

## LOS ASENTAMIENTOS DEL TEMPLO MAYOR ANALIZADOS POR LA MECÁNICA DE SUELOS

MARCOS MAZARI  
RAÚL J. MARSAL  
JESÚS ALBERRO

### INTRODUCCIÓN

Posiblemente, el Templo Mayor de la ciudad de México (Huey Teocalli) sea entre los edificios construidos por el hombre en el que existe evidencia de uno de los mayores asentamientos registrados en cimentaciones; así lo demuestran las recientes exploraciones dirigidas por el arqueólogo Matos Moctezuma.<sup>1</sup>

Al visitar el lugar y observar el gran asentamiento, así como la notable inclinación de la pirámide construida en la segunda etapa, se pensó que deberían tener una explicación, inclusive sin conocer cómo eran en detalle las pirámides que los españoles arrasaron hasta el nivel de piso,<sup>2</sup> al conquistar la capital del imperio azteca. Entre las cosas que se saben es que la última pirámide del Huey Teocalli (sexta etapa constructiva) contaba con 120 escalones.<sup>3</sup> Para conocer la geometría de las seis principales etapas constructivas, se supuso a partir de la información proveniente de excavaciones recientes<sup>1</sup> su posible configuración (fig. 1).

En cuanto a las propiedades de los materiales del subsuelo, particularmente su compresibilidad [ $m_v = a_v / (1 + e_i)$ ], se recurrió a los valores medios para un contenido de agua inicial dado y un intervalo de presiones impuestas,<sup>4</sup> determinados durante los ensayos de consolidación de muestras de los sondeos Pc143 y Pc128-1 que forman parte de los estudios del subsuelo de la ciudad de México.<sup>5</sup> Dicha información se escogió después de haber comparado varios sondeos de la zona céntrica de la ciudad, atendiendo a sus características mecánicas y a los hundimientos registrados.

Resulta razonable tomar el sondeo Pc143 como el más representativo del perfil geológico del subsuelo en el que los aztecas asentaron Tenochtitlan. Por su parte, el sondeo continuo efectuado bajo el Pa-

lacio Nacional (Pc128-1) es representativo de un sitio en el que bajo un amplio relleno artificial de 15 m de espesor y por consolidación unidimensional, el subsuelo ha sufrido asentamientos. En las figs. 2 y 3 se muestran las características generales de estos sondeos, así como sus elevaciones de referencia, en metros sobre el nivel del mar.<sup>5,6</sup>

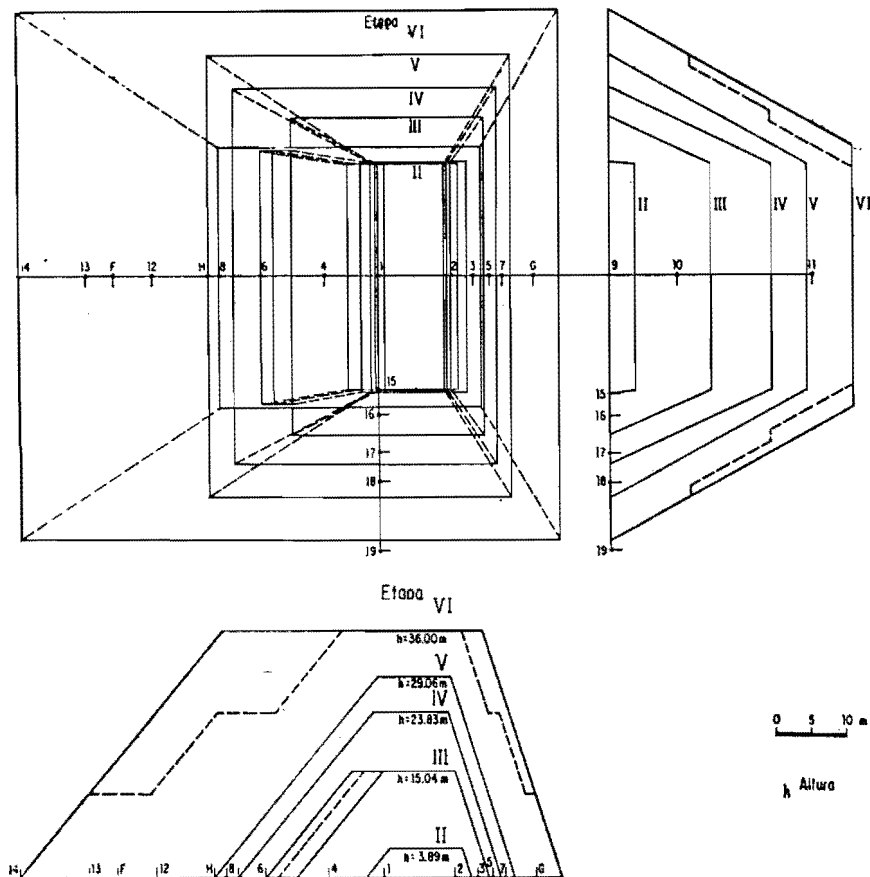


Fig. 1. Configuraciones de las cinco principales etapas constructivas.

En una primera aproximación que se analiza aquí, la estimación de los asentamientos de las pirámides durante sus largos periodos de construcción, se hizo suponiendo que se trata efectivamente de un fenómeno de consolidación unidimensional, o sea no se consideraron deslizamientos debidos a alguna falla por capacidad de carga o a ex-



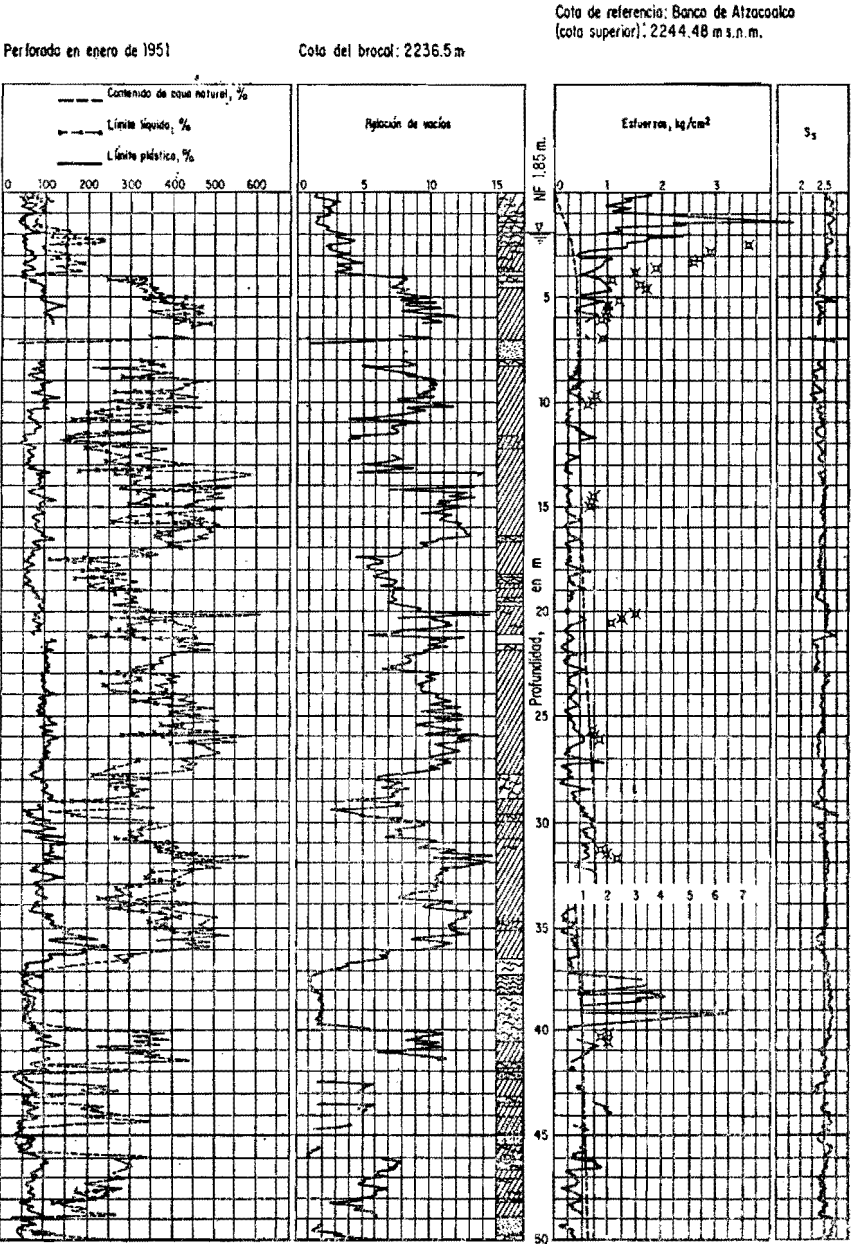


FIG. 3. Corte estratigráfico y propiedades mecánicas. Sondeo Pc 143 en la Unidad Jardín Balbuena.

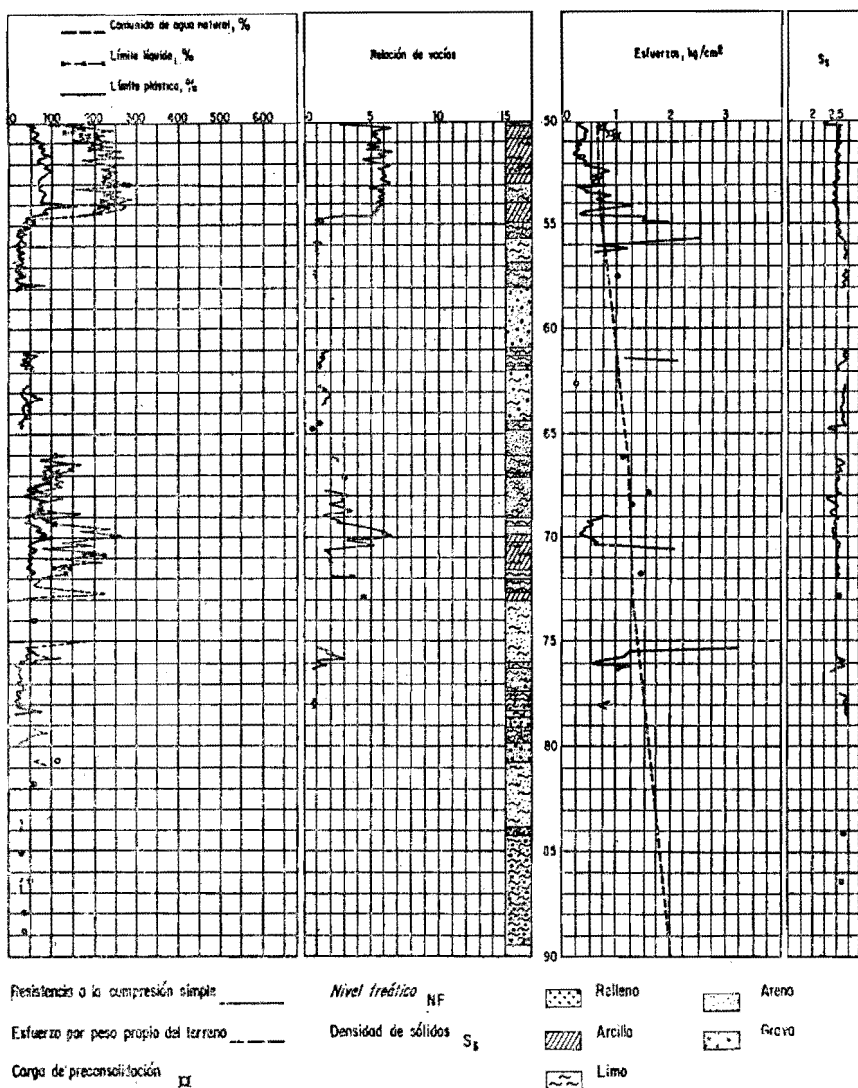


FIG. 3.  
(Continuación).

trusión lateral por deformación plástica de la arcilla, hipótesis apoyada también por un análisis de resistencia del subsuelo bajo ciertas condiciones de carga.

Los grandes asentamientos sufridos por el Templo Mayor propor-

Tabla 1. Niveles del terreno en el Lago de Texcoco y Ciudad de México

Fecha	Lugar	Elevación*, en m s.n.m.	Observaciones
Zona del Lago			
1862	Nivel del fondo del Lago de Texcoco. 2.8 m debajo del piso de la plaza <sup>6</sup>	2236.0	
1876	Nivel del fondo del Lago de Texcoco. Nivelación de los Ings. Velázquez y Aldasoro	2235.9	
1951	Nivel del brocal del Pc143 <sup>5</sup> Unidad Jardín Balbuena	2236.5	
1966	Nivel del fondo del Lago de Texcoco, C H C V M**	2235.3	Descenso del lago: 0.7 m
Zona céntrica de la ciudad <i>Downtown area of Mexico City</i>			
1891	Banqueta junto a la torre oeste de Catedral. Nivelación de R. Gayol <sup>7</sup>	2238.8	
	Nivelación de la esquina Guatemala y Argentina	2239.0	
1951	Nivel del brocal del Pc128-1 <sup>5</sup> . Palacio Nacional	2234.5	
1966	Torre oeste de Catedral. Tangente inferior del Calendario Azteca C H C V M** <sup>6</sup>	2233.0	Descenso de Catedral: 5.8 m
1982	Nivel de la calle de Argentina <sup>1</sup>	2234.5	

\* Precisión de las observaciones  $\pm 10$  cm

\*\* C H C V M Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México

cionan una razonable evidencia de que en el lugar de su construcción no existía alguna prominencia natural que emergiera del lago, sino, como se verá más adelante, se infiere la posibilidad de un islote artificial, previo al de las pirámides (el llamado Isla de los Perros).<sup>2</sup>

1. NIVELES DEL TERRENO, PERFILES DEL SUBSUELO Y PROPIEDADES MECÁNICAS GENERALES

La información pertinente a niveles del terreno en el área del Templo Mayor y la zona del lago de Texcoco para distintas épocas se resume en la tabla 1.

Como puede observarse en la fig. 4, sobre todo por la información

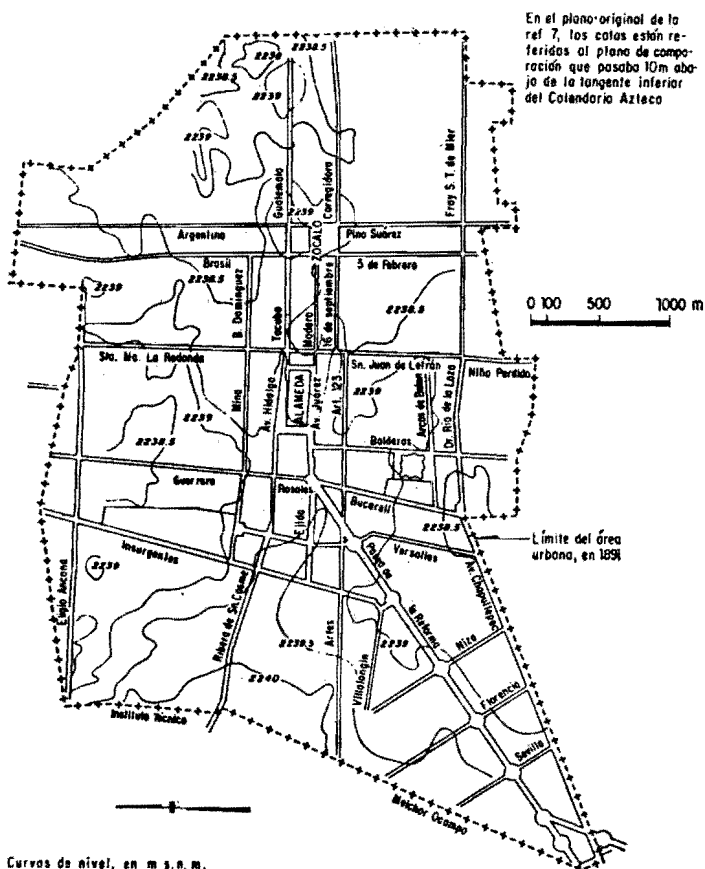


Fig. 4. Configuración del centro de la Ciudad de México en 1891 (ref. 7).

que Roberto Gayol<sup>7</sup> obtuvo con motivo de las obras de desagüe de la ciudad de México, se tiene un registro del hundimiento de la capital durante este siglo, debido principalmente al bombeo de aguas subterráneas, mecanismo ya indicado por Nabor Carrillo en 1948.<sup>8</sup>

El estudio del sondeo Pc143, con una elevación en la superficie de 2 236.5 m s.n.m., efectuado en el entonces Jardín Balbuena (aeropuerto militar), aproximadamente a 2.5 km al sureste del Templo Mayor, todavía en una época en que no había sufrido alteraciones ya sea por sobrecargas o por bombeo, se ha tomado como referencia de lo que pudo ser el perfil original del lago antes de la llegada de los aztecas (fig. 3). El movimiento de esta zona del lago fue en un siglo del orden de 70 cm (tabla 1), probablemente por la acción del bombeo de las capas profundas en décadas recientes.

Como comparación se incluye el sondeo Pc128-1 (elev. 2 234.5 m s.n.m.) efectuado en el Palacio Nacional, como ejemplo de una zona fuertemente afectada por un relleno artificial de 15 m, sobrecargada además por edificios y sujeta a bombeo; dicho sondeo está localizado en la proximidad del Templo Mayor. La información disponible,<sup>5,6</sup> indica además (fig. 5) valores del hundimiento total de la ciudad de 6 m en la Catedral y de siete o más en zonas cercanas.

Los valores medios de las propiedades mecánicas por estratos que se presentan en la tabla 2 se han obtenido de los perfiles de las figs. 2 y 3. Mientras el espesor de la formación arcillosa superior del Pc143 es de 33.2 m, el del Pc128-1 ha quedado reducido a 23.5 m, muy similar a lo observado también en el subsuelo ocupado por la Catedral.<sup>11</sup>

Si se hace un sencillo cálculo de la reducción del contenido de agua ( $w_j$  pasa a  $w_t$ ) del manto compresible superior, de espesor total  $H_T$  bajo la hipótesis de una consolidación unidimensional, el contenido de agua final  $w_t$  de la arcilla bajo una deformación  $\delta$  puramente vertical es:

$$w_t = w_i \left[ 1 - \frac{\delta}{H_T} \left( \frac{1 + e_i}{e_i} \right) \right]$$

en la que  $e_i$  es la relación de vacíos inicial.

Al aplicar esta expresión el caso del sondeo Pc143 resulta:

$$w_t = 350 \left[ 1 - \frac{9.7}{33.2} \left( \frac{1 + 8.48}{8.48} \right) \right] = 235\%$$





Tabla 2. Valores medios de las propiedades mecánicas por estratos

Pc128-1

Palacio Nacional

Elev 2234.5 m s.n.m.

	Prof, m	S <sub>s</sub>	e	w	w <sub>L</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	σ <sub>r</sub>
Formación arcillosa superior	15.15-25.40	2.36	5.54	246	293	101	192	1.22
	25.40-34.70	2.43	5.15	214	252	93	159	1.25
	34.70-38.70	2.45	5.59	235	271	113	158	1.78
Promedio	15.15-38.70	2.40	5.59	232	274	101	173	1.32

Pc143

Unidad Jardín Balbuena

Elev 2236.5 m s.n.m.

	Prof, m	S <sub>s</sub>	e	w	w <sub>L</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	σ <sub>r</sub>
Formación arcillosa superior	0.00- 3.80	2.61	2.85	105	122	52	70	1.54
	3.80-11.85	2.41	7.98	332	331	87	244	0.54
	11.85-21.15	2.48	9.23	385	303	76	227	0.30
	21.15-29.30	2.42	9.68	402	357	101	256	0.29
	29.30-37.00	2.52	9.65	390	342	83	254	0.60
Promedio	0.00-37.00	2.48	8.48	350	311	84	227	0.54
Primera capa dura	37.00-39.70	2.61	1.40	50	60	45	15	2.58
Formación arcillosa inferior	39.70-44.00	2.52	5.58	214	189	62	127	0.97
	44.00-49.00	2.48	4.60	201	178	65	113	0.89
	49.00-54.75	2.51	4.66	197	193	60	133	0.85
Promedio	39.70-54.75	2.51	4.97	204	187	63	124	0.91
Promedio parcial	0.00-54.75	2.49	7.15	294	264	77	187	0.74
Segunda capa dura	54.75-58.00	2.57	0.75	25	24	20	4	2.16
Prolongación segunda capa dura	60.90-64.80	2.63	1.15	33	47	30	17	-
3a. formación arcillosa	66.30-72.25	2.50	2.70	129	138	67	71	-
Promedio total.	0.00-72.25	2.51	6.10	252	229	70	159	0.82

S<sub>s</sub> Densidad de sólidosw<sub>p</sub> Límite plástico

e Relación de vacíos

I<sub>p</sub> Índice de plasticidad

w Contenido de agua inicial

σ<sub>r</sub> Resistencia a la compresión simplew<sub>L</sub> Límite líquido

Si se compara dicho resultado con el contenido de agua de la formación arcillosa superior del Pc128-1, w= 232%, la coincidencia puede calificarse de extraordinaria.

Ese resultado da confianza para afirmar que aun bajo estas grandes



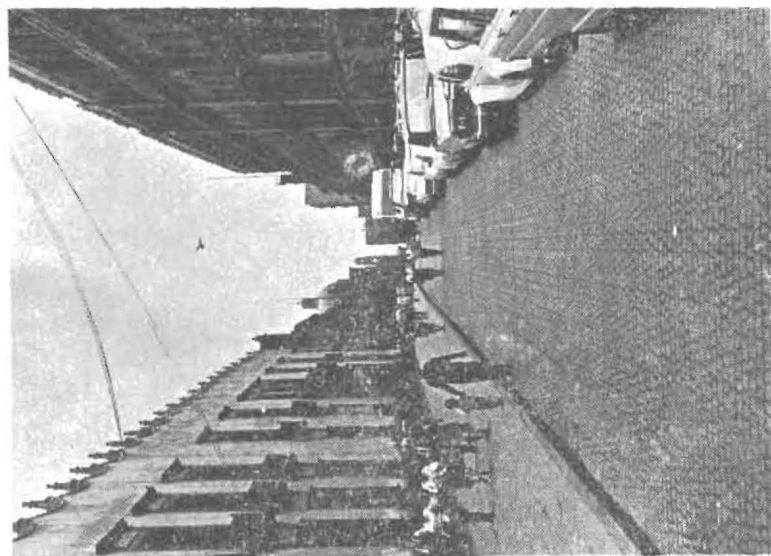


Foto 2. Joroba en la calle de Moneda de E a W.

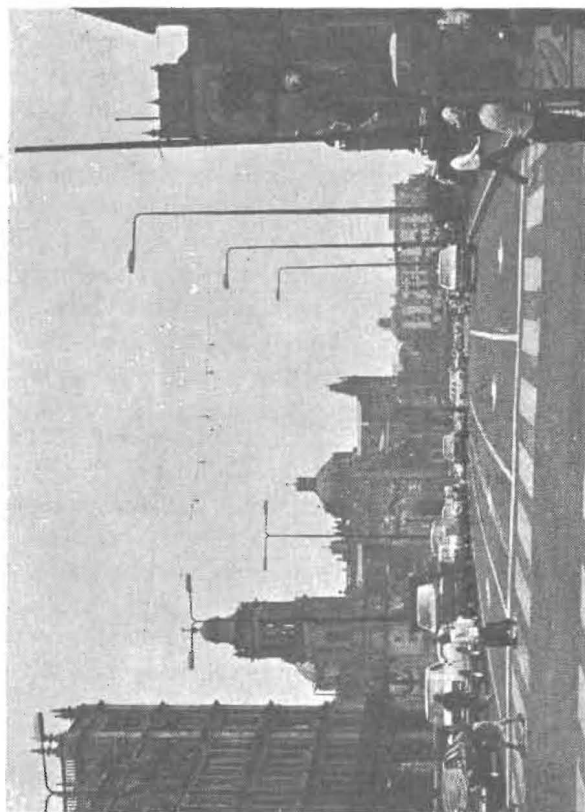


Foto 3. Desnivel de la calle entre Corregidora y Uruguay, tomado sobre Pino Suárez.



deformaciones, el fenómeno de asentamiento puede atribuirse principalmente a consolidación unidimensional y no a falla plástica de la arcilla con desplazamiento lateral del suelo.

Las grandes deformaciones observadas en el Huey Teocalli también permiten aseverar que en ese lugar el subsuelo está formado por arcillas compresibles similares, y que no fue construido sobre un islote natural apoyado rígidamente en capas firmes del subsuelo. Téllez-Pizarro<sup>2</sup> habla de un desnivel con el lago de 8.5 m, todavía a fines del siglo pasado. Se menciona además en la misma referencia el hecho de que durante las grandes inundaciones, en particular la de 1629, no se anegaron ese lugar ni las zonas que ocupaban el arzobispado y el área ceremonial de Tlatelolco.

Como se verá más adelante, simples estimaciones de los asentamientos inducidos en la zona central de las pirámides por las cinco primeras etapas constructivas sobre suelo virgen arrojan un valor de 11.2 m (ver tabla 3), o sea más del doble de lo realmente observado. Esto indica la imposibilidad de que los aztecas hubieran construido sus templos directamente sobre terreno natural.

Para alcanzar un total del orden de 5.6 m observado en la realidad y como lo sugiere la información existente,<sup>2</sup> es adecuado suponer que la Isla de los Perros, con unos 5 m de altura sobre el fondo del lago fue construida por los aztecas con anterioridad a sus templos, por lo menos a partir de la tercera pirámide. Se estima que para alcanzar un relleno formado básicamente de tierra ( $1.6 \text{ ton/m}^3$ ) que sobresañera aproximadamente 5 m sobre el fondo del lago tuvo que construirse un macizo de 11.6 m de altura, que por el mismo fenómeno de consolidación quedó en parte bajo la superficie libre del lago (tabla 3).

Ya en este siglo, el hundimiento de los mantos compresibles por bombeo de los acuíferos del subsuelo ha originado un descenso de la superficie de 6 m en la Catedral y de siete o más en la vecindad (fig. 5). Estos hundimientos por pérdida de la presión del agua intersticial en los mantos profundos, proceso que con el tiempo avanza hacia la superficie, también ayudan a explicar en parte las inclinaciones de los patios de las pirámides con pendiente hacia el exterior, ya que en el perímetro la compresibilidad sigue siendo mayor que debajo del templo.

Una inspección ocular a la zona, a pesar de que siempre se han corregido niveles con nuevos materiales de aporte en las calles, restaurado entradas y fachadas de los edificios, modificando escalones y accesos, señala en varios lugares hundimientos menores que en sus alrededores. La fig. 6 muestra el posible contorno de la parte gruesa de

Tabla 3. Deformación por consolidación del subsuelo provocada por un amplio relleno sobresaliendo 3 o 5 m del fondo del lago

Incremento de esfuerzo para el relleno de 3 m				Incremento de esfuerzo para el relleno de 5 m		
Estrato	$\Delta H$ cm	$\Delta \sigma_z$ kg/cm <sup>2</sup>	$\bar{m}_v$ cm <sup>2</sup> /kg	Deformación $\rho$ , cm	$\Delta \sigma_z$ kg/cm <sup>2</sup>	Deformación $\rho$ , cm
1	380	0.82	0.041	12.7	1.26	19.6
2	805	"	0.100	66.0	"	101.4
3	930	"	0.100	76.2	"	117.2
4	815	"	0.160	106.9	"	164.2
5	770	"	0.100	63.2	"	97.0
6	270	"	0.026	5.8	"	8.8
7	1505	"	0.041	50.6	"	77.8
8	1005	"	0.026	21.4	"	32.9
9	745	"	0.041	25.4	"	38.4
				$\rho_t = 427.8$ cm		
Incremento de esfuerzo para el relleno de 3 m				Incremento de esfuerzo para el relleno de 5 m		
Nivel		Peso ton/m <sup>2</sup>		Nivel		Peso ton/m <sup>2</sup>
0 + 3 m		4.8		0 + 5 m		8.0
0 - 1 m		1.6		0 - 1 m		1.6
Material sumergido		1.8		(= 5 m)		3.0
(= 3 m)		8.2 ton/m <sup>2</sup> (0.82 kg/cm <sup>2</sup> )				12.6 ton/m <sup>2</sup> (1.26 kg/cm <sup>2</sup> )

Se supuso para el suelo un peso volumétrico de 1.6 ton/m<sup>3</sup>

Espesor probable en la parte gruesa de la Isla de los Perros 5 + 6.58 = 11.58 m

la Isla de los Perros formada artificialmente por un relleno de unos 12 m de espesor.

¿Cómo se explicaría, por ejemplo, la gran inclinación de la iglesia de Sta. Teresa la Antigua (foto 1) (inclinación respecto de la vertical de 3.5°; la inclinación de la torre de Pisa es de 5°) hacia el oriente, sabiendo que la mayor carga se encuentra en su fachada poniente sobre la calle de Lic. Primo Verdad, de no admitir la ocurrencia de un asentamiento mayor general del subsuelo a partir y hacia afuera de la frontera de un importante relleno sobre el que se apoya la fachada menos hundida? Esta inclinación aumentará con el tiempo debido al hundimiento de la ciudad y conviene analizar la estabilidad de la estructura.

¿Cómo es que en el Palacio Nacional, a lo largo de la calle de Moneda (foto 2) y también en la de Corregidora (foto 3), aparecen puntos altos en vez de valles en la propia estructura del edificio de Palacio? Se sabe que estos desniveles del terreno ya empezaban a provocar





fallas en Palacio en la década de los cincuentas. En su informe Nabor Carrillo<sup>10</sup> indica la aparición de grietas, inclusive en los pisos, que corrían de norte a sur a lo largo de toda la manzana del edificio primero o frontal, pasando por la puerta que mira hacia la calle de Lic. Primo Verdad.

Los españoles arrasaron las construcciones de los aztecas hasta el nivel del piso y utilizaron los materiales originales seguramente para ampliar y elevar la isla, lo que permite explicar el gran espesor de rellenos (15 m) tanto en la zona de Palacio como en buena parte de la Catedral (foto 4), excepto en su cara poniente. No es de asombrar entonces los problemas de cimentación y de movimientos que por dicha heterogeneidad de los rellenos sufrió la Catedral durante su construcción en 300 años (fig. 5). Recientemente, la Catedral fue recimentada con pilotes de control a cargo del Ing. Manuel González Flores y bajo la supervisión del Arq. Jaime Ortiz Lajous.<sup>11</sup>

## 2. COMPRESIBILIDAD DE LAS ARCILLAS

Se presenta en este capítulo una explicación especial a dicha propiedad, ya que se considera que el fenómeno de consolidación, o sea el de la expulsión muy lenta del agua a través del medio arcilloso con permeabilidades sumamente bajas, es el principal causante de los asentamientos que a través del tiempo sufren las estructuras cimentadas en la zona lacustre del Valle de México.

La determinación del coeficiente de compresibilidad  $a_v = -\Delta e/\Delta p$ , siendo  $\Delta e$  el decremento de la relación de vacíos ante un incremento de presión  $\Delta p$ , requiere de un análisis especial. Los valores de este parámetro se han tomado de los ensayos de consolidación en muestras de los sondeos Pc-143 y Pc128-1 y 2, efectuados con motivo del estudio del hundimiento de la ciudad de México,<sup>5</sup> los que se conservan en el archivo del Instituto de Ingeniería.<sup>4</sup>

En las figs. 7 y 8 se dibujaron los valores medios y la desviación estándar del coeficiente de compresibilidad volumétrica  $m_v = a_v/(1 + e_1)$  calculado a partir del coeficiente de compresibilidad  $a_v$  y de la relación de vacíos inicial en los ensayos mencionados. Las barras verticales representan las desviaciones estándar de los valores de  $m_v$  para cada incremento de presión. Son mayores las del Pc143, sobre todo en el intervalo  $0 \leq p \leq 1.5 \text{ kg/cm}^2$ ; se reducen en el Pc128-1, 2, que ha estado sujeto a una consolidación considerable.

Se presenta además la información correspondiente a las pruebas

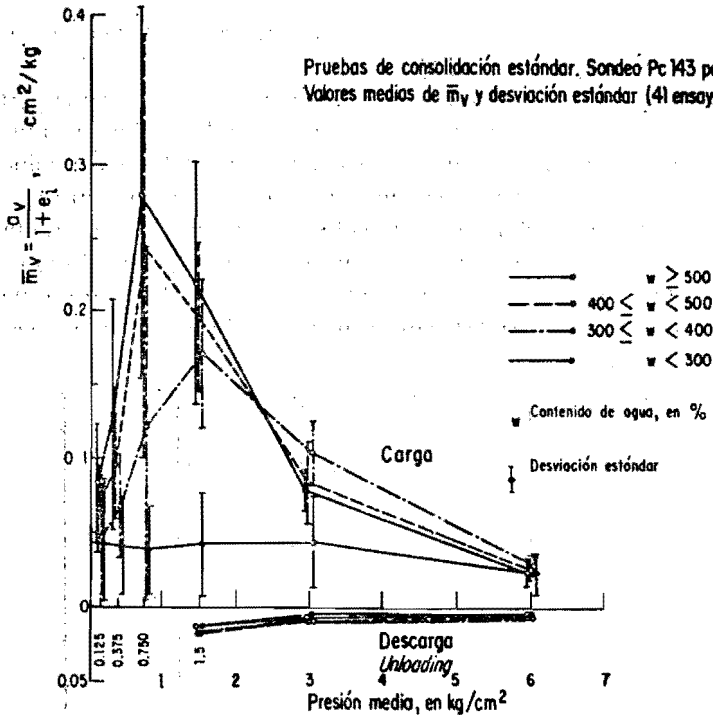


Fig. 7. Compresibilidad de las arcillas del subsuelo (Pc 143).

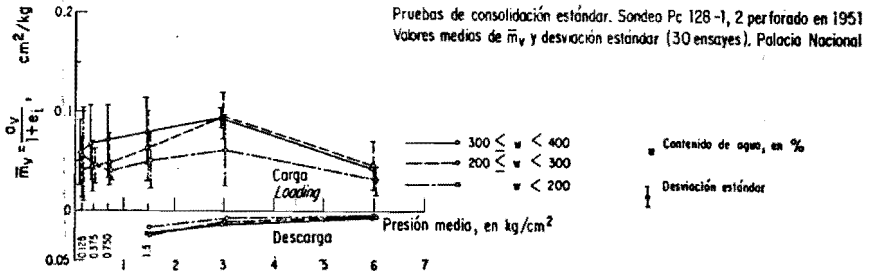


Fig. 8. Compresibilidad de las arcillas del subsuelo (Pc 128-1, 2).

del Pc143 calculadas con el  $a_{v\max}$  y una relación de vacíos  $e$ , en este máximo. Para grandes deformaciones, en función de los intervalos de contenido de agua inicial de las muestras, las arcillas no responden a esa envolvente; en cambio, resultan muy sensibles a la historia de car-

gas impuestas para expulsar el agua, hasta presiones de 8 kg/cm<sup>2</sup> en la prueba estándar (fig. 9).

Cuando al ingeniero le toca construir un edificio procura por razones obvias producir un mínimo de deformaciones; en tal caso es aceptable considerar un valor aproximado de los parámetros físicos involucrados, o inclusive suponerlos constantes en un panorama representativo de las condiciones del problema. Este procedimiento no resulta aplicable al estudiar las grandes deformaciones del Templo Mayor. Se hace necesario escoger los valores medios, siguiendo la historia de cargas bajo la cual los materiales van transformando sus propiedades.

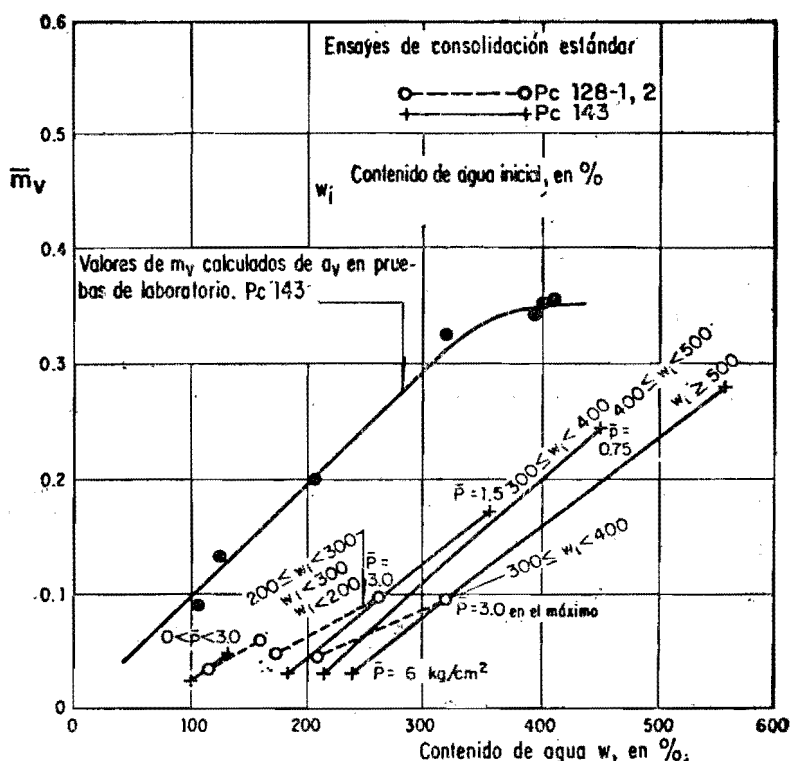


Fig. 9. Coeficiente promedio de compresibilidad volumétrica  $\bar{m}_v$  de las arcillas en función del estado de carga y para distintos intervalos del contenido de agua inicial.

Para estimar las deformaciones  $P$  en mantos de espesor  $H$ , bajo un incremento de esfuerzo vertical  $\Delta\sigma_z$ , el coeficiente de compresibilidad

$a_v$  o su índice  $m_v$  son determinantes, pues intervienen en una expresión de la forma

$$q = \frac{a_v}{1 + e_1} \Delta\sigma_2 H = m_v \Delta\sigma_2 H$$

### 3. POSIBLE GEOMETRÍA DE LAS ÚLTIMAS CINCO ETAPAS CONSTRUCTIVAS Y CÁLCULO DE ESFUERZOS EN EL SUBSUELO

#### 3.1. Peso de las pirámides

Como se mencionó en la introducción, se propone una posible geometría de las diferentes etapas constructivas, suponiendo que la corona de las primeras cinco fue casi igual a la de la segunda (fig. 1), a partir de los arranques e inclinaciones descubiertos durante la exploración reciente del Templo Mayor.<sup>1</sup> Se supone que en la sexta etapa se alcanzó una altura de 36 m, coronando en un adoratorio más amplio que los anteriores, con base en la información de que a la llegada de los españoles tenía 120 escalones.<sup>3</sup> Como se verá más adelante, es probable que las excesivas deformaciones tanto por consolidación como por una posible iniciación de falla en la cara poniente de esta última estructura, hayan sido un factor determinante para que los aztecas no intentaran proseguir y elevar considerablemente su altura hasta alcanzar un adoratorio de tamaño similar a las anteriores.

En una primera aproximación para los fines de cálculo que siguen se consideraron laderas con una geometría recta en vez de escalonada o en bermas, compensando la diferencia en peso que resulta de esta hipótesis con el peso del relleno necesario para nivelar el piso, deformado por el hundimiento propio de cada cuerpo. Para simplificar la estimación de los volúmenes de material que cada una contenía, ya que la mayor parte de los rellenos agregados resultan prácticamente de espesor constante, se propone la geometría de la fig. 10. Las dimensiones aquí anotadas no corresponden al origen de los arranques de los costados, sino a los lugares desde donde estos espesores agregados pueden considerarse constantes.

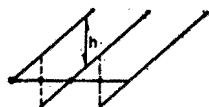
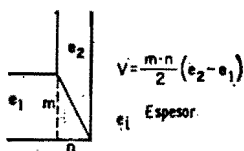
Se ha supuesto para la tierra que principalmente integraba el grueso de la masa de las estructuras, un peso volumétrico de 1.6 ton/m<sup>3</sup>.

#### 3.2. Esfuerzos inducidos en el subsuelo

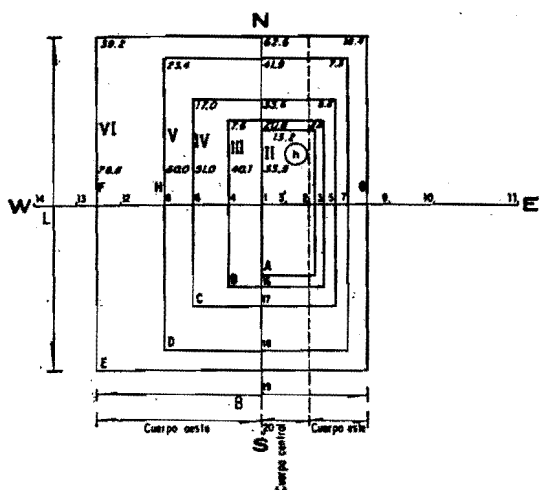
Como este trabajo probablemente sea de más interés para historiadores, arquitectos y antropólogos que para especialistas en mecánica

Dimensiones para la estimación de volúmenes de las distintas etapas constructivas

Correcciones de esquinas:



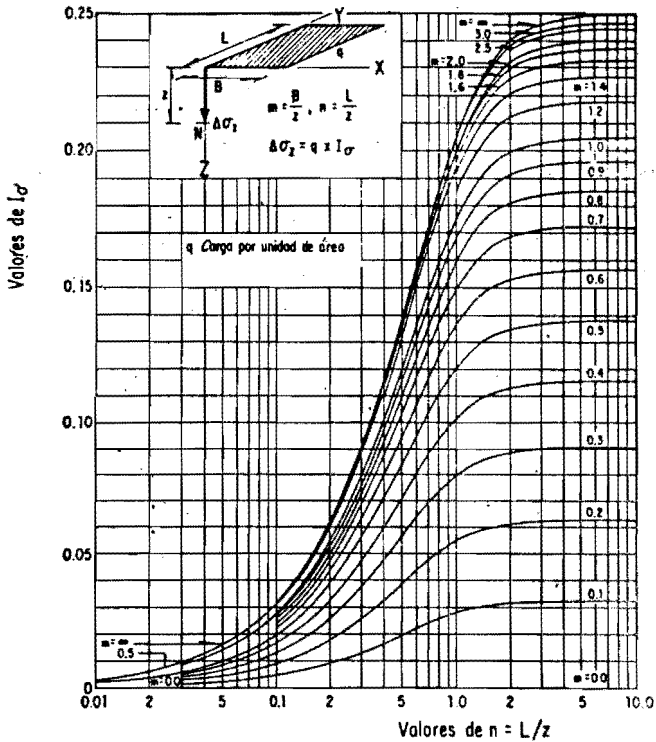
Acolaciones, en m. Las dimensiones no corresponden a los arranques de las pirámides, sino donde los incrementos de espesor  $h$  pueden considerarse constantes



Etapas	B m	L m	V m <sup>3</sup>	h m	q kg/cm <sup>2</sup>	$\bar{q}$ kg/cm <sup>2</sup>	Cuerpo
II	13.2	33.5		3.89	0.622	0.62	Un solo cuerpo
III	11.0	40.1		11.15	1.78		Central
	2.2	40.1	+3.5	8.2	1.31	1.68	Este
	7.6	40.1	-0.9	12.1	1.94		Oeste
IV	11.0	51.0		8.79	1.40		Central
	5.6	51.0	+4.0	5.6	0.90	1.31	Este
	17.0	51.0	-1.5	10.2	1.63		Oeste
V	11.0	60.0		5.24	0.84		Central
	7.5	60.0	-3.0	6.5	1.04	0.80	Este
	23.4	60.0	+8.4	6.4	0.70		Oeste
VI	11.0	78.8		0	0		Central
120 escalones	12.4	78.8		21.6	3.46	4.45	Este
	38.2	78.8	-2.6	34.0	5.44		Oeste
Descarga	88.3	58.4		36.00		5.76	

q Carga por unidad de área

Fig. 10. Geometría de pirámides para la estimación de pesos y deformaciones.



2. Uniformly distributed load on a rectangular area. If  $B$  is the width and  $L$  the length of a rectangular area, which carries a load  $q$  per unit of area the vertical normal stress at a point  $N$  (Fig. 120a) at a depth  $z$  below one of the corners of the area is equal to

$$\Delta\sigma_z = qI_s$$

The influence value  $I_s$  is determined by the equation

$$I_s = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \cdot \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 - m^2n^2} \right] \quad 136(B)$$

wherein

$$m = \frac{B}{z} \quad \text{and} \quad n = \frac{L}{z}$$

The values of  $I_s$  for given values of  $m$  and  $n$  can be determined from the graph on Plate 1, which has been prepared by R. E. Fadum.

FIG. 11. Método de cálculo de incrementos de esfuerzos verticales en un medio semi-infinito.

de suelos conviene reproducir aquí el método propuesto por Terzaghi (ref. 9, p. 484-485) para la estimación del esfuerzo inducido en un medio semi-infinito bajo la aplicación de una carga uniforme  $q$  sobre un área rectangular  $B \times L$  (fig. 11).

Dado que la solución es válida únicamente para la vertical de la esquina cargada, distintos puntos interiores o exteriores del área afectada pueden analizarse por superposición, ya sea positiva o negativa de distintos rectángulos colindando con el punto de interés.

La distribución de los incrementos de esfuerzo  $\Delta\sigma_z$  o presiones verticales, responsables de la deformación por expulsión de agua de los diferentes estratos del subsuelo, se resume para las principales etapas de las pirámides en la fig. 12. La distribución de esfuerzos con la profundidad corresponde a los puntos identificados en las figs. 1 y 10.

Con base en esa información, los resultados de los ensayos de consolidación y los espesores  $H_2-H_1$ , de la estratigrafía, pueden valorarse las deformaciones acumuladas conociendo la contribución de cada estrato.

#### 4. ESTIMACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS DE LAS PIRÁMIDES

A fin de valorar las deformaciones acumuladas en distintos puntos, bajo incrementos de esfuerzo vertical  $\Delta\sigma_z$  obtenidos en el capítulo 3, correspondientes a las diferentes etapas constructivas, se dividió verticalmente el subsuelo en nueve estratos entre 0 y 72 m de profundidad. Como se indica en la fig. 13, se han tabulado horizontalmente los valores medios de  $m_v$  propios de cada estrato en función de los contenidos de agua y de la presión, extraídos de los ensayos y siguiendo la historia carga-deformación en el laboratorio.

Para situaciones en las que la deformación es considerable conviene proceder en esa forma, evitando emplear, por ejemplo, la envolvente de propiedades estadísticas de las arcillas correspondientes a los contenidos de agua iniciales, encontrados en la naturaleza.

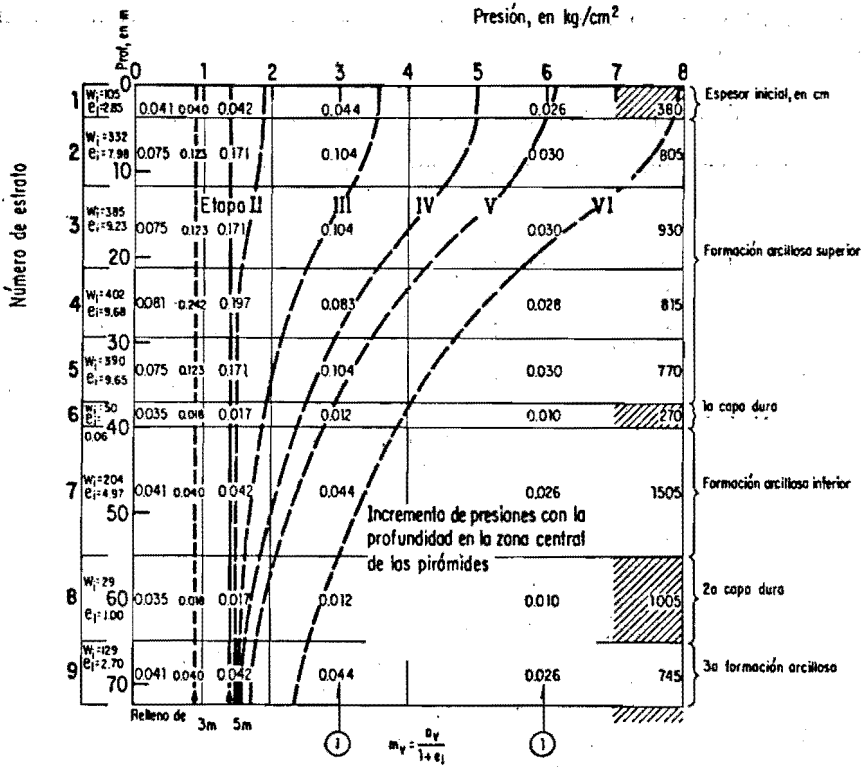
La fórmula que se empleará para estas determinaciones es:

$$\rho = \sum_{j=1}^n \rho_j = \sum_j \frac{a_{vj}}{1 + e_{ij}} \Delta\sigma_{zj} (H_2 - H_1)_j = \sum_j m_{vj} \Delta\sigma_{zj} (H_2 - H_1)_j$$

Habrá que seleccionar los valores de las tres cantidades mencionadas ( $m_v$ ,  $\Delta\sigma_z$  y  $H$ ) para cada situación de esfuerzo, e ir corrigiendo los espesores de los estratos  $j$  a cada paso, por tratarse de deformaciones







① Valores de  $m_v$  para cálculos de asentamientos del Templo Mayor. Pc 143, Pozo de referencia. Sobrecarga 0 ton/m<sup>2</sup>. De ensayos de consolidación

$w_i$  Contenido de agua inicial, en %

$e_i$  Relación de vacíos inicial

Fig. 13. Valores experimentales de  $m_v$  por estratos y en función de la presión (Pc 143).

la tabla 4 las deformaciones obtenidas en algunos puntos de las etapas II a V, suponiendo que éstas fueron edificadas sobre terreno virgen.

El perfil de asentamientos a lo largo del corte E-W por el centro de los edificios se muestra en la fig. 14. Hay que destacar dos aspectos de esta información:

a) Las deformaciones así obtenidas, por ejemplo, en el punto 1 y apenas para los cuatro primeros incrementos de carga, etapas I-II,

Tabla 4. Asentamientos de algunos puntos sobre terreno virgen

ETAPA II Puntos 1 y 2						Punto 3							
Capa	$\Delta H$	$\Delta\sigma_z$	$\bar{m}_v$	$\rho$ , cm ( $\gamma = 1.8$ )	$\rho$ , cm ( $\gamma = 1.6$ )	Capa	$\Delta H$	$\Delta\sigma_z$	$\bar{m}_v$	$\rho$ , cm ( $\gamma = 1.8$ )	$\rho$ , cm ( $\gamma = 1.6$ )		
1	380	0.350	0.041	5.4	4.8	1	380	0.689	0.041	10.7	9.5		
2	805	0.332	0.075	20.0	17.8	2	805	0.490	0.099	39.1	34.7		
3	930	0.238	0.975	16.6	14.7	3	930	0.308	0.075	21.5	14.1		
4	815	0.157	0.081	10.4	9.2	4	815	0.189	0.081	12.5	11.1		
5	770	0.105	0.075	6.1	5.4	5	770	0.105	0.075	6.1	5.4		
6	270	0.084	0.035	0.8	0.7	6	270	0.084	0.035	0.8	0.7		
7	1505	0.056	0.041	3.5	3.1	7	1505	0.056	0.041	3.4	3.0		
8	1005	0.035	0.035	1.2	1.1	8	1005	0.035	0.035	1.2	1.1		
9	745	0.035	0.041	1.1	1.0	9	745	0.035	0.041	1.1	1.1		
				Ptot	65.1	57.9					Ptot	96.4	85.6
ETAPA III Punto 1						Punto 2							
1	375	2.09	0.042	32.9	29.2	1	375	1.62	0.042	25.5	22.7		
2	785	1.80	0.147	207.7	184.6	2	785	1.20	0.147	138.5	123.1		
3	913	1.19	0.147	159.7	142.0	3	913	0.89	0.147	119.4	106.1		
4	805	0.75	0.161	97.2	86.4	4	805	0.65	0.161	84.2	74.9		
5	764	0.51	0.075	29.2	26.0	5	764	0.49	0.075	28.1	25.0		
6	269	0.40	0.035	3.8	3.4	6	269	0.39	0.035	3.7	3.3		
7	1502	0.30	0.041	18.5	16.4	7	1502	0.29	0.041	17.9	15.9		
8	1004	0.18	0.035	6.3	5.6	8	1004	0.20	0.035	7.0	6.2		
9	744	0.14	0.041	4.3	3.8	9	744	0.15	0.041	4.6	4.1		
				Pt	559.6	497.5					Pt	428.9	381.3
ETAPA IV Punto 1						Punto 2							
1	346	1.71	0.044	26.0	23.1	1	352	1.28	0.044	20.0	17.8		
2	603	1.61	0.104	100.9	89.7	2	664	1.15	0.104	79.4	70.6		
3	773	1.28	0.104	102.9	91.5	3	681	0.93	0.104	65.9	58.6		
4	719	0.93	0.197	131.7	117.1	4	731	0.70	0.197	100.8	89.6		
5	739	0.70	0.140	72.4	64.4	5	740	0.58	0.140	60.1	53.4		
6	266	0.59	0.018	2.8	2.5	6	266	0.50	0.019	2.4	2.1		
7	1486	0.42	0.040	25.0	22.2	7	1486	0.39	0.040	23.2	20.6		
8	998	0.27	0.035	9.4	8.4	8	998	0.25	0.035	8.7	7.7		
9	740	0.21	0.041	6.4	5.7	9	740	0.20	0.041	6.1	5.4		
				Pt	477.5	424.6					Pt	366.6	325.8
ETAPA V Punto 1						Punto 2							
1	323	0.86	0.026	7.2	6.4	1	334	1.05	0.026	9.1	8.1		
2	513	0.83	0.030	12.8	11.4	2	593	0.93	0.030	16.5	14.7		
3	681	0.74	0.065	32.7	29.1	3	622	0.67	0.065	27.1	24.1		
4	602	0.60	0.083	29.9	26.6	4	641	0.53	0.083	28.2	25.1		
5	675	0.46	0.135	41.9	37.2	5	687	0.41	0.135	38.0	33.8		
6	263	0.41	0.017	1.8	1.6	6	264	0.38	0.017	1.7	1.5		
7	1464	0.32	0.042	19.7	17.5	7	1465	0.30	0.042	18.4	16.4		
8	990	0.23	0.018	4.1	3.6	8	990	0.21	0.018	3.7	3.3		
9	734	0.16	0.040	4.7	4.2	9	735	0.17	0.040	5.0	4.4		
				Pt	154.8	137.6					Pt	147.7	131.4
Asentamiento total					1117.6						924.1		

$\Delta H$  Espesor de la capa, en m

$\Delta\sigma_z$  Incremento de esfuerzo, en  $\text{kg/cm}^2$

$\bar{m}_v$  Módulo de compresibilidad volumétrica promedio, en  $\text{cm}^2/\text{kg}$

$\rho$  Asentamiento

$\gamma$  Peso volumétrico, en  $\text{ton/m}^3$

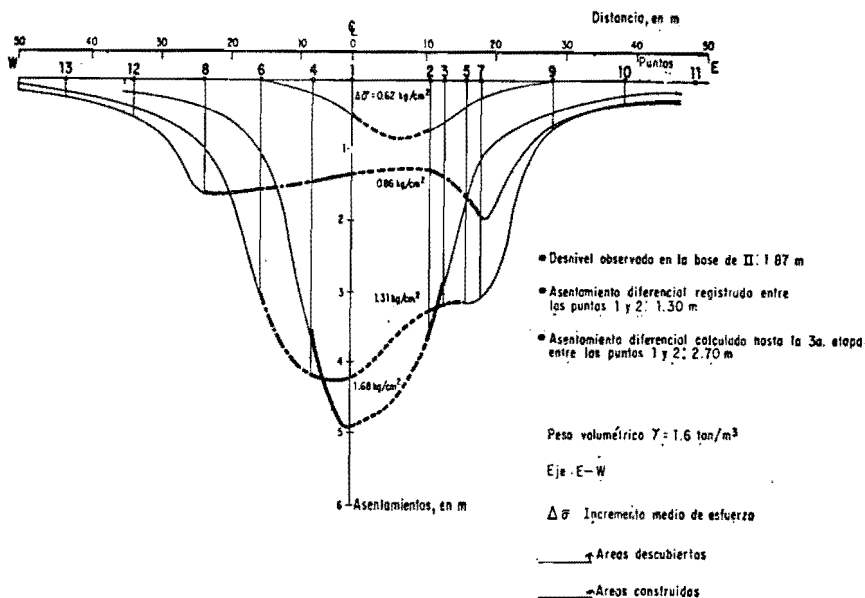


Fig. 14. Perfiles de asentamientos de las pirámides sobre terreno virgen de las etapas II a V. Corte E-W.

III y IV, arrojan valores de 58, 498 y 425 cm, respectivamente, sumando 9.81 m, muy arriba de los 5.6 m observados en la realidad; dichos valores no incluyen las deformaciones de las últimas dos pirámides. Esto ha sido el principal argumento para proponer que antes de la construcción de las pirámides mismas, y por lo menos previamente a la construcción de la segunda fase, los aztecas comprimieron considerablemente el terreno en una amplia zona varias veces mayor que el área ocupada por el Templo Mayor, mediante una plataforma anteriormente denominada la Isla de los Perros. Como se mencionó, para que ésta sobresaliera unos 5 m fue necesario por la compresibilidad de los mantos que se contemplan en el ejemplo, que esta base desplazara las arcillas en unos 6.6 m y permaneciera en su mayor parte sumergida por abajo del nivel freático (tabla 3).

b) Otro punto interesante es la influencia de la asimetría de cargas de la tercera y cuarta pirámides sobre la inclinación de la segunda. El asentamiento diferencial entre los puntos 1 y 2 resulta de 270 cm para estas tres etapas. Evidentemente el ejem-

plo únicamente ilustra la tendencia, aquí exagerada, según la cual la inclinación de la pirámide fue provocada por el mayor espesor y peso agregado en las laderas poniente como parte de las escaleras de los cuerpos, admitiendo que dicha inclinación no se debió a una falla por capacidad de carga del terreno. Como se verá, de haberse construido las pirámides sobre terreno virgen, una estimación de resistencia o de capacidad de carga muestra que el subsuelo hubiera fallado por esa razón desde su cuarta etapa constructiva. Más adelante se comparará el asentamiento observado con el estimado bajo una situación posiblemente más realista.

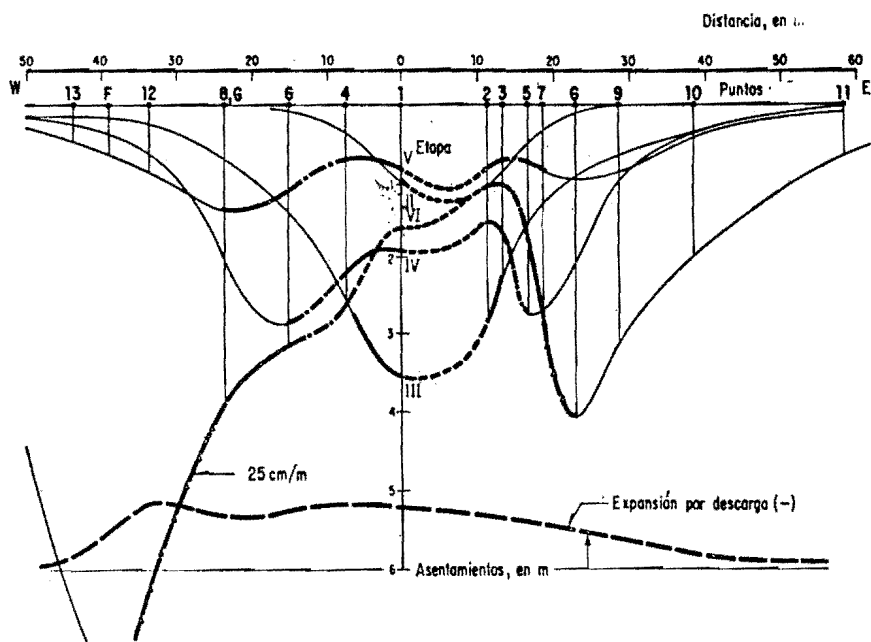
#### 4.2. Construcción de las pirámides sobre un relleno flexible

Estimaciones con el mismo procedimiento bajo el supuesto de una precompresión del manto arcilloso debido a un relleno previo de espesor total de 12 m, seis de ellos por abajo del nivel freático, llevan al empleo de valores de  $m_v$  en un intervalo de presiones mayores. Además, al considerar los incrementos de esfuerzo con la profundidad indicados en la fig. 12 se obtienen los perfiles de deformación a lo largo de los ejes E-W y N-S mostrados en las figs. 15 y 16, correspondientes a cada uno de los incrementos de carga.

Puede observarse en las figuras que las etapas constructivas II y III producen asentamientos en forma de olla, y que en las etapas IV y V, la parte central tiende a quedarse arriba, con mayores asentamientos hacia el exterior y más notables hacia el poniente, hacia la región de las escalinatas del templo.

Destaca aquí, sobre todo en la sexta etapa, que mientras los asentamientos son del orden de 1.5 m en el centro, o sea en la región altamente preconsolidada por los primeros edificios, se incrementan notablemente hacia el norte, sur y este ( $\approx 4.2$  m), sobre todo hacia el oeste, alcanzando un valor de 7.7 m en la región todavía poco comprimida por los incrementos de carga anteriores.

Se aprecia en estas figuras que los patios que seguramente se construyeron horizontalmente en los perímetros al finalizar cada etapa, han sufrido asentamientos con pendientes hacia el exterior dejando una protuberancia hacia el centro (Foto 5). Por ejemplo, la etapa VI (fig. 16) indica pendientes del orden de 16 por ciento. Éstas debieron incrementarse algo, tanto por la descarga provocada por los españoles al destruirlos, como por los asentamientos que la ciudad ha sufrido durante este siglo por el bombeo de aguas profundas.



Construcción previa de la Isla de los Perros con 5 m de altura y asentamiento total de 6.6 m (consolidación)

Desnivel calculado entre 1 y 2: 1.46 m

Desnivel observado en toda la base de II: 1.87 m

Eje E-W

Áreas descubiertas \_\_\_\_\_

Desnivel real entre 1 y 2: 1.30 m

Áreas construidas \_\_\_\_\_

Fig. 15. Asentamientos estimados de las seis etapas constructivas del Templo Mayor. Recuperación del fondo al ser arrasados los edificios. Corte E-W.

Las inclinaciones hacia el exterior de los patios perimetrales de la sexta etapa constructiva, de mayor pendiente cerca del Templo Mayor y disminuyendo su magnitud con la distancia, se deben a importantes rellenos ( $\approx 3$  m) de los españoles, y a la influencia de las deformaciones que ya se dejan sentir hasta la superficie debidas al bombeo profundo de la ciudad.

Se estimó la recuperación de los movimientos al ser arrasados estos edificios por los españoles hasta el nivel de piso, usando los valores experimentales de  $m_{vd}$  en la descarga (de  $-0.003$  para los 24 m superiores con  $\Delta\sigma_z = -3.84$  kg/cm<sup>2</sup> y de  $-0.007$  para los 12 m restantes con  $\Delta\sigma_z = 1.9$  kg/cm<sup>2</sup>). Como aparece en las figs. 15 y 16, la recu-

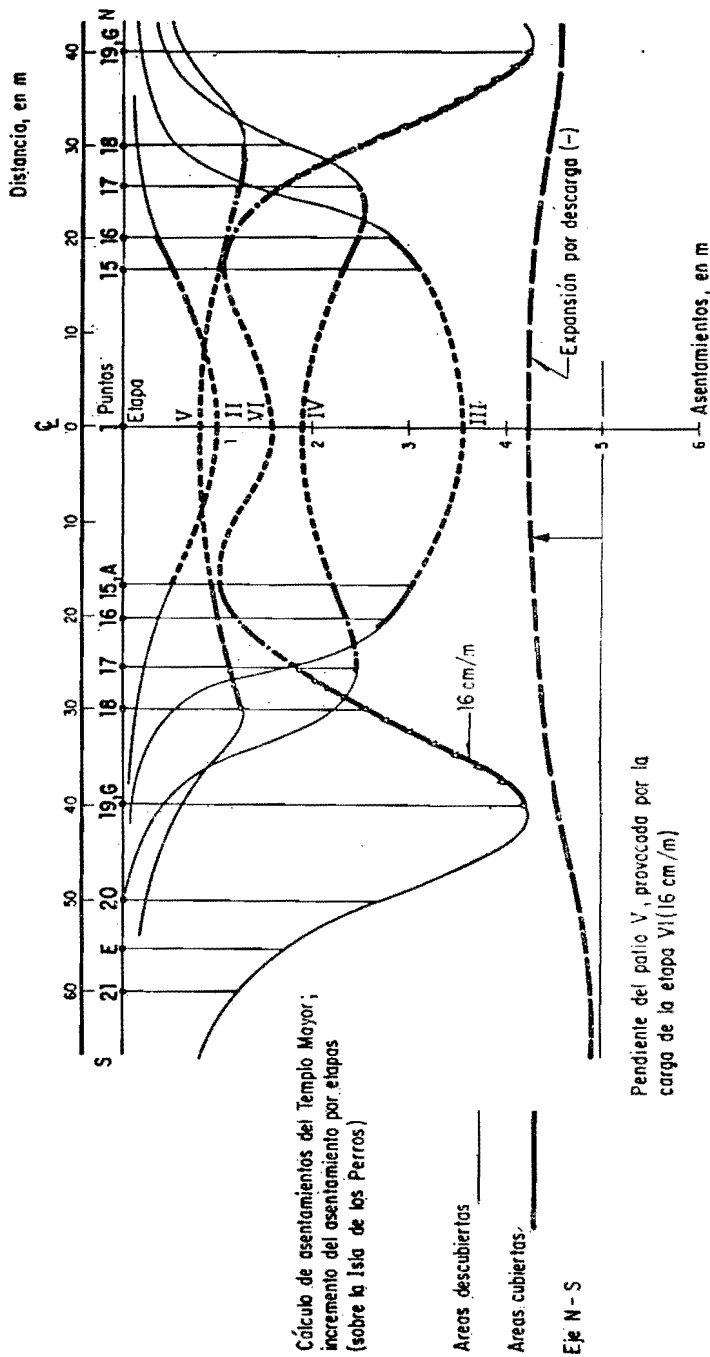
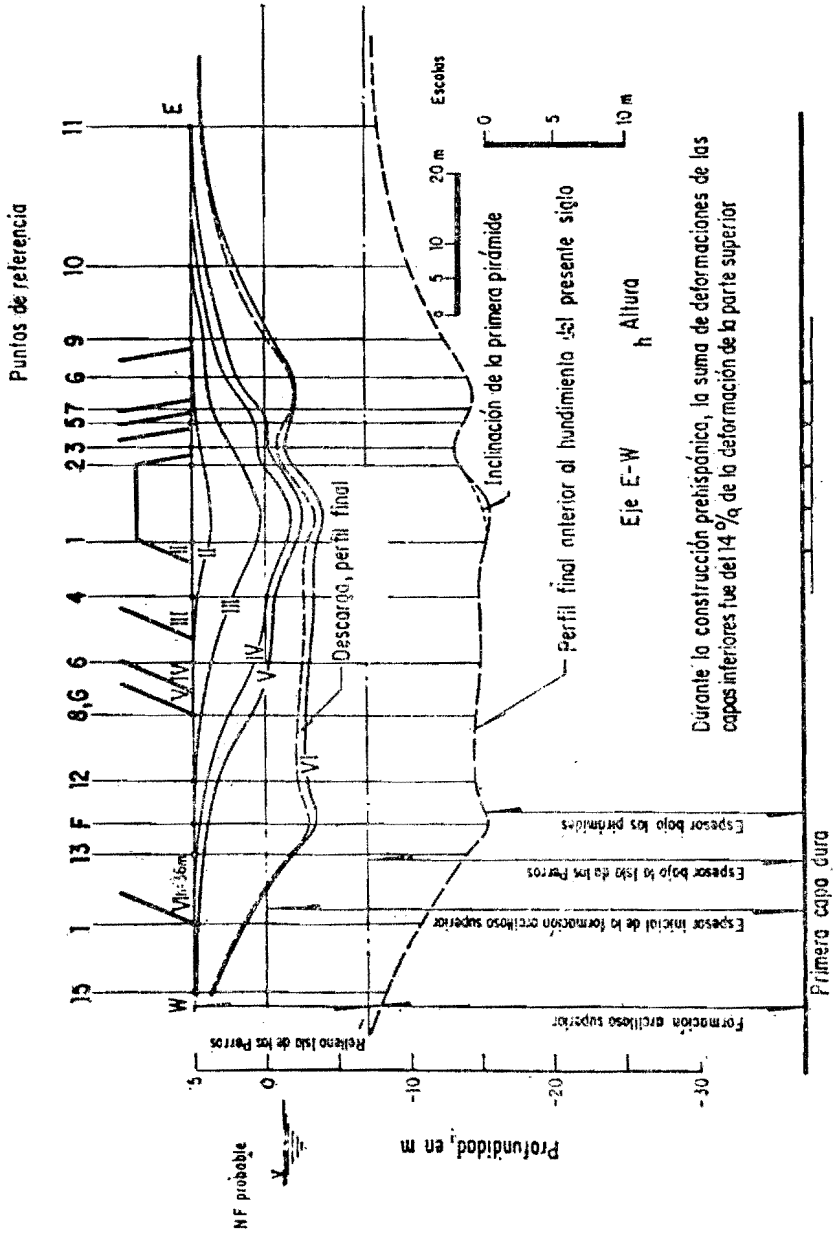


Fig. 16. Asentamientos según un corte N-S.



Durante la construcción prehispánica, la suma de deformaciones de las capas inferiores fue del 14 % de la deformación de la parte superior

Fig. 17. Asentamientos acumulados bajo un proceso de consolidación unidimensional.



peración o expansión por descarga del manto es considerable, del orden de 80 cm en la zona central.

El desnivel final entre los puntos 1 y 2 del primer edificio en el cálculo resulta de 146 cm, mientras que el observado<sup>1</sup> es de 130 cm entre los mismos puntos (Foto 6).

Para terminar con lo relativo a los asentamientos por consolidación, en la fig. 17 se ha acumulado lo que resulta de la estimación de las deformaciones correspondientes a las seis etapas constructivas. La contribución de las deformaciones debidas a los incrementos de esfuerzo calculados a partir de la primera capa dura, originalmente a los 37 m de profundidad, fue únicamente de 14 por ciento.

## 5. VERIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD POR CAPACIDAD DE CARGA

Tratándose de presiones tan considerables, impuestas por la construcción del Templo Mayor en un suelo arcilloso con un muy alto contenido de agua como el de la ciudad de México,<sup>5</sup> resulta importante efectuar una estimación de la estabilidad de estos edificios por resistencia o capacidad de carga, particularmente en una formación como la que originalmente tenía el lago de Texcoco.

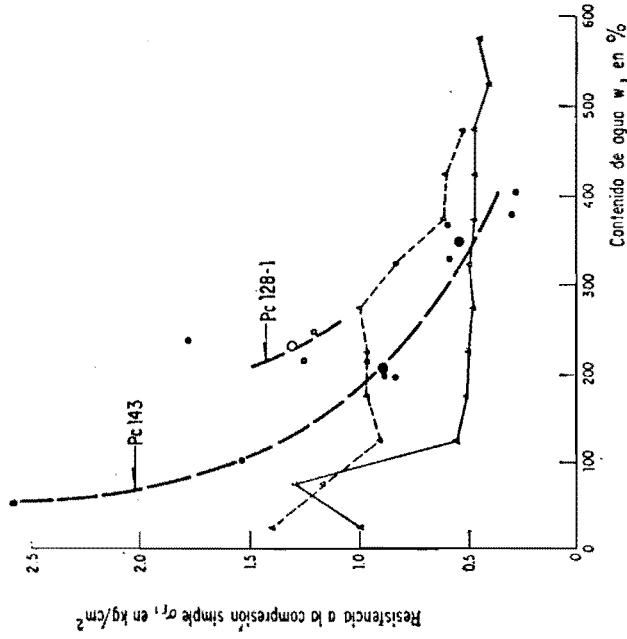
Para tener una idea de la resistencia a la compresión simple  $\sigma_r$  de estas arcillas, en la que la cohesión  $c$  o resistencia al esfuerzo cortante se tomó como la mitad, se han resumido en la fig. 18 los valores estadísticos de la formación arcillosa superior que aparecen en la ref. 5, así como los valores correspondientes de los sondeos Pc143 y Pc128-1.

En los cálculos relativos a la capacidad de carga que siguen, se ha tomado la variación de  $\sigma_r$  con el contenido de agua del Pc143, así como las fórmulas para este objeto  $q_p = 5.7c$  para un cimiento largo y  $q_p = 1.3 \times 5.7c$  para uno cuadrado sometido a una carga  $q$ , tomadas de la misma ref. 9, art. 45.

La variación de la resistencia en función del cambio en el contenido de agua, deducido de las deformaciones que por consolidación sufrieron los diferentes estratos durante las seis etapas constructivas permite, previamente a la aplicación del siguiente paso, estimar su capacidad de carga, salvando la posibilidad de que la consolidación no se hubiera completado durante dicho incremento.

### 5.1. Construcción de las pirámides sobre terreno virgen

En la tabla 5 se han resumido los valores de las deformaciones, contenidos de agua dependiendo de dichas deformaciones, resistencia



Tipo de folio por capacidad de carga para materiales cohesivos

$$q_0 = 5.7c \quad \text{Cimiento largo.}$$

$$q_0 = 1.3 \times 5.7c \quad \text{Cimiento cuadrado (ref 9)}$$

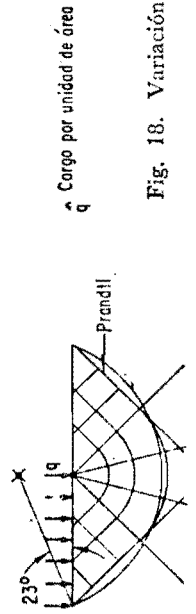


Fig. 18. Variación de la resistencia a la compresión simple en función del contenido de agua.

TABLA 5. Verificación de la estabilidad por capacidad de carga. Construcción de pirámides sobre suelo virgen. Referencia: Pc 143.

Características Iniciales	Estrato 1 0 - 3.80 m	Estrato 2 3.80 - 11.85 m	Estrato 3 11.85 - 21.15 m	Estrato 4 21.15 - 29.30 m	Estrato 5 29.30 - 37.00 m
h	380	805	930	815	770
w	105	302	385	402	390
e	2.85	7.98	9.23	9.68	9.65
$\sigma_r$	1.54	0.54	0.30	0.29	0.60
c	0.77	0.27	0.15	0.15	0.30
H		8.9			
$q_D = 5.7\bar{c}$		2.96			
$\Delta p$ (II)		0.62			
FS		4.77			
$\delta_{II}$	5	18	15	9	5
w	105	295	378	397	387
$\sigma_r$	1.54	0.65	0.45	0.39	0.40
c	0.77	0.33	0.23	0.20	0.20
H			15.6		
$q_D = 5.7\bar{c}$		2.52			
$\Delta p$ (II+III)		2.30			
FS		1.10			
$\delta_{III}$	29	185	142	86	26
w	94	217	313	350	362
$\sigma_r$	1.70	0.90	0.60	0.50	0.48
c	0.85	0.45	0.30	0.25	0.24
H				24.3	
$q_D = 7.4\bar{c}$			3.40		
$\Delta p$ (II+III+IV)			3.61		
FS			0.94		
Desde esta etapa, falla por capacidad de carga					
$\delta_{IV}$	23	90	92	117	64
w <sub>i</sub>	85	180	271	288	327
$\sigma_r$	1.77	1.08	0.72	0.66	0.55
c	0.88	0.54	0.36	0.36	0.27
H					30.0
$q_D = 7.4\bar{c}$				3.85	
$\Delta p$ II+...+V)				4.47	
FS				0.86	
Se incrementa la inestabilidad por capacidad de carga					

Se usó fórmula  $w_r = w_i [1 - \frac{\delta}{H} (\frac{1 + e_1}{e_1})]$  para calcular la disminución del contenido de agua y la gráfica de la fig. 18, para la variación de la resistencia  $\sigma_r$  a lo largo del sondeo Pc143.

- h Espesor, en cm
- w Contenido de agua inicial, en %
- e Relación de vacíos
- $\sigma_r$  Resistencia a la compresión simple, en kg/cm<sup>2</sup>
- c Cohesión, en kg/cm<sup>2</sup>
- Estrato i
- H Profundidad afectada, en m
- $q_D$  Capacidad de carga, en kg/cm<sup>2</sup>
- $\Delta p$  Carga por etapa i
- FS Factor de seguridad
- $\delta$  Deformación, en cm

TABLA 6. Verificación de la estabilidad por capacidad de carga. Construcción de pirámides sobre la Isla de los Perros. Referencia: Pc 143.

Características iniciales	Estrato 1 0 - 3.80 m	Estrato 2 3.80 - 11.05 m	Estrato 3 11.05 - 21.15 m	Estrato 4 21.15 - 29.30 m	Estrato 5 29.30 - 37.00 m
h	380	805	930	815	770
w	105	302	385	402	390
e	2.95	7.95	9.23	9.68	9.85
$\sigma_r$	1.54	0.54	0.30	0.29	0.60
$\delta$	20	101	117	164	97
$\delta^*$	97	259	331	313	336
$\sigma_r$	1.65	0.77	0.55	0.60	0.52
c	0.83	0.39	0.28	0.30	0.25
H	8.9				
		Espesor Isla de los Perros = 11.6 m			
$q_D = 5.7\bar{c}$	4.39	Suponiendo $\sigma_r = e$ la del estrato 1			
$\Delta p$ (II)	0.62				
FS	7.08				
$\delta_{II}$	5	35	29	18	10
w	95	244	318	303	331
$\sigma_r$	1.66	0.80	0.59	0.61	0.54
c	0.83	0.40	0.30	0.30	0.27
H	15.6	Isla de los Perros más estrato 1			
$q_D = 5.7\bar{c}$		4.73			
$\Delta p$ (II + III)		2.30			
FS		2.06			
$\delta_{III}$	29	109	85	58	51
w	84	153	274	258	300
$\sigma_r$	1.78	1.05	0.71	0.74	0.63
c	0.89	0.53	0.35	0.37	0.28
H			24.30		
$q_D = 7.6\bar{c}$	Tomado 2 veces para $\bar{c}$		4.92		
$\Delta p$ (II + III + IV)			3.61		
FS			1.36		
$\delta_{IV}$	13	23	50	38	36
w	79	184	252	248	278
$\sigma_r$	1.85	1.05	0.78	0.80	0.79
c	0.93	0.53	0.39	0.40	0.28
H				30.0	
$q_D = 7.4\bar{c}$	Tomado 2 veces para $\bar{c}$			4.71	
$\Delta p$ (II + ... + V)				4.71	
FS				1.05	
$\delta_V$	6	11	12	8	24
w	77	180	247	244	266
$\sigma_r$	1.89	1.08	0.80	0.80	0.75
c	0.99	0.54	0.40	0.40	0.37
H					44
$q_D = 5.7\bar{c}$	Tomado 2 veces para $\bar{c}$				4.45
$\Delta p$ (II + ... + VI)		Cero carga al centro, 4.5 perimetral			4.47
FS					1.02

Con la deformación por consolidación FS se incrementa a 1.04.

Se promediaron las c aritméticamente, no por espesores y longitudes de influencia.

- |                |  |                |   |
|----------------|--|----------------|---|
| h              | Espesor, en cm   | e              | Relación de vacíos                        |
| w <sub>1</sub> | Contenido de agua inicial, en %  | H              | Profundidad afectada, en m                |
| w*             | Contenido de agua para la Isla de los Perros, en %   | q <sub>D</sub> | Capacidad de carga, en kg/cm <sup>2</sup> |
| $\sigma_r$     | Resistencia a la compresión simple, en kg/cm <sup>2</sup>  | $\Delta p$     | Carga para etapa i                        |
| $\sigma_r^*$   | Resistencia a la compresión simple por el efecto de la Isla de los Perros, en kg/cm <sup>2</sup> | FS             | Factor de seguridad                       |
| c              | Cohesión, en kg/cm <sup>2</sup>  | $\delta$       | Deformación, en cm                        |
|                |  | $\delta^*$     | Deformación, Isla de los Perros, en cm    |
|                |  |                | Estratos i                                |

y cohesión de distintos estratos, así como su capacidad de carga y factores de seguridad. Bajo esta suposición de construcción, únicamente las primeras dos etapas alcanzan factores de seguridad mayores de uno, demostrando una franca inestabilidad a la falla desde el cuarto incremento.

## 5.2. Construcción de las pirámides sobre la Isla de los Perros

Con el mismo procedimiento, bajo el supuesto de la construcción de la Isla de los Perros previa a la de las pirámides, los factores de seguridad van disminuyendo desde 7 para la etapa II, a 1.05 para la cuarta, hasta un valor 1.02, muy próximo a 1 para el sexto incremento de carga (tabla 6).

Es posible que la plataforma frontal todavía de la etapa V se hubiera agregado para detener los inicios de una falla incipiente de la pirámide V en su frente W (Foto 7).

Tanto las grandes deformaciones diferenciales por consolidación como la posible iniciación de una falla por capacidad de carga en la última etapa fueron probablemente indicios que influyeron para que los aztecas limitaran la altura de la etapa VI, aproximadamente a los 36 m con un adoratorio de mayores dimensiones a ese nivel, que el de los correspondientes a las etapas III a V con posibles dimensiones similares al de la segunda pirámide.

De haber construido estas estructuras sobre un mejor terreno es posible que el nivel de la etapa VI hubiera alcanzado una mayor altura.

Nuevamente, dichas estimaciones proporcionan evidencia de que los aztecas no pudieron haber construido sus pirámides directamente sobre terreno virgen. Vuelve a mostrarse la necesidad de la construcción previa de la Isla de los Perros.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 6.1. Las exploraciones arqueológicas recientes de las partes de los templos del Gran Teocalli no destruidas por los españoles revelaron, por encontrarse hundidas y en gran parte sumergidas bajo el nivel freático de la época, información de lo que fue el basamento de las pirámides, evidenciando seis épocas constructivas principales del Templo Mayor.
- 6.2. A partir de dicha información puede inferirse razonablemente cuál fue la geometría aproximada que pudieron tener las pirámides en sus diferentes etapas.

- 6.3. Como no se cuenta con información de las características del subsuelo en el propio lugar, se tomó del archivo del Instituto de Ingeniería la información de dos posibles perfiles estratigráficos, uno virgen (Pc143) y otro afectado por construcciones y bombeo (Pc128-1), como indicativos para estudiar en una primera aproximación la mecánica de lo que posiblemente ocurrió durante la construcción del Templo Mayor.
- 6.4. Dado que los materiales modifican sus características con el proceso de deformación, para acercarse al cálculo a la realidad se procedió por incrementos finitos, siguiendo la historia de lo ocurrido en el laboratorio. También en la descarga un valor medio de  $m_v$  con 36 m retirados en una sola etapa arroja valores muy altos; esta fase también se calculó en dos pasos. Se utilizaron los valores de las características mecánicas obtenidas en laboratorio de muestras de los sondeos mencionados, especialmente las relacionadas con compresibilidad de los mantos arcillosos. Para grandes deformaciones conviene emplear la información del laboratorio a través de la historia de carga o descarga de las arcillas. La envolvente estadística de las arcillas naturales arroja valores excesivamente altos de compresibilidad para este objeto.
- 6.5. Se localizó información referente a los niveles topográficos en las zonas del lago y céntrica de la ciudad en distintas épocas, que muestran el fuerte asentamiento provocado por el bombeo de aguas subterráneas, principalmente en el presente siglo.
- 6.6. Con base en teorías de elasticidad para estimar el estado de esfuerzos en el subsuelo bajo las diferentes sobrecargas impuestas por las estructuras, y con la información experimental mencionada se hicieron las estimaciones de las deformaciones suponiendo que el proceso es de consolidación unidimensional.
- 6.7. De dichas estimaciones surgieron los siguientes comentarios:
  - a) De haberse levantado instantáneamente las seis etapas constructivas en un perfil virgen del lago, los asentamientos hubieran alcanzado fácilmente el doble de los observados.
  - b) La asimetría de las pirámides con mayor peso del lado oeste por la presencia de las escaleras explica la notable inclinación hacia ese costado de la segunda estructura. Ésta no se debe a una falla por capacidad de carga o por haberse construido

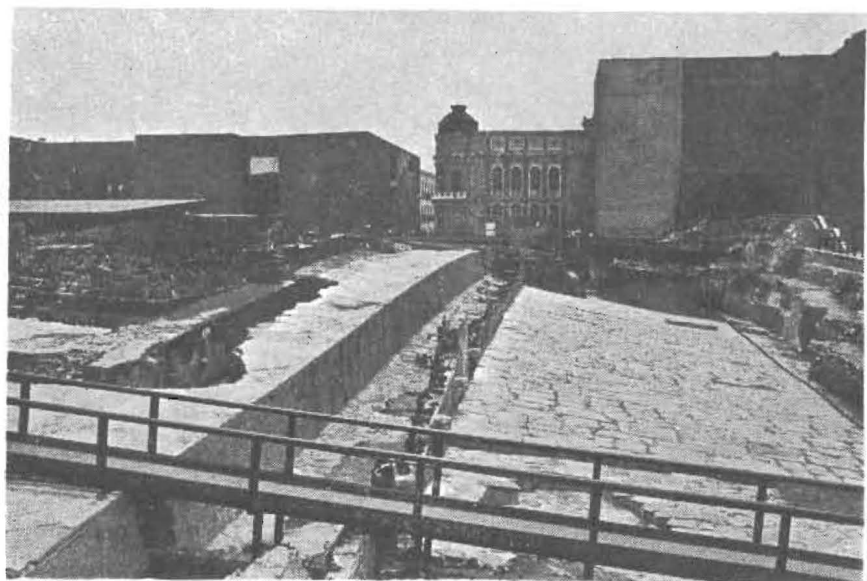


Foto 5. Joroba sur de las etapas V y VI del Templo Mayor.  
Inclinación de patios hacia el exterior.

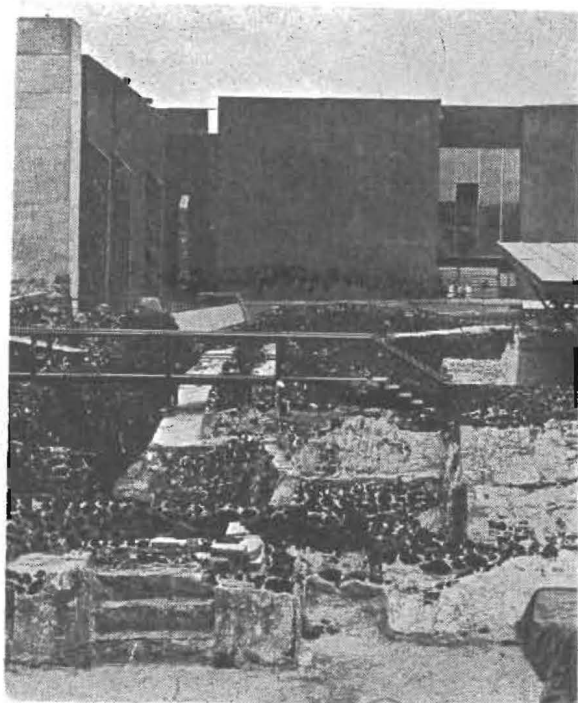


Foto 6. Inclinación hacia el W de la pirámide; etapa II del Templo Mayor.

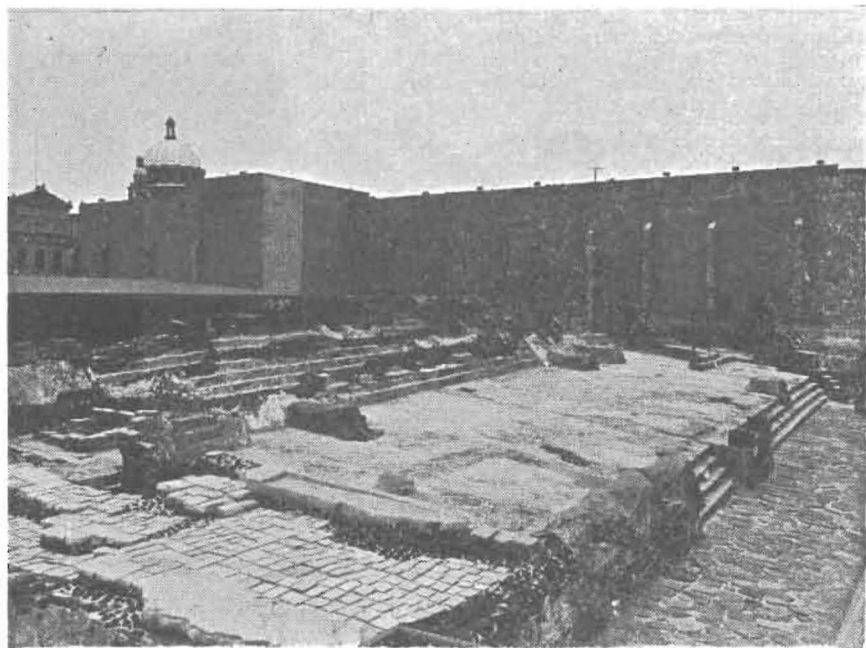


Foto 7. Inclinación hacia el exterior de los patios del Templo Mayor.  
Escalinatas W de la etapa V.

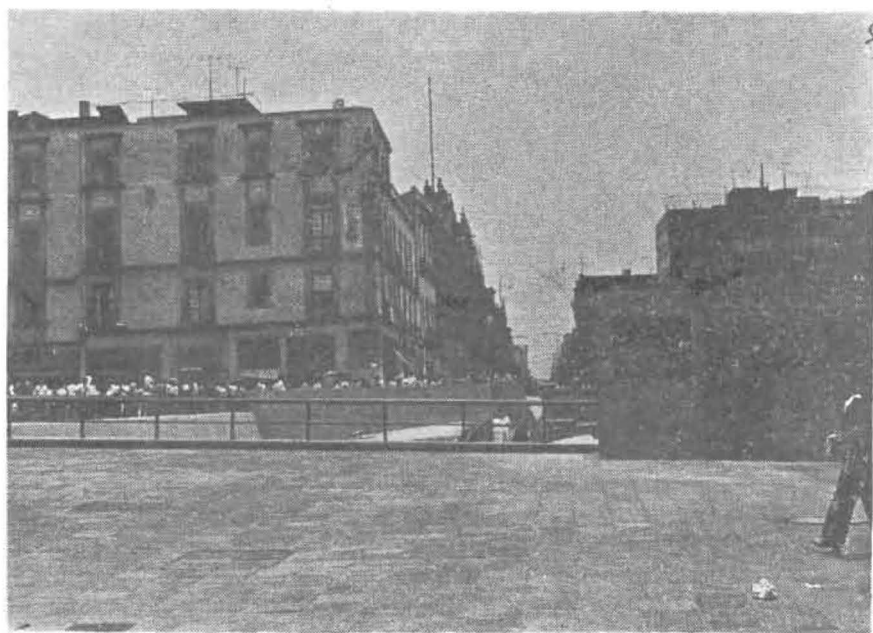


Foto 8. Esquina Guatemala y Argentina de S a N. Esquina sobre la VI etapa del  
Templo Mayor.



con esa inclinación; por consolidación, las etapas posteriores inclinaron a esa estructura hacia el oeste.

- c) Otro efecto también explicable por estas estimaciones es la notable pendiente de los patios hacia el exterior. Se mencionó que los asentamientos de las etapas II y III mostraban una forma de olla, mientras que durante los posteriores incrementos de carga, principalmente las IV y VI, estas construcciones arrastraron a los patios obviamente construidos horizontalmente, imponiéndoles una pendiente importante hacia el exterior. Este efecto se incrementó por la descarga cóncava hacia arriba en el centro. Además el efecto crece por los hundimientos en la ciudad, que aunque en gran parte ocurren uniformemente en los estratos inferiores, con el tiempo dejan sentirse diferencialmente en la superficie (Foto 8).
- d) Para alcanzar las deformaciones recientemente descubiertas debió existir un manto de considerable espesor, que en esa época sobresalía unos 5 m sobre el nivel del lago con 6 m sumergidos; este relleno tuvo que construirse previamente a la edificación de las pirámides, o por lo menos a partir de la etapa III de la monumental obra. La Isla de los Perros pudo haberse construido antes de la conquista española, quizá iniciada con el método de las chinampas, seguramente desarrollado durante un tiempo considerable. No parece haber existido un islote natural en el lugar.

6.8. Estimaciones de la capacidad de carga confirman la anterior conclusión.

- a) Las pirámides no pudieron ser construidas sobre terreno virgen. Desde la cuarta etapa el suelo hubiera presentado signos evidentes de falla.
- b) Aunque con factores de seguridad muy próximos a 1 para las etapas V y VI, la estabilidad ante una falla del subsuelo todavía se mantiene bajo el supuesto de la construcción previa de la Isla de los Perros.

Tanto los grandes asentamientos diferenciales estimados para la etapa constructiva VI, como los indicios de una iniciación de falla del suelo posiblemente observados por los aztecas, fueron causa de que la construcción se limitara a los 120 escalones, rematada con un adoratorio más amplio.

- 6.9. Debido a la descarga inducida durante la excavación efectuada para descubrir las pirámides, también se ha presentado una segunda recuperación elástica del terreno. Se conserva un bombeo que mantiene abatido el nivel freático actual alrededor de 3 m en el interior del Templo Mayor. Aunque dicho bombeo debe ser pequeño en volumen, si el abatimiento del nivel freático se propaga en la vecindad, esto equivaldrá a una sobrecarga que seguramente provocará movimientos irregulares en las construcciones vecinas. En principio, para mantener el nivel freático en las áreas colindantes, esta agua debe reintegrarse al suelo. Salvo por la presencia de alguna grieta o conducto abierto, la cantidad de agua que se ha de reinyectar no debe ser grande, dada la tan baja permeabilidad de las arcillas. Es recomendable la vigilancia de este mecanismo de recuperación del nivel freático en la vecindad.
- 6.10. Los cálculos presentados en el texto parecen confirmar, por lo menos en sus aspectos medulares, los mecanismos que llevaron a las deformaciones observadas. Para mejorar estas estimaciones, todavía preliminares, pero basadas en una buena información de sondeos cuidadosos aunque distantes del Templo Mayor, convendría explorar el subsuelo abajo y en la vecindad de la gran obra.
- 6.11. La parte gruesa o alta de la plataforma localizada originalmente en la parte céntrica de la ciudad, denominada Isla de los Perros se refleja actualmente en la topografía del terreno como lo muestra una inspección ocular recientemente efectuada. Sería muy instructiva una nivelación en la zona céntrica de la ciudad, lo que informaría mejor acerca de lo comentado de la inspección ocular, así como sondeos con cono<sup>12</sup> para determinar el espesor y extensión de la Isla de los Perros en el centro histórico.
- 6.12. De seguir los hundimientos de la ciudad, en esa zona céntrica las deformaciones serán menores en la parte más fuertemente consolidada por los considerables rellenos y cargas que en las áreas vecinas. El templo de Santa Teresa la Antigua aumentará su desplome; en el Palacio Nacional, a lo largo del quiebre observado por el centro del edificio frontal de norte a sur, seguirán incrementándose los desniveles y daños en su estructura.
- 6.13. En la ref. 2 se menciona que durante las grandes inundaciones no llegaron a anegarse ni la zona céntrica de la ciudad (Obispado-Catedral-Palacio Nacional) ni la zona de Tlatelolco. Se su-

giere como interesante propiciar estudios similares a los expuestos aquí en la zona de la plaza de las Tres Culturas, que seguramente estuvo sujeta a un proceso semejante al de la misma Tenochtitlan.

- 6.14. Aunque en general es recomendable hacer uso de la evidencia histórica, se prefirió durante esta etapa preliminar utilizar las mismas referencias técnicas pertinentes al problema y dejar para una segunda fase la comparación de ideas aquí expuestas, con mayores referencias históricas y con una más amplia información del subsuelo.

### BIBLIOGRAFÍA

1. MATOS MOCTEZUMA, Eduardo (1982), "El Templo Mayor de Tenochtitlan. Planos, cortes y perspectivas", Instituto Nacional de Antropología e Historia, México, D. F.
2. TÉLLEZ PIZARRO, A. (1982), "Apuntes acerca de los cimientos de los edificios en la ciudad de México", en *Compilación de artículos técnicos de ingeniería escritos a principios de siglo*, México, D. F., Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
3. LEÓN-PORTILLA, Miguel, "The ethnohistorical record for the Huey Teocalli of Tenochtitlan", Washington, Dumbarton, Oaks, 1983.
4. Archivo del Instituto de Ingeniería (1951), "Ensayes de consolidación de los sondeos Pc143 y Pc128-1", México, D. F.
5. MARSAL, R. J. y MAZARI, M. (1969), "El subsuelo de la ciudad de México", Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F.
6. Departamento del Distrito Federal, *Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal*, México, 1975, t. I, p. 63.
7. GAYOL, R., "Breves apuntes relativos a las obras de saneamiento y desagüe de la capital de la República y de las que, del mismo género, necesita con grande urgencia", *Revista Mexicana de Ingeniería y Agricultura*, VII, México, 1929.
8. CARRILLO, N., "Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City", Proc. II International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, 1948.
9. TERZAGHI, K., "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley and Sons, Nueva York, 1943.

10. CARRILLO, N., "Informe final del estudio de los movimientos observados en el edificio del Palacio Nacional", para la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México, D. F., 1952.
11. ORTIZ LAJOUS, J. y ZAVALA, S., *Comunicación personal*.
12. SANTOYO, E., *Comunicación personal*.