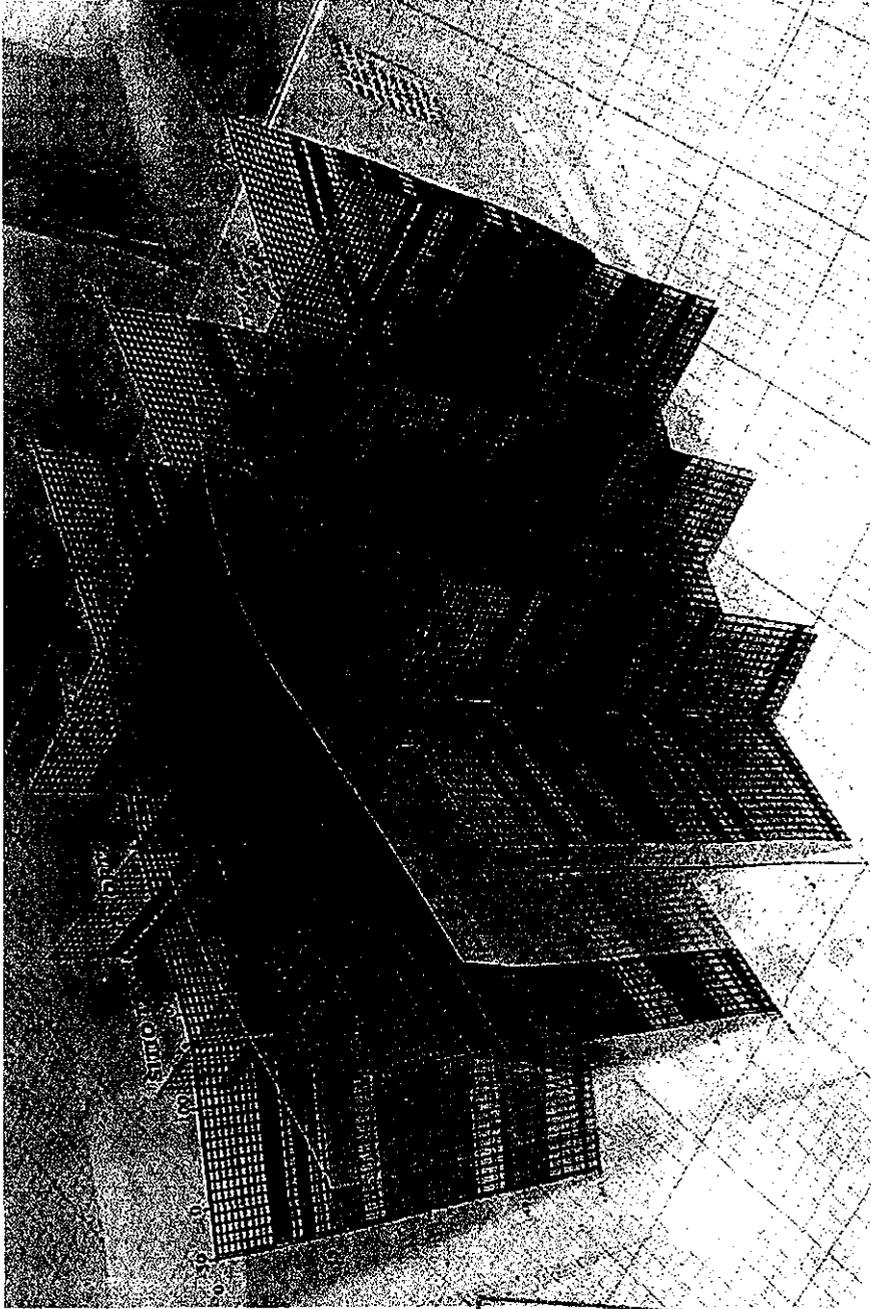
SITIO SOSA TEXCOCO MODELO FÍSICO 1 q.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 102

SITIO SOSA TEXCOCO MODELO FÍSICO 2 q_c



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 103

SITIO SOSA TEXCOCO MODELO FÍSICO 3 q.

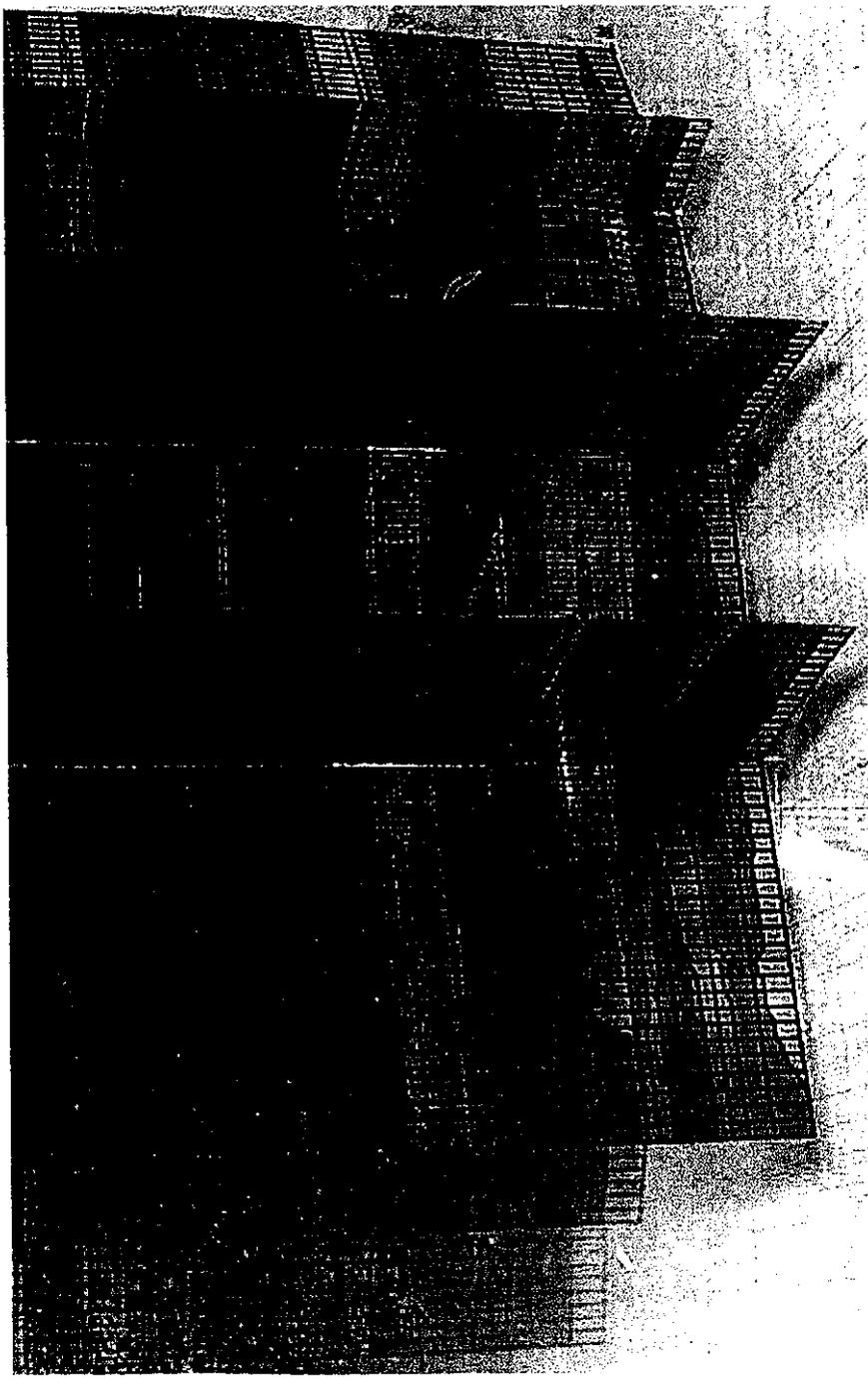


Figura 104

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

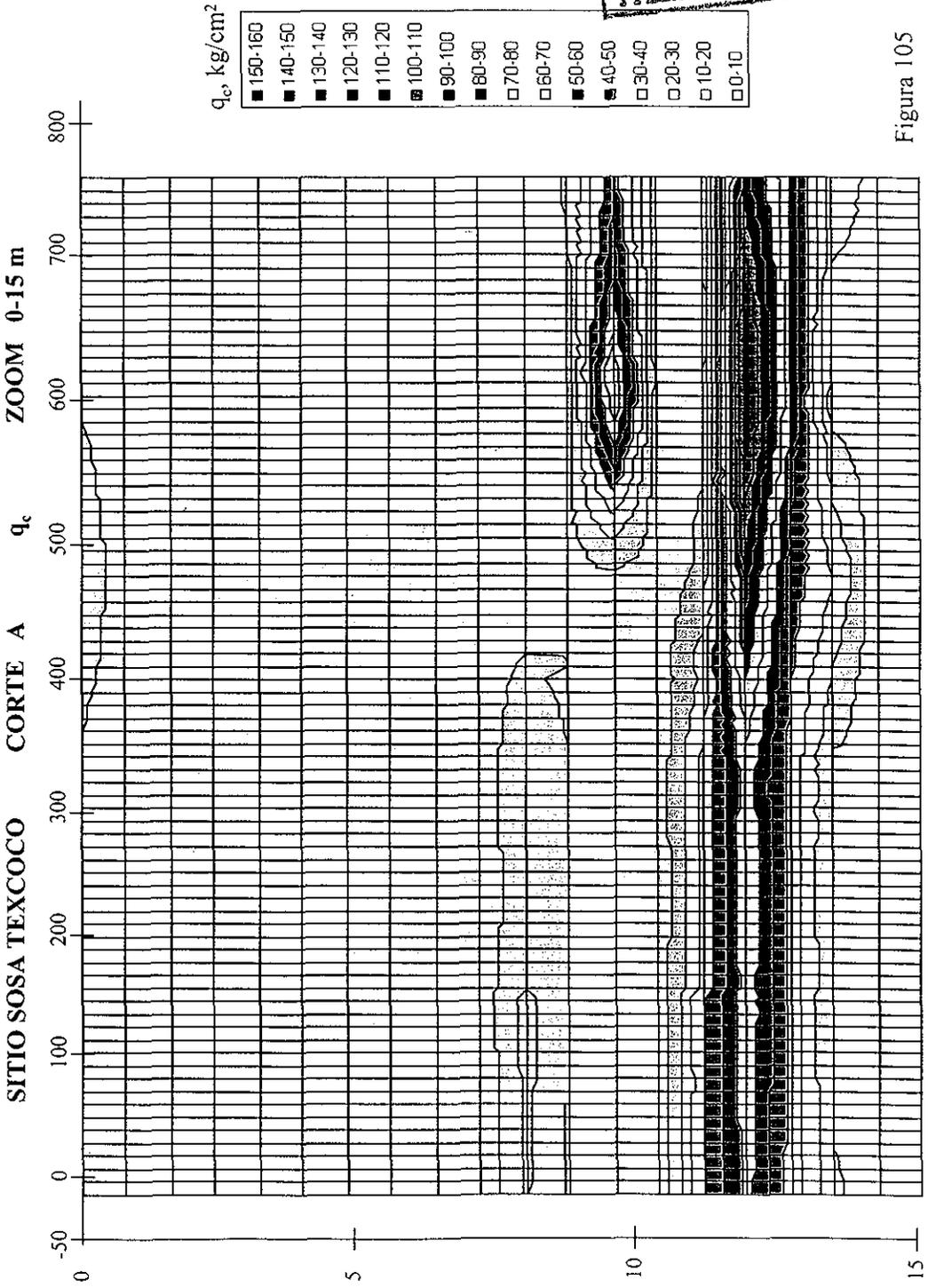


Figura 105

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

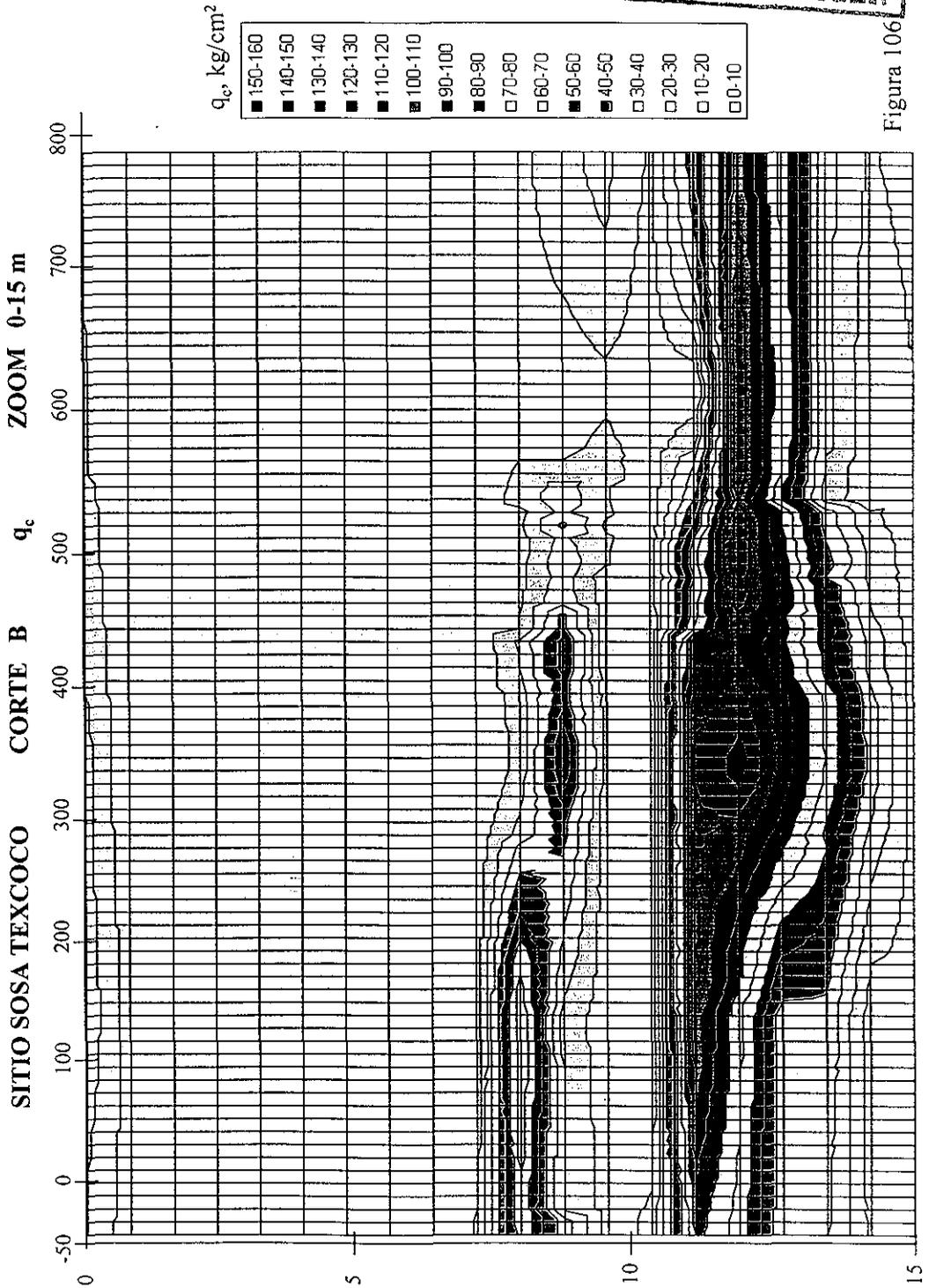


Figura 106

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

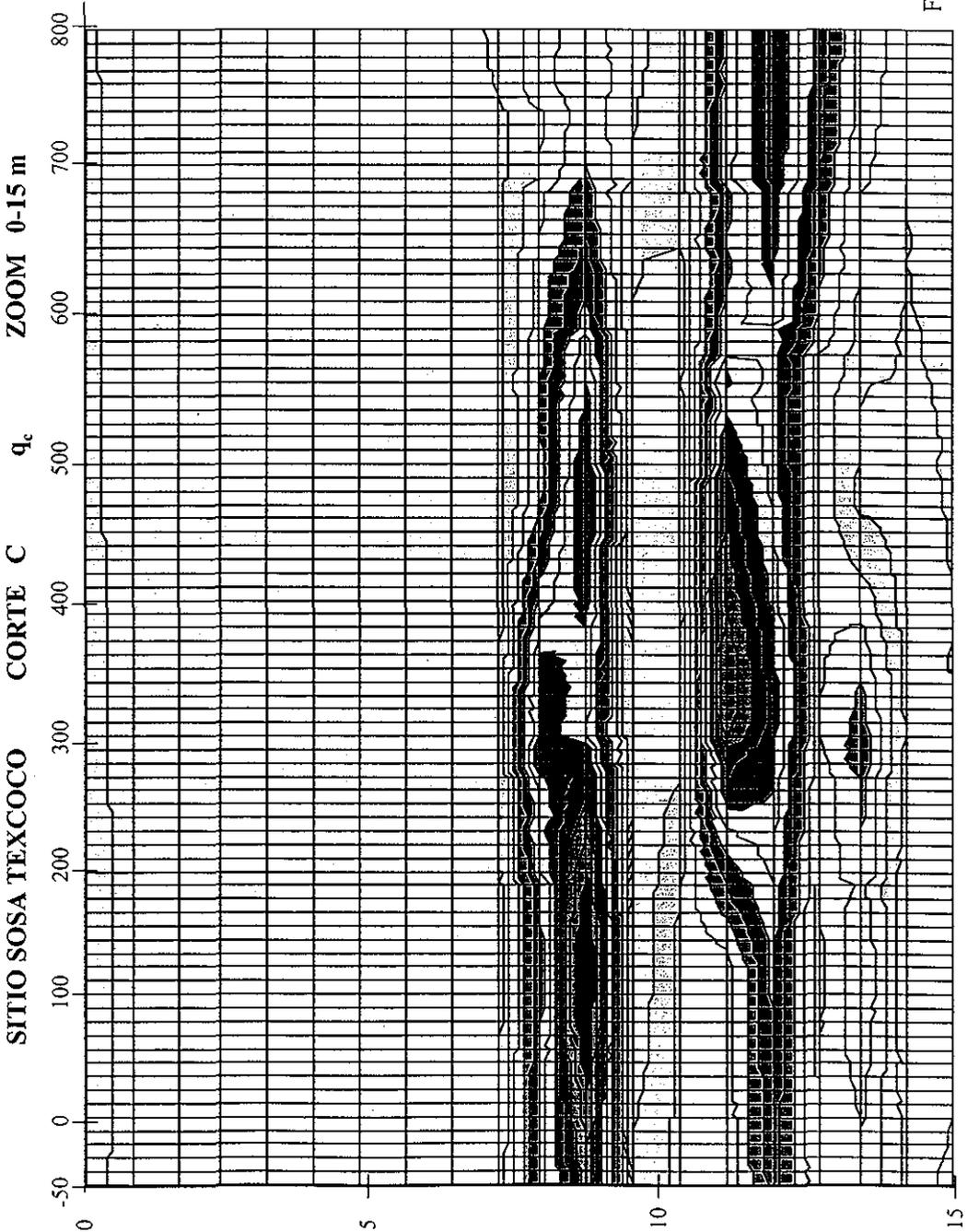


Figura 107

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

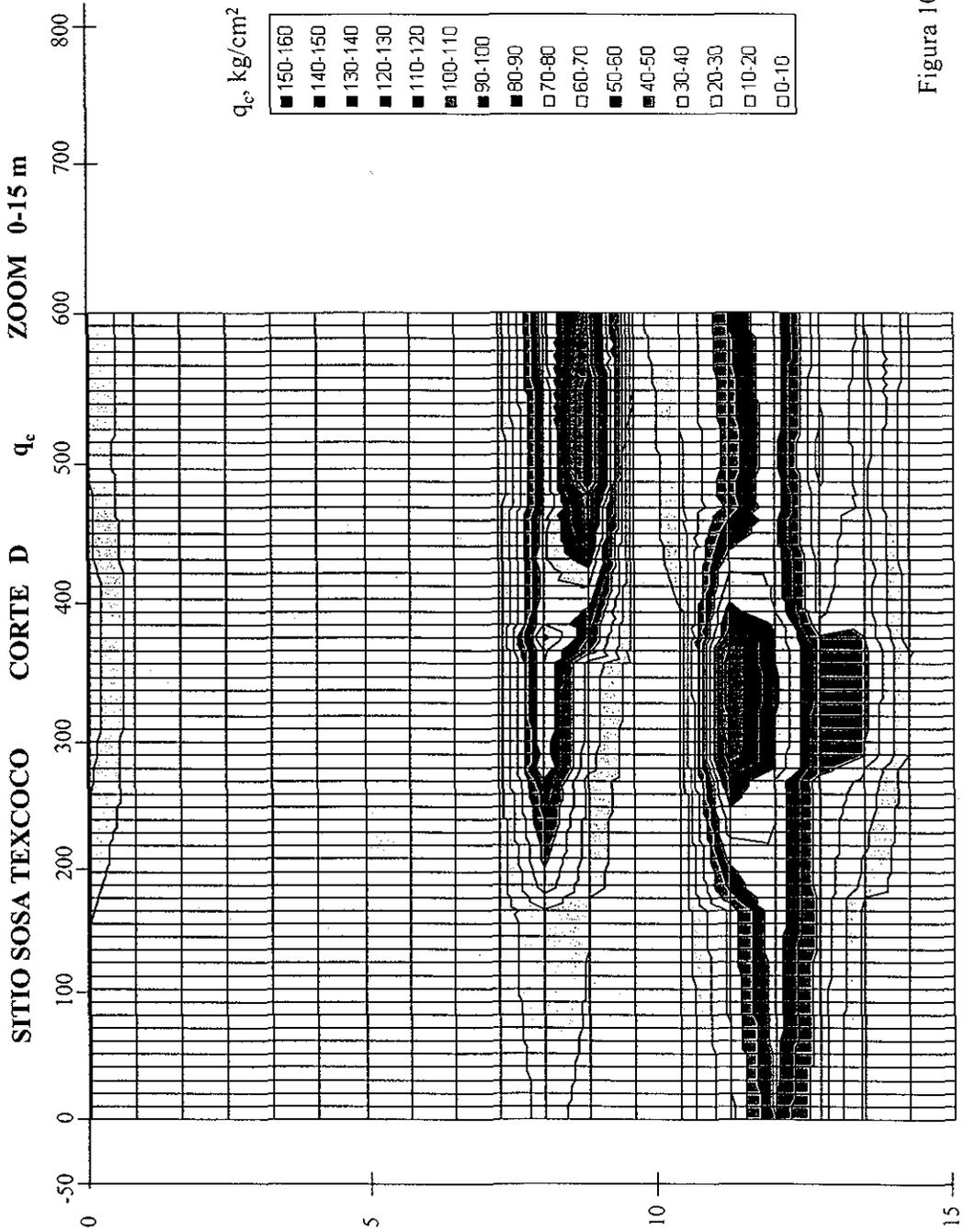


Figura 108

SITIO SOSA TEXCOCO CORTE E ZOOM 0-15 m

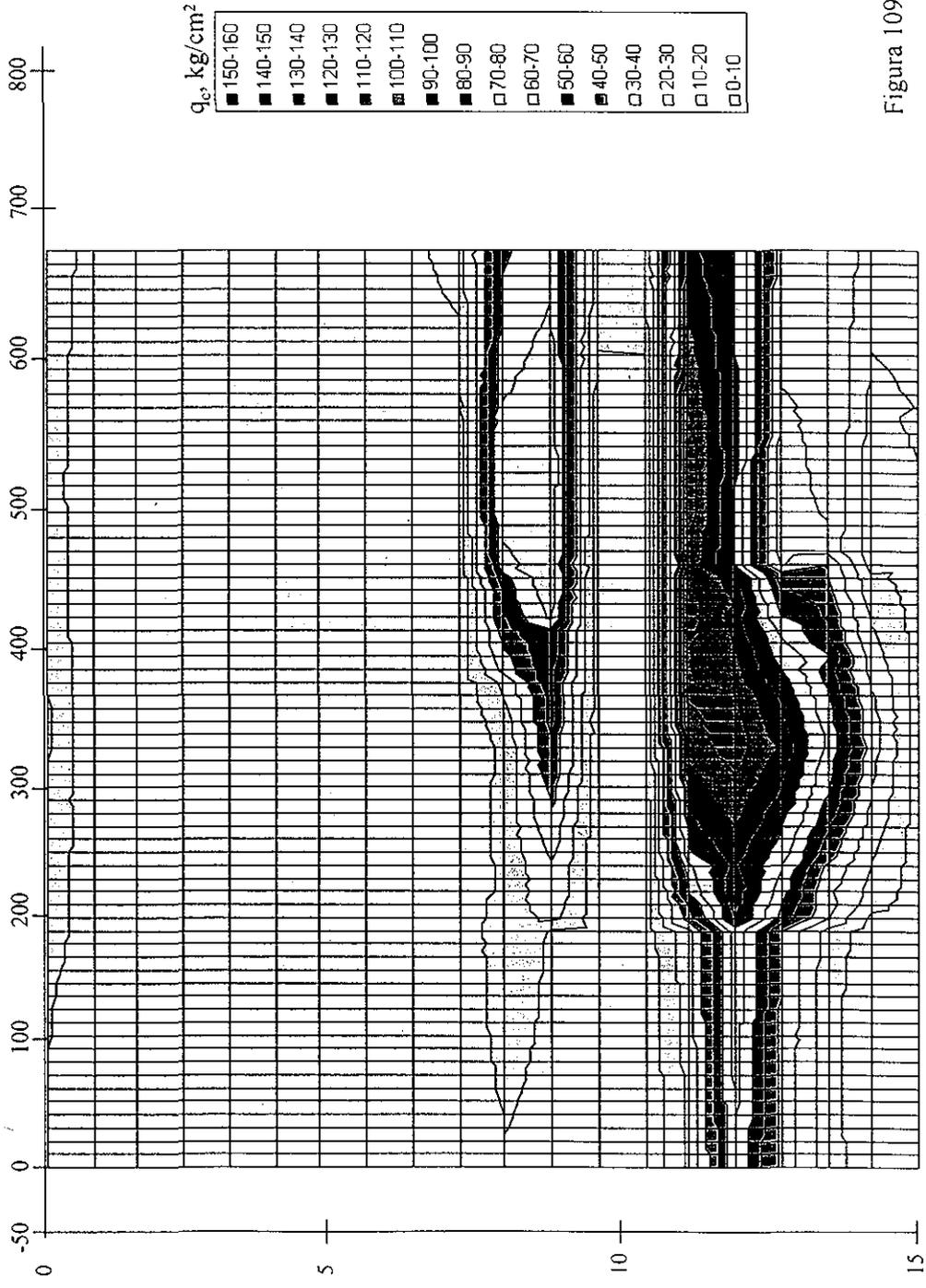


Figura 109

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

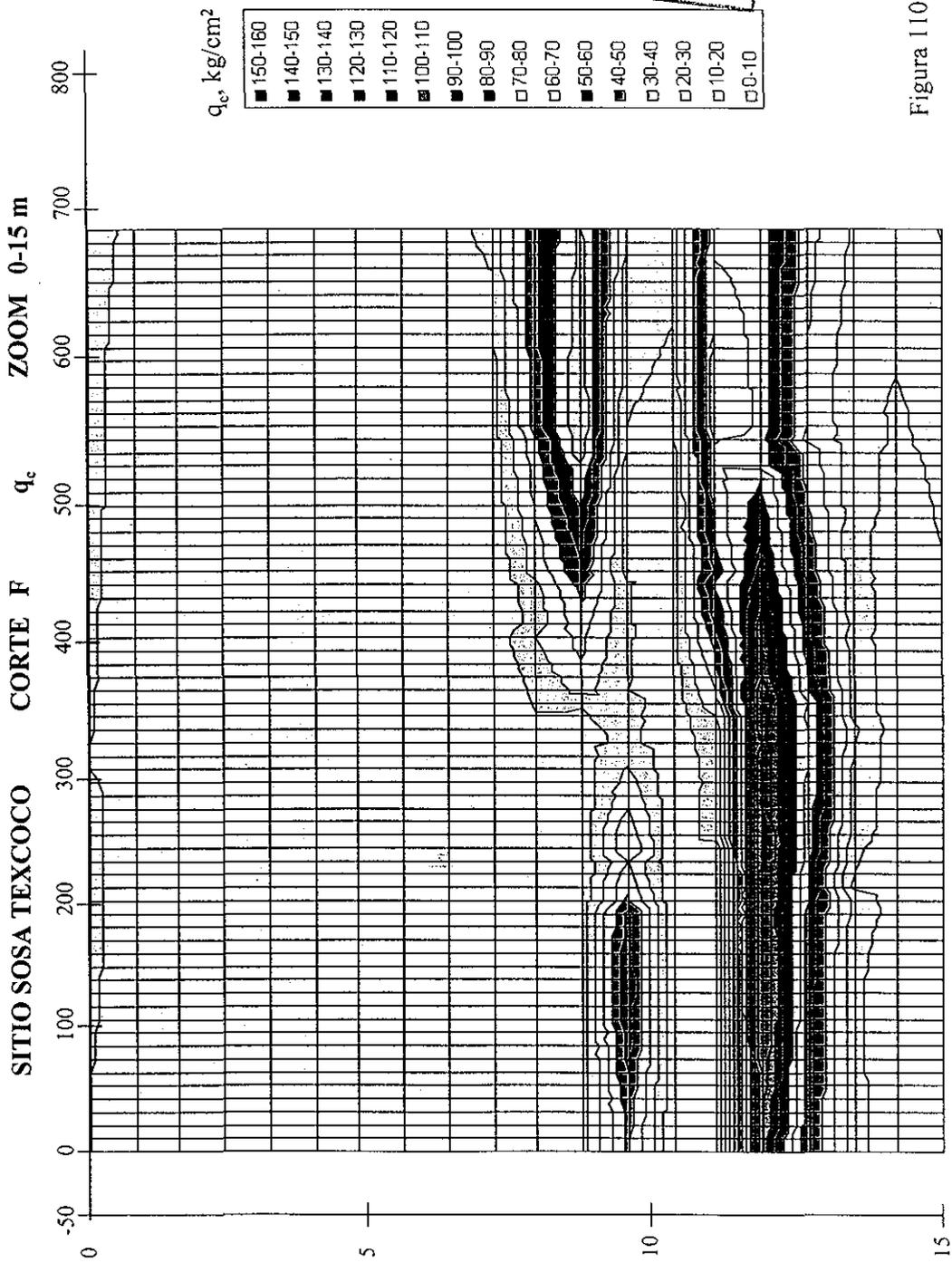
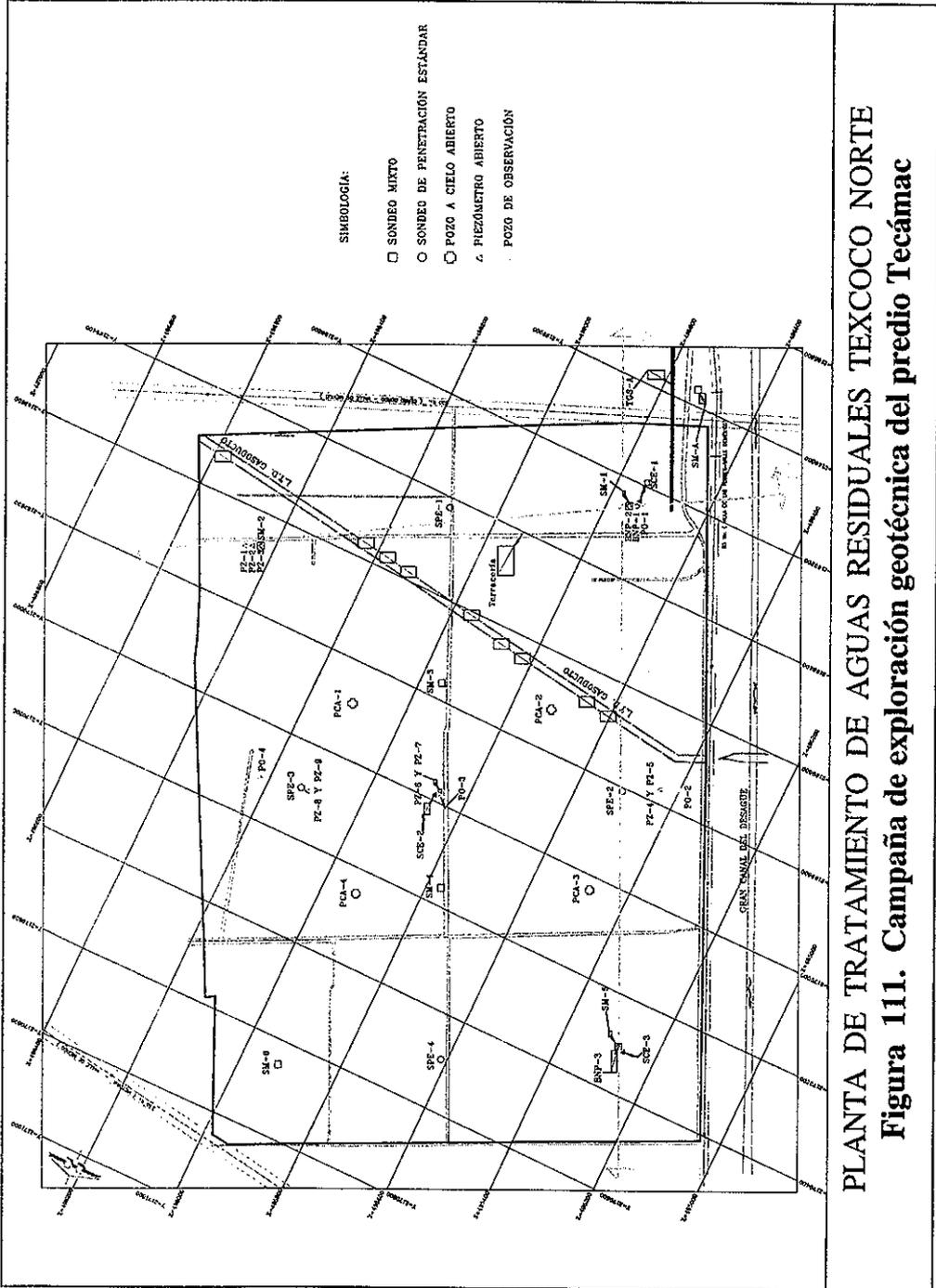
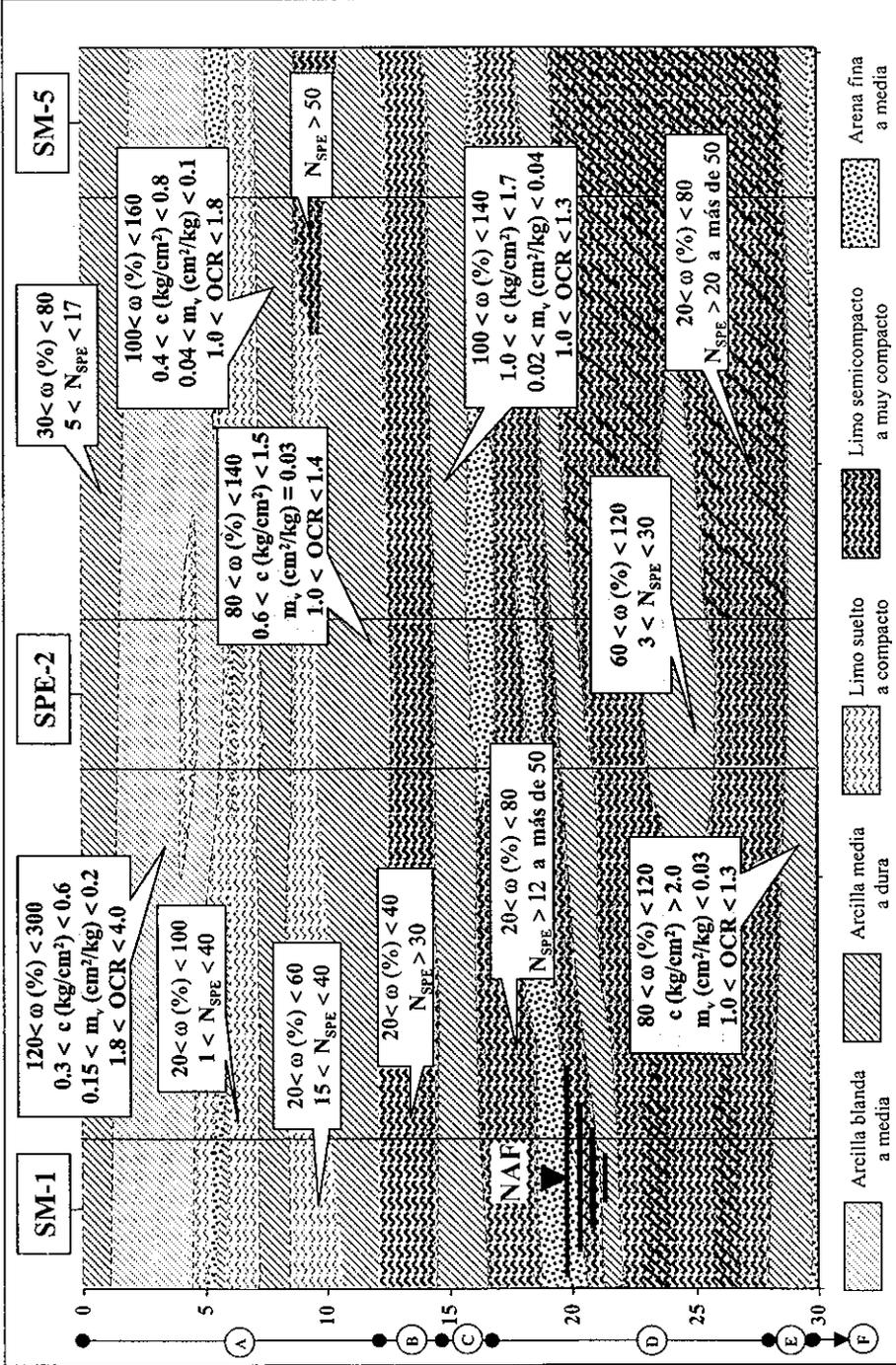


Figura 110

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



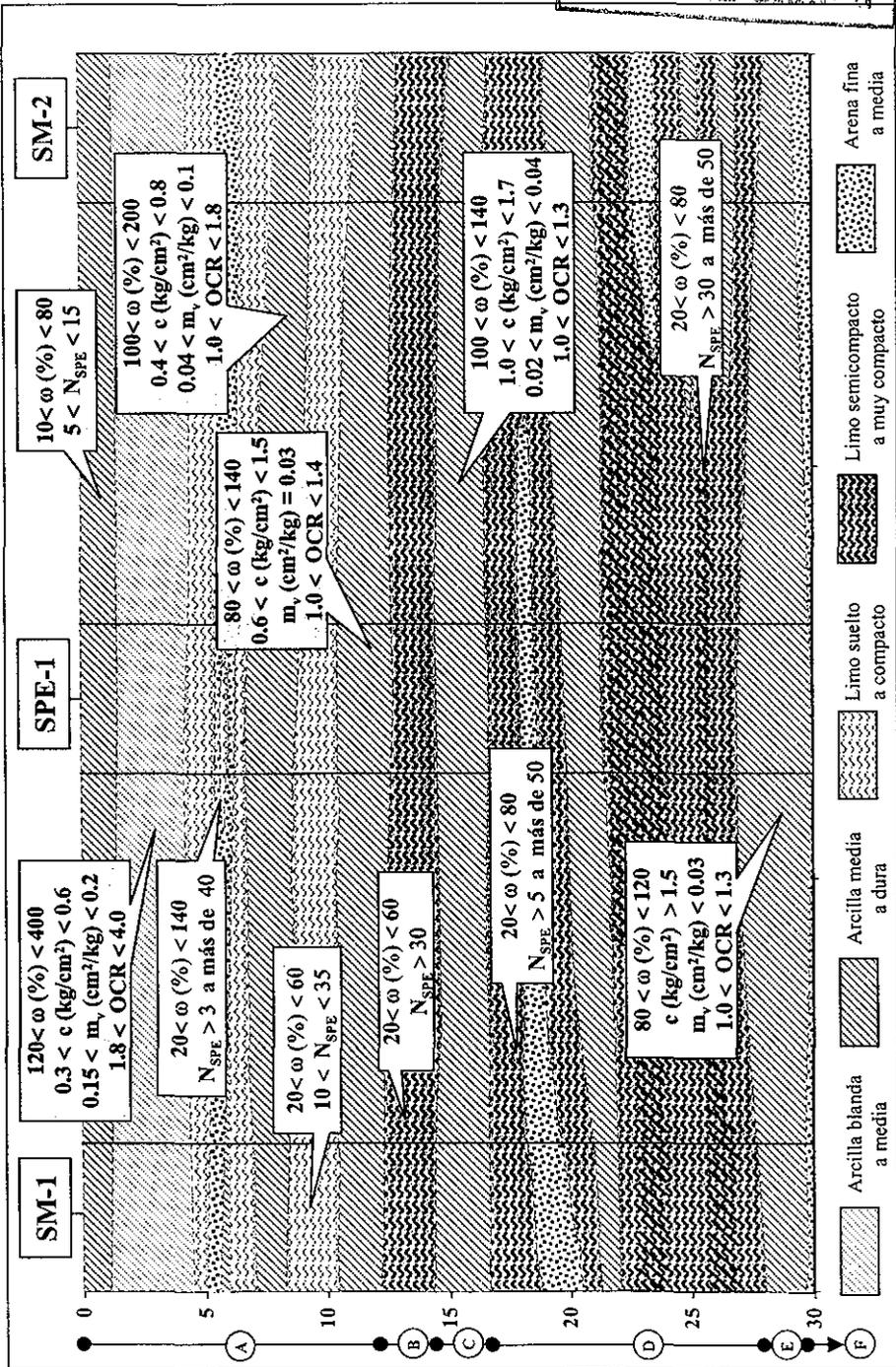


- (A) Formación arcillosa superior (FAS)
- (B) Primera capa dura (PCD)
- (C) Formación arcillosa inferior (FAI)
- (D) Serie estratificada superior (SES)
- (E) Formación arcillosa profunda (FAP)
- (F) Serie estratificada inferior (SEI)

P.T.A.R. TEXCOCO NORTE (TECÁMAC)

Figura 112. Corte estratigráfico A - A'

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

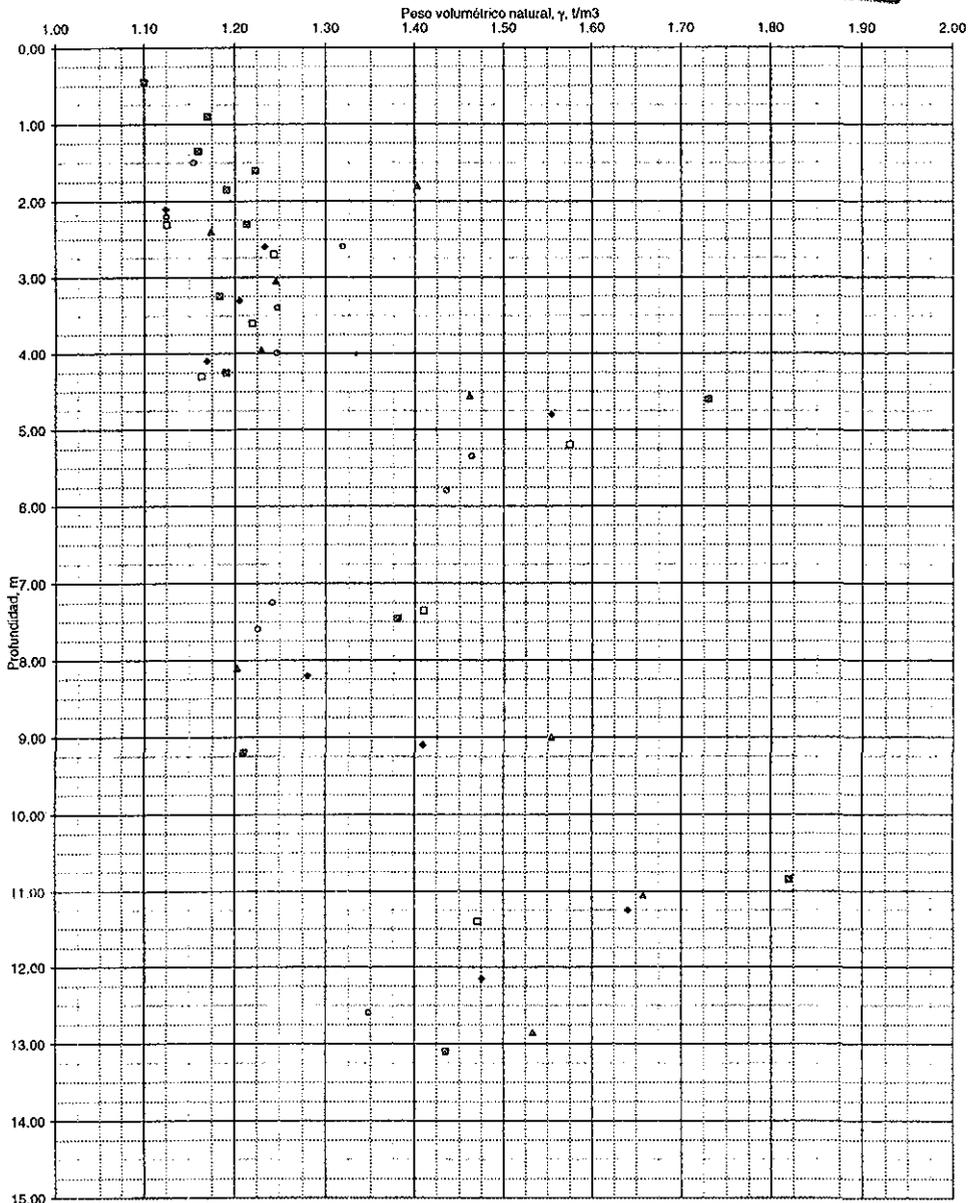


P.T.A.R. TEXCOCO NORTE (TECÁMAC)

(A) Formación arcillosa superior (FAS) (D) Serie estratificada superior (SES)
 (B) Primera capa dura (PCD) (E) Formación arcillosa profunda (FAP)
 (C) Formación arcillosa inferior (FAI) (F) Serie estratificada inferior (SEI)

Figura 113. Corte estratigráfico B - B'

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

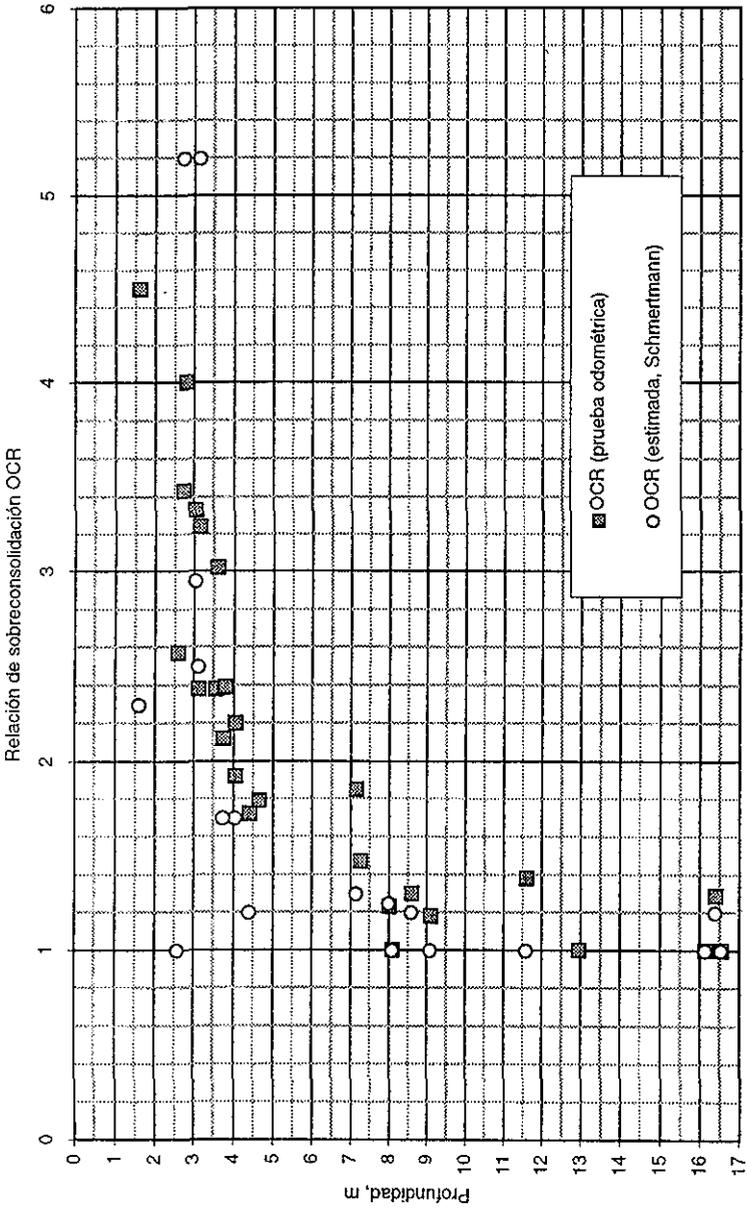


<p>Simbología:</p> <p>○ SM-1 ■ SM-2 ▲ SM-3 ● SM-4 □ SM-5</p>	<p>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXCOCO NORTE (SITIO TECÁMAC)</p>
---	--

Pesos volumétricos naturales de las muestras de los sondeos mixtos (muestras de tubo tipo Shelby), de 0 a 15 m Figura 114

213

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

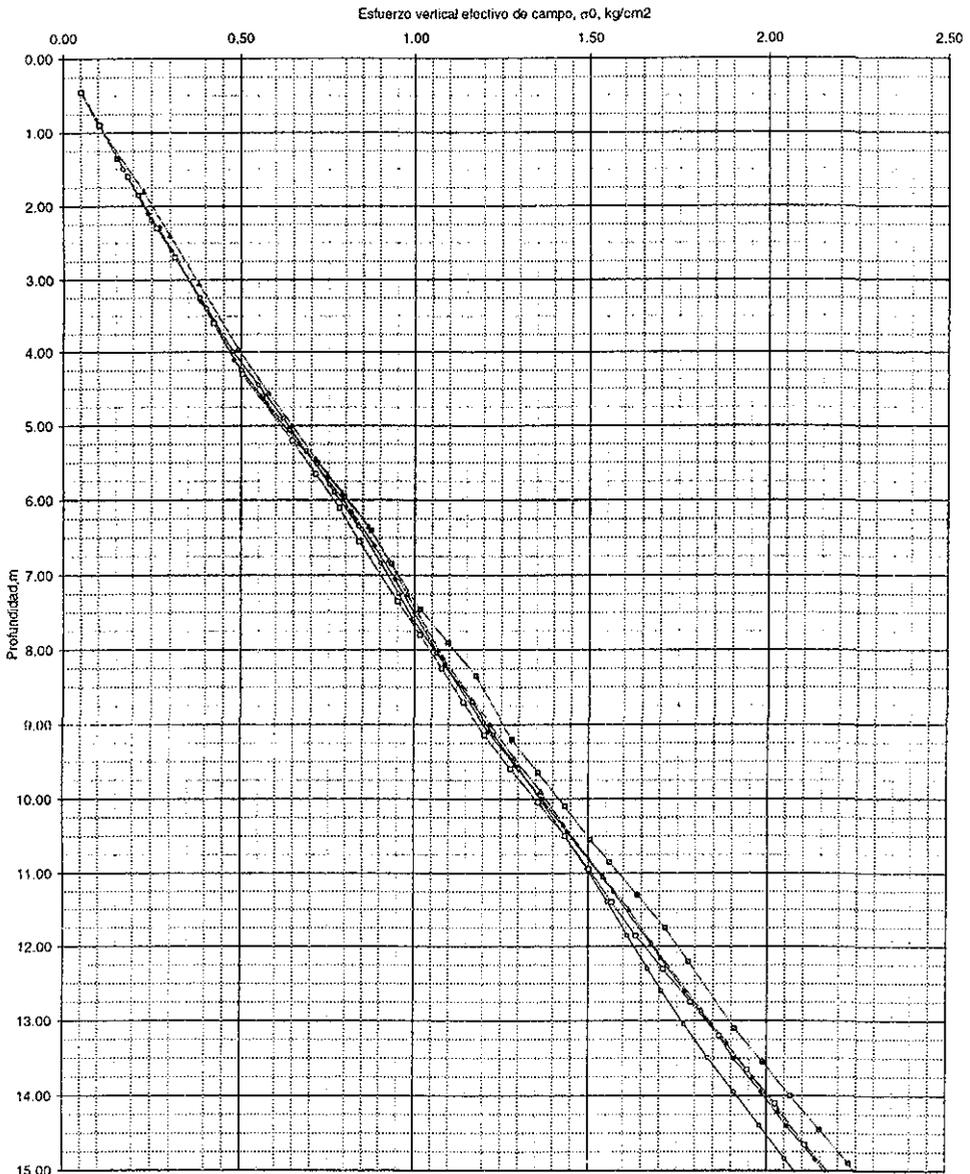


Variación de la relación de sobreconsolidación (OCR) con la profundidad

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXCOCO NORTE (SITIO TECAMAC)	Figura 115
---	------------

210

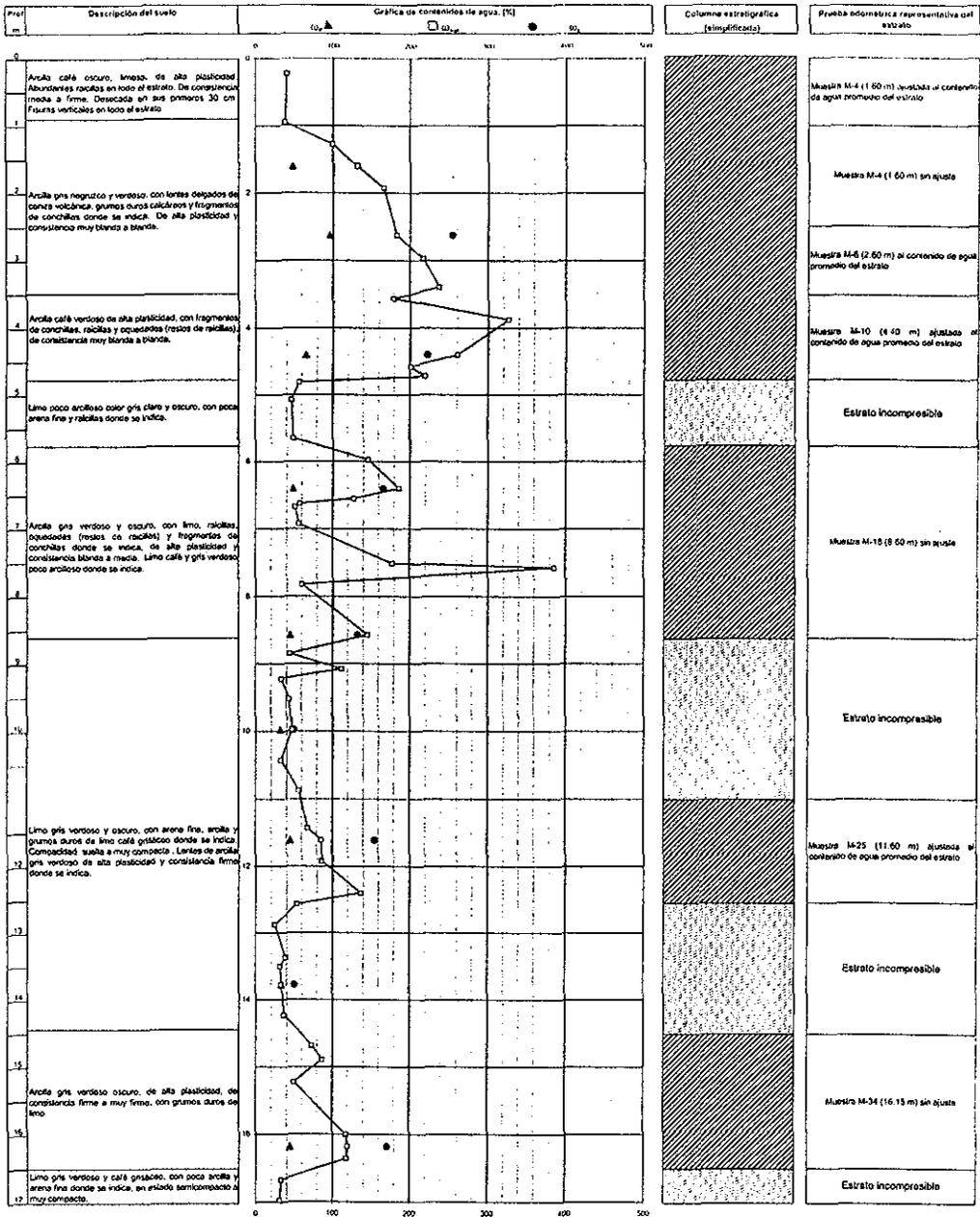
TESIS CON FALLA DE ORIGEN



<p>Simbología:</p> <p> ◊- SM-1 ◊- SM-2 ◊- SM-3 ◊- SM-4 ◊- SM-5 </p>	<p>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXCOCO NORTE (SITIO TECÁMAC)</p>	
<p>Diagramas de esfuerzo vertical efectivo de campo de los sondeos mixtos (de 0.0 a 15.0)</p>		<p>Figura 116</p>

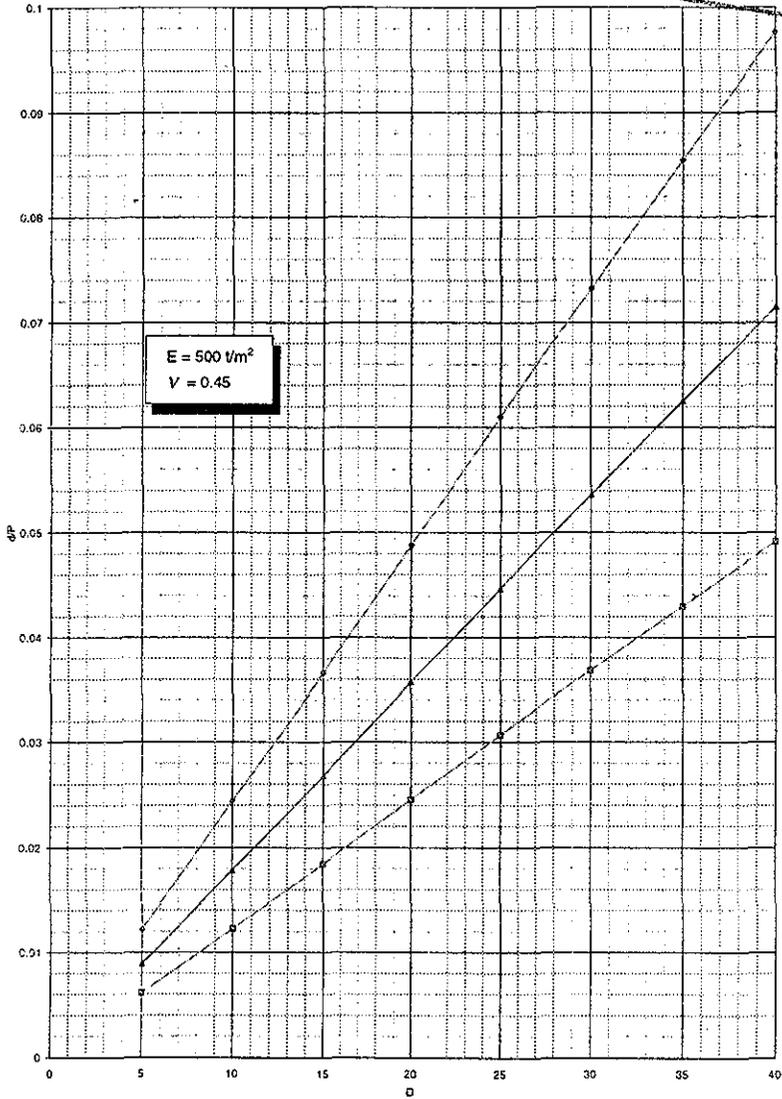
215

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Simbología: <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 15px; background-color: #cccccc; margin-right: 5px;"></div> Arcilla <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 15px; background-color: #e0e0e0; margin-right: 5px; margin-left: 20px;"></div> Limo <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 15px; background-color: #d3d3d3; margin-right: 5px; margin-left: 20px;"></div> Arena <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 15px; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px); margin-right: 5px; margin-left: 20px;"></div> Grava </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> X: _____ Y: _____ Z: _____ </div>	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXCOCO NORTE (SITO TECÁMAC)
Modelo Estratigráfico del SM-6 para el cálculo de los asentamientos diferidos a largo plazo		Figura 117

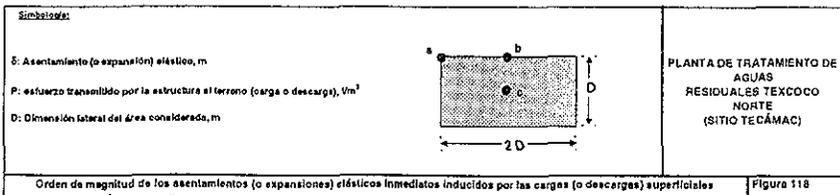
TESIS CON
TALLA DE ORIGEN

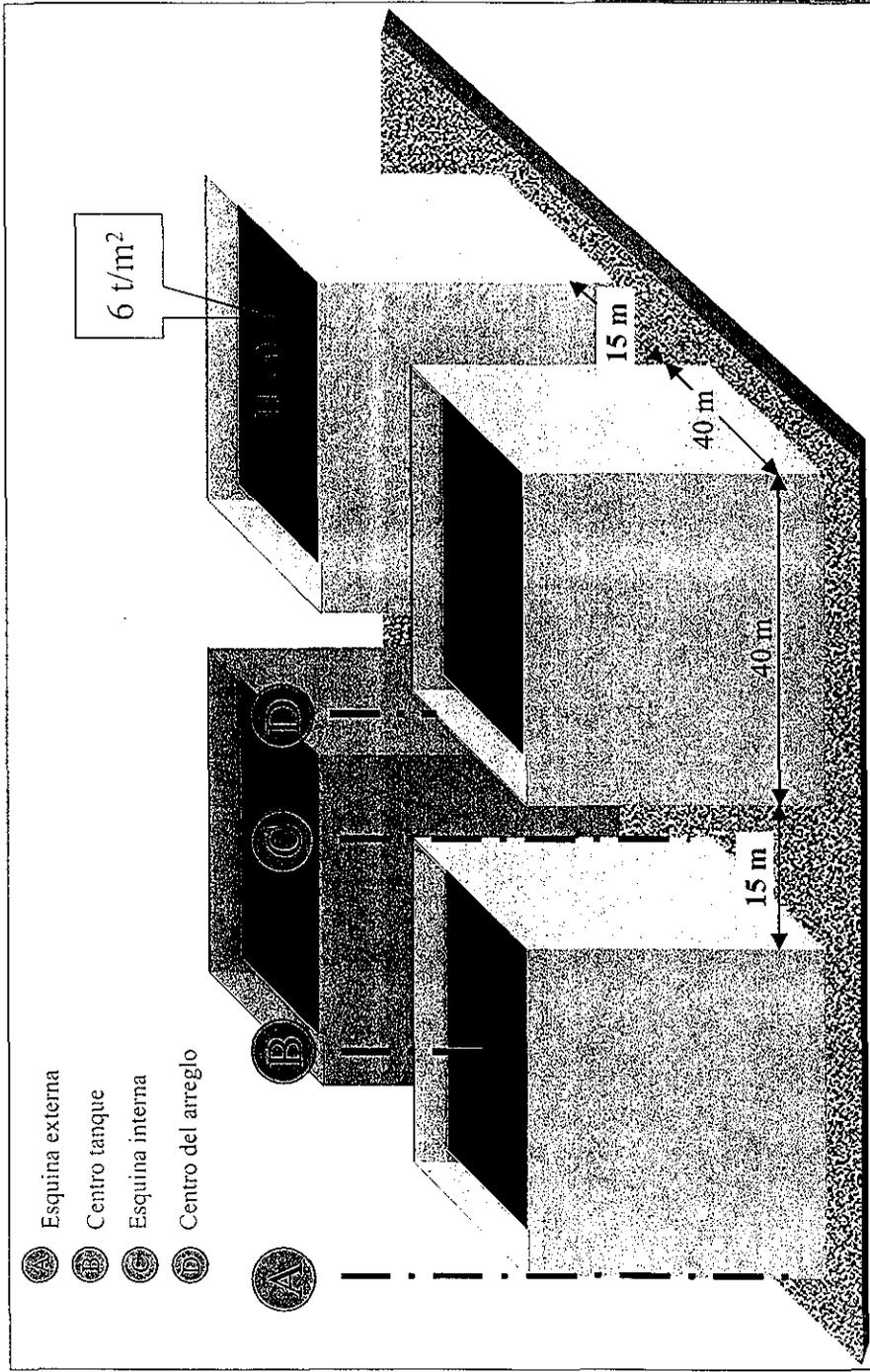


○- Esquina de estructura (a)

◐- Medio de estructura (b)

●- Centro de estructura (c)





- ⊙ A Esquina externa
- ⊙ B Centro tanque
- ⊙ C Esquina interna
- ⊙ D Centro del arreglo

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXCOCO NORTE
Figura 119. Arreglo propuesto para los análisis de asentamientos diferidos a largo plazo (Tecamac)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

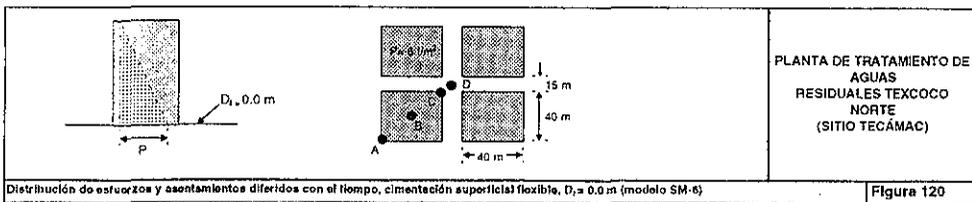
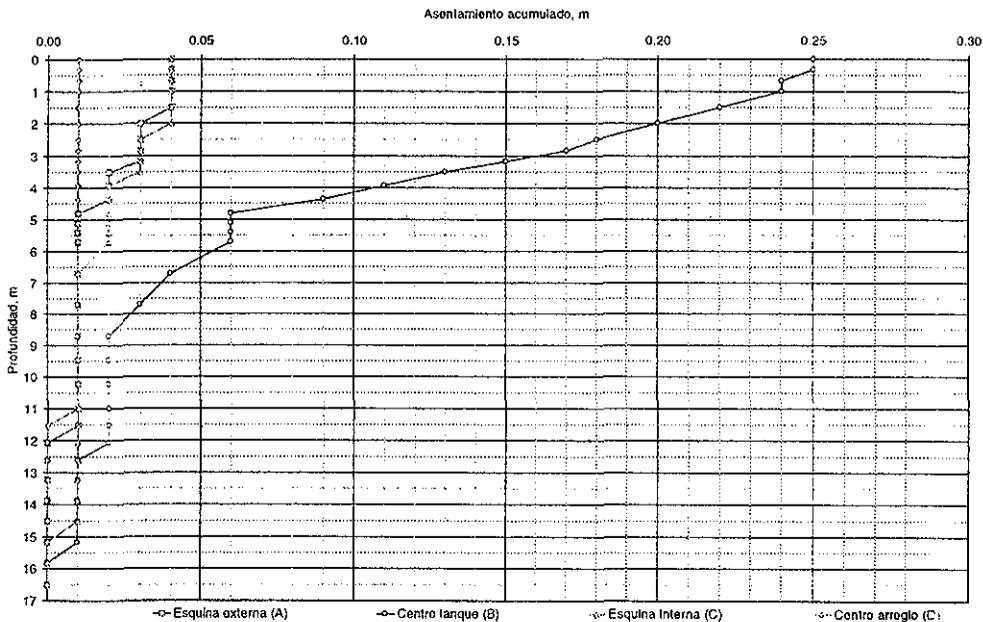
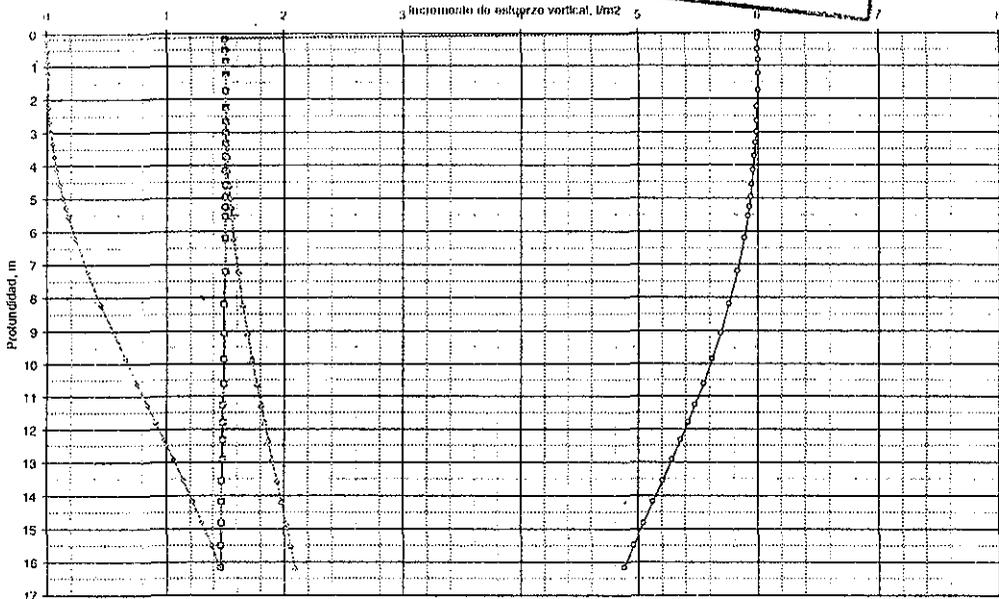
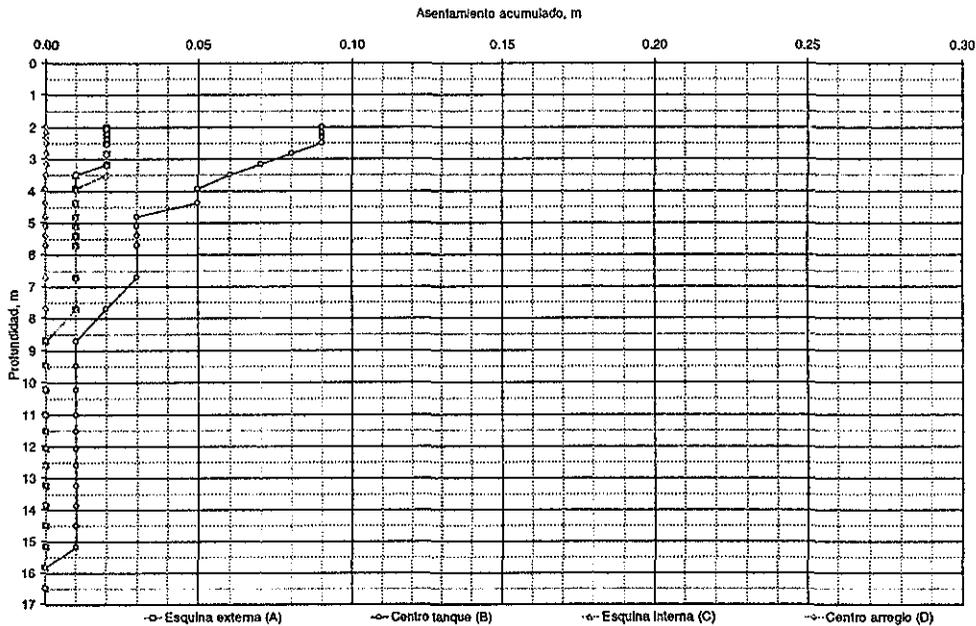
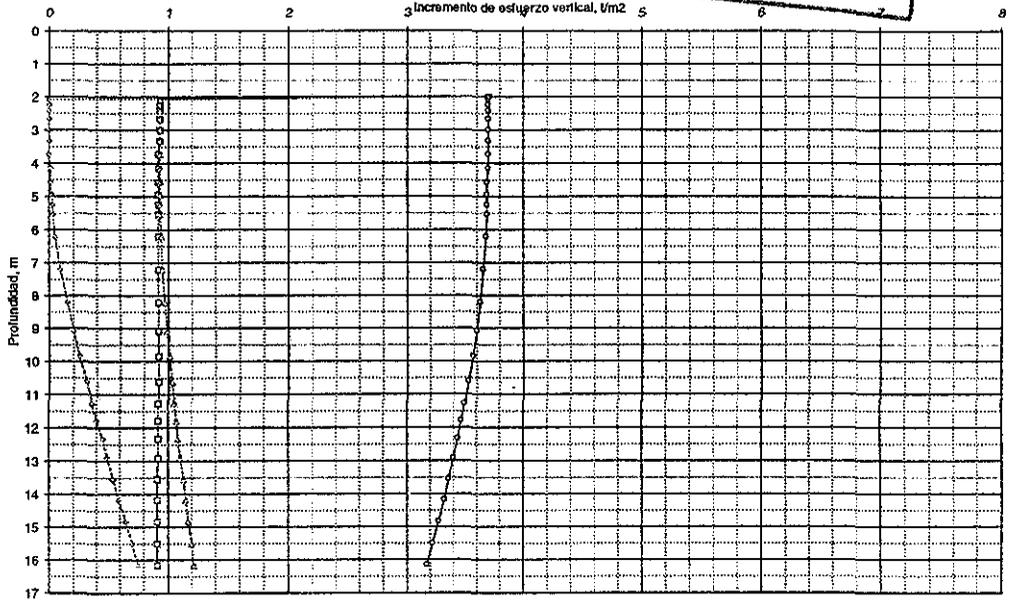


Figura 120

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



$D_1 = 2.0 \text{ m}$

40 m

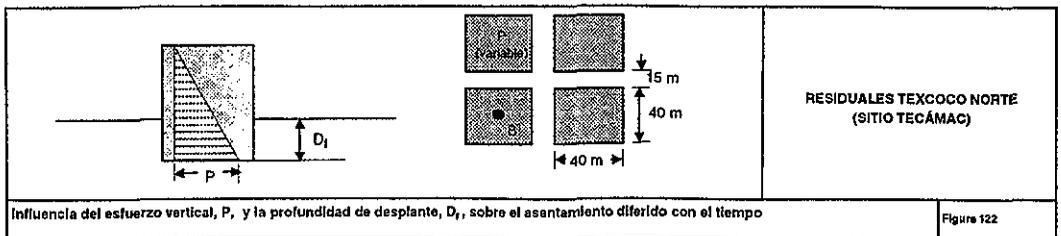
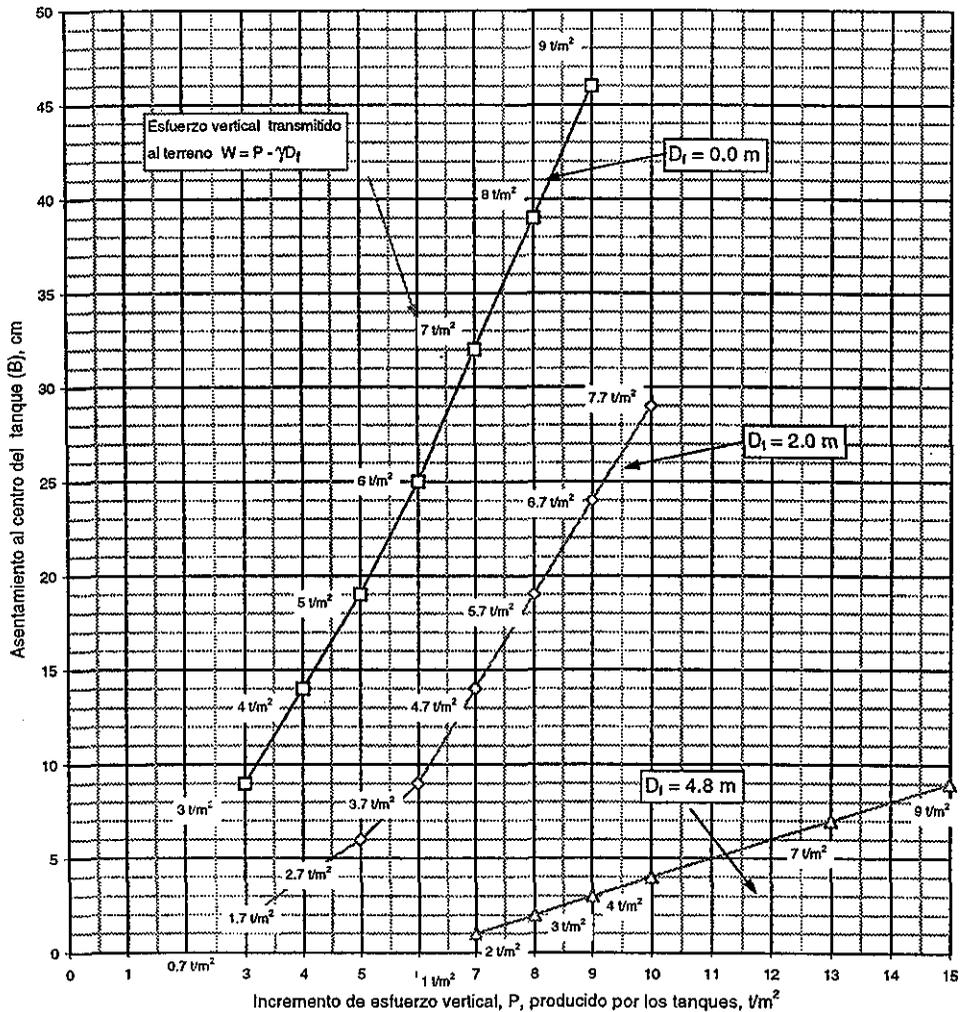
15 m

40 m

PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS
RESIDUALES TEXCOCO
NORTE
(SITO TECÁMAC)

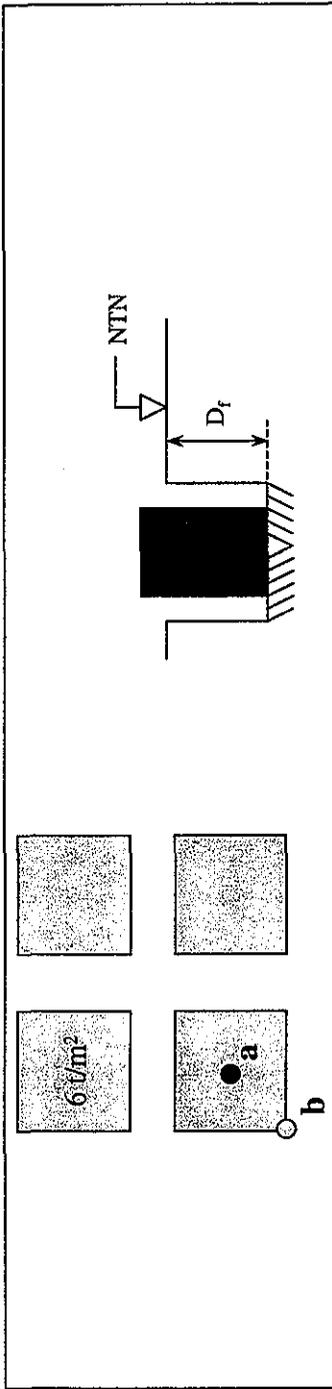
Distribución de esfuerzos y asentamientos diferidos con el tiempo, cimentación superficial flexible, $D_1 = 2 \text{ m}$ (modelo SM-6)

Figura 121



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



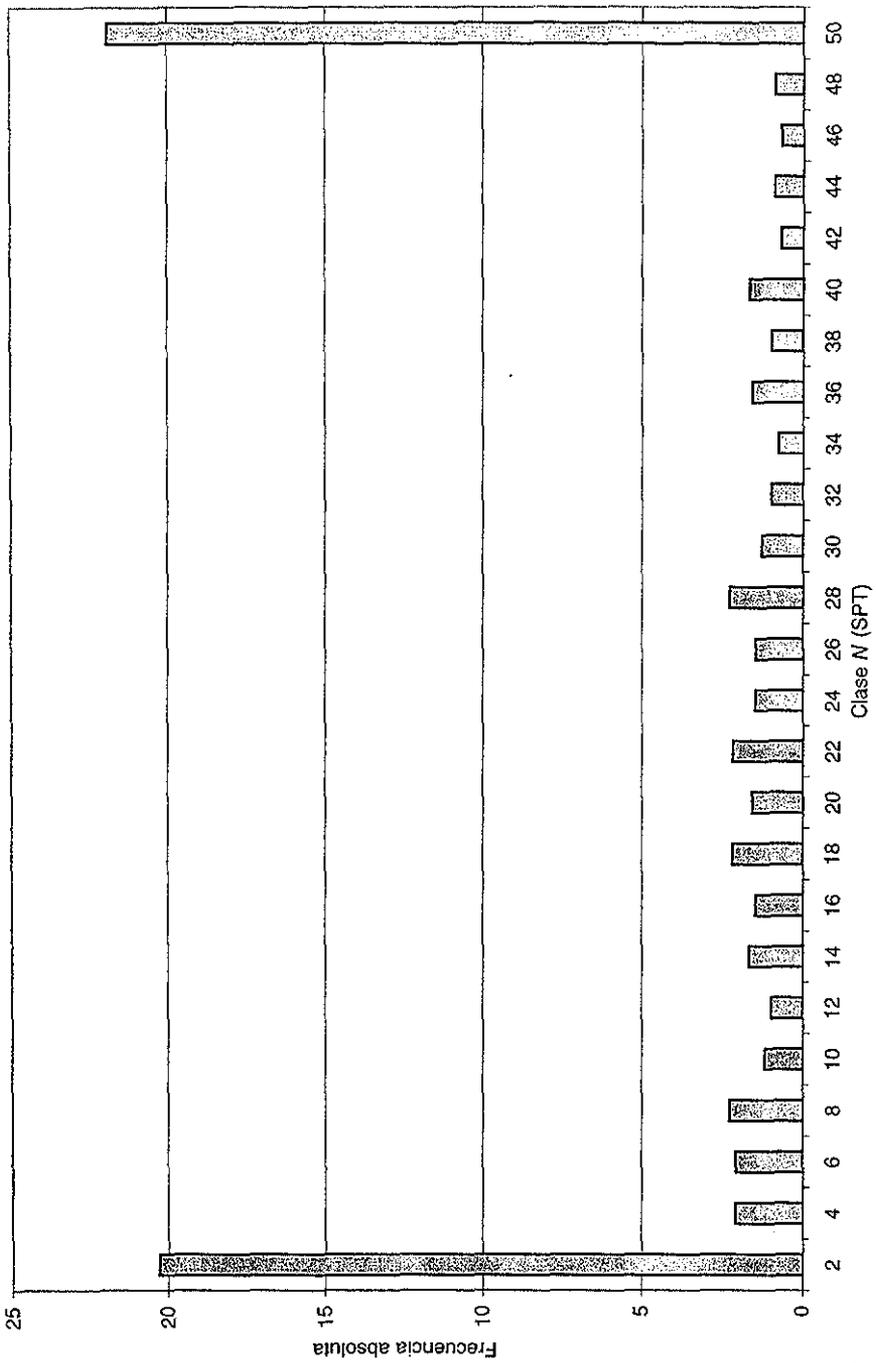
Profundidad de desplante, D_f	Sitio	δ_a cm	δ_b cm	ΔH cm	ϕ grados
0.0	Sosa Texcoco	161	48	113	2.3°
	Tecámac	25	4	21	0.4°
2.0	Sosa Texcoco	94	31	63	1.3°
	Tecámac	9	2	7	0.2°

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXCOCO NORTE
 Figura 123. Comparación entre los asentamientos diferidos a largo plazo, inducidos por el arreglo de tanques, sitios "Sosa Texcoco" y "Tecámac" (Tecámac)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TECAMAC.

Fig 124 Histograma de la población global de la prueba de penetración estándar N (SPT)



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tendencia penetración estándar. SM-2 Tecámac

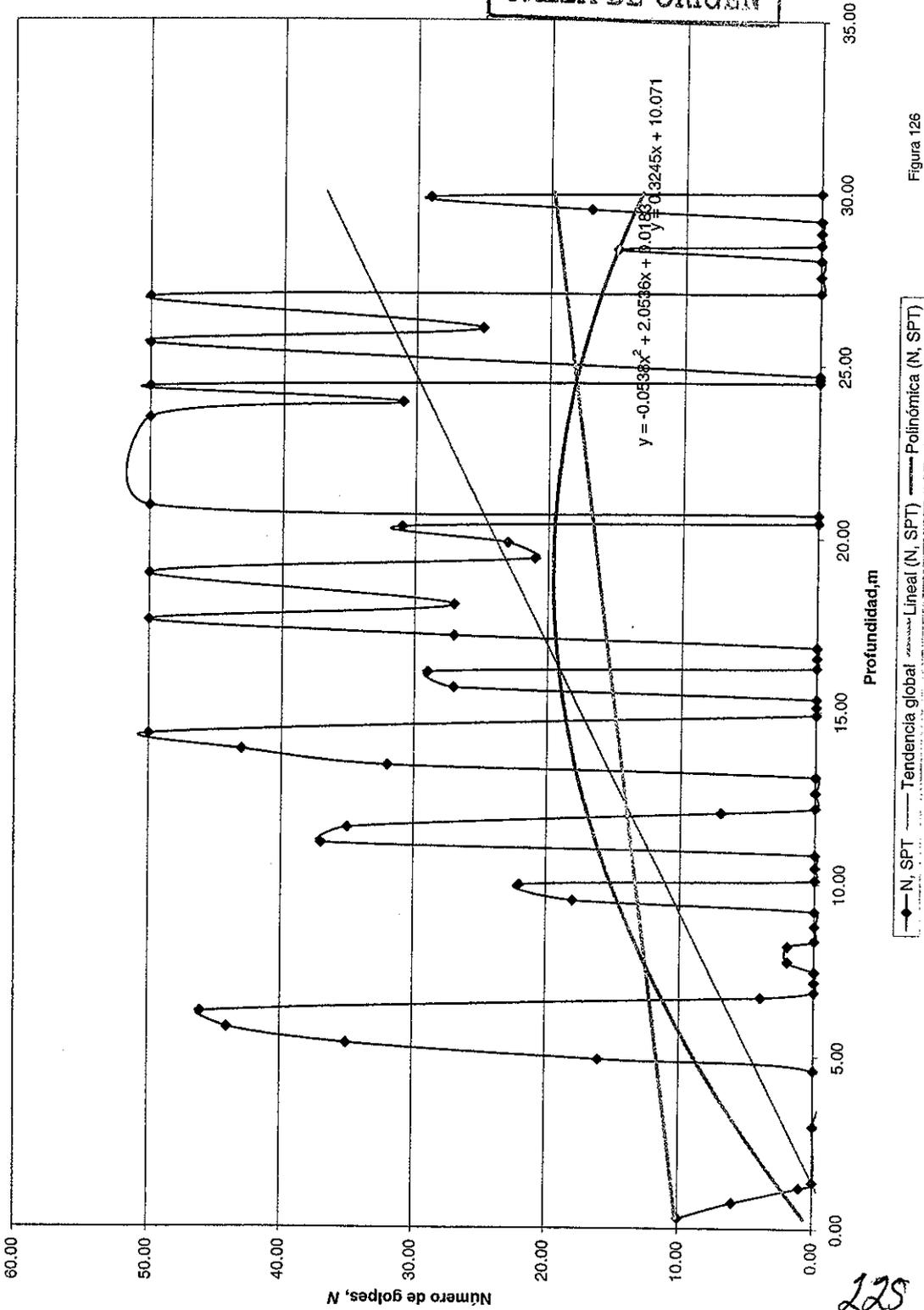
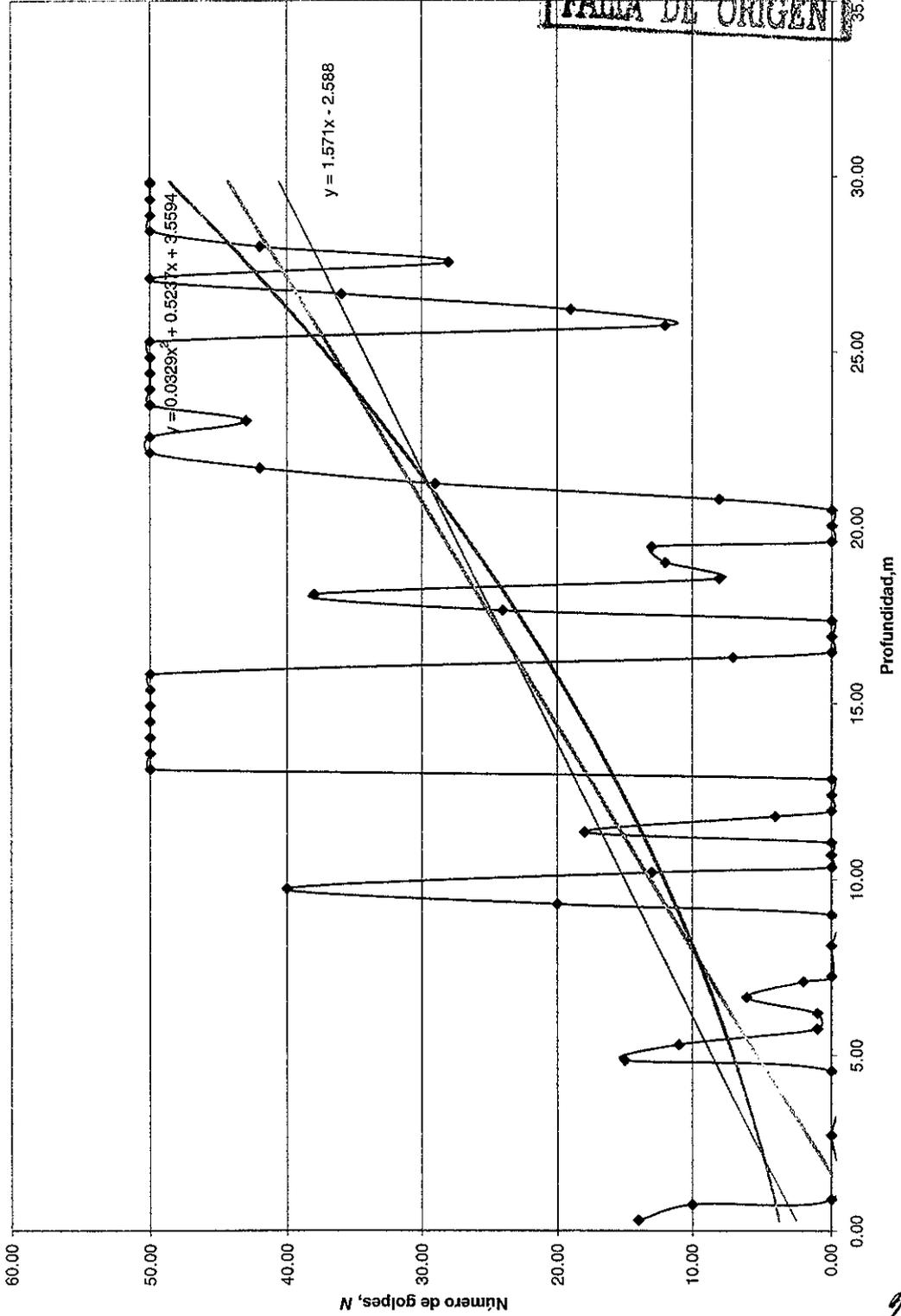


Figura 126

225

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



—●— N, SPT ——— Tendencia global (N, SPT) - - - - - Tendencia Lineal (N, SPT) - - - - - Tendencia Polinómica (N, SPT)

Figura 127

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tendencia penetración estándar. SM-4 Tecámac

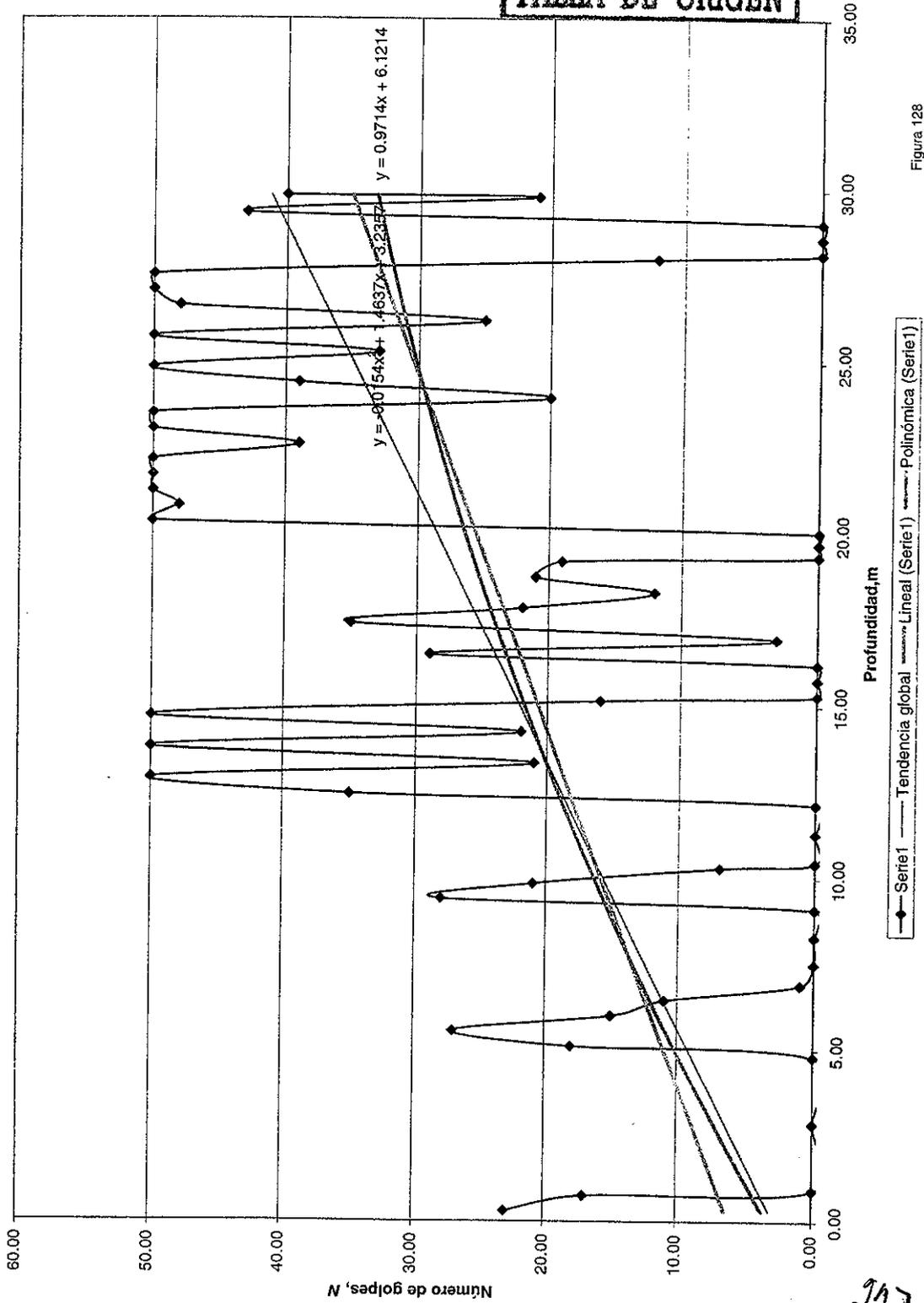


Figura 128

297

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tendencia penetración estándar. SM-5 Tecámac

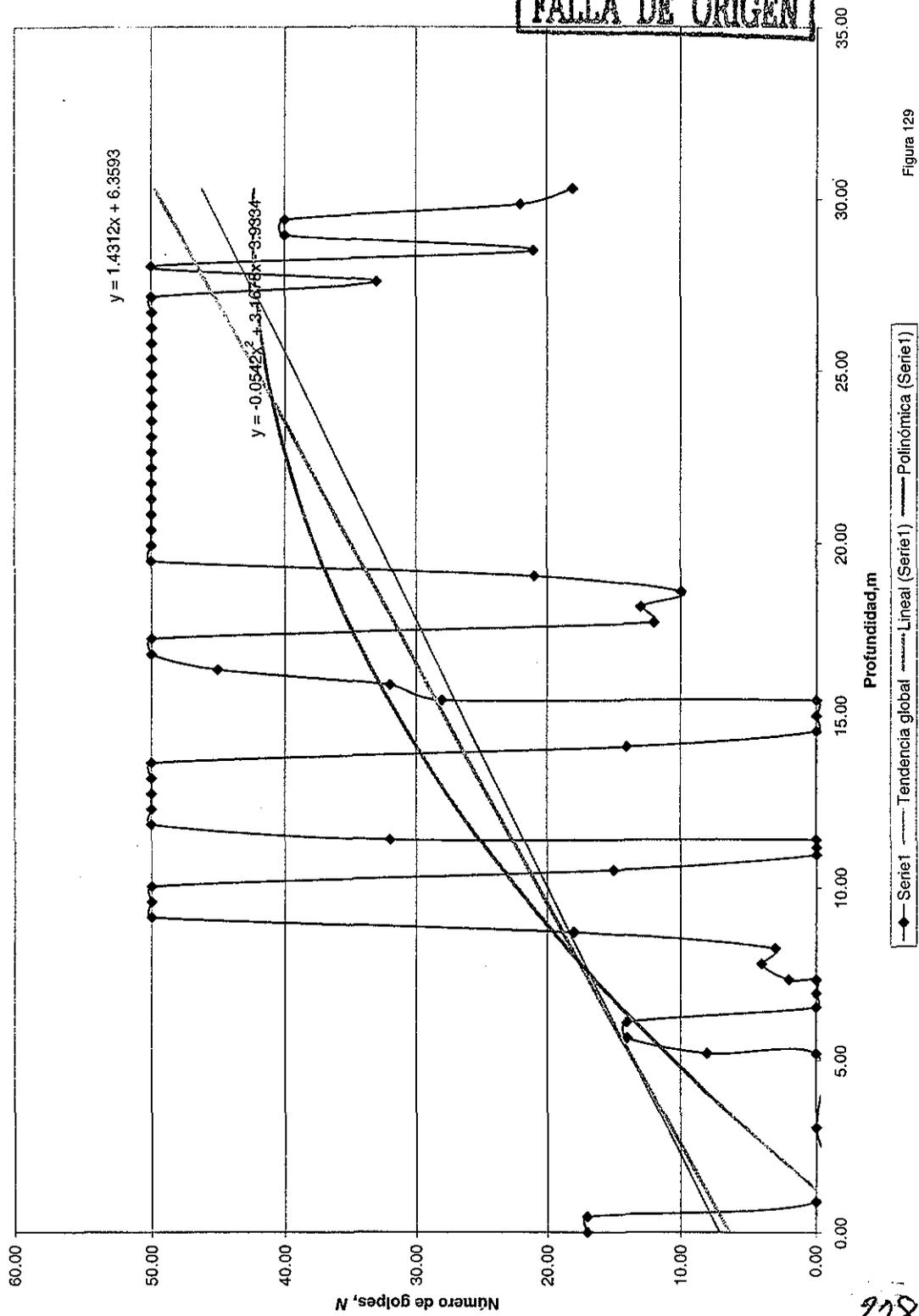


Figura 129

828

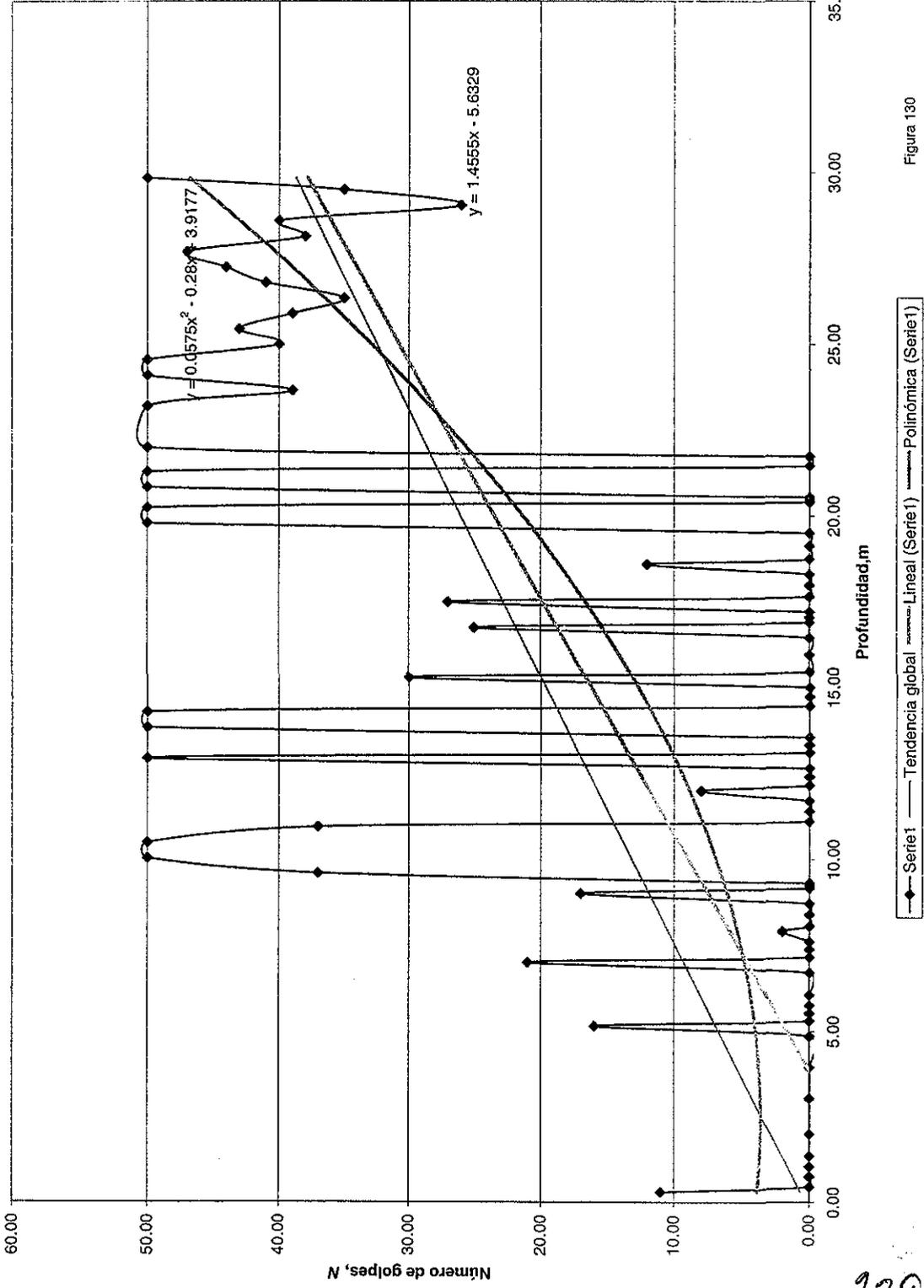


Figura 130

Tendencia penetración estándar.SPE-1 Tecámac

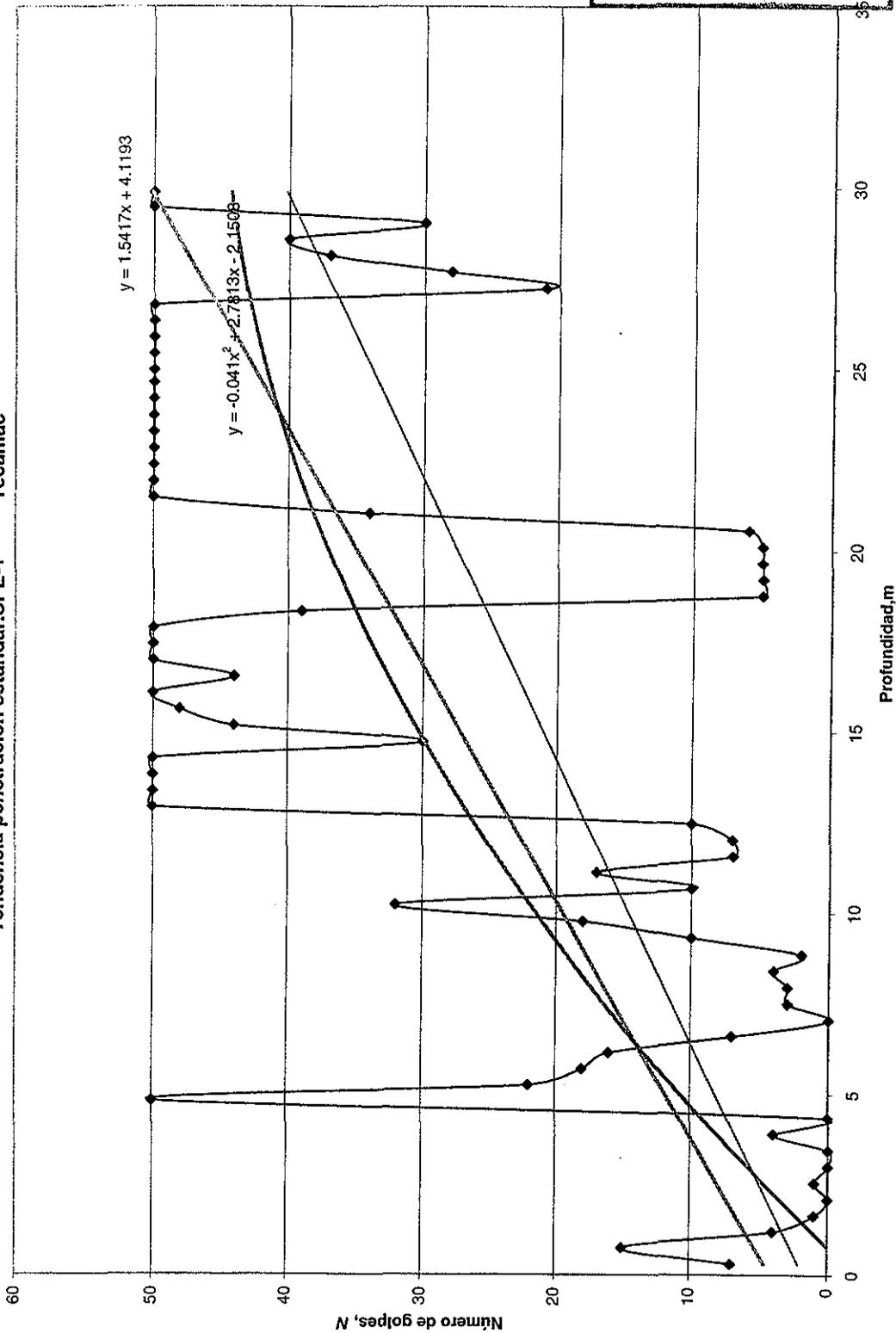


Figura 131

N, SPT
 Tendencia global
 Lineal (N, SPT)
 Polinómica (N, SPT)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tendencia penetración estándar.SPE-2 Tecámac

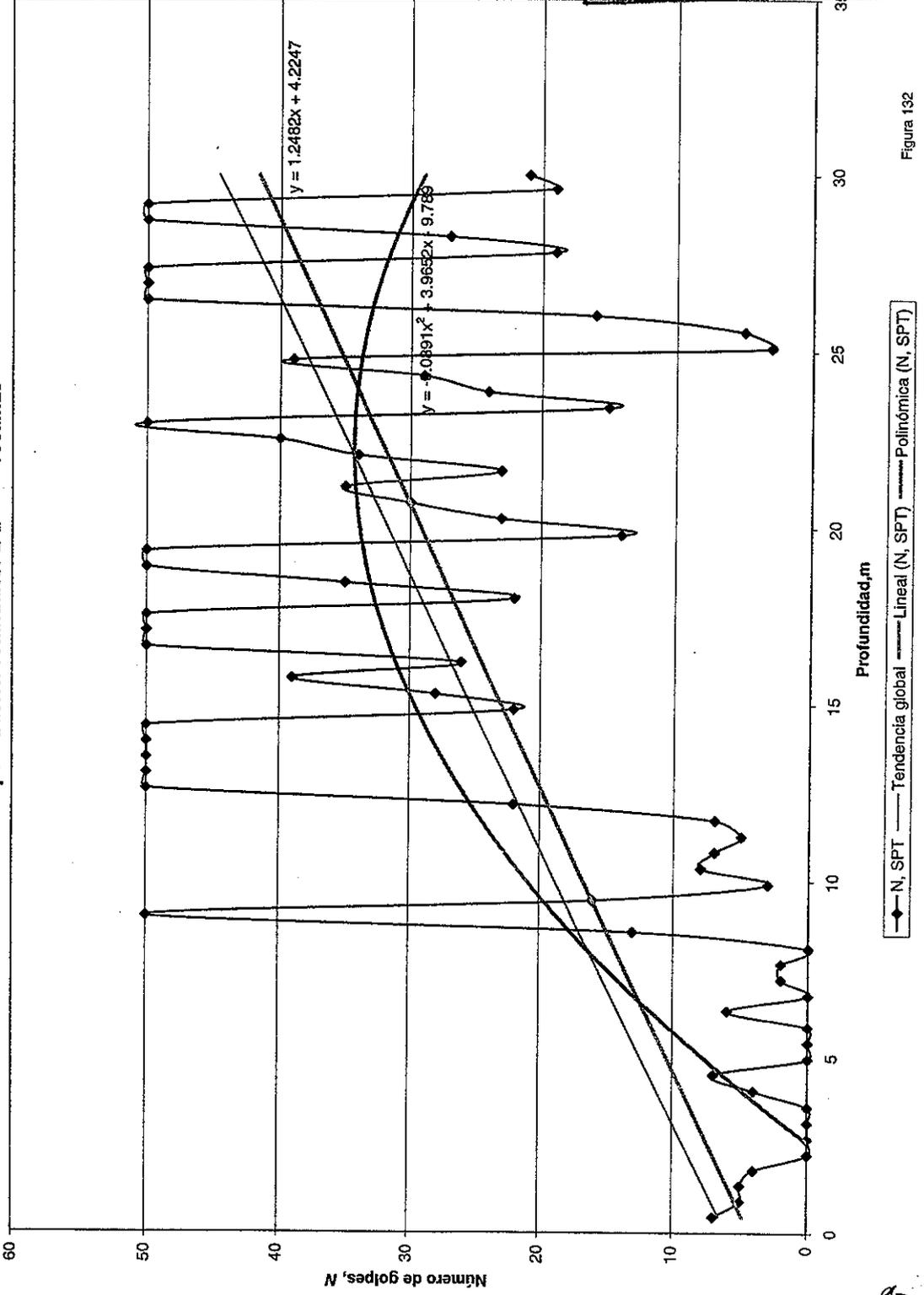


Figura 132

N, SPT
 Tendencia global
 Lineal (N, SPT)
 Polinómica (N, SPT)

231

Tendencia penetración estándar.SPE-3 Tecámac

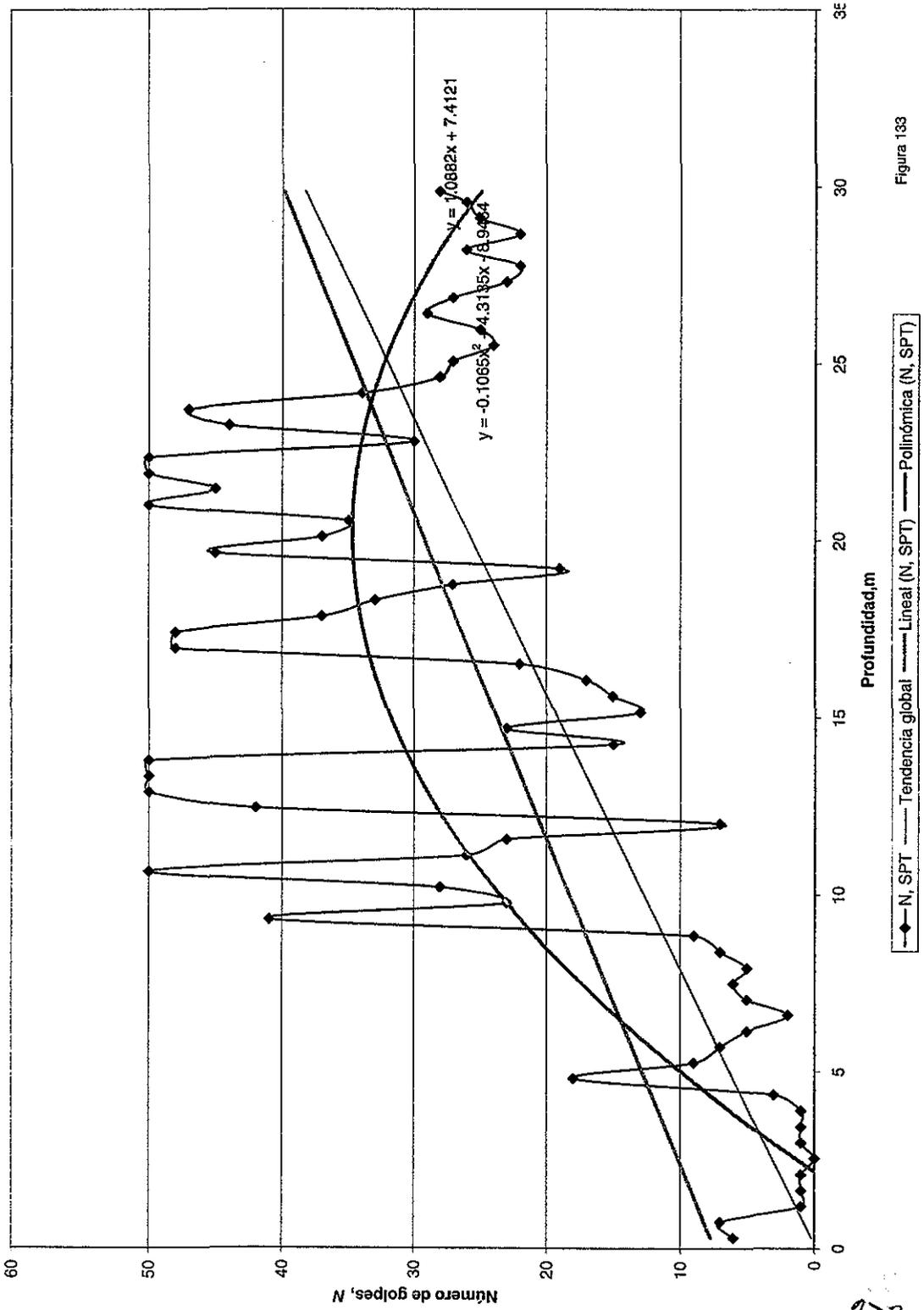


Figura 133

Tendencia penetración estándar.SPE-4 Tecámac

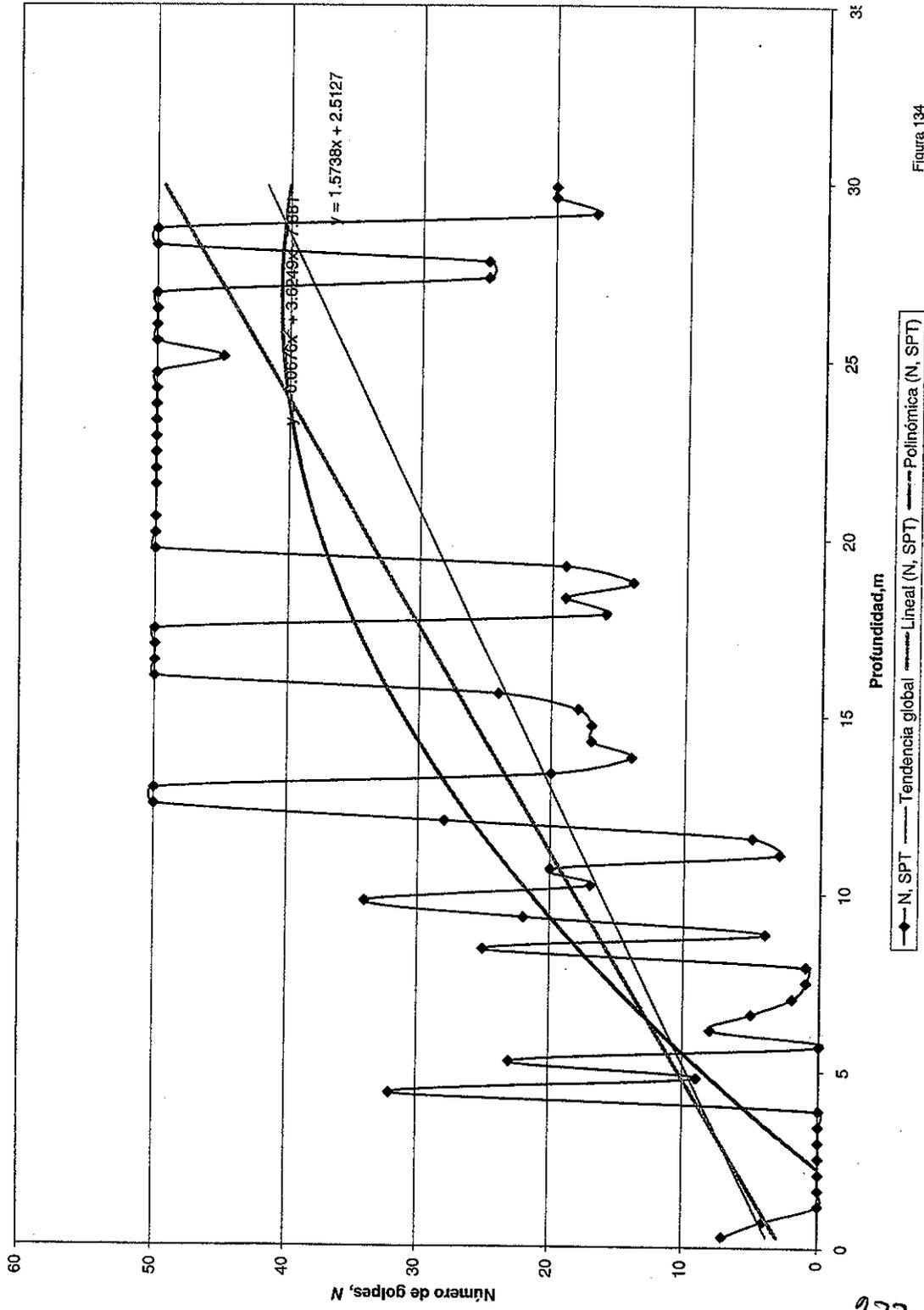
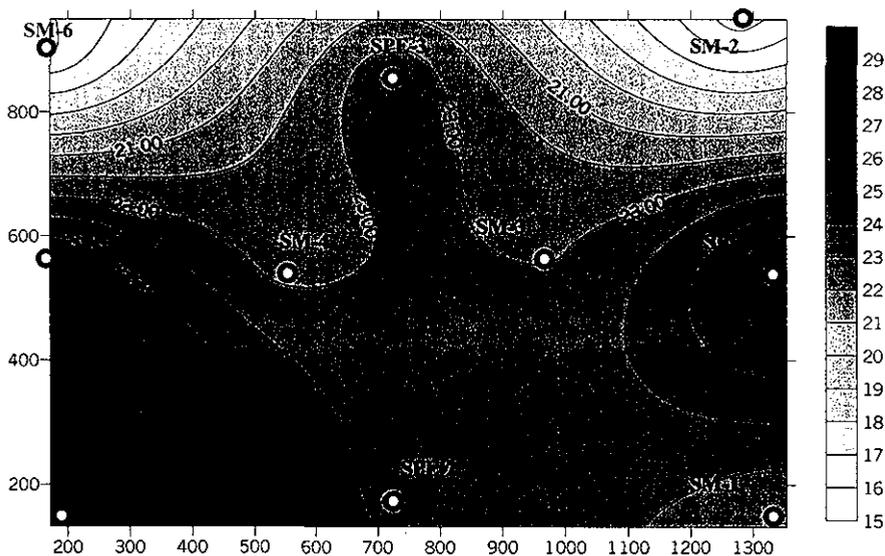


Figura 134

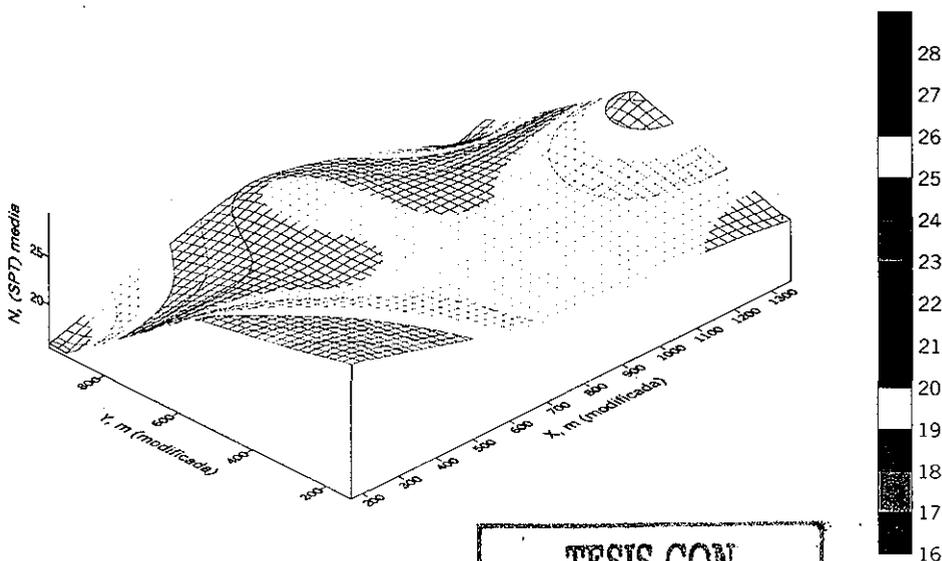
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TECAMAC

Fig 135 Tendencia global de la media de la prueba de penetración estándar, N (SPT)

CONTORNO EN PLANTA



DISTRIBUCIÓN TRIDIMENSIONAL

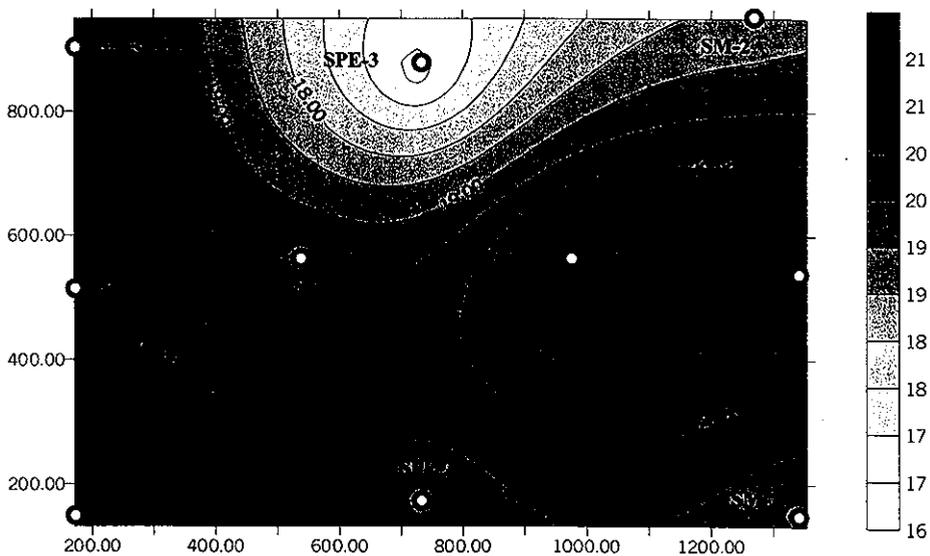


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

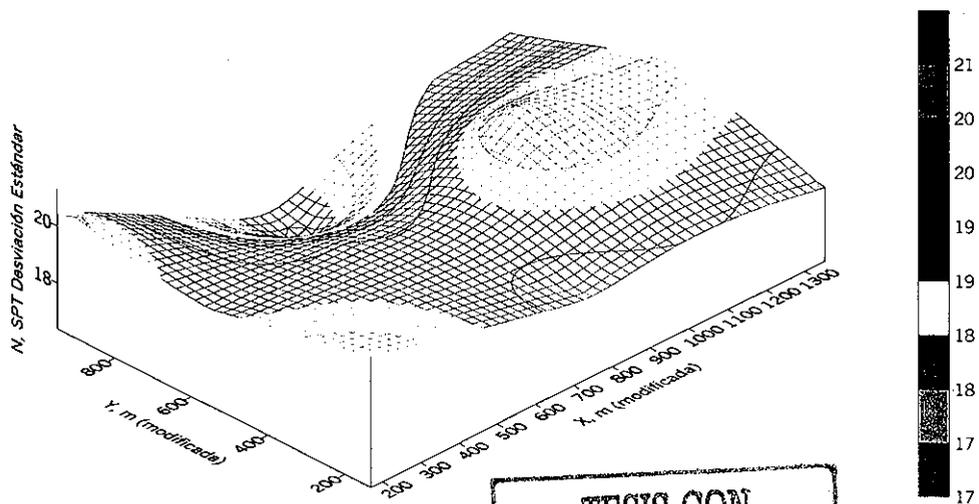
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TECAMAC

Fig 136 Tendencia global de la desviación estándar de la prueba de penetración estándar, N (SPT)

CONTORNO EN PLANTA



DISTRIBUCIÓN TRIDIMENSIONAL

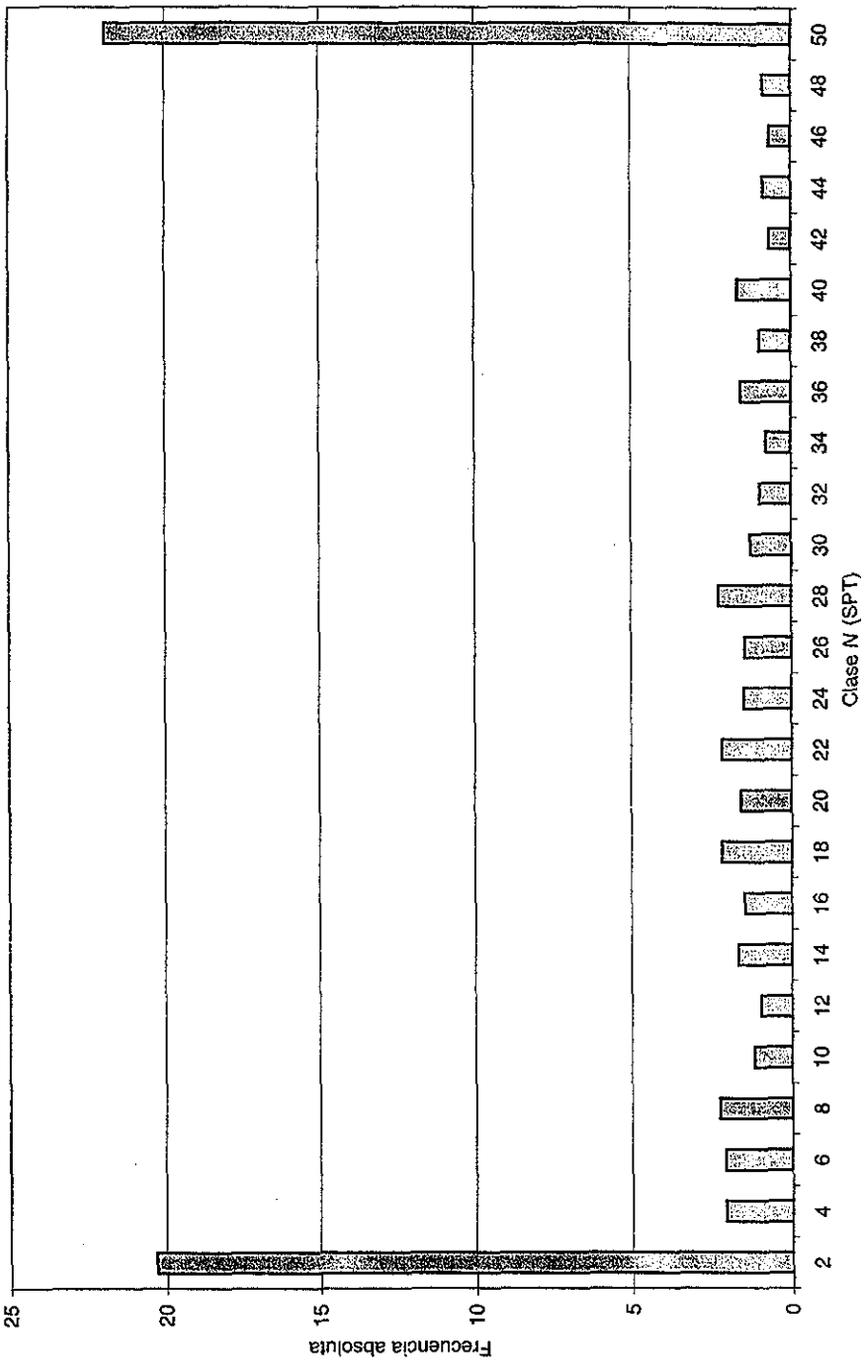


TESIS CON FALLA DE ORIGEN

235

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TECAMAC.

Fig 137 Histograma de la población global de la prueba de penetración estándar N (SPT)



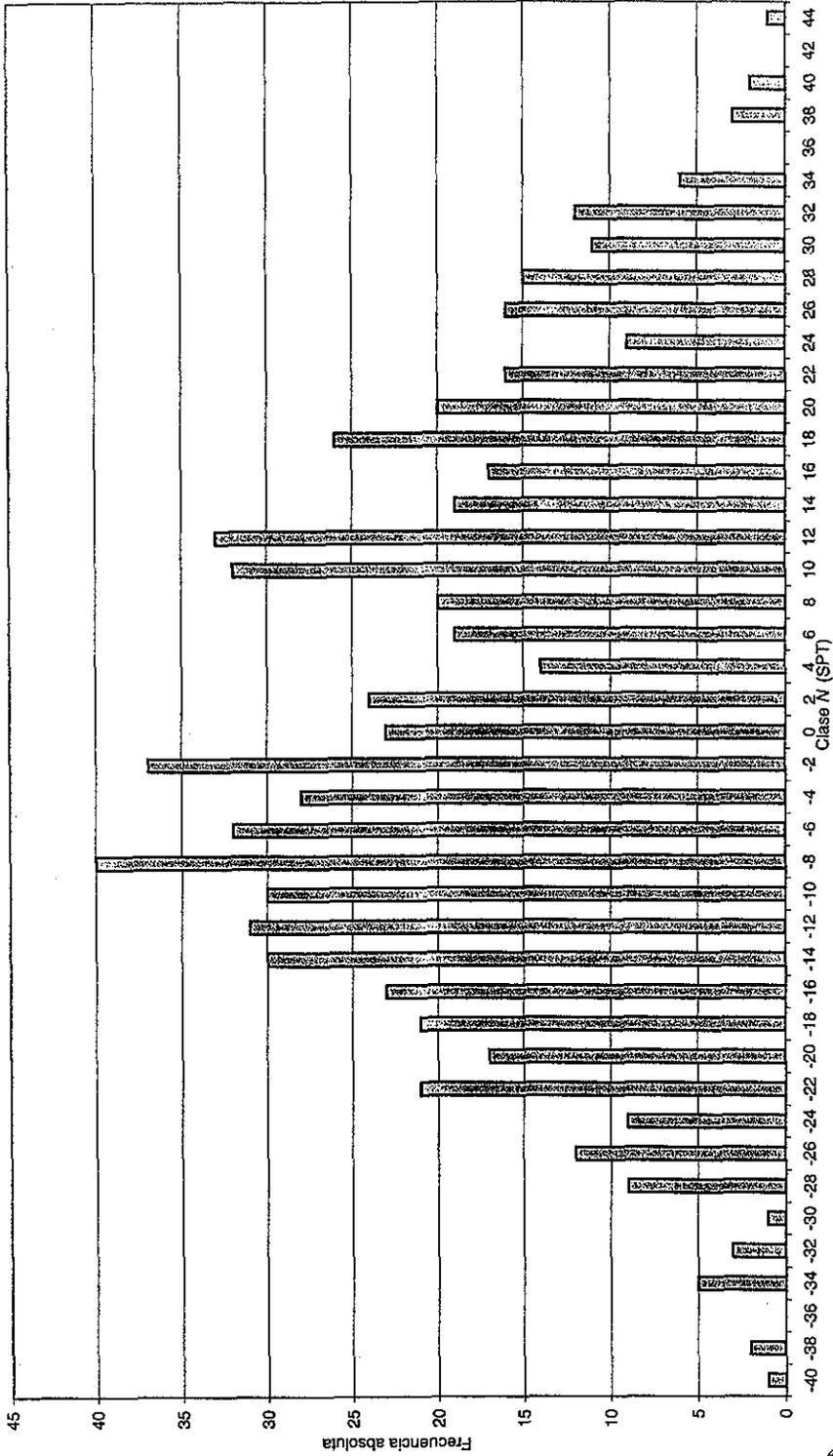
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TECAMAC.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig 138 Histograma de la población global corregida (sin la tendencia) de la prueba de penetración estándar N (SPT)



137

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, N SPT, SM-1, TECÁMAC

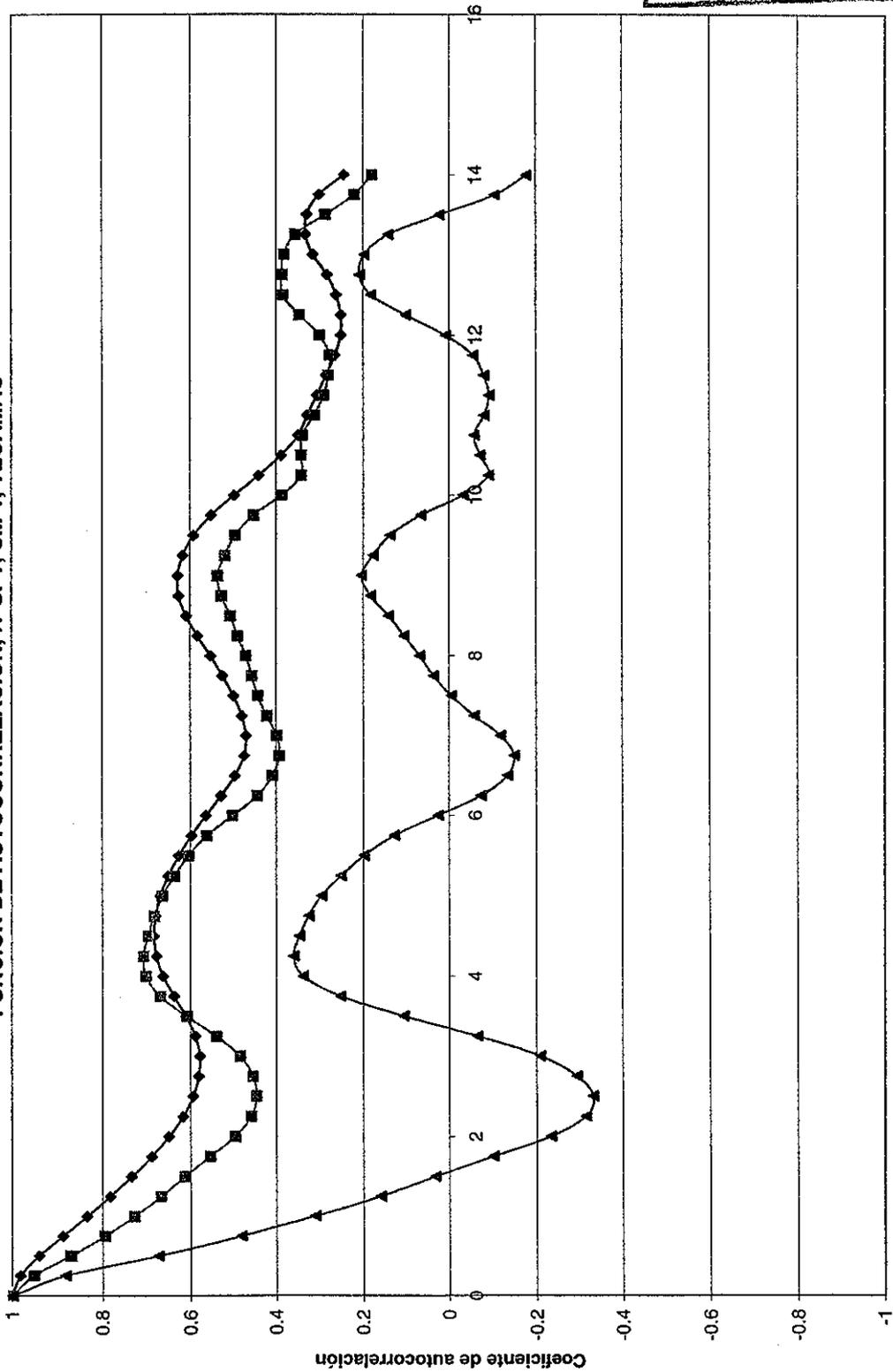
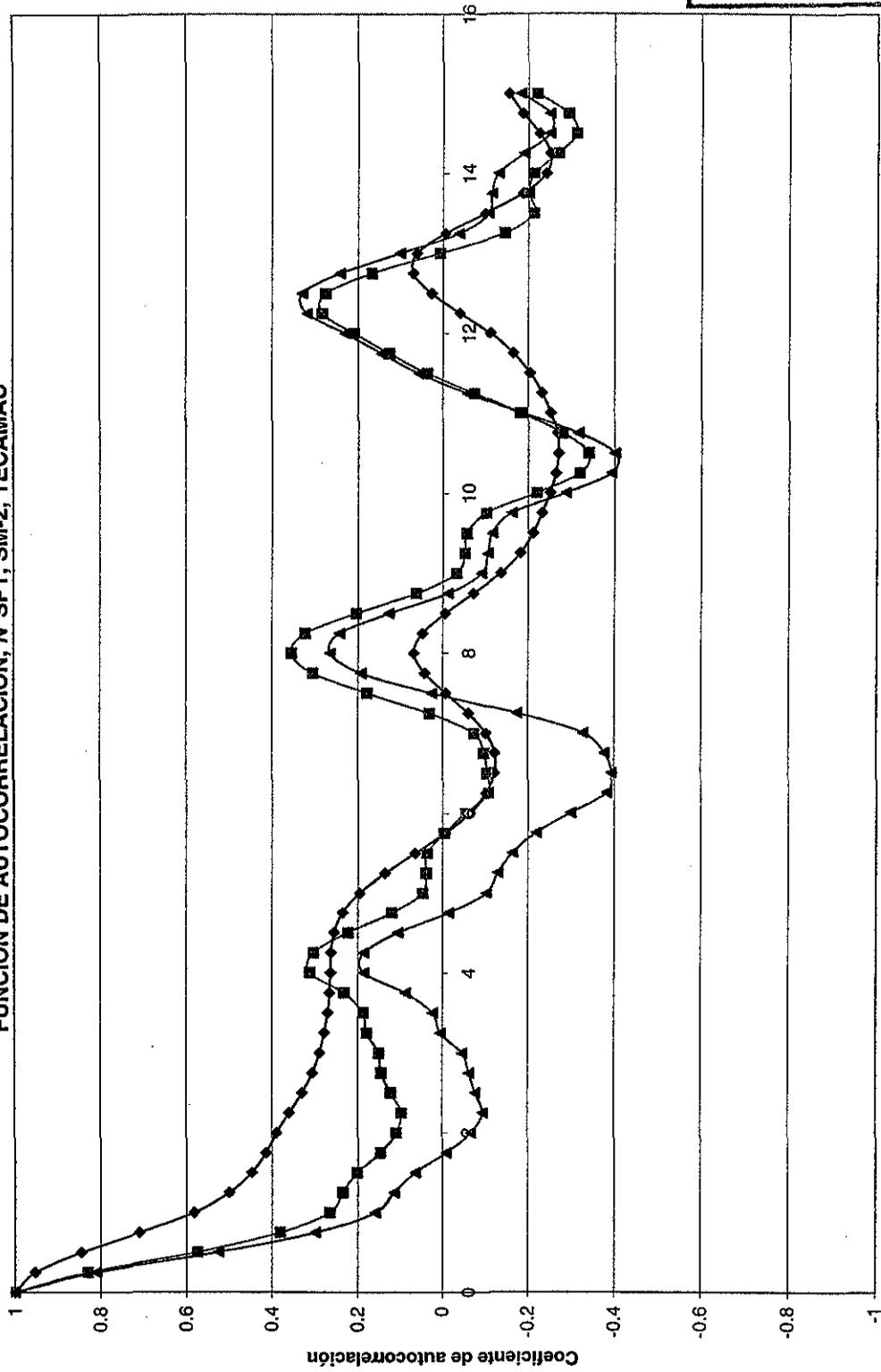


Figura 139

Distancia, m
 ◆ Interpolación a cada metro
 ■ Interpolación a cada 0.25 m
 ▲ Interpolación a cada 0.25 m sin tendencia

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, N SPT, SM-2, TECÁMAC

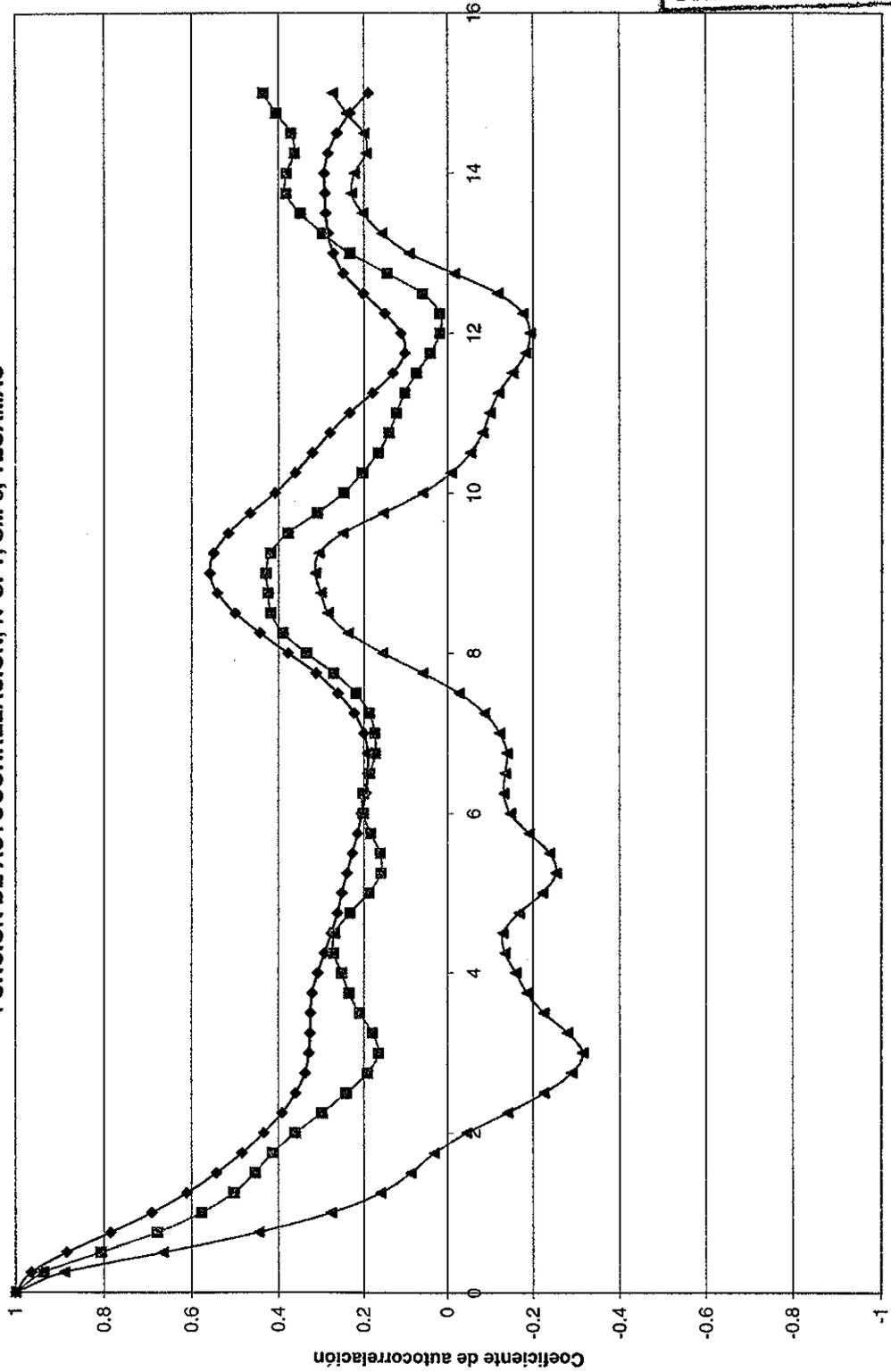


Distancia, m

—●— Interpolación a cada metro —■— Interpolación a cada 0.25 m —▲— Interpolación a cada 0.25 m sin tendencia

Figura 140

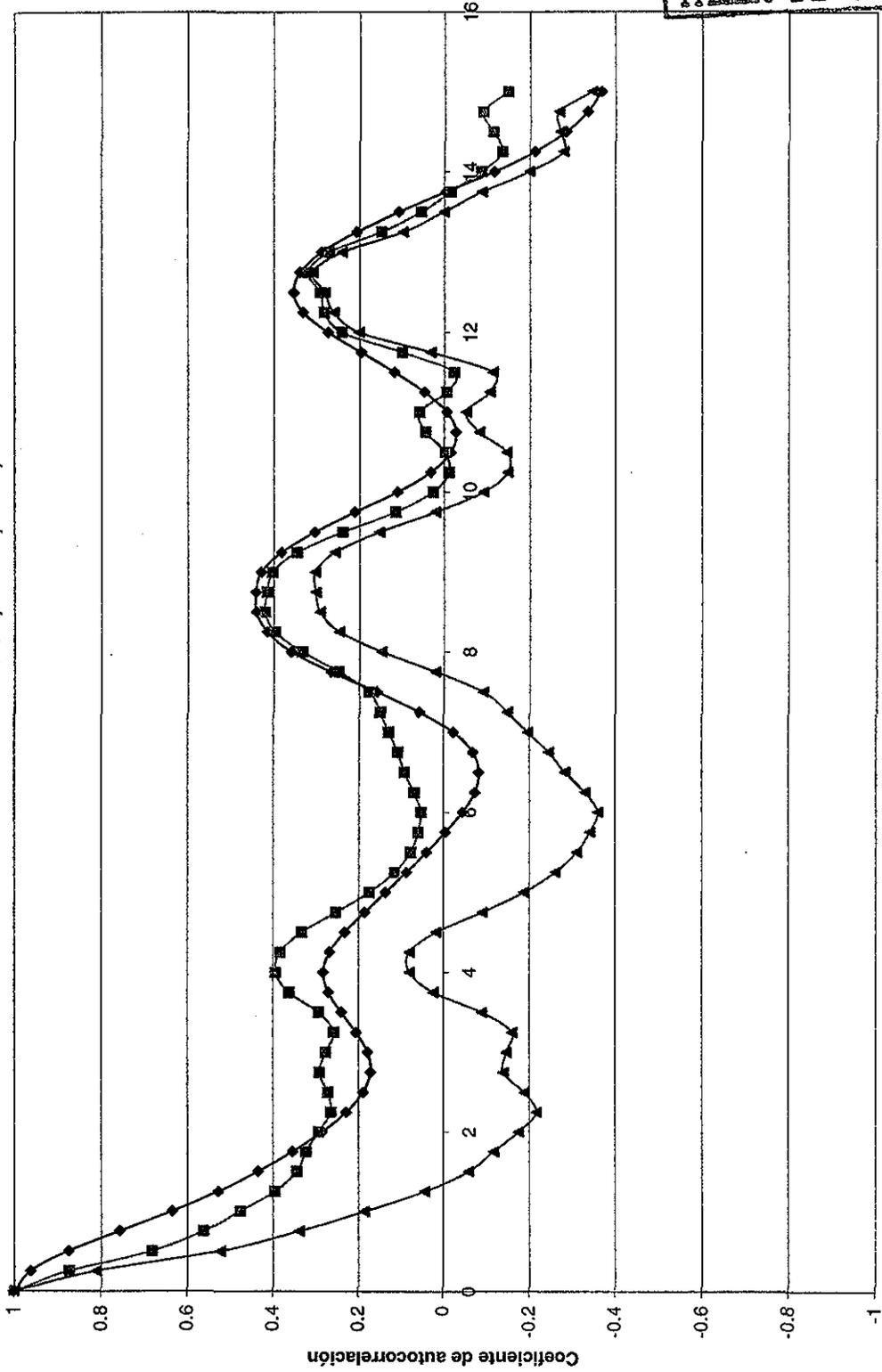
FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, N SPT, SM-3, TECÁMAC



Distancia, m
—◆— Interpolación a cada metro -■- Interpolación a cada 0.25 m -▲- Interpolación a cada 0.25 m sin tendencia

Figura 141

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, N SPT, SM-4, TECÁMAC



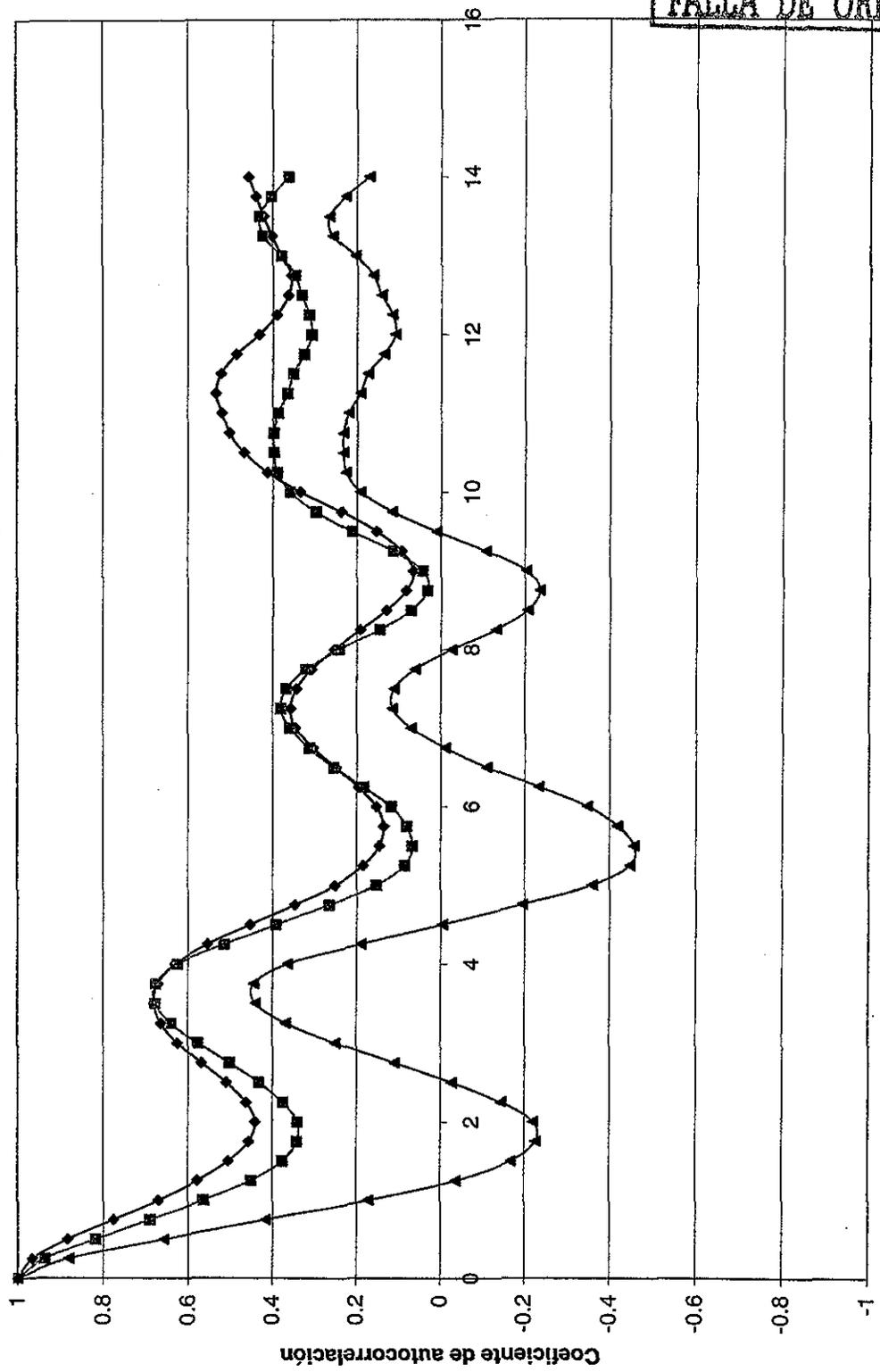
Distancia, m

—◆— Interpolación a cada metro —▲— Interpolación a cada 0.25 m

Figura 142

241

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, N SPT, SM-5, TECÁMAC

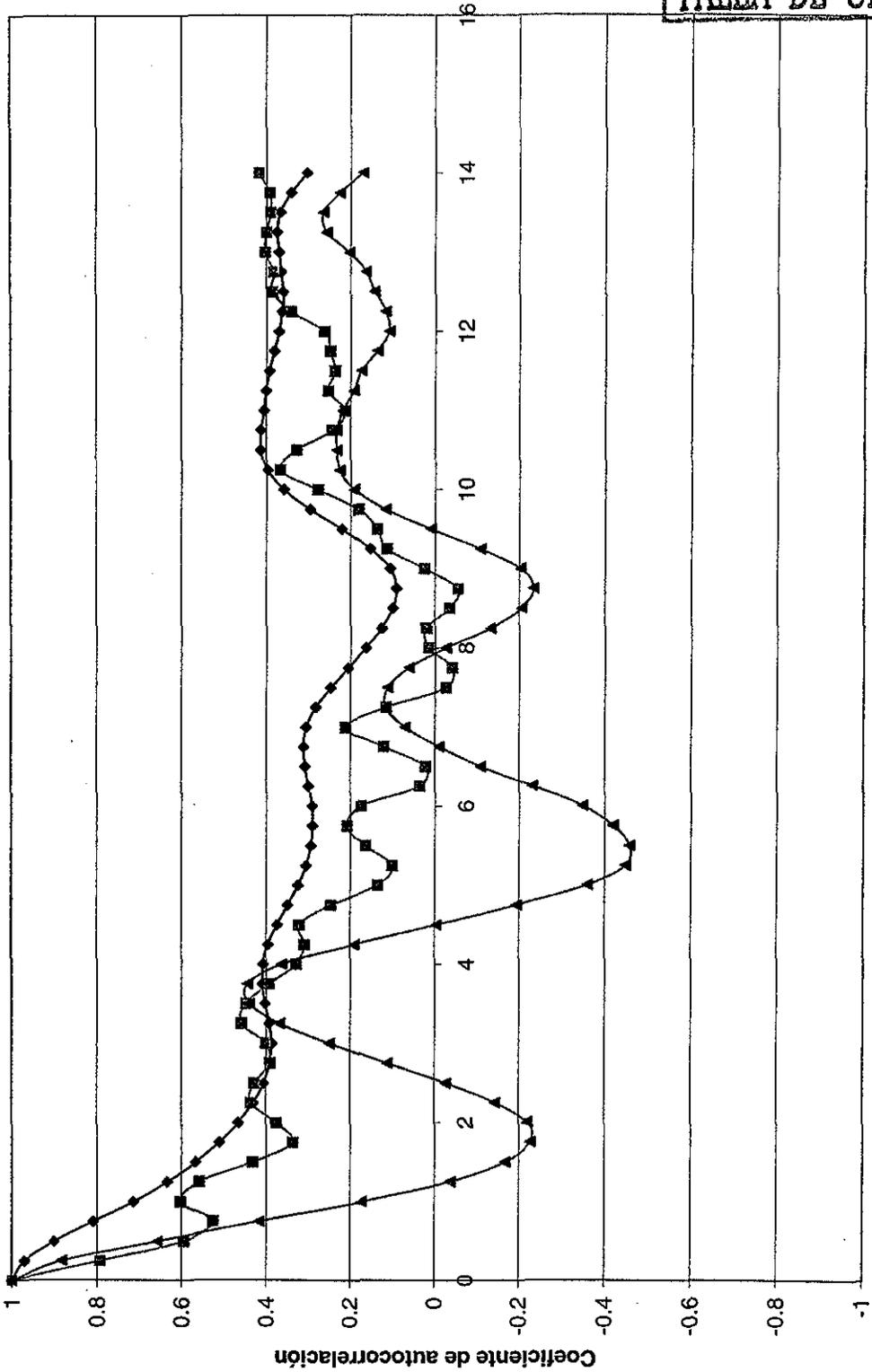


Distancia, m

◆ Interpolación a cada metro ■ Interpolación a cada 0.25 m ▲ Interpolación a cada 0.25 m sin tendencia

Figura 143

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, N SPT, SM-6, TECÁMAC

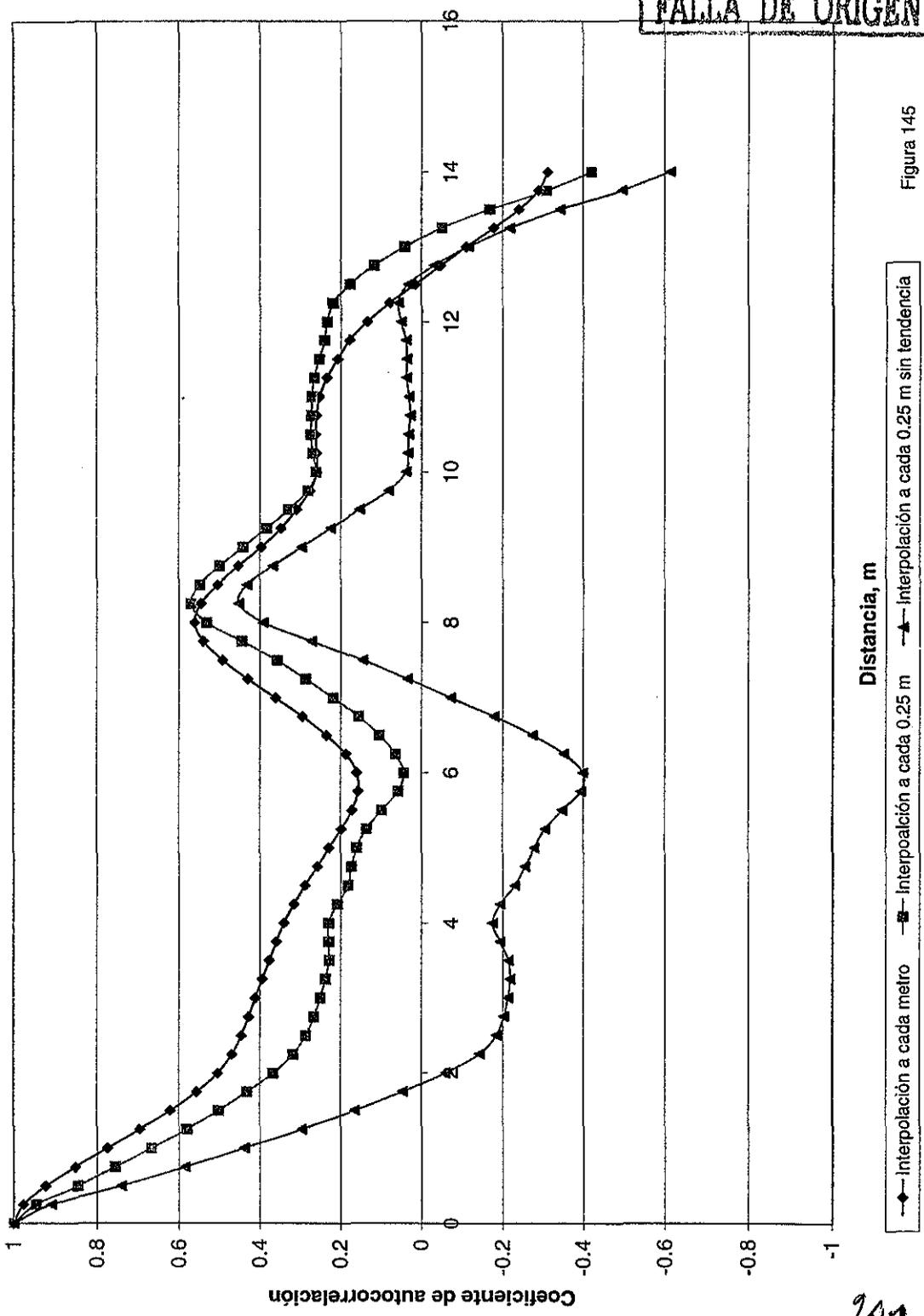


Distancia, m

◆ Interpolación a cada metro ■ Interpolación a cada 0.25 m ▲ Interpolación a cada 0.25 m sin tendencia

Figura 144

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, N SPT, SPE-1, TECÁMAC

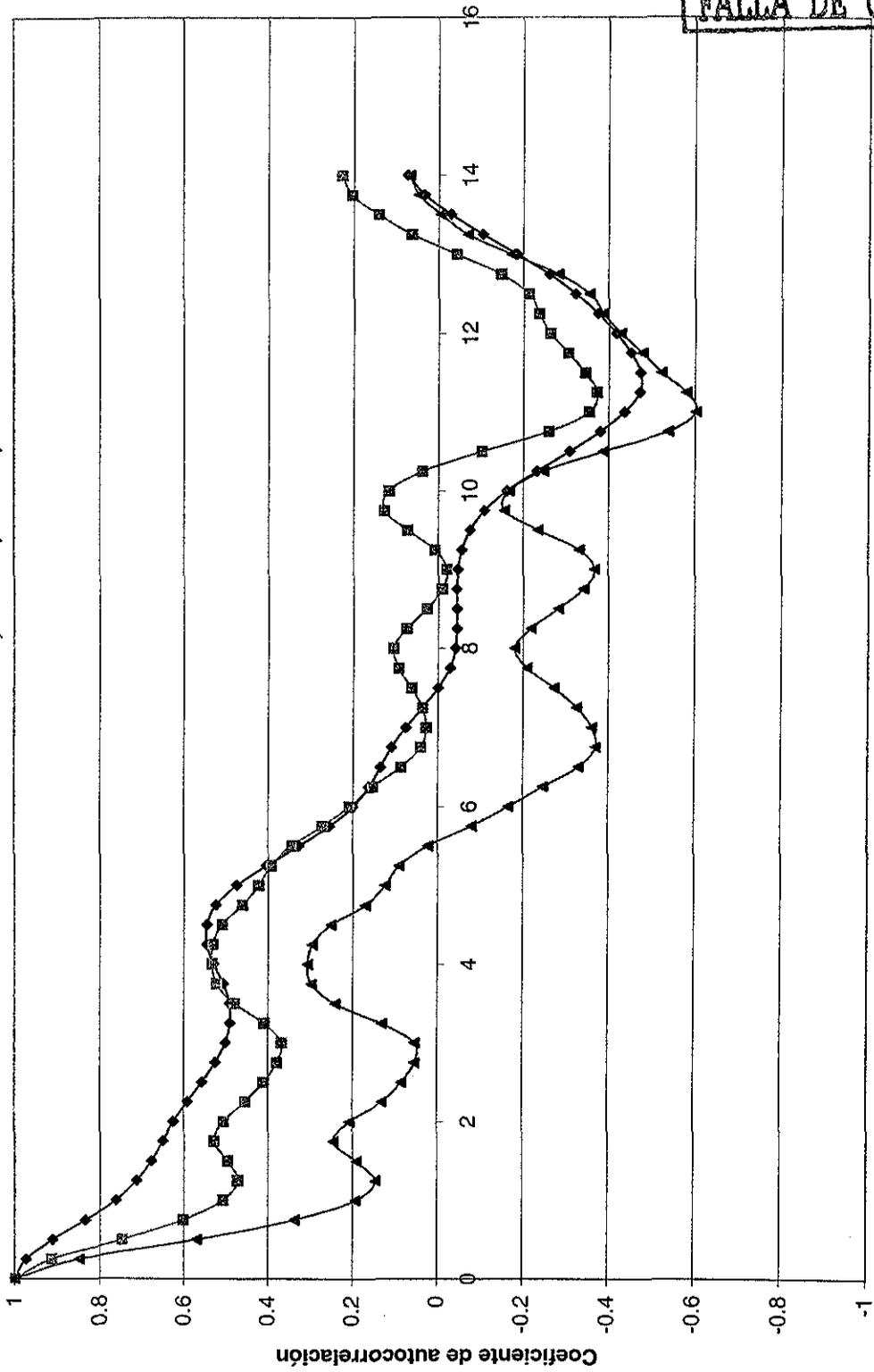


Distancia, m

◆ Interpolación a cada metro ■ Interpolación a cada 0.25 m ▲ Interpolación a cada 0.25 m sin tendencia

Figura 145

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, N SPT, SPE-2, TECÁMAC

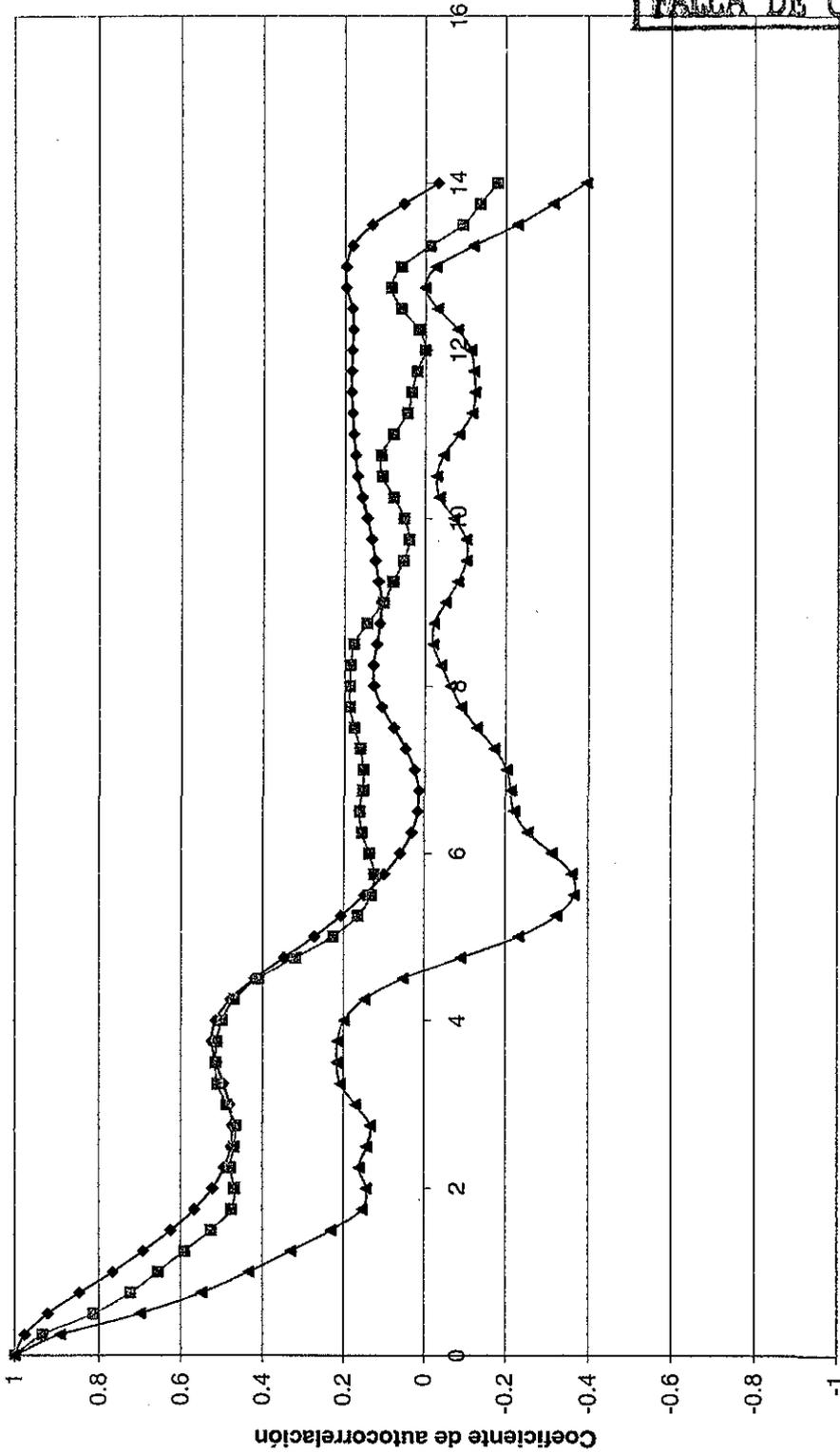


Distancia, m

◆ Interpolación a cada metro ■ Interpolación a cada 0.25 m ▲ Interpolación a cada 0.25 m sin tendencia

Figura 146

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, N SPT, SPE-3, TECÁMAC



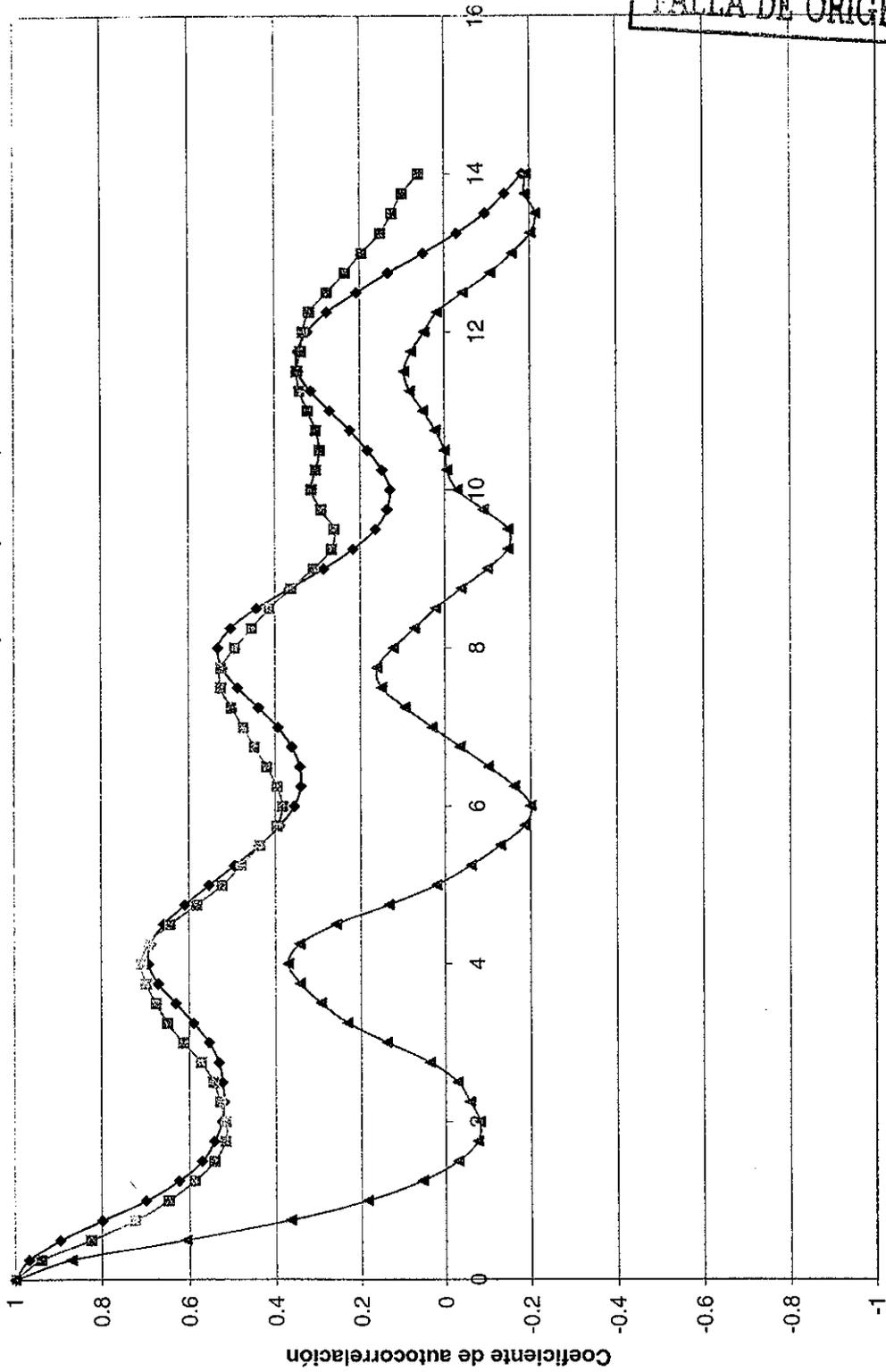
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Distancia, m

◆ Interpolación a cada metro ◻ Interpolación a cada 0.25 m ▲ Interpolación a cada 0.25 m sin tendencia

Figura 147

FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN, N SPT, SPE-4, TECÁMAC



Distancia, m

Figura 148

◆ Interpolación a cada metro ▲ Interpolación a cada 0.25 m

977

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TECAMAC.

Fig 149 Función "modelo" de la autocorrelación vertical de la prueba de penetración estándar N (SPT)

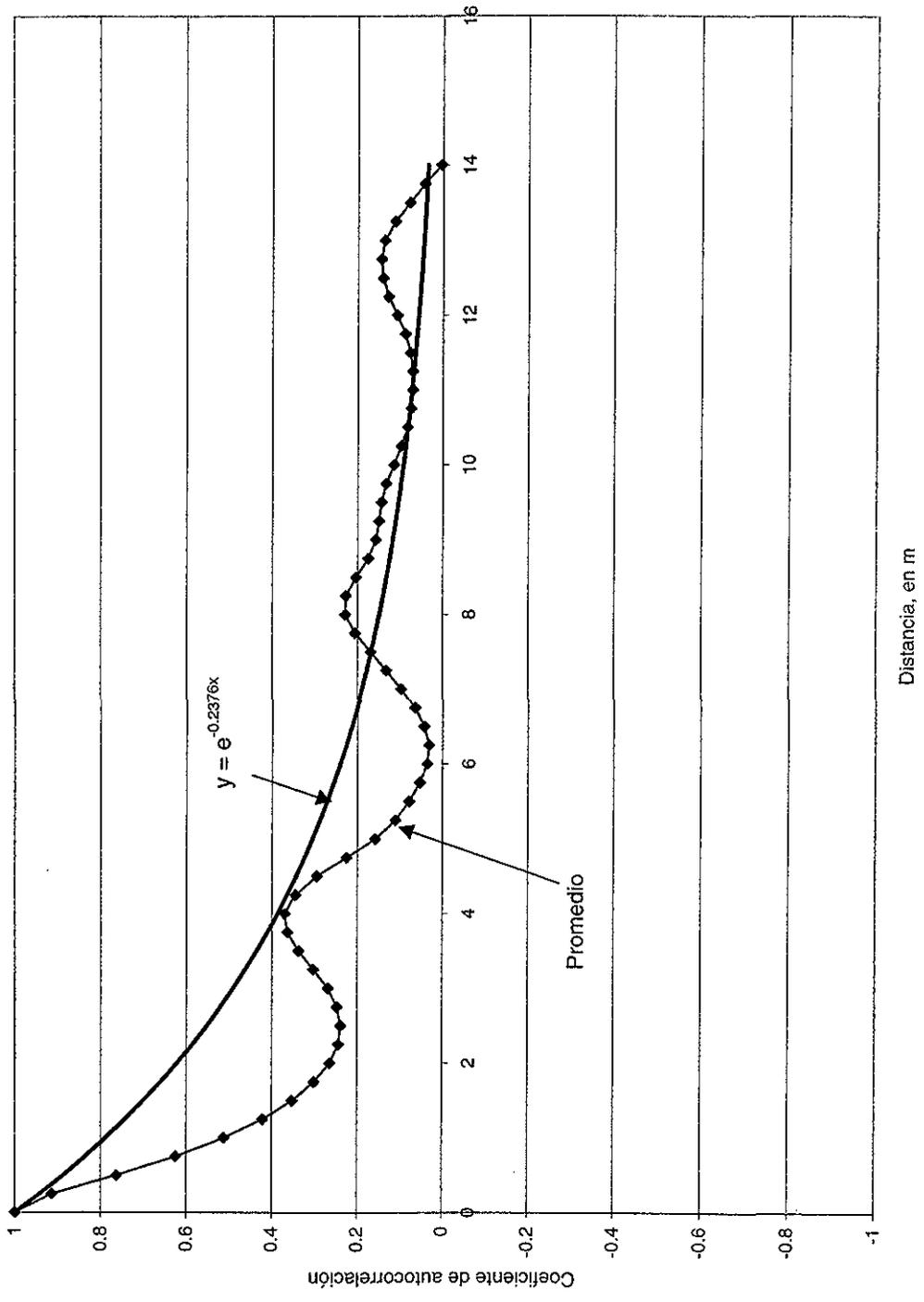
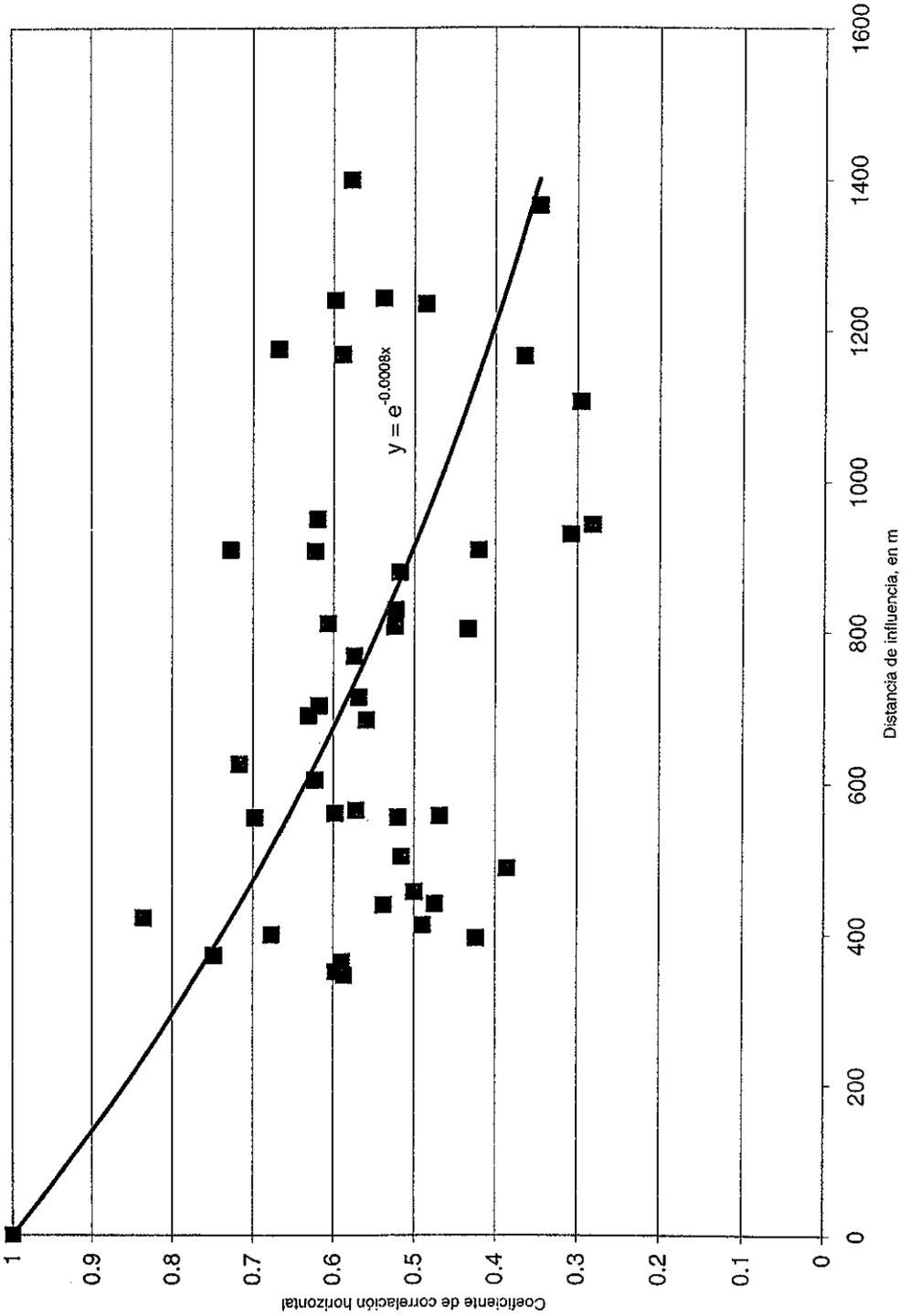


Fig 150 Función "modelo" de la correlación horizontal de la prueba de penetración estándar N (SPT)



Rosa de coeficientes de correlación cruzada
SM-1

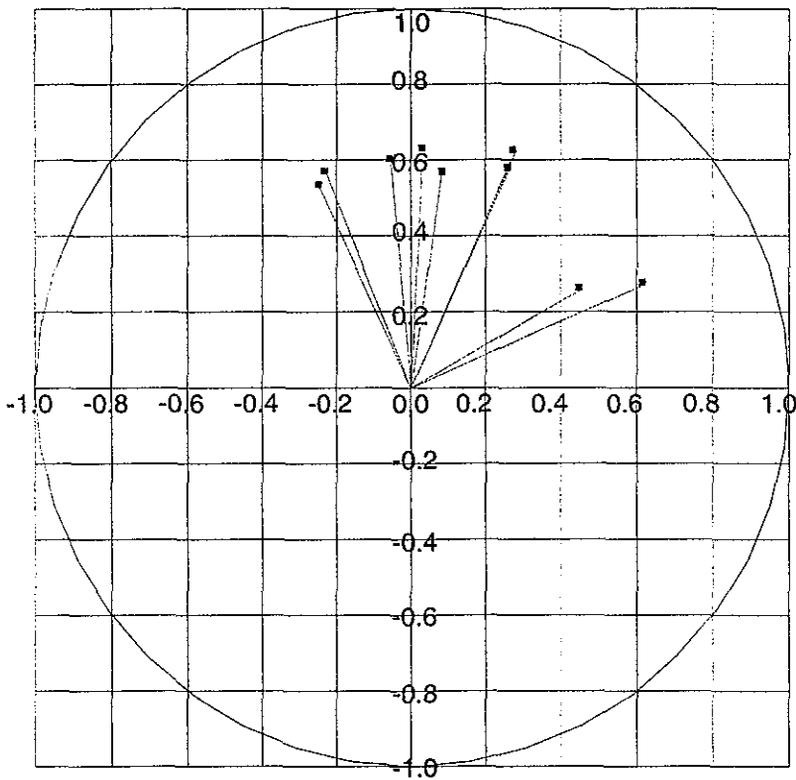


Figura 151. Rosa de correlaciones del sondeo SM-1 (N SPT) contra los otros nueve (Tecámac)

Rosa de coeficientes de correlación cruzada
SM-2

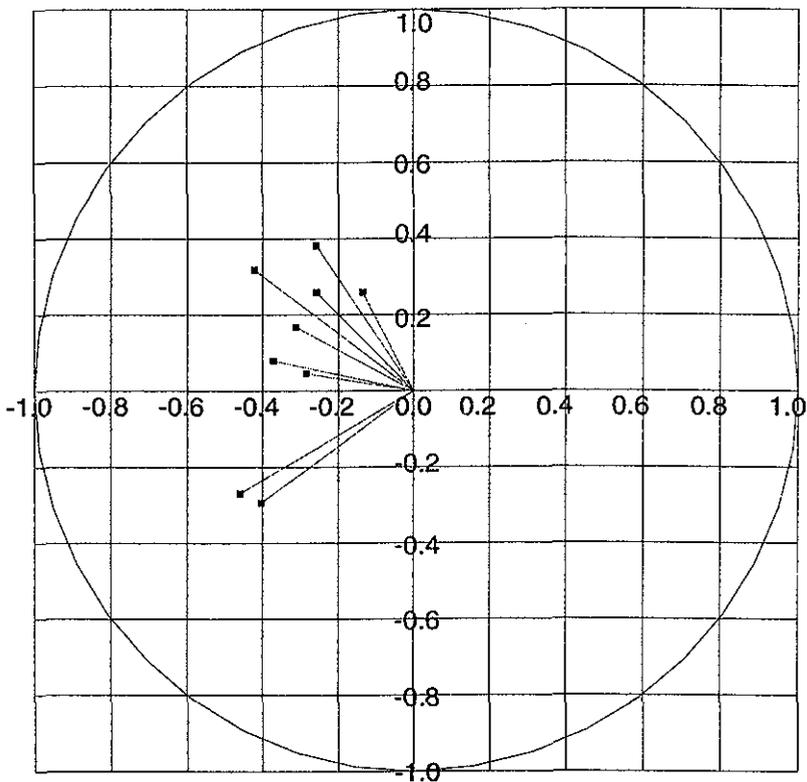


Figura 152. Rosa de correlaciones del sondeo SM-2 (*N* SPT) contra los otros nueve (Tecámac)

Rosa de coeficientes de correlación cruzada SM-3

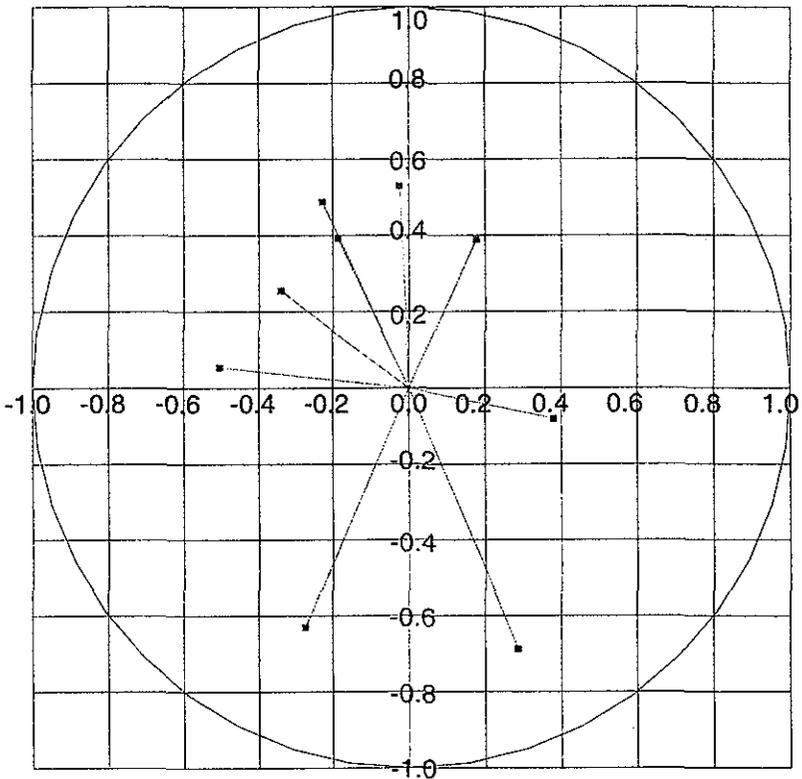


Figura 153. Rosa de correlaciones del sondeo SM-3 (*N* SPT) contra los otros nueve (Tecámac)

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Rosa de coeficientes de correlación cruzada SM-4

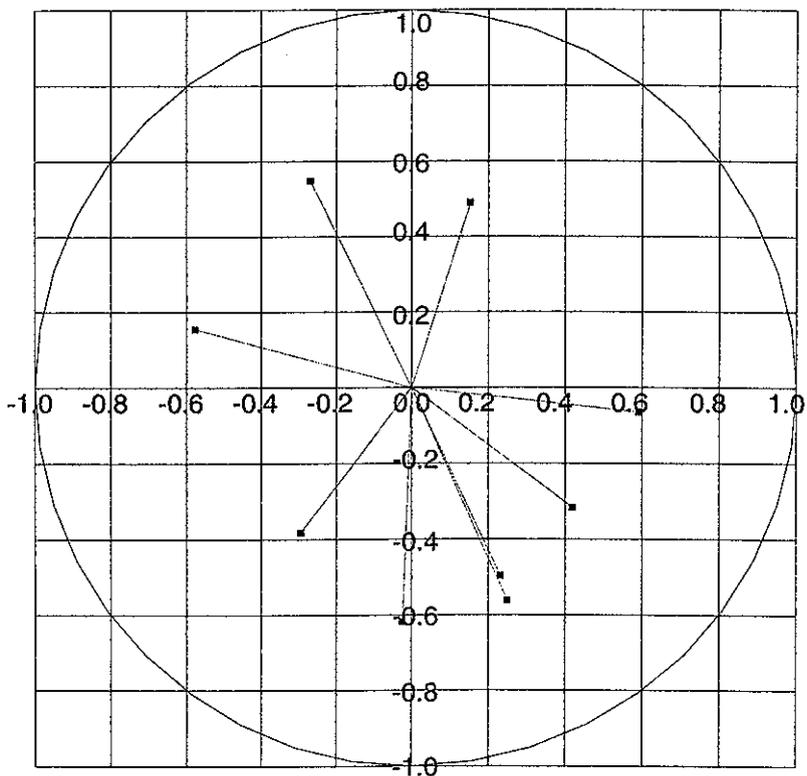


Figura 154. Rosa de correlaciones del sondeo SM-4 (*N* SPT) contra los otros nueve (Tecámac)

Rosa de coeficientes de correlación cruzada SM-5

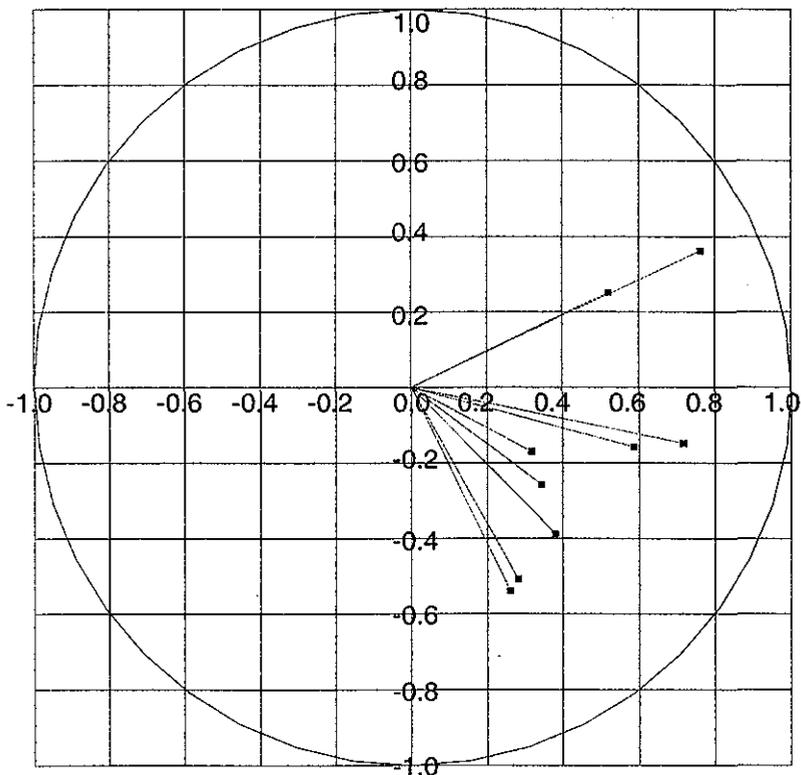


Figura 155. Rosa de correlaciones del sondeo SM-5 (*N* SPT) contra los otros nueve (Tecámac)

Rosa de coeficientes de correlación cruzada SM-6

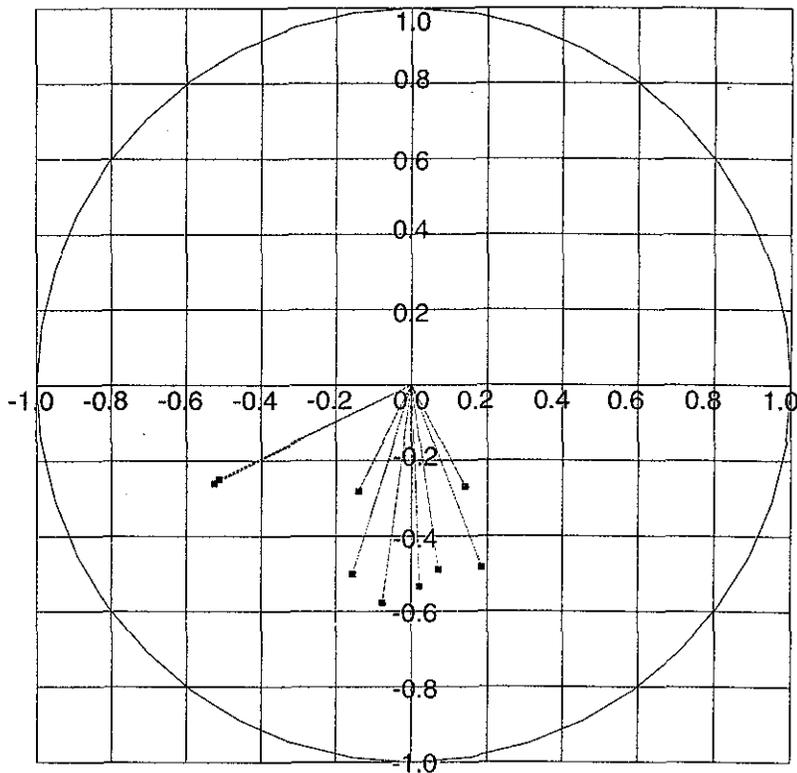


Figura 156. Rosa de correlaciones del sondeo SM-6 (N SPT) contra los otros nueve (Tecámac)

Rosa de coeficientes de correlación cruzada SPE-1

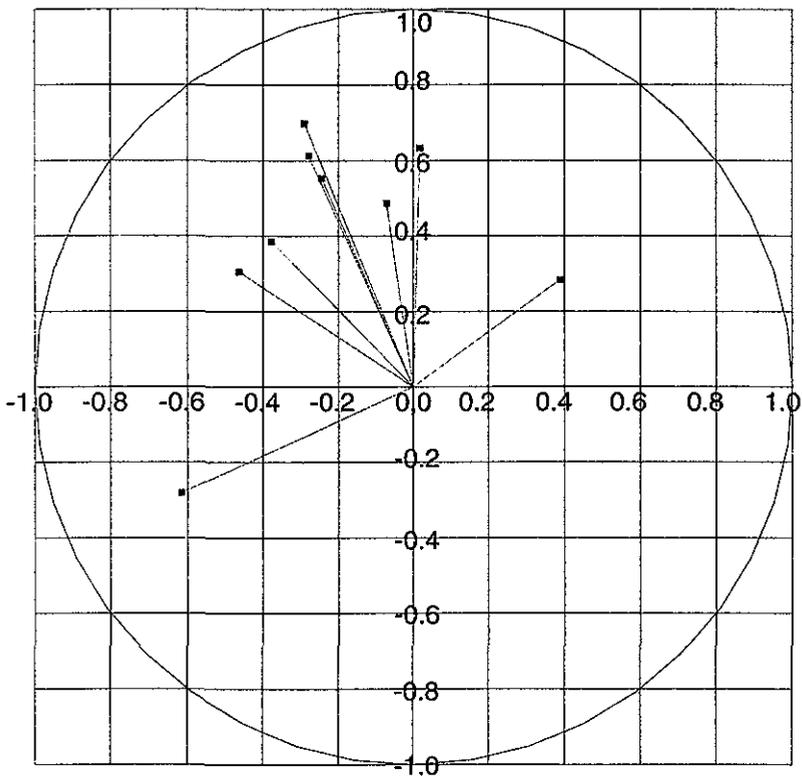


Figura 157. Rosa de correlaciones del sondeo SPE-1 (*N* SPT) contra los otros nueve (Tecámac)

Rosa de coeficientes de correlación cruzada SPE-2

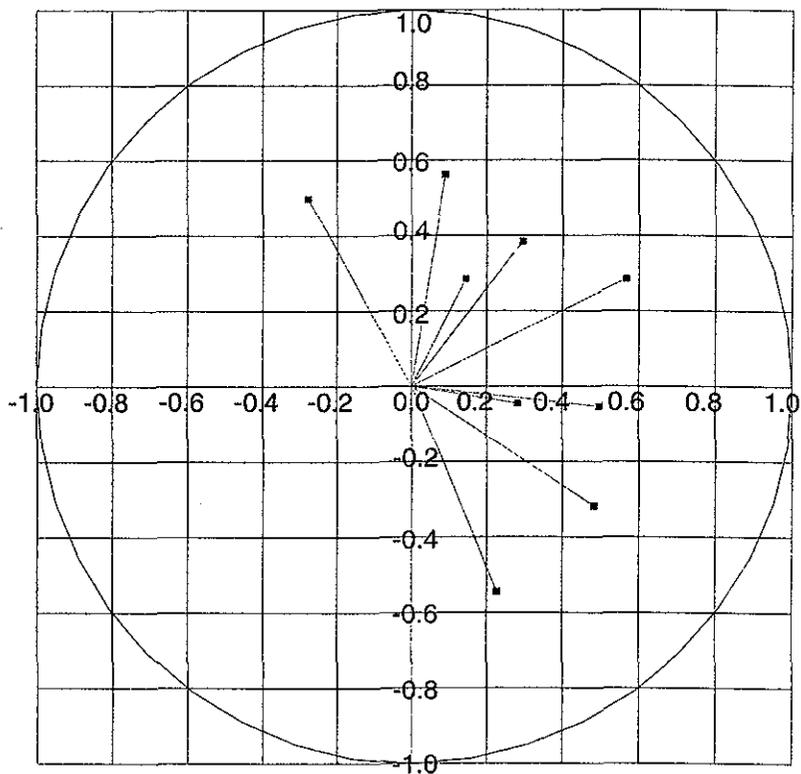


Figura 158. Rosa de correlaciones del sondeo SPE-2 (N SPT) contra los otros nueve (Tecámac)

Rosa de coeficientes de correlación cruzada SPE-3

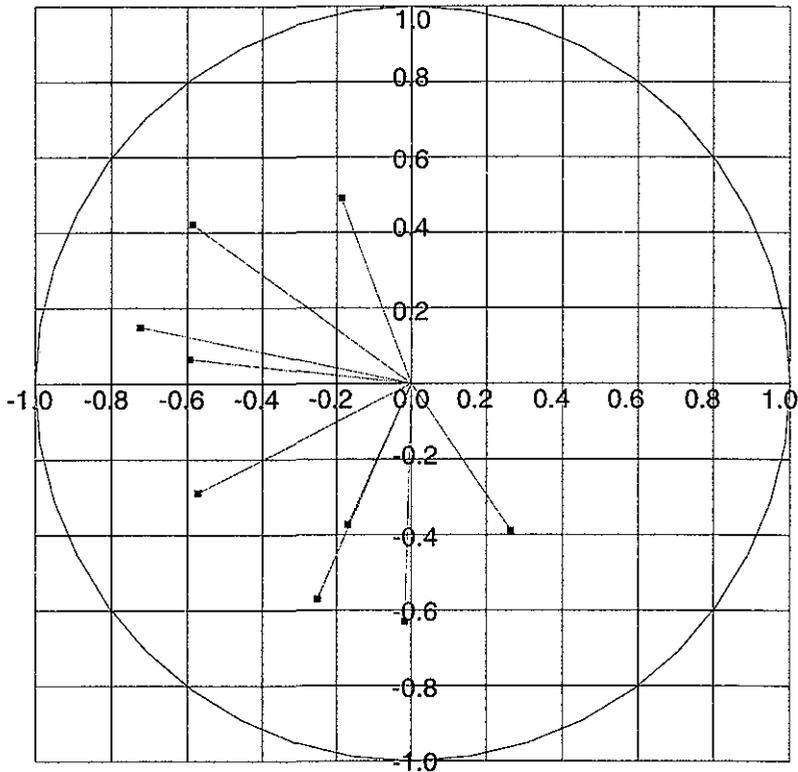


Figura 159. Rosa de correlaciones del sondeo SPE-3 (N SPT) contra los otros nueve (Tecámac)

Rosa de coeficientes de correlación cruzada SPE-4

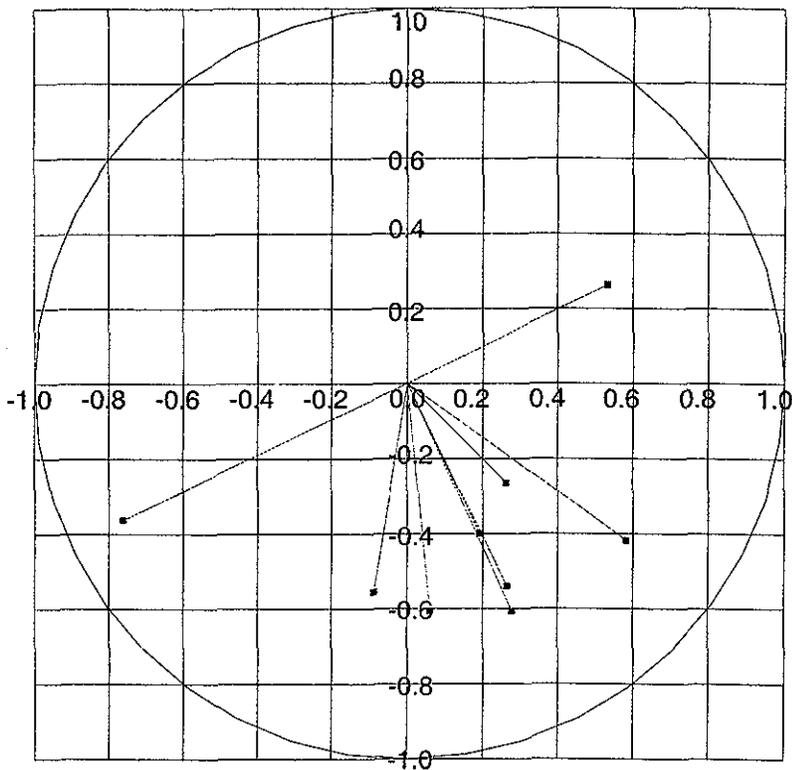


Figura 160. Rosa de correlaciones del sondeo SPE-4 (N SPT) contra los otros nueve (Tecámac)

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA CAMPAÑA DE
RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SITIO TECAMAC.

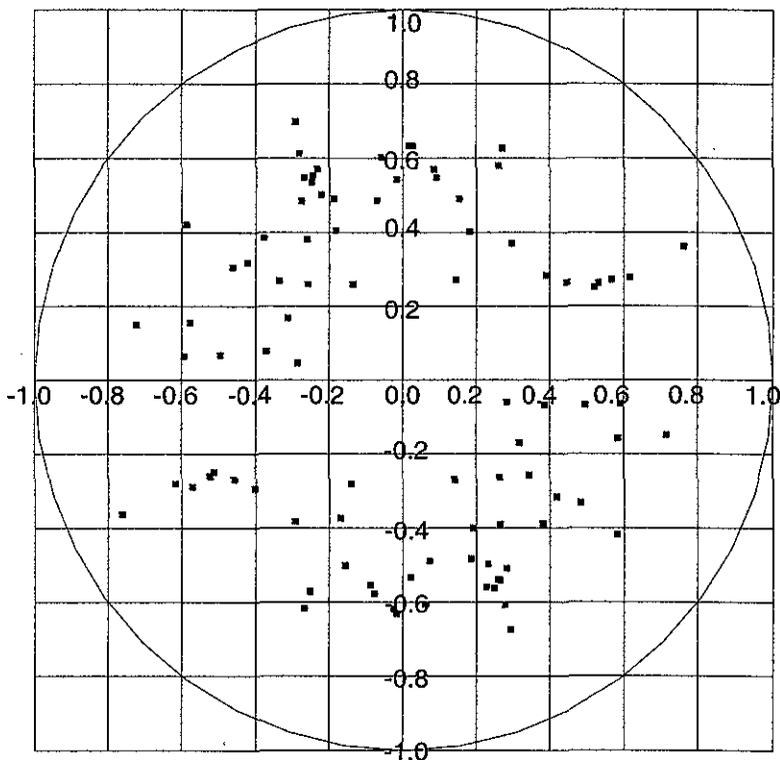
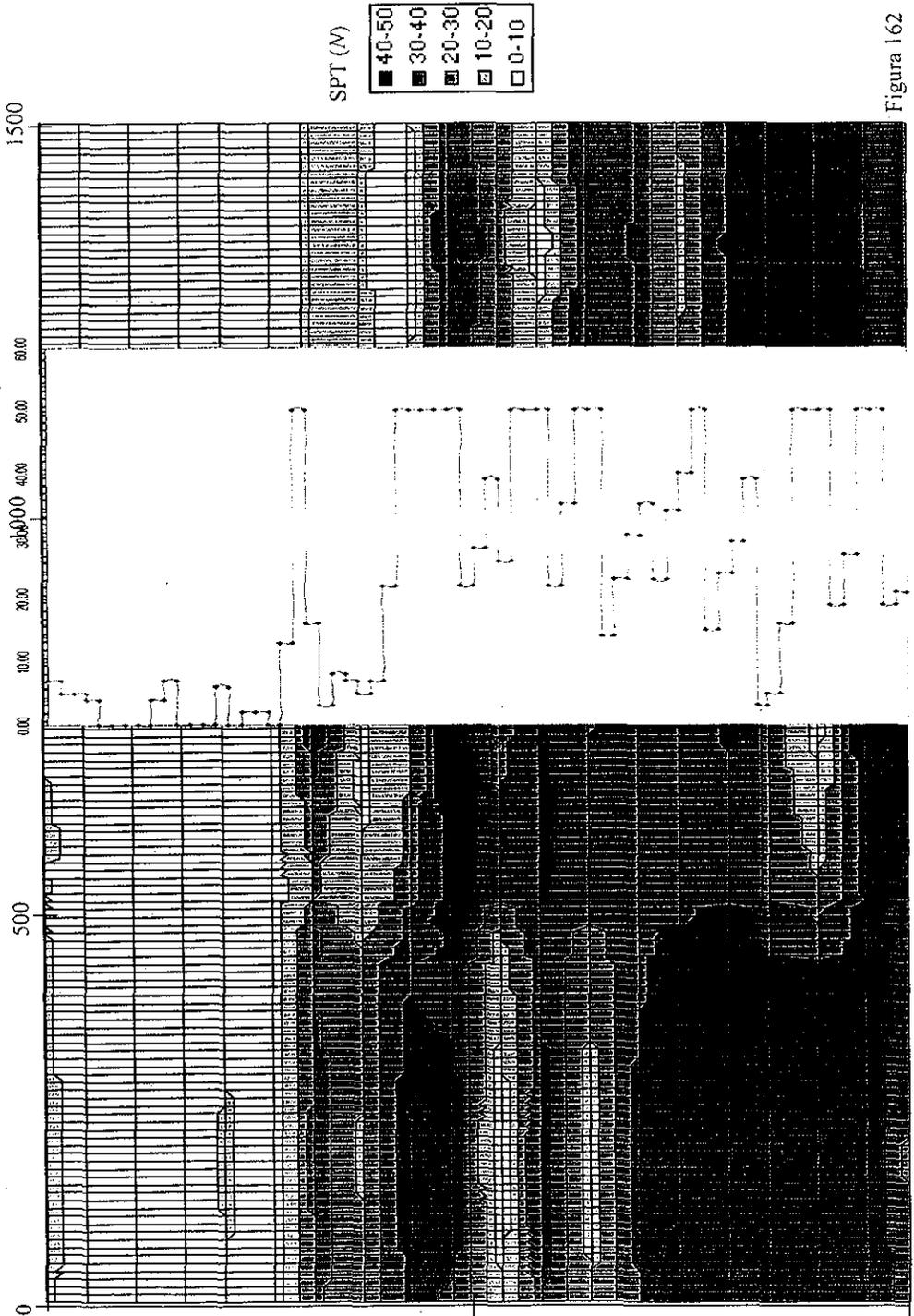


Figura 161. "Rosa" de coeficientes de correlación horizontal (cruzada) global
(SM-1 a SPE-4) de la prueba de penetración estándar, N SPT
(Tecámac)

SITIO TECAMAC

CORTE N° A

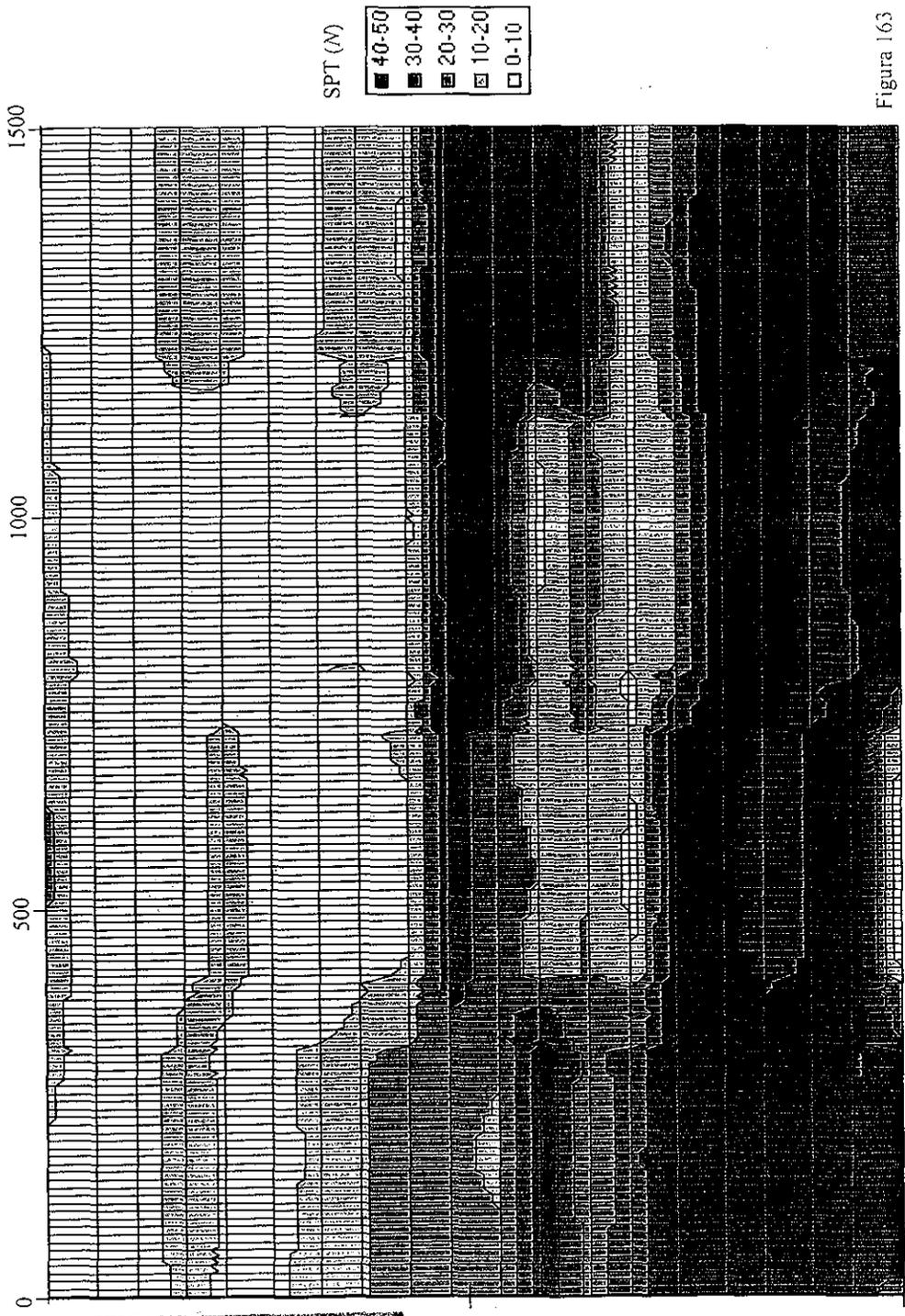
SPT



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 162

SITIO TECAMAC CORTE B SPT



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 163

SITIO TECAMAC CORTE C SPT



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 164

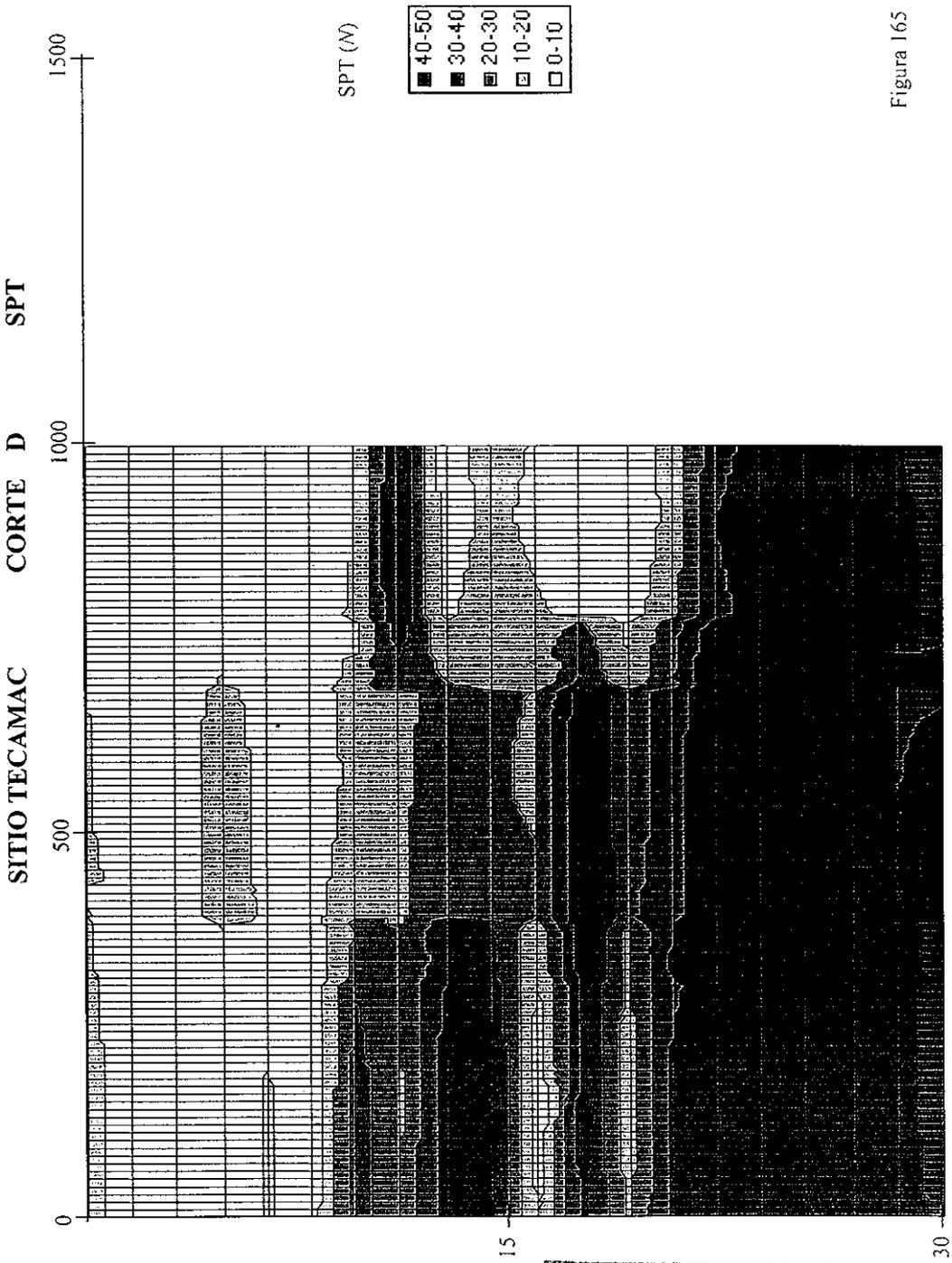


Figura 165

15

30

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

261

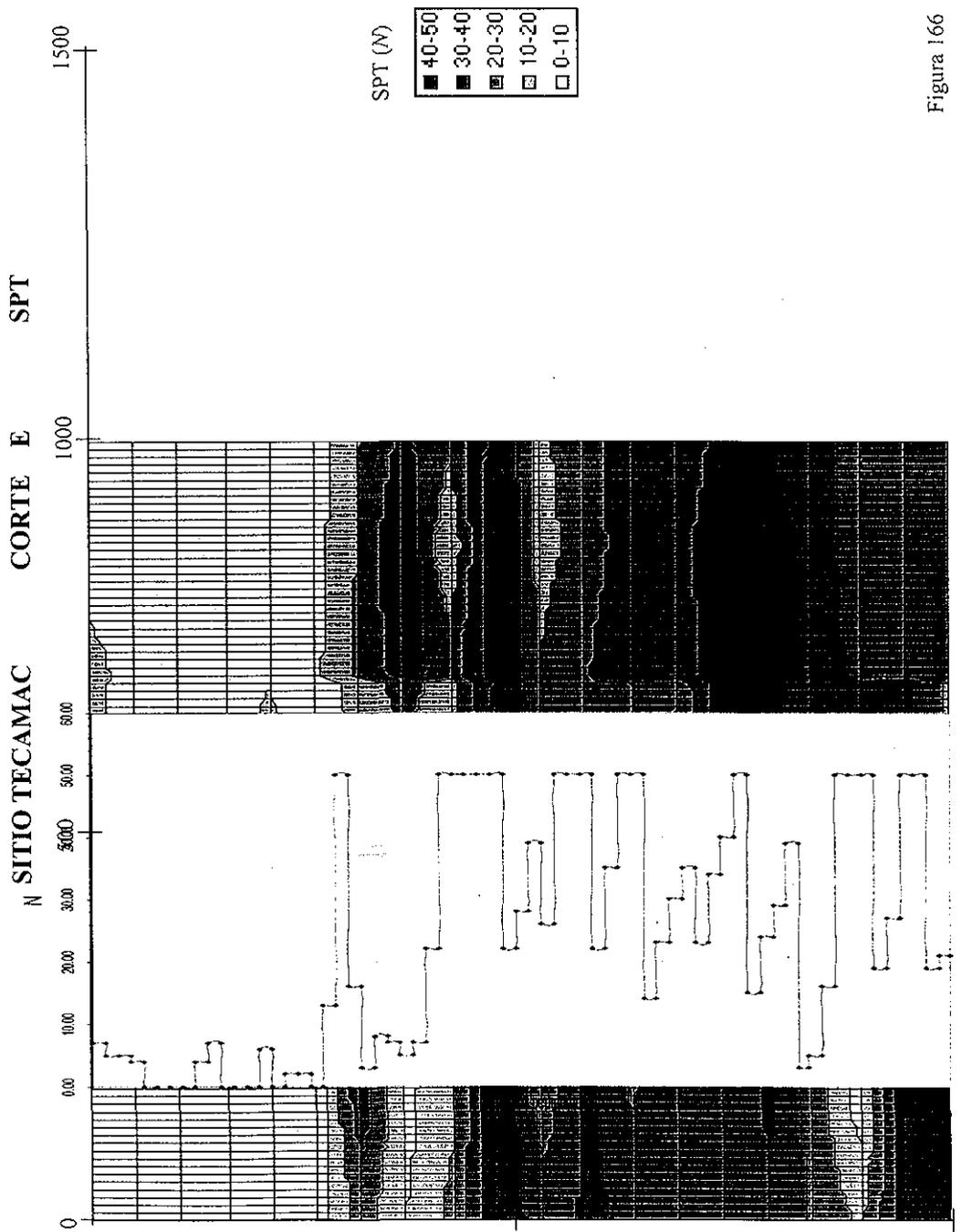


Figura 166

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

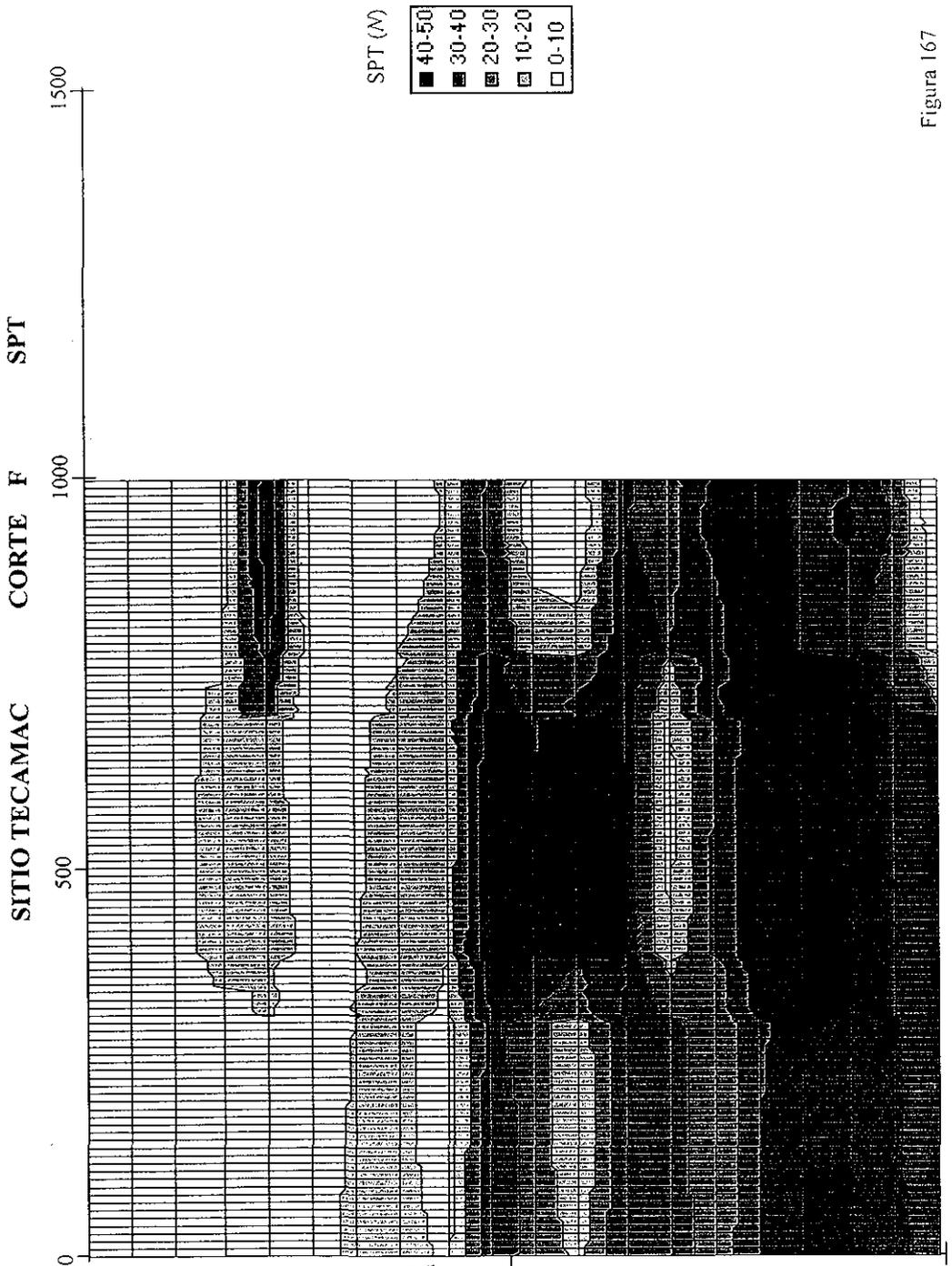


Figura 167

SITIO TECAMAC CORTE A SPT DESV STD

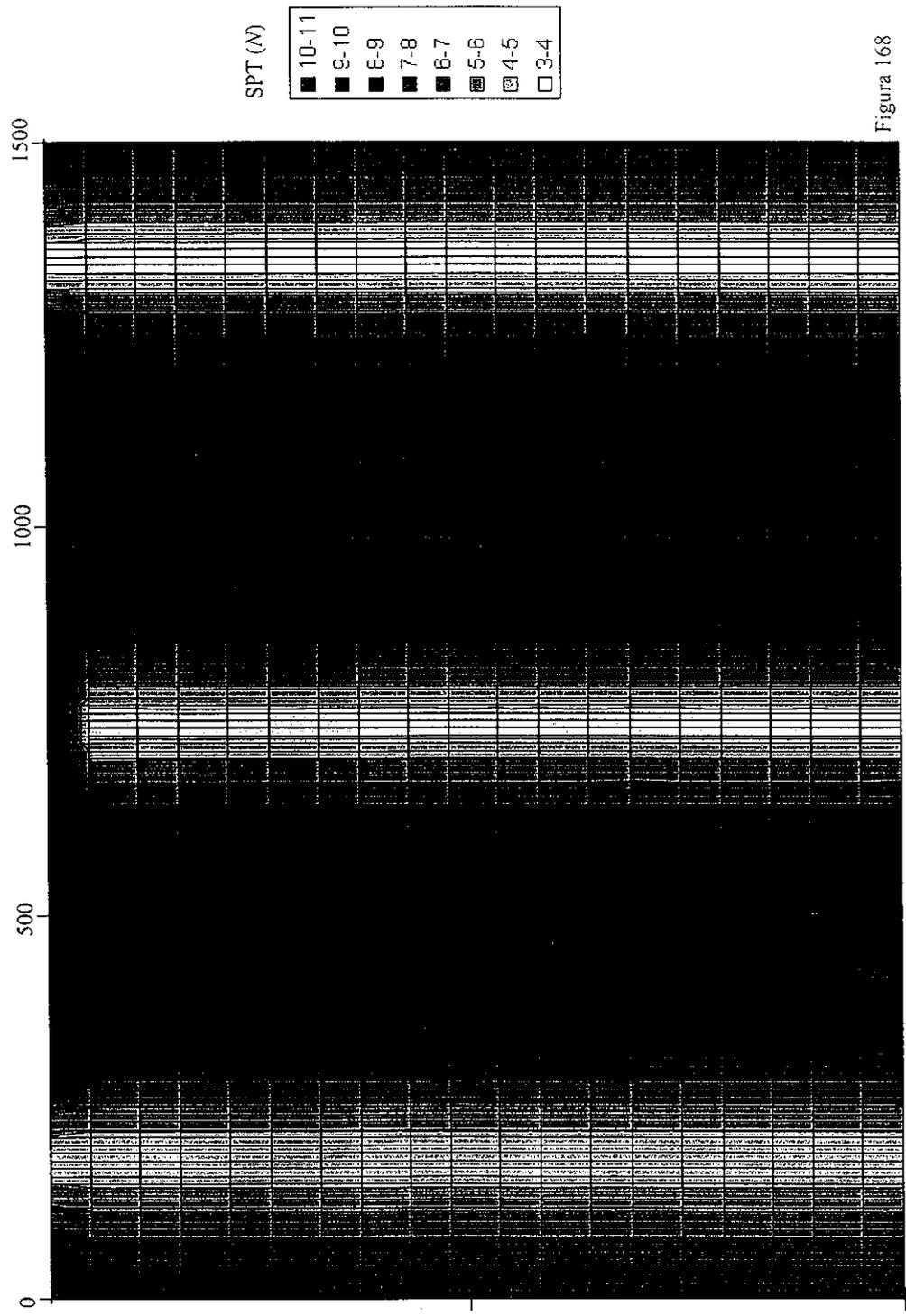


Figura 168

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

SITIO TECAMAC CORTE B SPT DESV STD

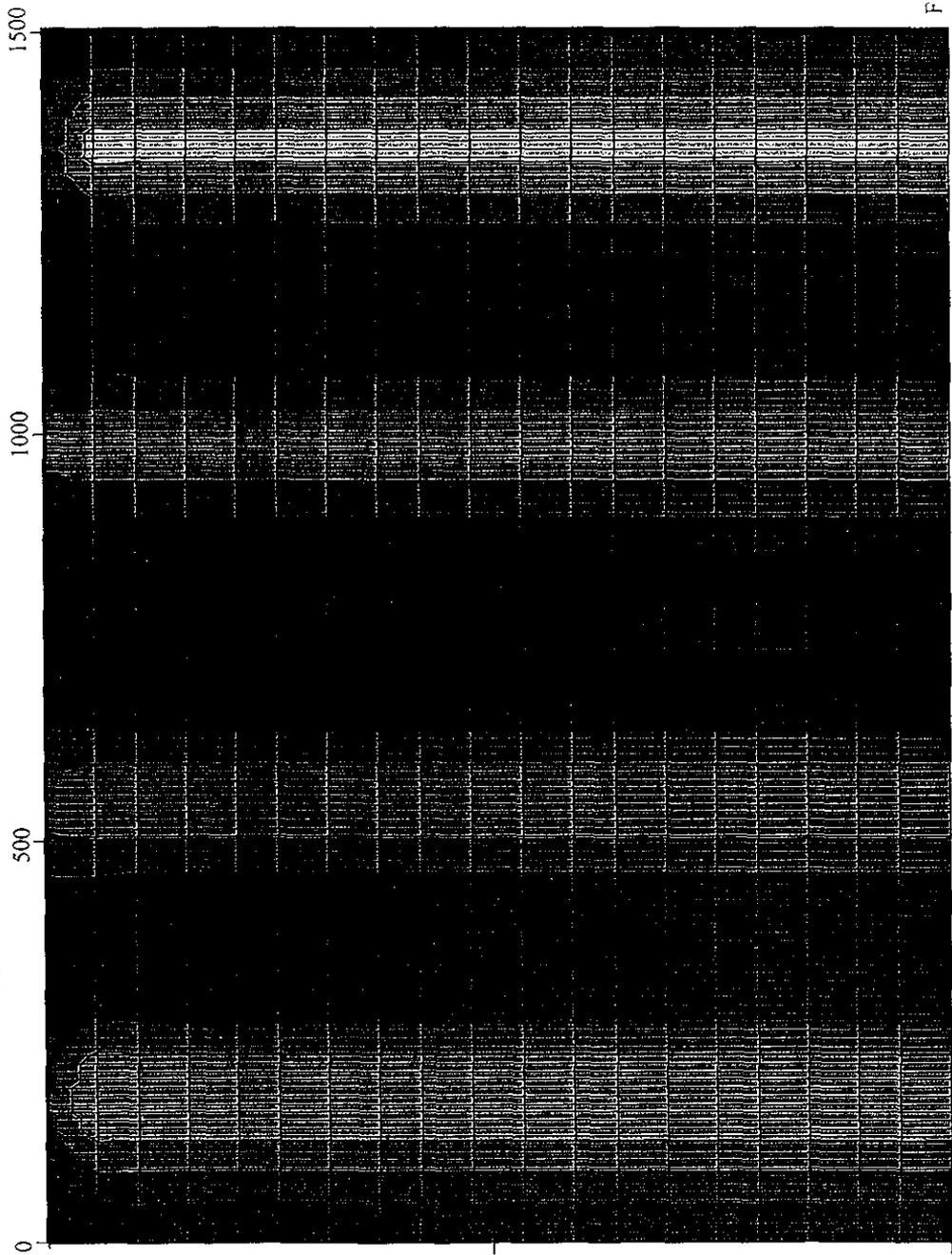


Figura 169

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

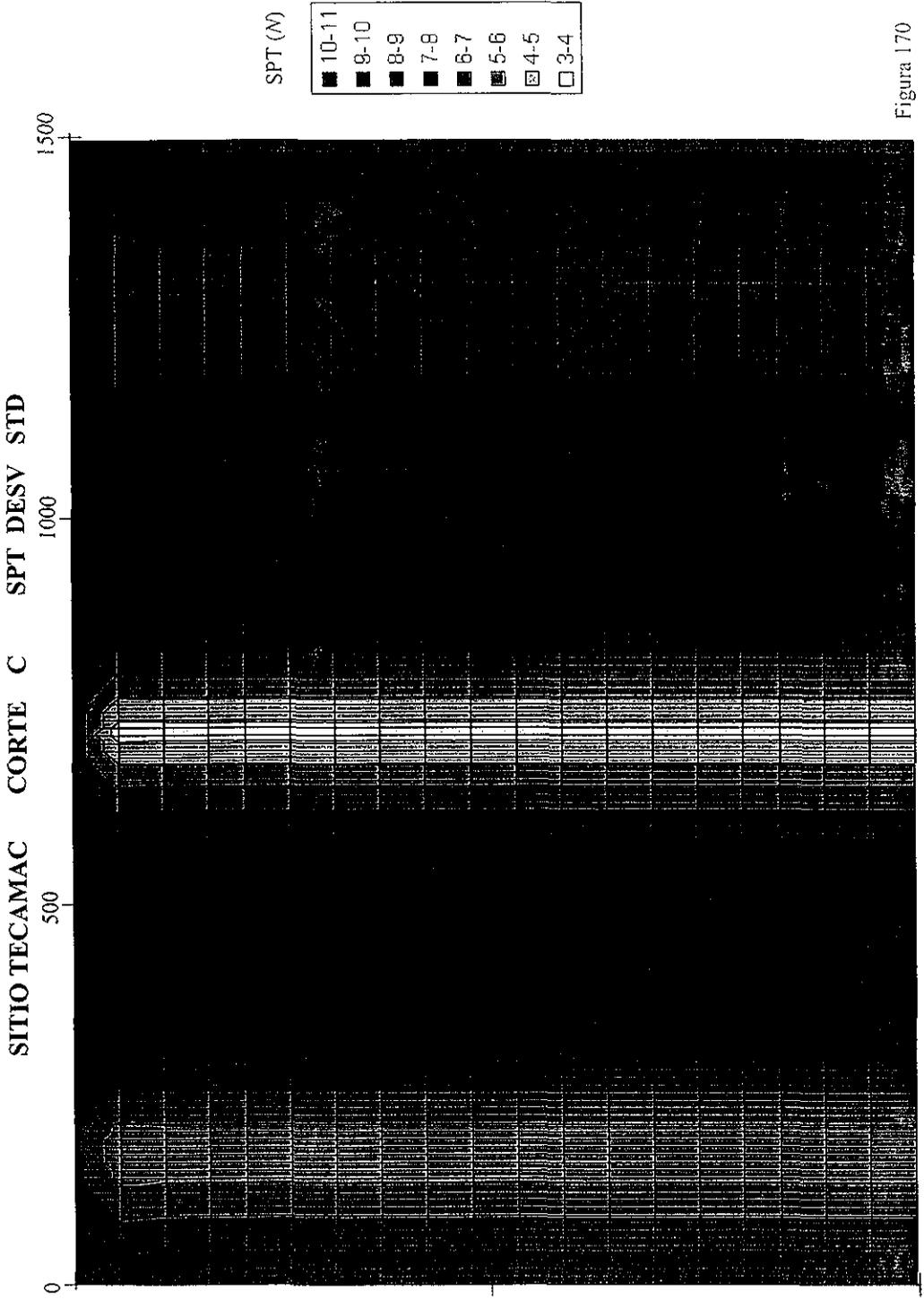


Figura 170

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

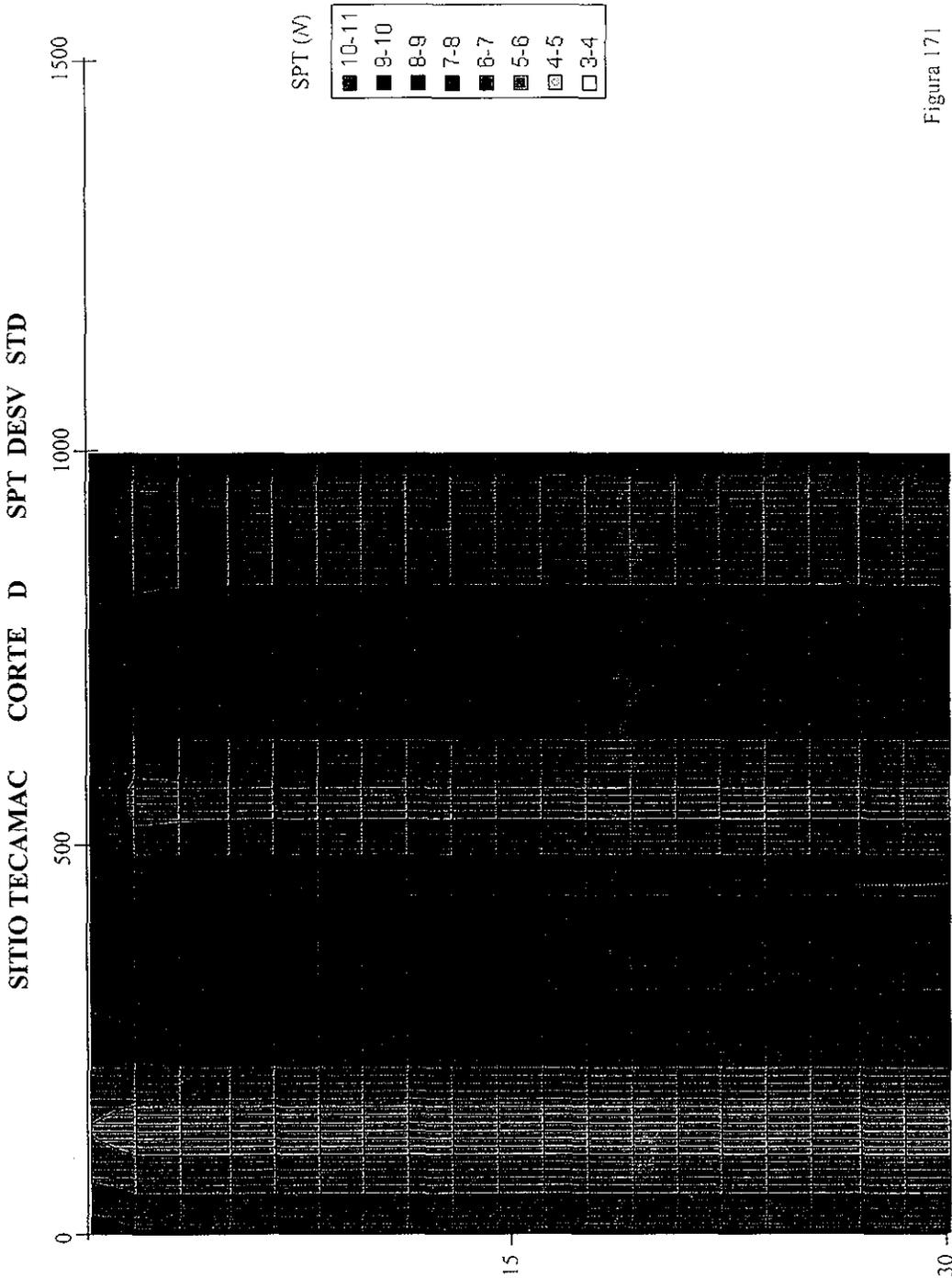


Figura 171

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

SITIO TECAMAC CORTE E SPT DESV STD

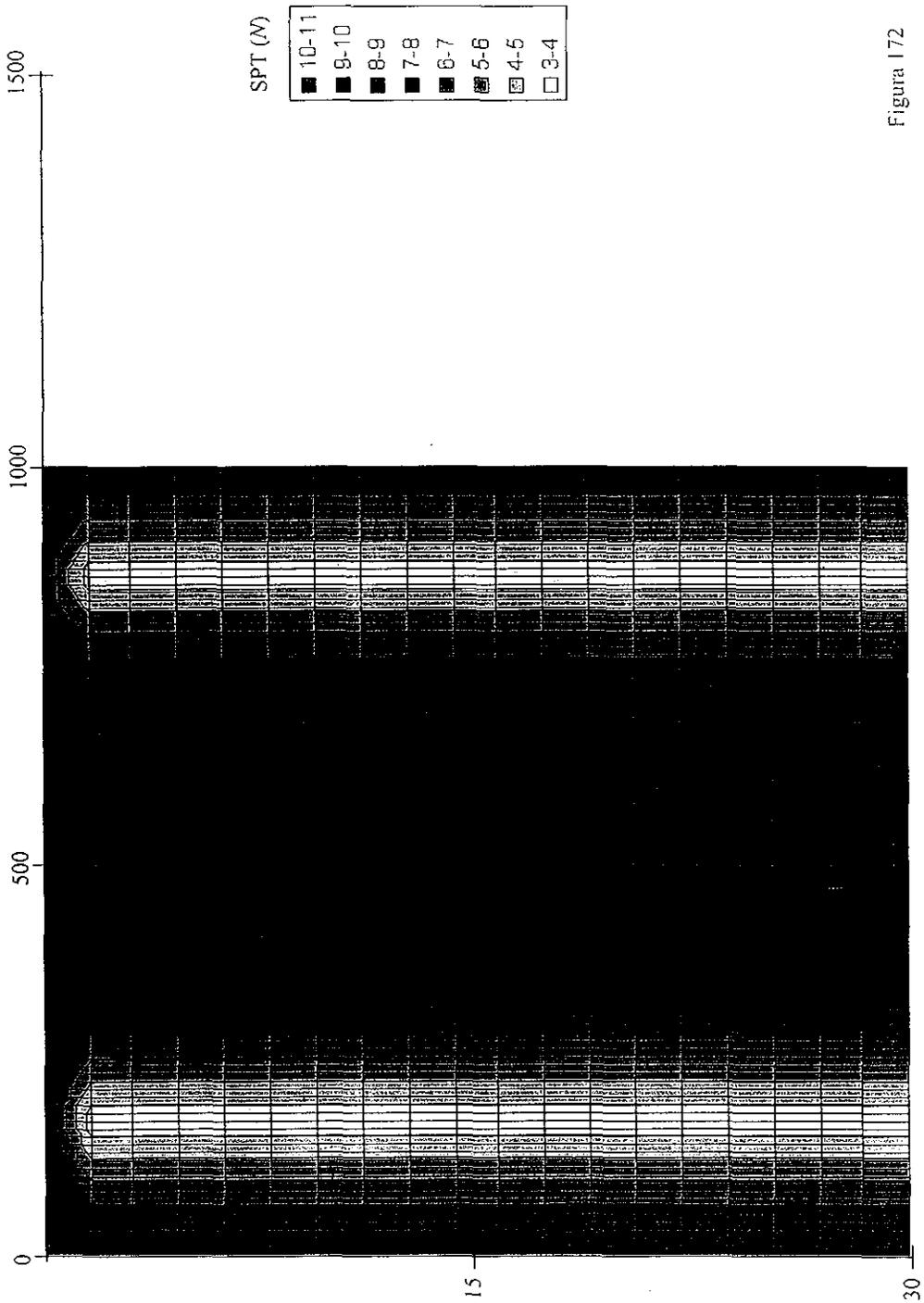
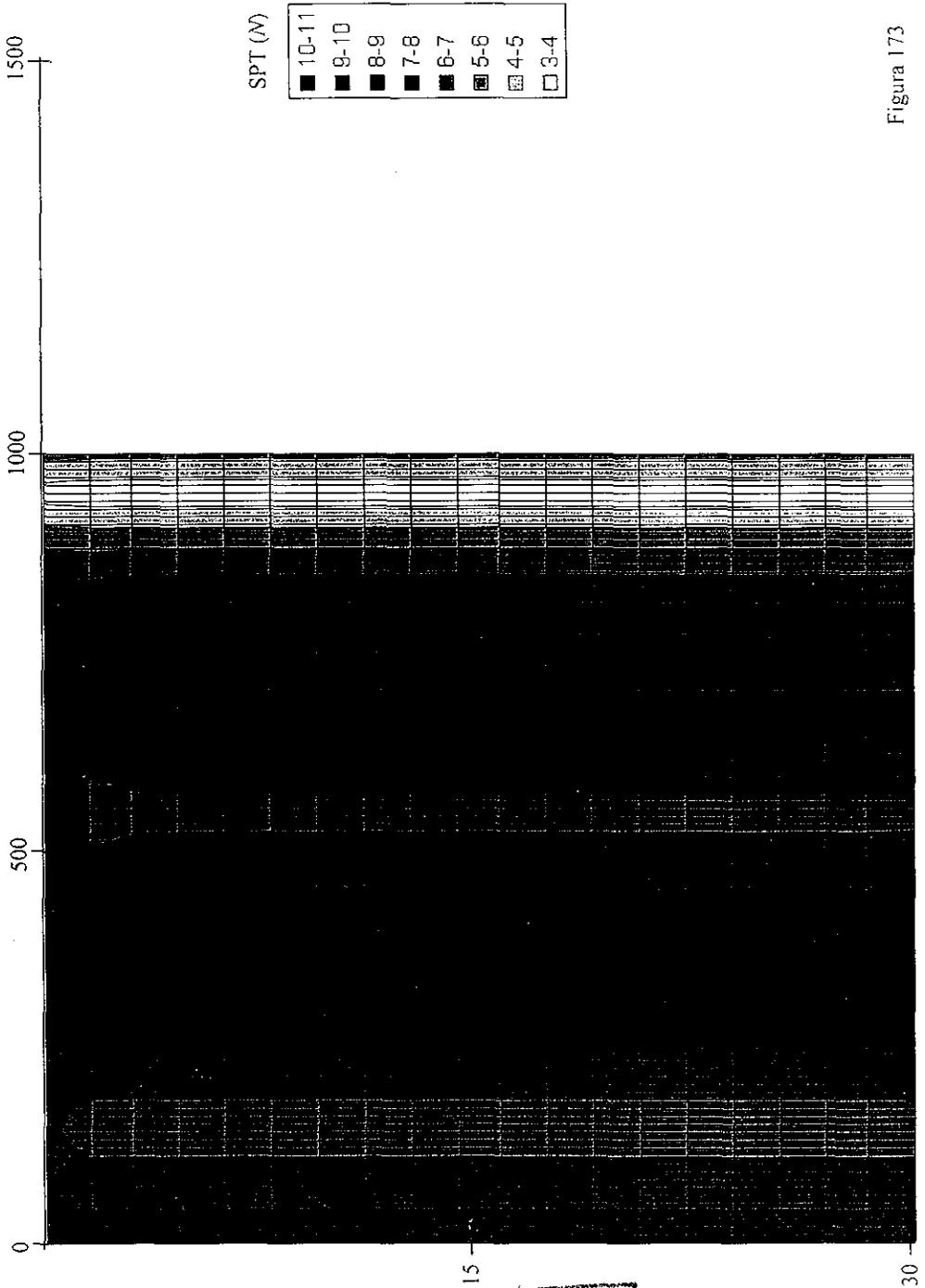


Figura 172

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

SITIO TECAMAC CORTE F SPT DESV STD

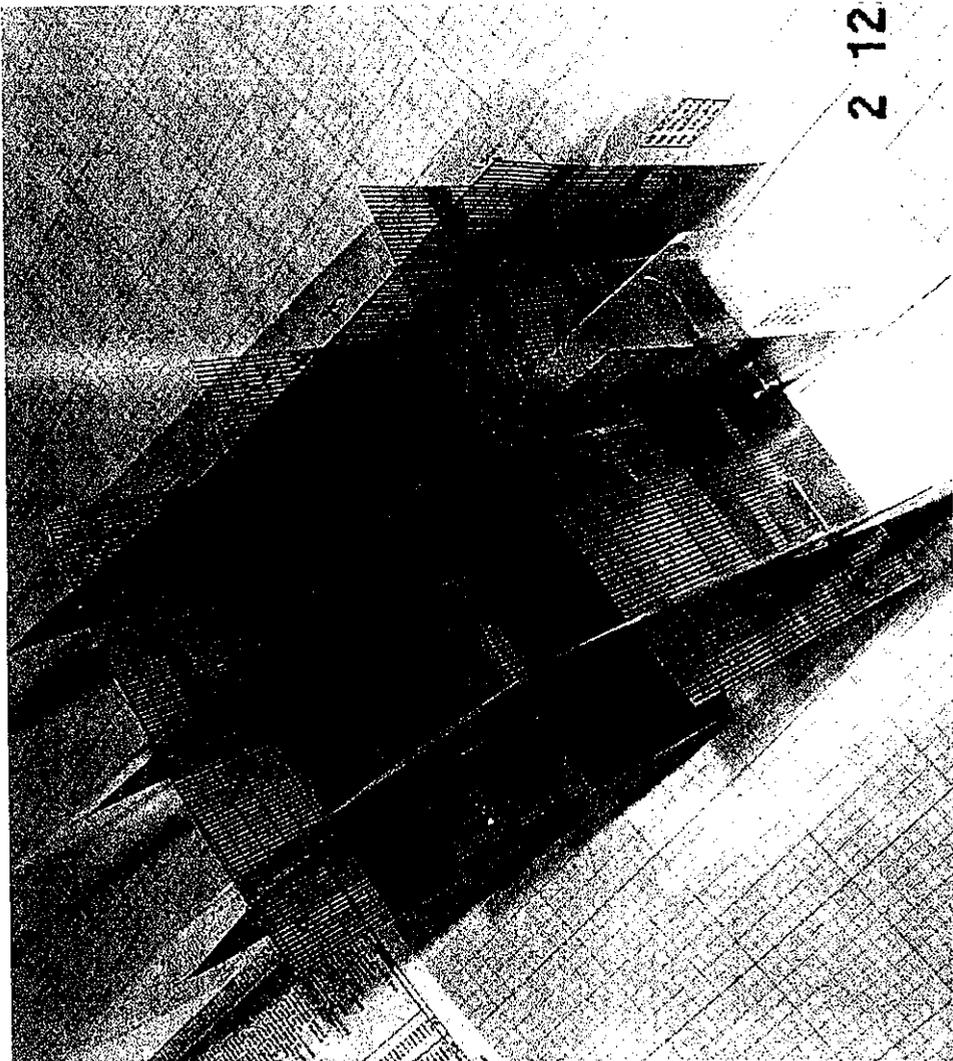


TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 173

272

SITIO TECÁMAC MODELO FÍSICO 1 SPT



212

Figura 174

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

273

SITIO TECÁMAC MODELO FÍSICO 2 SPT



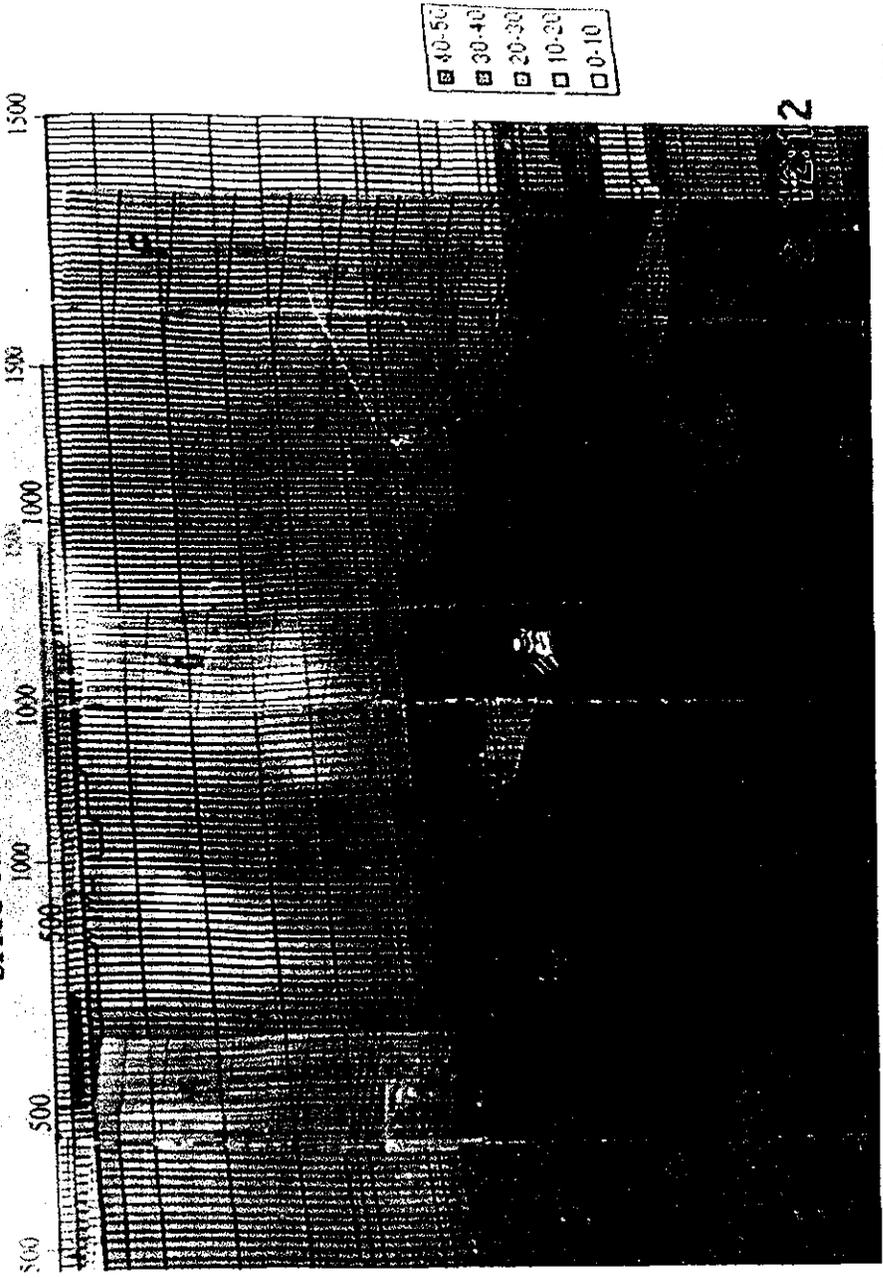
Figura 175

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

274

SITIO TECÁMAC MODELO FÍSICO 3 SPT

SITIO TECÁMAC CORTE A SPT



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

275

Figura 176