

SEGUNDA PARTE : APLICACION DEL METODO DE ANALISIS DE
VULNERABILIDAD A LA ZONA METROPOLITANA DE MANILA

IV - ANALISIS DE VULNERABILIDAD SISMICA

4.1 Observaciones generales

Durante los últimos años se han producido algunos terremotos de gran magnitud en el norte de la isla de Luzón. Dos de ellos alcanzaron la magnitud 7,3 (2 de agosto de 1968) y 7,2 (abril de 1970) ; ambos afectaron a la ciudad de Manila. Aunque la ciudad tuvo suerte, en el sentido de que sólo dos edificios sufrieron un derrumbamiento casi total y no se produjo ningún incendio, es importante observar que otras estructuras padecieron daños importantes, y que más de 500 personas resultaron muertas o heridas. En una ciudad en rápida expansión como Manila, el problema del riesgo de terremotos debe tomarse en consideración con carácter prioritario en todos los niveles de planificación y para toda clase de actividades humanas.

Examen general de la Zona Metropolitana de Manila, su medio
y sus características físicas

La Zona Metropolitana de Manila es parte integrante de la prolongación sudoccidental de la llanura central y de la prolongación meridional de la Sierra Madre en la isla de Luzón.

4.1.1 Características tectónicas

Existen, desde luego, diferentes teorías y opiniones sobre la geología y las estructuras tectónicas de todas las Filipinas. Según Gervasio, las Filipinas pueden dividirse en dos partes : en primer lugar, la región estable, que comprende Palawan, las islas Cuyo, el mar de Sulú y algunas partes de Mindoro y Mindanao. En esta región no hay pruebas de actividad sísmica ni volcánica desde la era terciaria. El cinturón móvil de Filipinas se extiende por Luzón, el mar de las Bisayas y Mindanao. Se trata de una parte del "cinturón circumpacífico" y se caracteriza por una concentración de epicentros sísmicos y de volcanes relativamente recientes. En esta región, el rectángulo de Luzón septentrional se ve periódicamente comprimido en zonas de lineamiento, de distinta elevación, y sufre un desplazamiento hacia el este a lo largo de una zona de corrimiento inclinada hacia el oeste que emerge en el borde oriental. Como consecuencia de ese desplazamiento puede observarse una fisiografía en arco convexo de la costa oriental del Luzón septentrional.

4.1.2 Sismicidad

Desde el siglo XIX, muchos autores intentaron hacer una recopilación y descripción detallada de los terremotos que han afectado a Filipinas desde finales del siglo XVI. Más recientemente, PAGASA ha publicado un documento titulado "Significant Philippines Earthquakes" (Terremotos importantes de Filipinas), que indica la fecha, la hora, la ubicación del epicentro y las intensidades registradas de todos los terremotos ocurridos desde 1949.

Si se examinan diferentes listas de los terremotos que han afectado Manila en los tiempos históricos, puede observarse que, en los últimos 300 años, se han producido en muchas ocasiones terremotos destructivos. Por término medio, Manila ha sido sacudida por

terremotos dañosos cada 15 años. Es muy interesante observar también que en los últimos 60 años los terremotos destructivos no han sido tan frecuentes como antes. Sin embargo, esto no debe considerarse necesariamente como tendencia establecida, porque como han demostrado acontecimientos recientes ocurridos en otras partes de Asia y Centroamérica, la actividad sísmica es muy difícil de predecir, y puede comenzar con renovado vigor con escasos avisos. El examen de los datos recogidos sobre terremotos desde 1949 induce a estimar que Manila puede verse afectada todos los años por un terremoto de intensidad 4, que es un nivel relativamente alto teniendo en cuenta las características geológicas predominantes del subsuelo de la ciudad.

La escala de intensidades sísmicas actualmente utilizada en Filipinas es la Rossi-Forrel. En el mapa de intensidades preparado por PAGASA para el terremoto de Luzón de agosto de 1968 se observa que en el centro de Manila se registró una intensidad aislada superior. Esto se debió a las capas de suelo blando existentes bajo esa zona. En los tiempos históricos, los terremotos más fuertes observados en Manila han sido de intensidad 10, con un período medio de retorno de 130 años. Esta intensidad máxima posible debe tenerse en cuenta en el presente documento al evaluar los riesgos.

4.1.3 Geología

a) Información general

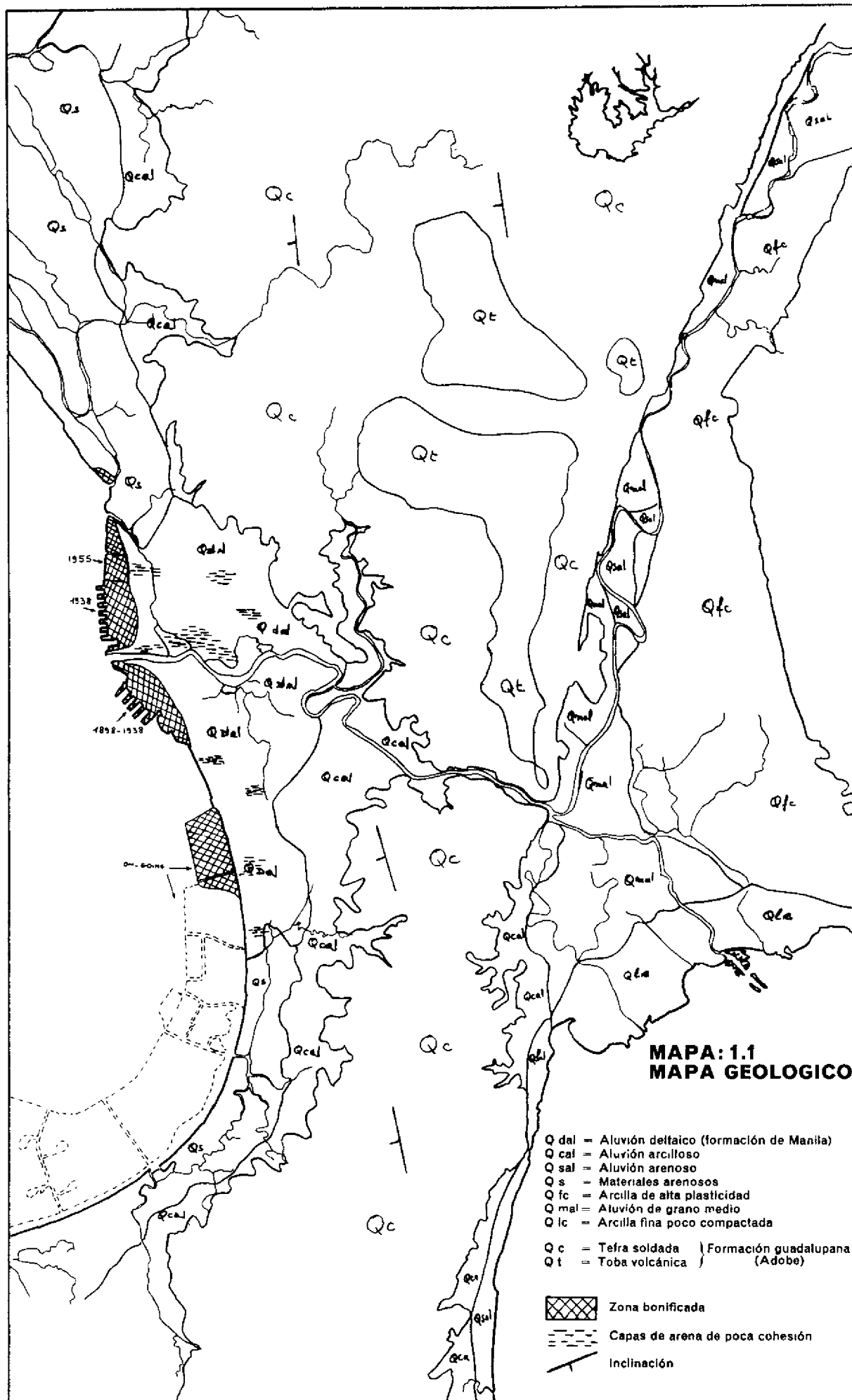
La estructura geomorfológica de la Zona Metropolitana de Manila es bastante sencilla. Se compone de un relieve de poca elevación que se extiende desde el pie de la Sierra Madre en el norte hasta las laderas del volcán Taal en el sur. Forma un brazo de tierra que separa la laguna de Bay de la bahía de Manila y que está limitado por una planicie sedimentaria que desciende suavemente hacia el lago en el este y hacia el mar en el oeste.

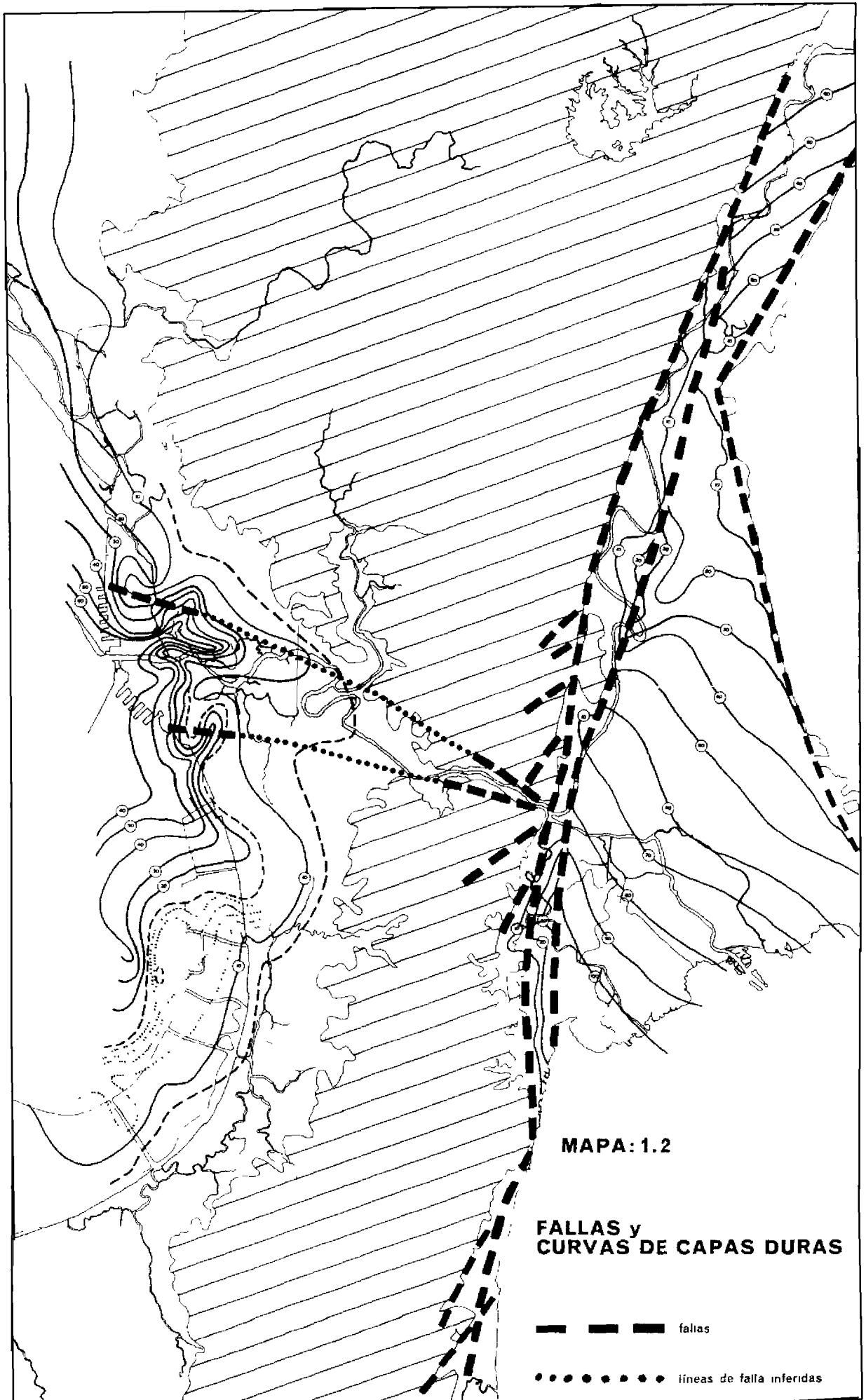
Un corte esquemático dado cerca de Manila se caracteriza por dos grandes accidentes. La formación volcánica, una formación guadalupana llamada localmente Adobe, es una apretada sucesión de tobas volcánicas y depósitos clásticos tobáceos muy estratificados, que datan de la primera edad glacial pleistocénica (aproximadamente hace un millón de años). Los depósitos de esta formación van generalmente acompañados de la posible aparición de actividades de dislocación : por ejemplo, la falla de Marikina, de orientación N-S. Esta formación guadalupana, considerada como de roca de fondo, forma en realidad toda la cresta inferior que se extiende de norte a sur a través de la Zona Metropolitana de Manila.

b) Las planicies sedimentarias

Datan de la segunda era glacial (hace unos 700.000 años). Durante este período, la mayor parte de la provincia de Cavite y la ladera submarina del volcán Taal se levantaron y elevaron unos 400 m. en las proximidades de Tagaytay, con ayuda de la proyección meridional de la línea de falla de Marikina. La cresta elevada de Parañaque a Las Piñas constituyó una presa natural que separó el lago del mar, anteriormente unidos. Además de esas características topográficas se produjo erosión, dando origen a grandes depósitos a ambos lados de la cresta guadalupana.

- planicie aluvial de Marikina : este valle tectónico, bien delimitado por el talud tobáceo y las crestas truncadas por fallas, se llenó casi totalmente con los sedimentos aluviales arrastrados por el río Marikina.
- planicie deltaica de Manila : después del levantamiento de la cresta guadalupana, el río Pasig recibió el agua embalsada y, al mismo tiempo, proporcionó un gran volumen de materiales fluviales que, mezclados a los sedimentos marinos, se expandieron rápidamente para formar una gran planicie deltaica.





c) Características del subsuelo

En el presente estudio se han considerado las zonas delimitadas en el párrafo precedente (véanse los mapas 1.1 y 1.2).

i) La formación guadalupana (Adobe)

La mayor parte de la formación se compone de capas depositadas por las aguas, integradas por cenizas volcánicas litificadas, lapilli y arenas cristalinas. Al oeste, hacia Manila, la formación se extiende por debajo de los sedimentos deltaicos, donde las capas se entrecruzan con arena marina compactada, grava y limo a lo largo de la zona costera. Se adelgazan hacia el oeste y se introducen en cuña en los sedimentos marinos. Bajo la bahía de Manila, las prolongaciones laterales de las capas tobáceas no se han determinado todavía.

Al este y el norte de Manila y en Parañaque esas tobas están cubiertas por un fango de arcilla parda pesada que luego se transforma en arcilla ligera compacta, gris o parduzca. El espesor varía entre 0,5 m cerca de la ciudad de Quezón y 2 metros cerca de Novaliches, en el norte.

ii) Valle del Marikina : planicie aluvial

En general, el aluvión está formado por una mezcla no consolidada de arena, alguna grava y cantidades considerables de limo y arcilla debidos principalmente a la intemperización de rocas piroclásticas y volcánicas. Se han encontrado capas de arena con cantidades considerables de fragmentos de conchas marinas a profundidades de 6,15 a 18 metros de la superficie del suelo en Sucat y Napindan.

El espesor del aluvión varía entre 0 en el punto de contacto con la roca de fondo y por lo menos 75 m en el

valle, en Pinagbuhatan y Napindan. Desde Bambang y Pasig, el aluvi3n se adelgaza gradualmente hacia el este a trav3s del valle del Marikina, hasta Pinagbuhatan y Anzano.

En el complejo de Amparts (al este de la confluencia de los r3os Pasig y Napindan), el espesor del aluvi3n var3a entre 13 metros, cerca del extremo noroccidental de la esclusa proyectada (esclusa de Napindan), y 55 metros cerca del extremo sudoriental de la misma esclusa. A juzgar por algunos resultados de ensayos, la planicie aluvial del valle del Marikina soportar3 generalmente cargas ligeras de 1 a 2 toneladas/pie² en las proximidades de la zona de Mongahan, Pinagbuhatan y Taytay, y de 0,5 a 1 ton/pie² en la zona de Napindan. En la zona de Pingbuhatan, el valor medio de los ensayos de penetraci3n normal (N) ^{1/} es de 6 en los primeros 10 metros de profundidad. M3s al este, cerca de la zona de Taytay-Anzano, el valor (N) es por t3rmino medio de 15 hasta una profundidad de 1,5 metros. En la zona de Napindan, los valores (N) var3an generalmente entre 2 y 4 en las capas de arcilla, y 10 a 12 donde las caracter3sticas son fangosas o arenosas.

iii) Planicie deltaica de Manila

Esta planicie, formada por el r3o Pasig, abarca la zona de Manila y se extiende hacia el sur, cerca de la ciudad de Pasay. La planicie se une al sur con los sedimentos marinos

^{1/} El valor (N), obtenido del ensayo de la blandura relativa (compacidad) de los suelos poco consolidados, se expresa en el n3mero de golpes por unidad de profundidad de penetraci3n (por una cu3a de acero de di3metro y fuerza determinados). El valor (N) se expresa en golpes/pie y se conoce por ensayo de penetraci3n normal.

y lacustres de Parañaque, y hacia el norte con los depósitos predominantemente estuarinos y los de bancos de arena marinos de la ciudad de Caloocan y de Malabon.

Teniendo en cuenta los datos reales obtenidos de perforaciones y los análisis de muestras, puede decirse que, en general, el distrito comercial de Santa Cruz, Sampaloc, Quiapo, Escolta, Intramuros, el Puerto, Ermita, Paco y Malate, todos ellos en Manila, se asientan sobre arcillas plásticas, limos, arenas y gravas, con una mezcla compleja de conchas marinas, corales y plantas descompuestas. Las capas son característicamente lenticulares, y por ello se entrecruzan o entrelazan entre sí. La persistencia lateral entre las distintas capas es tan escasa que incluso una capa espesa puede terminar abruptamente en sólo 3 metros. Se registran espesores de 61 metros hasta más de 90 metros, encontrándose espesores máximos en las orillas del río Pasig en Quiapo, la Avenida Rizal, Escolta y el Puerto (véanse los mapas).

Se ha adoptado la clasificación propuesta en el informe de 1968 de la UNESCO sobre los terremotos.

Arena y arena limosa que a menudo contienen fragmentos de conchas. Aquí el valor (N) es casi siempre inferior a 0, lo que indica la presencia de materiales de muy poca cohesión en muchos lugares. La capa superior de este estrato puede consistir en diversos rellenos utilizados para conseguir solares edificables llanos en las tierras bajas.

Arcilla limosa y limos arcillosos o arenosos que, en su mayoría, se encuentra en el litoral.

Arcilla limosa y arcilla, que es muy oscura, gris o azul, orgánica y muy plástica y compresible.

Arcillas limosas y arcillas que son grises y rígidas. Los valores (N) varían entre 6 y 20. Estos suelos están probablemente excesivamente consolidados.

Roca de fondo tobácea y sus productos de alteración.

4.2 Factores físicos relacionados con la intensidad de la respuesta del suelo

4.2.1 Componente (i) de respuesta básica del suelo

a) Composición normal de los suelos (G)

En el caso de Manila, excepto la formación guadalupana que puede considerarse como "roca de fondo", las capas sedimentarias se componen principalmente de arena, arcilla y limo, que pueden combinarse para producir arcilla limosa, arena limosa, limo arenoso, etc. Teniendo en cuenta los datos disponibles sobre propiedades físicas, pueden distinguirse cinco clases de suelos en relación con los riesgos sísmicos (A) : roca de fondo (adobe tobáceo), (B) arcilla limosa, (C) arcilla, (D) aluvión arenoso y (E) relleno. Se ha añadido la última categoría (relleno) por la especial importancia de algunas zonas bonificadas y también de algunos proyectos de bonificación en curso de ejecución. Esas clases de suelos, en combinación con las variaciones de espesor, se ordenen en un cuadro de "unidades sísmicamente significativas". A cada unidad del cuadro se le da un valor numérico (un orden de importancia), que es función de la respuesta supuesta del suelo en relación con su profundidad. El orden que aparece en el cuadro se aplica a la Zona Metropolitana de Manila.

Puede estimarse que la respuesta más fuerte del suelo se producirá en los materiales de relleno a una profundidad de 30 metros o más; por ello, para Manila (Zona Metropolitana) se ha elegido una escala que varía entre la respuesta más débil (roca de fondo bajo capas delgadas de sedimentos) y los espesores máximos previstos de relleno (más de 30m.).

Como cabe esperar, las cinco clases de suelos horizontalmente definidas no se encuentran reunidas en ningún punto de la Zona Metropolitana de Manila. Se ha observado que, en la práctica, no hay más de cuatro de esas clases simultáneamente, porque no existen cantidades significativas de relleno en la roca de fondo que aflora (E sobre A).

Cuadro de unidades sísmicamente significativas

	Tipo de suelo Espesor	Roca de fondo Adobe tobáceo (A)	Limo Limo ar- cilloso (B)	Arcilla (C)	Aluvión arenoso (D)	Relleno (E)
0m	(a)	0,5	1	1	2	3
5m	(b)	-	2	3	4	4
15m	(c)	-	3	4	4	5
30m	(d)	-	3	4	5	5

Por consiguiente, siguiendo la metodología para la composición normal del suelo descrita en el párrafo 1.2.1 (a), las proporciones de las clases de suelos en cualquier zona determinada se han dividido en cuatro partes (múltiplos de $\frac{1}{4}$). Considerando sólo cuatro clases (B, C, D y E), la composición normal del suelo puede expresarse del siguiente modo :

$$(G) = n_2B + n_3C + n_4D + n_5E$$

es decir,
$$\frac{1}{4}B + \frac{1}{4}C + \frac{1}{4}D + \frac{1}{4}E$$

En donde sólo se encuentran dos o tres clases de suelos, sus proporciones respectivas se expresan también en múltiplos de $\frac{1}{4}$.

Por razones de conveniencia, esas proporciones se multiplican por 4 para evitar los decimales al determinar la respuesta básica del suelo.

b) Respuesta básica del suelo (i)

Una vez conocida la composición básica del suelo, puede determinarse la respuesta básica de éste aplicando la fórmula a un lugar o emplazamiento determinados :

$$(i) = n_1A_t + n_2B_t + n_3C_t + n_4D_t$$

en donde $n_1 + n_2 + n_3 + n_4$ representa las proporciones de las clases de suelos A, B, C y D para un espesor determinado del suelo (t), que puede corresponder a cualquiera de los espesores a, b, c, y d definidos en el cuadro precedente.

Se supone que se quiere calcular el componente (i) de respuesta básica del suelo para un espesor del suelo de b (5 a 15m) y una composición normal del suelo de

$$G = \frac{1}{4} A + \frac{2}{4} B + \frac{1}{4} D \text{ o, para evitar fracciones, } G = 1A + 2B + 1D.$$

Acudiendo al cuadro de unidades sísmicamente significativas, puede determinarse la respuesta básica del suelo (i) para una profundidad b (5 a 15 m) del siguiente modo :

$$(i) = (1 \times \text{el valor correspondiente del cuadro para A}) + \\ (2 \times \text{el valor correspondiente del cuadro para B}) + \\ (1 \times \text{el valor correspondiente del cuadro para D})$$

$$\therefore (i) = (1 \times 0) + (2 \times 2) + (1 \times 4) = 8$$

Este valor se indica entonces en la cuadrícula de vulnerabilidad sísmica para el lugar de que se trate.

4.2.2 Presencia de capas de arena de poca cohesión (s)

Hasta la fecha hay pocas pruebas concluyentes de graves daños causados por la licuefacción del suelo durante terremotos ocurridos en Manila. No obstante, el riesgo no puede desconocerse, porque hay acumulaciones considerables de capas de arena de poca cohesión en la Zona Metropolitana de Manila, especialmente donde se han ganado tierras al mar. Además, algunas partes de Intramuros (Binondo y Santa Cruz) presentan un hundimiento e inclinación constantes del suelo que, en principio, pueden haber sido causados (al menos parcialmente) por la licuefacción de las capas de arena de poca cohesión que se encuentran bajo la planicie deltaica de Manila. Puede haberse producido cierta licuefacción hacia finales del siglo XVI, cuando Manila fue sacudida por terremotos especialmente violentos. Por lo tanto, se estima que el factor de licuefacción del suelo debe tomarse en consideración al evaluar la vulnerabilidad de la Zona Metropolitana de Manila a desastres producidos por terremotos, sobre todo en las zonas que no están aún plenamente desarrolladas o urbanizadas (como el valle del Marikina).

En la Zona Metropolitana de Manila, el componente de licuefacción es $s = 2$. Este valor se ha estimado partiendo de una evaluación

empírica de la aparición probable de la licuefacción en un terremoto producido en la Zona Metropolitana de Manila (véase también el párrafo 1.2.2).

4.2.3 Resonancia (R)

Durante los últimos terremotos de 1968 y 1970, algunos edificios de Manila sufrieron graves daños e incluso se derrumbaron (por ejemplo, la Ruby Tower). Se señaló la resonancia como una de las causas del hundimiento estructural. Además, los edificios más afectados estaban situados en capas muy espesas de aluviones blandos. Los valores relativos a cada zona se indican en el mapa 1.3 (véase el párrafo 4.4).

4.2.4 Presencia de fallas (f)

En lo que se refiere a la Zona Metropolitana de Manila, no hay pruebas históricas de desplazamientos de fallas, ni siquiera en el caso de violentos temblores. Las pruebas del último desplazamiento (y de la deformación consiguiente) se remontan a la segunda era glacial, es decir, mucho más lejos del límite arbitrario pero usual de, por ejemplo, 15.000 años, hasta el cual se supone la actividad de una falla. Sin embargo, teniendo en cuenta la importancia de los desplazamientos pasados (más de 80 m en Pasig) y el hecho de que la Zona Metropolitana de Manila constituye una "zona frágil" que puede ser afectada por fuertes sacudidas, ese factor debe tenerse en cuenta al estimar el riesgo sísmico total. Por consiguiente, toda zona atravesada por una línea de falla será afectada por un nuevo índice $f = 1$, este valor moderado se debe a la importancia relativamente escasa del riesgo (véase también el párrafo 1.2.3).

4.2.5 Índice de respuesta total del suelo (I)

La respuesta total del suelo, $I = i + s + f$, se aplica ahora

a cada cuadro del mapa de limitaciones totales de la Zona Metropolitana de Manila, variando el valor de I entre $I = 2$ e $I = 23$. Los valores relativos a cada zona se llevan al mapa 1.3 (véase el párrafo 4.4).

4.3 Cuadro de vulnerabilidad sísmica general (I/R)

Como queda dicho, el índice de respuesta total estimada del suelo varía entre 2 y 23. Las variaciones de las respuestas del suelo se dividen más o menos por igual en cuatro categorías que corresponden a débil, fuerte, violenta y muy violenta.

De igual modo, el espesor de los suelos blandos se divide en tres intervalos que dependen de diferentes gamas de amplitud. Esta división se basa en los datos recogidos sobre daños producidos por terremotos anteriores.

		I=2	I=5	I=10	I=15	I=23
espesor ↓	0m	Respuesta total del suelo Resonancia (R) (I) débil A	fuerte B	muy fuerte C	violenta D	
	5m	corta 1 A1	B1	C1	D1	
	30m	media 2 A2	B2	C2	D2	
		larga 3 A3	B3	C3	D3	

NB : Las zonas sombreadas no se aplican en la Zona Metropolitana de Manila

4.4 Síntesis de vulnerabilidad sísmica

Todos los componentes del riesgo sísmico se llevan al mapa cuadriculado de vulnerabilidad sísmica del siguiente modo :

G	composición normal del suelo	
s	capas de arena de poca cohesión	
R	resonancia	
i	respuesta básica del suelo	
f	fallas	
	*	
I	Respuesta total del suelo	coeficiente de vulnerabilidad sísmica obtenido del cuadro general de vulnerabilidad sísmica (I/R) (véase el párrafo 4.3)

Se ponen de manifiesto dos clases de zonas :

- una zona comparativamente no vulnerable que se extiende de norte a sur : Novaliches, ciudad de Quezón, Adobe y colinas de Parañaque.
- zonas vulnerables compuestas esencialmente por Manila propiamente dicha y la planicie de Marikina, entre las que la más peligrosa se encuentra cerca de la desembocadura del río Pasig y en la parte meridional de la planicie de Marikina.

El subsuelo de la bahía de Manila, compuesto en su mayor parte por limo no compactado y fango, cuyo espesor total es probablemente

de más de 60 m. en algunos lugares, no soportará seguramente grandes cargas sin graves hundimientos (compactación). Además, sedimentos como éstos, cuando están recubiertos de materiales de relleno (arena, limo, arcilla), como ocurre con las tierras bonificadas de la bahía, no pueden compactarse durante la operación de relleno. Como consecuencia, los edificios tienden a compactar los materiales subyacentes, poniendo en peligro su estabilidad y su integridad estructural. (Por ejemplo, han aparecido grietas importantes en los techos, muros y pavimentos del Folk Arts Theatre).

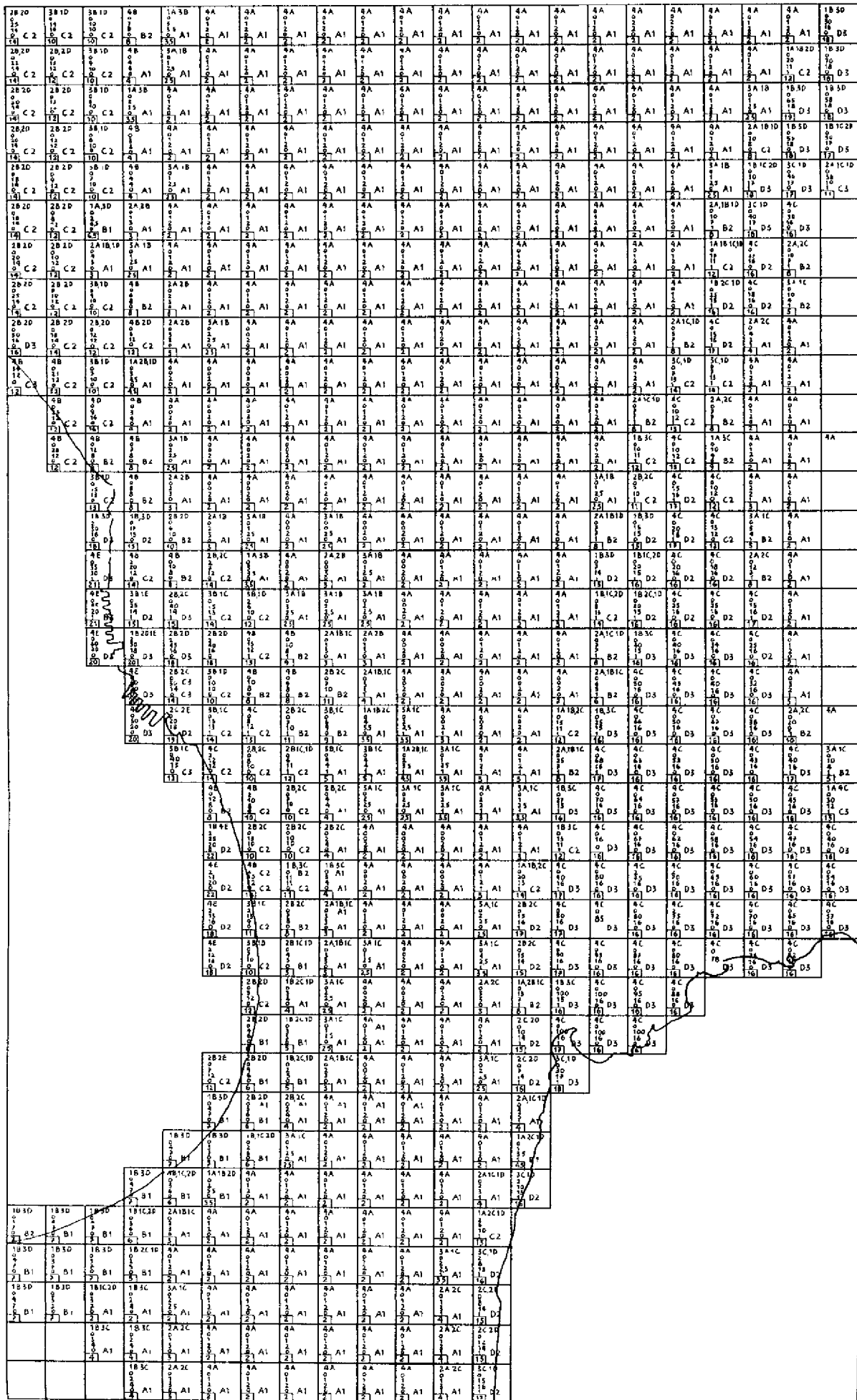
Debe subrayarse la vulnerabilidad de la zona bonificada de la bahía de Manila al riesgo de terremotos y los efectos que los acompañan. La naturaleza del suelo en esa zona, inevitablemente :

- a) amplificará la aceleración de las ondas de choque
- b) producirá una grave licuefacción.

4.5 Limitaciones del aprovechamiento del suelo y de la construcción

- (1) sólo espacios abiertos
- (2) sin edificios de poca altura (0 a 2 pisos)
- (3) sin edificios de altura media (3 a 7 pisos)
- (4) sin edificios de gran altura (más de 7 pisos)
- (5) sin lugares públicos
- (6) sin industrias peligrosas
- (7) sin industrias ni servicios vitales para la comunidad

1.3 MAPA CUADRICULADO DE VULNERABILIDAD SISMICA



I R	A	B	C	D
1	-	-		
2		-	4,6,7	3,4,5 6,7
3			3,4,5 6,7	1

De esa forma, utilizando el método descrito en el párrafo 1.7, el número definitivo de clases de limitaciones sísmicas en la Zona Metropolitana de Manila queda reducido a cuatro, como se indica supra.