

"Documento original en mal estado"

ANEXO 1

```

*****
* PROGRAMA PARA EL CALCULO DE MAGNITUDES, *
* ACELERACIONES, VELOCIDADES Y DESPLAZAMIEH- *
* TOS. *
* DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDADES PARA VALU *
* RES EXTREMOS DE GUMBEL TIPOS I Y II *
* PROGRAMACION: A. VILLACRES FEB/91 *
*****

```

SISMOS DESDE : Area Sismogénica 6

MAXIMAS MAGNITUDES ANUALES

(AN)	MAGNITUD
1943	6.2
1960	6.1
1961	6.2
1962	6.2
1963	4.6
1964	5.3
1965	4.4
1967	4.4
1968	4.5
1969	4.4
1971	4.1
1973	5.5
1974	4.9
1975	4.7
1977	4.4
1978	4.6
1979	4.3
1980	5.5
1981	5.2
1982	4.9
1984	4.7
1985	4.4
1986	4.9

APLICACION DE MODELO TIPO GUMBEL I PARA MAGNITUDES

Mbarra = 4.9739
 Sigma = 0.6602
 Varianza= 0.4358
 Moda U = 4.6768
 Beta = 1.9419

PERIODO	MAGNITUD
1.11	4.25
1.25	4.43
1.43	4.58
1.66	4.72
2.00	4.87
2.50	5.02
3.33	5.21

5.00	5.45
10.00	5.84
25.00	6.32
50.00	6.69
100.00	7.05
200.00	7.40
500.00	7.88

Test de bondad de ajuste de Chi-cuadrado
Prueba uni-muestral para Magnitudes Nb
Distribucion de probabilidades asumida:
Gumbel tipo I para valores extremos
 $f(x)=\exp(-\exp(-b(x-u)))$
b: parametro beta
u: moda
x: variable del modelo

Programacion: Alex Villacres S.

b= 1.94
u= 4.68

Modelo:

$$F(x)=\exp(-\exp(-1.94(x-4.68)))$$

Numero de clase	Frecuencia acumulativa	valor superior de la clase	Ni	$(Ni-nPi)^2$	$(Ni-nPi)^2 / Ni$
1	0.20	4.43	7	5.76	0.82
2	0.40	4.72	5	0.16	0.03
3	0.60	5.02	3	2.56	0.85
4	0.80	5.45	2	6.76	3.38
5	1.00	inf.	3	1.96	0.33

X2 calculado : 5.415
X2 critico : 9.210
Nivel de aceptacion: 99.00%

Acepte que la muestra proviene de una poblacion Gumbel I

MICROZONIFICACION SISMICA DE GUAYAQUIL

por:

Jaime Argudo Rodriguez⁽¹⁾ y Rommel Yela Acosta⁽²⁾

INSTITUTO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD
CATOLICA DE GUAYAQUIL (IIFIUC)

RESUMEN

En esta ponencia se propone una microzonificación sísmica para un importante sector del área urbana de Guayaquil, en base a las investigaciones desarrolladas por el IIFI-UC como parte del proyecto "Vulnerabilidad Sísmica de Edificios Importantes de Guayaquil" con el auspicio de la Junta Provincial de la Defensa Civil del Guayas y las Naciones Unidas.

Para la definición de la microzonificación sísmica se ha requerido procesar o interpretar la información geológica disponible, los estudios geotécnicos de más de setenta perforaciones profundas, los registros acelerográficos de la Red Nacional de Acelerógrafos, cerca de 80 mediciones de las microtrepidaciones del suelo realizadas durante los años 1991 al 1993, y el trabajo de grado desarrollado por egresados de la Facultad de Ingeniería quienes propusieron una microzonificación sísmica del casco comercial de la ciudad mediante modelos matemáticos.

Se analiza en esta ponencia la importancia de los estudios de microzonificación sísmica en áreas urbanas, los mismos que permiten distinguir la variación de los períodos de vibración de los suelos y su incidencia posterior en la probable distribución del nivel de daños que podría ocurrir como consecuencia de un terremoto.

Finalmente se establecen conclusiones y recomendaciones para la planificación del uso adecuado del suelo y líneas prioritarias de investigación para un mejor entendimiento del comportamiento del suelo durante movimientos fuertes del terreno.

1. ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LA DINAMICA DE LOS SUELOS DE GUAYAQUIL.

1.1 MEDICION DE MICROTRIPIDACIONES EN JUNIO DE 1991.

En Junio de 1991 conjuntamente con una misión del CISMID (Centro Peruano Japonés de Mitigación de Desastres) liderada por el Dr. Tsunehisa Tsugawa, se miden las microtrepidaciones en diez zonas de la ciudad utilizándose para el efecto un sistema de adquisición portátil VIBROCODDER SPC-35 y tres sensores del tipo VSE-15 de tecnología japonesa.

(1) Profesor de Ingeniería Sísmica e Investigador del IIFIUC
(2) Coordinador Administrativo e Investigador del IIFIUC

Como resultado de estas mediciones se publicó en la referencia 1 un espectro suavizado que ilustra el rango de periodos predominantes del depósito de arcilla aluvial de Guayaquil (suelo tipo III) y las amplitudes de los desplazamientos comunmente observados durante la medición de las microtrepidaciones del suelo. Este espectro se ilustra en la figura 1-A.

1.2 MICROZONIFICACION SISMICA MEDIANTE MODELOS MATEMATICOS DE SEPT. DE 1992.

En Septiembre de 1992, tres egresados de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica bajo la dirección del Profesor Agustín Serrano desarrollan un estudio de microzonificación sísmica del casco comercial de la ciudad mediante el uso de modelos matemáticos (referencia 2).

Durante el desarrollo de esta investigación alrededor de mil ensayos geotécnicos fueron procesados, entre ellos cerca de setenta perforaciones profundas de hasta 60 metros, (ver figura 10-B) para producir perfiles del subsuelo de Guayaquil, dos de los cuales se ilustran en las figuras 3 y 4.

Los modelos matemáticos en dicho estudio consideran como hipótesis que un basamento rocoso infinitamente rígido actúa como condición de borde a una profundidad de 100 metros y que las ondas sísmicas se propagan unidimensionalmente hasta la superficie. Así, se llega a obtener histogramas de la respuesta en campo libre que contienen periodos de vibración comprendidos entre 1.2 y 1.8 segundos.

La profundidad del basamento no obstante desconocida en el casco comercial, se determinó en 90 metros durante una prospección para pozos de agua en los terrenos del Hotel Oro Verde localizado en la avenida 9 de Octubre y calle García Moreno.

1.3 ANALISIS ESPECTRAL DE ACELEROGRAMAS DE MOVIMIENTOS FUERTES DEL TERRENO.

En Mayo de 1993 la Facultad de Ingeniería publica la Tesis de Grado de la referencia 3, donde se analizan los registros de la Red Nacional de Acelerógrafos de la Universidad Católica recopilados desde Marzo de 1990 hasta Mayo de 1993.

Los acelerógrafos de la red son digitales del tipo DCA-333 de tecnología TERRATECHNOLOGY y son quince los que actualmente se encuentran en funcionamiento en el Ecuador (referencia 15). La localización de las estaciones acelerográficas dentro de la ciudad y se ilustra en la figura 10.

Su autor, el Ing. Alex Villacrés S., hace uso de los registros acelerográficos para el estudio del peligro sísmico de Guayaquil, llegando a establecer los valores esperados de aceleración en el basamento rocoso de la ciudad para diversas fuentes o áreas sismogénicas (referencia 6). Las áreas sismogénicas que se destacan por su importancia son:

a) La denominada franja de orogénesis costera y zona de subducción, distante de la ciudad y por lo tanto considerada capaz de inducir excitaciones sísmicas en el basamento rocoso de Guayaquil con bajas frecuencias vibratorias.

b) La denominada zona del golfo, zona de convergencia entre el cuerpo del arco de islas y la corteza continental y oceánica donde se encuentra localizada la ciudad, capaz de producir excitaciones de altas frecuencias características de los sismos cercanos.

ANEXO 2:

MICROZONIFICACION SISMICA DE GUAYAQUIL,
PONENCIA PUBLICADA EN LA VIII JORNADAS
DE INGENIERIA ESTRUCTURAL Y SISMO-
RESISTENTE DE LA UNIVERSIDAD
CENTRAL DE QUITO - ECUADOR
MAYO 1994

Algunos valores esperados de aceleración en roca, a los que más adelante se referirá este estudio se transcriben en la tabla 1.

TABLA 1

ACELERACION ESPERADA EN ROCA BASAL DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

Magnitud Mb	Periodo de Retorno T (años)	Distancia Hipocentral R (Km)	Fuente Sismogenética	Aceleración Esperada
7.5	50	250	Lejana	5.4
8.0	100	250	Lejana	14.2
6.7	50	60	Cercana	8.5
7.1	100	60	Cercana	16.6

1.4 MEDICION DE MICROTREPIDACIONES DURANTE LOS AÑOS 1992 - 1993.

1.4.1. Generalidades.

Desde Enero de 1992 hasta Diciembre de 1993 se han medido las microtrepidaciones en 68 puntos (localizaciones) de la Ciudad (ver figura 10-A). Para éstas mediciones se utilizó un sistema de adquisición de datos SRR-1 y tres sensores del tipo SS-1 de tecnología KINFIRICS.

La técnica de la medición de microtrepidaciones es útil porque permite sondear intensamente y con rapidez extensas áreas mediante sismógrafos móviles, a diferencia de las estaciones acelerográficas cuya localización es fija y brinda cobertura a grandes extensiones geográficas (referencia 6).

1.4.2. Consideraciones técnicas más importantes para la medición de las microtrepidaciones.

Las medición de las microtrepidaciones no es una técnica recomendada para la determinación de los periodos fundamentales del suelo si se la utiliza en forma aislada. La amplitud de las vibraciones es muy pequeña y genera una respuesta elástica en el suelo diferente a la producida por los movimientos fuertes. Adicionalmente, la acción de las vibraciones ambientales hace muy difícil discriminar a los periodos dominantes del sitio de aquellos que solamente podrian corresponder a una fuente ambiental de vibración.

Es por ello que no se recomienda fundamentar un estudio de microzonificación sísmica exclusivamente sobre los resultados de un conjunto de mediciones de microtrepidaciones o dar a éstos un crédito mayor que el que tienen: "Proporcionar información para una adecuada formulación, calibración y verificación de los modelos matemáticos, los mismos que asistidos por el conocimiento experimental de la respuesta elástica de los suelos permiten inferir el comportamiento inelástico de los suelos durante la acción de los sismos severos".

Para identificar los periodos fundamentales del sitio es necesario: que las mediciones se realicen a diferentes horas del día para distinguir las vibraciones permanentes de aquellas transitorias, que la duración de los registros sea lo suficientemente larga como para permitir un adecuado filtro de las vibraciones temporales y que las órbitas de las vibraciones sean investigadas dado que las vibraciones no propias del sitio emitidas por una fuente cercana frecuentemente tienen una dirección muy predominante.

Si las condiciones de medición son adversas, es recomendable desarrollar las mediciones durante la madrugada por un lapso de medición continua de hasta tres horas. Esto sucede normalmente en lugares donde el suelo es rígido y los períodos correspondientes a vibraciones de maquinarias y tránsito dificultan la identificación de los períodos dominantes del sitio.

1.4.3 Procesamiento de los registros de las microtrepidaciones.

Mediante la técnica matemática de la transformada rápida de Fourier, los registros son procesados hasta encontrar los espectros de Amplitudes de Fourier y los espectros de Densidad Espectral de Potencia. Si la duración de los registros es apropiada los espectros de Fourier resultantes son semejantes a los de Densidad Espectral. En las figuras 1-B y 1-C, se ilustran espectros del punto 44, próximo a la estación acelerográfica Torres de la Merced.

Para la interpretación de los períodos dominantes se emplea la técnica de Nakamura, quien propone obtener los períodos a partir del cociente de las densidades espectrales de potencia de la componente horizontal entre la componente vertical. Por ejemplo, para el punto 55 localizado en el Cerro del Carmen se obtendría una frecuencia dominante de 3.6 Hz que corresponde a un período de 0.28 seg (figuras 2-A, 2-B y 2-C).

Según Lermo (referencia 4) esta técnica permite estimar períodos equivalentes a los obtenidos a partir de los registros acelerográficos. Esto ha sido corroborado cuando se comparan acelerogramas de microsismos obtenidos en suelos compresibles del Tipo III con las microtrepidaciones.

1.4.4 Resultados obtenidos.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en tres ejes seleccionados (referencia 5).

a) Eje norte-sur formado por los puntos 3-9-15-21-27-33-39-45-51:

Períodos Medidos (seg):	Puntos								
	3	9	15	21	27	33	39	45	51
Mínimo	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.55	0.25
Máximo	1.2	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	0.30

b) Eje este-oeste formado por los puntos 43-44-45-46-47-48:

Períodos Medidos (seg):	Puntos					
	43	44	45	46	47	48
Mínimo	0.55	0.55	0.55	0.55	0.65	0.14
Máximo	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.20

c) Eje este-oeste formado por los puntos 49-50-51-52-53-54:

Períodos Medidos (seg):	Puntos					
	49	50	51	52	53	54
Mínimo	0.40	0.28	0.28	0.28	0.65	0.45
Máximo	0.55	0.35	0.30	0.30	1.20	0.46

1.4.5. Conclusiones

- a) Los periodos predominantes obtenidos a partir de las microtrepidaciones coinciden con los calculados a partir de los registros acelerograficos de microsismos.
- b) En los puntos vecinos a los cerros predominan los periodos correspondientes a la llanura aluvial. Aunque se advierte la influencia de los periodos caracteristicos de las formaciones rocosas, esta influencia generalmente desaparece a escasos 200 metros de los afloramientos rocosos.
- c) Existe un rango de periodos comprendido entre 0.25 y 0.5 segundos que aunque no es predominante en la planicie aluvial está bien definido y también se observa en los registros acelerograficos de sismos cercanos y en los espectros obtenidos a partir de los modelos matematicos de la sección 2.
- d) En toda la planicie aluvial investigada el rango de periodos predominante se ha medido entre 0.8 y 1.1 segundos. Sin embargo existe una tendencia que muestra que los periodos dominantes crecen hacia el sur de la ciudad.
- e) La información proporcionada por la medición de las microtrepidaciones verifica la información geológica disponible que se presenta en la figura 10.

2. INFLUENCIA DE LOS DEPOSITOS ALUVIALES (SUELO TIPO III) EN LA RESPUESTA ESPERADA EN LA SUPERFICIE O CAMPO LIBRE.

2.1. GENERALIDADES.

Los depósitos de suelo suave localizados sobre un basamento rígido tienen la propiedad de amplificar las aceleraciones en campo libre respecto de las que actúan en su basamento y sus características dinámicas (periodos de vibración y amortiguamiento) determinan la naturaleza de las vibraciones medidas en la superficie. Este fenómeno que modifica notablemente la distribución de las intensidades con las que se percibe un sismo dentro de una región se reconoce como "el efecto del sitio".

Gran parte de la ciudad de Guayaquil se encuentra edificada sobre depósitos de arcillas estratificadas, separadas por capas de arena arcillosa o limosa de menor potencia. Estos depósitos de origen aluvial yacen sobre un manto de arcilla sobreconsolidada (cangagua), poco explorada, la misma que se detecta a una profundidad cercana a los 60 metros y actúa como un basamento de transición entre los depósitos aluviales suaves y el basamento rocoso cuya profundidad y relieve poco se conoce.

La influencia de estos depósitos aluviales determinan la respuesta en la superficie y se estudian en esta sección mediante modelos matematicos.

2.2. HIPOTESIS MAS IMPORTANTES DEL MODELO MATEMATICO.

- a) La propagación de las ondas sísmicas es unidimensional, los perfiles mostrados en las figuras 3 y 4, se idealizan considerando a los estratos como paralelos. Por lo tanto los modelos matematicos son analizados mediante el programa "Shake" (referencia 7).

b) El basamento donde actúa el sismo es el estrato de arcilla cangagua y el perfil idealizado del subsuelo es el mostrado en la figura 6, que corresponde al sitio de la estación acelerográfica "Torres de la Merced". La arcilla sobreconsolidada tiene una rigidez mucho mayor que la de las arcillas aluviales proporcionando una condición de borde próxima a la de un basamento rígido.

Esta hipótesis permite obtener en la superficie registros teóricos similares a los registros obtenidos mediante acelerogramas y microtrepidaciones. Un modelo matemático de elementos finitos, con condiciones de borde más representativas se propone en la figura 7, para la solución de dicho modelo, se requeriría información geotécnica actualmente no disponible.

c) Las leyes constitutivas se ilustran en la figura 8. La curva: "arenas de Guayaquil" se calcula restando a la ley de Seed & Idriss 1970 su desviación estándar, así mismo, la curva: "arcillas de Guayaquil" se calcula restando a la ley propuesta por Sun, Galesorkhi y Seed (referencia 9) para arcillas con índices de plasticidad entre 40 - 80% y relación de vacíos entre 2 y 3 su desviación estándar. Se procura con esta sustracción mantener los resultados del lado de la seguridad puesto que las leyes constitutivas no han sido estimadas en laboratorio mediante ensayos triaxiales cíclicos.

Los porcentajes de amortiguamiento crítico como función de la deformación cortante unitaria se ilustran en la figura 9. Se han adoptado las relaciones que para las arenas propusieron Seed & Idriss 1970 y para las arcillas Schnabel, et. al., 1972. La velocidad de propagación de las ondas de corte se calcula como una función del número de golpes "N" de los ensayos de penetración estándar, empleándose las relaciones empíricas de Imai & Yoshimura. Posteriormente se calcula la rigidez lateral elástico "Go" del suelo como una función de la velocidad de la onda de corte.

En la tabla 2 se presentan los datos empleados en los modelos matemáticos para los diversos estratos de la figura 6.

2.3 TRES TIPOS DE SISMOS INCIDIENDO EN EL BASAMENTO.

El modelo de la sección 2.2 es sometido en su basamento a la acción de tres sismos de intensidad o amplitud de aceleración máxima variable, cuyos espectros de respuesta calculados para una aceleración máxima igual a 0.3g se ilustran en la figura 11.

El sismo incidente Tipo 1 corresponde al registro de TAFT S69E, histograma que ha sido seleccionado porque su rango de períodos predominantes ($0.1 < T < 0.45$ seg.) es apropiado para simular la acción de un sismo cercano.

El sismo Tipo 3 es un registro artificialmente generado a partir del sismo de TAFT, su rango predominante de períodos ($0.4 < T < 1.8$ seg.) tiene la virtud de someter al modelo a su condición crítica de amplificación dinámica (los períodos dominantes del suelo coinciden con los de la excitación). Este sismo ha sido propuesto para la simulación de la acción de un sismo lejano.

El sismo Tipo 2 es otro registro generado a partir del sismo de TAFT que permite simular la acción de un sismo con un rango intermedio de períodos dominantes ($0.2 < T < 0.9$ seg.).

TABLA 2

CARACTERISTICAS DEL SUELO LOCALIZADO BAJO EL EDIFICIO TORRES DE LA MERCED

Estrato	Tipo	Espesor (m)	Prof. (m)	Peso Esp. (t/m ³)	Velocidad Onda Corte (m/s)	Módulo de Corte Elástico "Go" (t/m ²)
Superficie*	-	-	3.75	-	-	-
1	CH	11.25	15.00	1.478	144.4	3141.1
2	SM	10.50	25.50	1.685	233.5	9354.8
3	CH	3.00	28.50	1.800	162.5	4838.9
4	SM	2.25	30.75	1.685	245.7	10357.8
5	CH	5.25	36.00	1.800	157.0	4511.1
6	SP-SM	5.00	41.00	1.814	308.8	17613.7
7	CH	11.50	52.50	1.750	200.9	7187.4
8	SP-SM	6.50	59.00	1.942	250.2	12383.4
Basamento	SC	-	-	1.900	347.2	23357.7

* Se desprecia la presencia del relleno superficial y la respuesta en campo libre se calcula a una profundidad de 3.75 m.

2.4 LOS ANALISIS MATEMATICOS Y SUS RESULTADOS

El modelo matemático se analiza para la acción de los tres tipos de sismos descritos en 2.3 con sus respectivos registros normalizados para aceleraciones basales máximas de 0.001g, 0.05g, 0.1g, 0.15g, 0.2g y 0.3g.

Los resultados de estos análisis se ilustran en las figuras 12 a 14, donde para cada tipo de sismo se ha calculado un conjunto de espectros de respuesta que corresponden a un oscilador elástico con 5% de amortiguamiento solicitado por los histogramas de aceleraciones resultantes en campo libre. Las figuras 15 a 19, contienen a los anteriores espectros reagrupados según la variación de las aceleraciones máximas en el basamento.

Para el estudio del efecto de amplificación de las aceleraciones calculadas en campo libre y otros aspectos discutidos posteriormente, se presentan a continuación en la Tabla 3 los resultados más importantes de los análisis y su nomenclatura.

2.5. DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ANALISIS

2.5.1 COMPARACION DE LOS RESULTADOS CON LOS REGISTROS ACCELEROGRAFICOS

Las figuras 5-A a 5-I continen los espectros de respuesta calculados para diversos sismos registrados en las cuatro estaciones acelerográficas de la figura 10-A. Algunas conclusiones surgen al analizar estos espectros:

a) Los sismos generados en fuentes cercanas a la ciudad (R < 120 km) como el sismo de la Isla Puná (Golfo de Guayaquil) o el de La Froncal, (distribuciones de la cordillera occidental de los Andes) excitan los períodos secundarios del suelo Tipo III comprendidos dentro del intervalo $0.25 < T < 0.6$ seg. y los fundamentales del suelo tipo I dentro del intervalo $0.05 < T < 0.15$ seg.

b) Los sismos generados en fuentes lejanas (R > 200 km) como el sismo de la Rioja (Perú) y Jama (Manabí) excitan los períodos dominantes de los suelos del Tipo III que pertenecen al intervalo $0.9 < T < 1.2$ seg., pero ningún sismo lejano ha podido registrarse en las estaciones localizadas sobre el suelo tipo I

Cuando se considera la acción de microsismos con aceleraciones máximas en el basamento tan pequeñas como 0.1% de la gravedad (ver Tabla 3) el modelo matemático del suelo tipo III muestra que este suelo responde elásticamente con un período fundamental de $T_{so} = 0.74$ seg

Este período debe compararse con los picos observados entre 0.9 y 1.2 seg. en los espectros acelerográficos y de microtrepidaciones. El modelo también define la existencia de períodos no fundamentales dentro del intervalo $0.25 < T < 0.6$ seg. Las hipótesis de la sección 2.2 han dado lugar a un modelo más rígido de lo experimentalmente observado, sin embargo apropiado para el estudio del fenómeno.

TABLE 3

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ANALISIS MATEMATICOS

Sismo Tipo	Ab (%g)	As (%g)	As/Ab	Ts (seg)	Fs/Tso	ESS	ESC	DS (%)	DC (%)
1	0.1	0.237	2.37	0.74	1.0	0.00036	0.00016	2.3	1.1
2	0.1	0.254	2.54	0.74	1.0	0.00060	0.00024	2.4	1.1
3	0.1	0.386	3.86	0.74	1.0	0.00098	0.00127	2.7	1.4
1	5.0	8.533	1.71	0.84	1.14	0.01060	0.02119	6.0	5.9
2	5.0	10.442	2.09	0.90	1.22	0.02103	0.03361	8.3	6.6
3	5.0	12.430	2.49	0.96	1.30	0.03613	0.06436	10.4	8.2
1	10.0	14.126	1.41	0.90	1.22	0.02029	0.03800	8.2	6.9
2	10.0	18.971	1.90	0.96	1.30	0.03692	0.04942	10.5	7.6
3	10.0	18.105	1.81	1.04	1.41	0.06643	0.10695	13.4	9.5
1	15.0	19.544	1.30	0.94	1.27	0.03326	0.04606	10.0	7.4
2	15.0	26.516	1.77	1.03	1.39	0.06163	0.06954	13.0	8.4
3	15.0	22.946	1.53	1.12	1.51	0.10532	0.14097	15.7	10.6
1	20.0	25.300	1.27	0.98	1.32	0.04620	0.05410	11.6	7.9
2	20.0	32.473	1.62	1.08	1.46	0.09475	0.08916	15.1	9.0
3	20.0	30.012	1.50	1.23	1.66	0.16955	0.20780	18.0	12.1
1	30.0	31.960	1.07	1.04	1.41	0.05947	0.07584	12.9	8.6
2	30.0	40.021	1.50	1.20	1.62	0.17566	0.14111	18.2	10.6
3	30.0	41.000	1.37	1.43	1.93	0.40231	0.37087	21.9	14.6

- Ab = Aceleración máxima del sismo incidente en el basamento.
- As = Aceleración máxima de la respuesta calculada en superficie.
- Ts = Período fundamental inelástico del modelo (Función de los módulos - inelásticos de corte y la intensidad del sismo).
- ESS = Máxima deformación unitaria efectiva de las arenas.
- ESC = Máxima deformación unitaria efectiva de las arcillas.
- DS = Máximo amortiguamiento de los estratos de arena.
- DC = Máximo amortiguamiento de los estratos de arcilla.

2.5.2. POTENCIAL ENERGETICO DE LOS SISMOS DE PERIODO LARGO

Si se considera la intensidad de los sismos como una constante, (ver Tabla 3) el sismo Tipo 3 tiene la propiedad de producir mayores deformaciones en el suelo.

Las mayores deformaciones que experimenta el suelo son una consecuencia de su

mayor potencial energético o de su mayor capacidad para introducir energía en los sistemas dinámicos flexibles.

Esto fue estudiado por Argudo en la referencia 10, de donde se extrae el siguiente desarrollo matemático:

Considérese al suelo estratificado de la figura 6 como un sistema estructural inelástico de varios grados de libertad, (hipótesis que es consistente con lo propuesto en la sección 2.2) luego su ecuación de movimiento será:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = -M\ddot{X}_b(t) \quad \text{Ec. 2.5.1.1}$$

Multiplicando ambos miembros por $\dot{X}(t)dt$, y calculando una integral para la duración del sismo se tendrá:

$$M \int_0^t \ddot{X}(t) \dot{X}(t) dt + \int_0^t C \dot{X}^2(t) dt + \int_0^t KX(t) \dot{X}(t) dt = -M \int_0^t \ddot{X}_b(t) \dot{X}(t) dt \quad \text{Ec. 2.5.1.2}$$

En esta ecuación, el miembro derecho expresa la cantidad total de energía absorbida por el sistema durante el sismo (referencia 11). Luego:

$$E = -M \int_0^t \ddot{X}_b(t) \dot{X}(t) dt \quad ; \quad \ddot{X}_b(t) = \text{acel. en el basamento} \quad \text{Ec. 2.5.1.3}$$

En esta última expresión, la velocidad relativa del sistema tiende a ser una constante cuando el período natural del oscilador excede de 1 seg. Por lo que la Ec. 2.5.1.3. puede escribirse en forma aproximada como sigue:

$$E \approx -M\dot{X}(t) \int_0^t \ddot{X}_b(t) dt \quad ; \quad T \geq 1 \text{ seg} \quad \text{Ec. 2.5.1.4}$$

Donde el valor de la integral es directamente proporcional al área encerrada por el histograma de aceleraciones, lo que permite concluir que: "La capacidad de absorción de energía de un sistema estructural flexible es mayor cuanto mayor es el período y la duración de la excitación que actúa en el basamento".

2.5.3. FACTORES DE AMPLIFICACION DINAMICA DEL SUELO TIPO III DE GUAYAQUIL.

Como se ha citado en las secciones precedentes, los suelos blandos de Guayaquil tienen la propiedad de amplificar las aceleraciones en la superficie respecto de las que actúan en el basamento. La razón de amplificación expresada por los llamados "factores de amplificación": A_b/A_s de la tabla 3, no es constante y depende de algunos condicionamientos:

a) Sismos Moderados, comportamiento casi elástico del suelo. En esta categoría quedan comprendidos los eventos sísmicos de recurrencia menor que 50 años, y aceleraciones esperadas en roca menores que 8%g para sismos cercanos y 5%g para sismos lejanos.

La respuesta del suelo, casi elástica, estaría dominada por períodos dentro del rango $0.74 < T_s < 0.9$ seg. en correspondencia con factores de amplificación comprendidos entre $2.5 < A_s/A_b < 4.0$.

b) Sismos severos, comportamiento inelástico del suelo. - Este grupo corresponde a eventos con recurrencia comprendida entre 50 y 100 años, y aceleraciones esperadas en roca entre 8%g y 17%g para sismos cercanos y entre 5%g y 15%g para sismos lejanos.

En este caso, el suelo desarrollaría un comportamiento inelástico moderado dominado por periodos dentro del rango $0.9 < T < 1.1$ en correspondencia con factores de amplificación comprendidos entre $1.5 < A_s/A_b < 2.5$.

c) Sismos catastróficos, posible fallamiento del suelo. - No existen suficientes evidencias que permitan predecir la ocurrencia de este tipo de eventos. Los mismos tendrían una recurrencia mayor a cien años y a juzgar por el nivel de las deformaciones y los amortiguamientos calculados por el modelo matemático corresponderían a un terremoto capaz de producir fallamiento o colapso del suelo.

El suelo se flexibilizaría tanto como para permitir que periodos de hasta 1.4 seg predominen en la respuesta. Según lo indican los análisis, la energía disipada debido al amortiguamiento viscoso y el posible fallamiento resultaría tan importante, que, los factores de amplificación no excederían de 1.5.

3. ESPECTROS DE DISEÑO ELÁSTICO DEL SUELO TIPO III DE GUAYAQUIL.

En las figuras 20 y 21 se presentan los espectros de respuesta de un oscilador elástico con 5% de amortiguamiento, calculados a partir de los registros de campo libre de los sismos tipo 1, 2 y 3, que actúan con aceleraciones máximas en el basamento correspondientes a terremotos de diseño con periodos de retorno de 50 y 100 años. Los espectros de diseño se formulan a partir de los espectros de respuesta antes mencionados, para dos grandes grupos de estructuras: de servicios esenciales y servicios no esenciales.

3.1 Estructuras de edificios de servicios esenciales.

Las estructuras de los edificios considerados como de servicios esenciales: hospitales, servicios públicos, etc; no deben fallar como consecuencia de un terremoto, puesto que de éstas instalaciones depende el normal funcionamiento de la comunidad y la prestación de servicios básicos durante los desastres.

Por lo tanto para el diseño de éstas estructuras, se especifica un factor de importancia $I=1.5$. Esto implica el diseñar con aceleraciones 50% más grandes que las empleadas en el diseño de estructuras no esenciales.

3.2 Espectro de diseño para estructuras de servicios esenciales.

Los tramos del espectro de diseño de estructuras de servicios esenciales se obtienen suavizando las trazas de los espectros de respuesta: tipo 1 para $T < 0.4$ seg, tipo 2 para el intervalo $0.4 < T < 0.8$ seg y tipo 3 para $T > 0.8$ seg.

La meseta de máximas aceleraciones espectrales se ensancha más allá de lo visiblemente necesario hasta 1.5 seg como una medida de seguridad que prevee la posibilidad de que el suelo se comporte más flexible de lo estimado en los análisis donde se emplea la condición de basamento rígido y se cuantifican algunas variables mediante correlaciones empíricas. También es una medida de seguridad considerar que la meseta comienza en 0.6 seg., puesto que las estructuras por su comportamiento inelástico pueden flexibilizarse durante un terremoto e incrementar sus periodos iniciales (referencia 16).

También se ha sobredimensionado el valor de las aceleraciones de diseño para el intervalo abierto $T > 1.8$ seg. Esta medida previene la posibilidad de que incidan en el basamento sismos con periodos dominantes superiores a 1.8 seg.

3.3 Espectro de Diseño para estructuras no esenciales ($I = 1$).

Los espectros de diseño para estructuras no esenciales, a las que corresponde un factor de importancia $I = 1$, se calculan dividiendo las aceleraciones del espectro de diseño de estructuras esenciales para 1.5.

3.4 Comparación de los espectros de diseño elástico del suelo tipo III de Guayaquil con el espectro de ciudad de México.

Los suelos compresibles de Ciudad de México se diferencian de los de Guayaquil por su origen geológico y características mecánicas, sin embargo, éstos últimos son también capaces de amplificar la intensidad esperada en el sitio principalmente cuando la fuente sismogénica es distante.

En Guayaquil un evento sísmico de naturaleza similar al experimentado por México en 1985 podría ocurrir. Se espera con 90% de probabilidad la ocurrencia de un terremoto de magnitud Richter 7.7 durante el período 1989-2009 localizado aproximadamente a 250 Km de Guayaquil frente a las costas de Jama, provincia de Manabí (referencia, 12).

Adicionalmente, los espectros de diseño de Ciudad de México han sido espectros de referencia para el diseño sismoresistente de estructuras en Guayaquil por la esperada similitud del comportamiento dinámico de ambos depósitos. Estos espectros han sido modificados luego del terremoto de 1985 (referencia 13).

En la figura 22, los espectros 1 y 2 son para estructuras esenciales o del Tipo A y no esenciales o del Tipo B respectivamente y corresponden al Reglamento de 1976. Nótese que la máxima aceleración para el diseño elástico de estructuras es 312 gals o 0.32g.

Los espectros 3 y 4 corresponden a las "Normas de Emergencia al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal" y fueron publicadas luego del terremoto de Septiembre de 1985. En estos espectros nótese que la máxima aceleración para el diseño de estructuras esenciales virtualmente duplica su valor desde 0.32g hasta 0.61g o 600 gals. Al comparar los espectros de Guayaquil (figuras 20 y 21) con los de Ciudad de México (figura 22), se advierte lo siguiente:

a) El espectro propuesto para el diseño de estructuras no esenciales en Guayaquil con periodo de retorno igual a 50 años es comparable con el espectro de 1976 para estructuras esenciales de la ciudad de México.

b) Los espectros de ciudad de México 1985 siguen trazas comparables a las de los espectros propuestos para Guayaquil con periodo de retorno de 100 años.

4. ESPECTRO DE DISEÑO PARA EL SUELO TIPO I DE GUAYAQUIL.

Las formaciones geológicas de roca sedimentaria de Guayaquil se clasifican según se ilustra en la figura 10-A. Estas formaciones poseen distinta composición mineralógica aunque sus propiedades dinámicas no son muy diferentes unas de otras por lo que han sido agrupadas bajo la denominación de suelo "Tipo I".

Las microtrepidaciones de los puntos 48, 55 y 58; y los registros acelerográficos de microsismos permiten estimar el rango de sus periodos dominantes dentro del

intervalo 0.07 seg a 0.28 seg.

La información geotécnica disponible, no permite analizar matemáticamente la dinámica de estas formaciones durante los movimientos fuertes del terreno. No obstante respecto de las propiedades mecánicas que caracterizan a estos suelos se puede mencionar lo siguiente:

a) En general, los suelos rocosos poseen leyes constitutivas que les permiten desarrollar un comportamiento poco inelástico cuando las deformaciones unitarias son menores que 0.1 (ver figura 8).

b) Los porcentajes de amortiguamiento crítico de las rocas son pequeños: menores que 5% para los movimientos fuertes esperados y 0.5% cuando se trata de microsismos (ver figura 9). Esto explica el porqué los suelos rocosos pueden desarrollar factores de amplificación A_s/A_b muy grandes principalmente durante microsismos.

c) La afirmación anterior concuerda con los cálculos de Ruffilli (referencia 14), quien estimó que la aceleración en una estructura localizada sobre el Cerro del Carmen durante el sismo de Enero de 1943 fue superior a 0.3g. Dicho evento fue un sismo cercano, localizado a 70 km de Guayaquil, cuya aceleración esperada en roca basal se estima cercana a 0.08g.

Haciendo uso de la información disponible se propone en la figura 23 los espectros de diseño para el suelo Tipo I de la ciudad de Guayaquil. Las máximas amplitudes en éste espectro han sido estimadas considerando un factor de amplificación A_s/A_b de alrededor de 2.

5. EL SUELO TIPO II DE GUAYAQUIL.

Los suelos del Tipo II son depósitos aluviales de poca potencia, comprendidos entre los depósitos del Tipo I y Tipo III. Sus propiedades dinámicas han sido solamente estudiadas mediante la medición de microtrepidaciones habiéndose establecido lo siguiente:

a) Se requiere mucha más información geotécnica y mayores estudios sobre esta zona, su extensión trazada en base a la observación de microtrepidaciones define una franja de aproximadamente 200 metros de ancho que separa los suelos rocosos del Tipo I y los suelos compresibles del Tipo III.

b) Los períodos dominantes de estos suelos corresponden a los suelos Tipo I y Tipo III, ya que tiene la propiedad de vibrar con las características dinámicas de los suelos adyacentes.

c) Para el diseño de las estructuras localizadas en la zona de transición o suelo del Tipo II, se recomienda emplear los espectros de diseño propuestos para los suelos del Tipo I para intervalo de períodos $T < 0.35$ seg y los del Tipo III para el rango de períodos donde $T \geq 0.35$ seg.

6. MAPA DE MICROZONIFICACION SISMICA DE GUAYAQUIL.

La figura 24 contiene el "Mapa de Microzonificación Sísmica de Guayaquil", donde se divide a la ciudad en microzonas según el Tipo de suelo que las caracteriza (Tipo I, II o III).

Los límites de las microzonas se trazan de acuerdo con los criterios antes

citados y los espectros para el diseño de estructuras sismoresistentes son los propuestos en las secciones 3 y 4 que se recomienda emplear según el tipo de suelo que posee cada microzona.

7. RECOMENDACIONES PARA EL USO DEL SUELO Y LINEAS PRIORITARIAS DE INVESTIGACION SOBRE LA DINAMICA DE LOS SUELOS.

7.1 Recomendaciones para el uso del suelo.

Cada tipo de suelo define un grupo de estructuras muy solicitadas por los sismos y que deben diseñarse con especificaciones técnicas más severas. Otro grupo de estructuras, las menos solicitadas, pueden diseñarse con especificaciones que impliquen una mayor economía siendo recomendable que las autoridades encargadas de la planificación urbana establezcan incentivos fiscales para estimular la construcción de este tipo de edificaciones.

a) Suelos rocosos del Tipo I.- En esta zona las estructuras de uno hasta cuatro pisos deben diseñarse y construirse con las especificaciones técnicas más severas, puesto que el suelo las excitará en mayor medida.

b) Suelos compresibles del Tipo II.- Hasta que no se disponga de suficiente información sobre la dinámica de estos depósitos se recomienda que las estructuras de uno a cuatro pisos se diseñen con las especificaciones del suelo Tipo I y las de cinco o más pisos con las de los suelos del tipo III.

c) Suelos compresibles del Tipo III.- En esta zona las estructuras de cinco a quince pisos deben diseñarse y construirse con las especificaciones técnicas más severas. Las estructuras de uno, dos, y las que poseen más de veinticuatro pisos son las menos vulnerables de acuerdo con los resultados de éste estudio.

7.2 Líneas prioritarias de investigación sobre la dinámica de los suelos.

A continuación se mencionan algunas líneas de investigación prioritarias que permitirían un mejor conocimiento de la dinámica de los suelos de Guayaquil y su futura aplicación en la definición de una nueva microzonificación sísmica más completa.

a) Prospección geotécnica: se necesitan perforaciones geotécnicas más profundas para sondear el relieve y profundidad del basamento rocoso, la recuperación de muestras inalteradas de los distintos estratos del subsuelo y la instalación de acelerómetros a profundidades mayores a 55 metros que permitan estudiar la dinámica del basamento.

b) Prospección geofísica: se requiere estimar la velocidad de propagación de ondas corpóreas a partir de ensayos geofísicos en pozos profundos. Es necesario que las perforaciones que se realicen para la toma de muestras dejen abiertos los pozos permitiendo la posterior ejecución de estos ensayos.

c) Ensayos de laboratorio: las muestras inalteradas deben someterse a ensayos de laboratorio que permitan una mejor estimación de las relaciones constitutivas de los suelos. Es decir, la variación del módulo de corte y el amortiguamiento como una función de las deformaciones unitarias del suelo.

d) Se requiere extender los estudios de microzonificación sísmica a otras áreas importantes de la ciudad, aún no investigadas.

8. REFERENCIAS.

1. Determinación experimental de los periodos de vibración de edificios y suelos de Guayaquil (reporte preliminar). Argudo Jaime, Memorias de las VI Jornadas de Ingeniería Estructural, (Quito - Ecuador 1991).
2. Microzonificación Sísmica de un sector de la ciudad de Guayaquil. Maridueña Lorena, et. al., Trabajo de Grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Guayaquil, 1992.
3. Analisis espectral de acelerogramas de movimientos fuertes del terreno y estructuras. Villacrés Alex, Tesis de Grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Guayaquil, 1993.
4. Natural Period of Sites in the Valley of Mexico from Microtremor Measurements and Strong Motion Data. Javier Lermo, M. Rodriguez and Shri K. Singh. Earthquake Spectra. Volume 4, November 1989.
5. Experimental dynamic measurement of periods of vibration of various reinforced concrete buildings and soils of Guayaquil - Ecuador. Mera Walter & Argudo Jaime, Ponencia presentada en la Universidad de La Calabria - Italia 1993.
6. Determinación experimental de periodos de vibración de edificios y suelos de Guayaquil, para estimación de vulnerabilidad sísmica. Argudo Jaime, Curso Internacional del CISMID: Uso de Información de Peligros Naturales en la Preparación de Proyectos de Inversión, Lima - Perú, 1992.
7. PC-SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Distributed by Geotechnical Software services, Sunnyvale - California, March 1985.
8. Análisis de acelerogramas registrados en Guayaquil y sus aplicaciones prácticas en estudios de amenaza sísmica. Villacrés Alex, ponencia presentada en las VII Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural, Machala - Ecuador, 1993.
9. Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils. Sun Joseph, Goleorkhi R. & Seed Bolton. Earthquake Engineering Research Center, 1988.
10. Nonlinear response of reinforced concrete buildings subjected to long period earthquakes. Argudo Jaime, Earthquake Engineering Course, IISEE, Tokyo - Japan, 1990.
11. Earthquake Resistant Limit State Design for Buildings, Akiyama H. University of Tokyo Press, Japan 1980.
12. Circum Pacific Seismic Potential 1989 - 1999. Nishenko S.P. Golden, Colorado: U.S. Geological Survey, 1989.
13. Departamento del Distrito Federal, "Normas de Emergencia al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal". Diario Oficial de la Federación, México, 1985.
14. Lecciones de Estructuras. Arnaldo Ruffilli, Universidad Estatal de Guayaquil - Ecuador, 1949.
15. Red Nacional de Acelerógrafos para Movimientos Fuertes del Terreno. Mancero J., Mera W., Valarezo I., Reporte final al CONULP del proyecto de investigación para la instrumentación sísmica del Ecuador, 1993.
16. Estudio Comparativo entre las Metodologías de Diseño Sismo Resistentes en el Rango Elástico y una Propuesta de Diseño Inelástico para Edificios de Hormigón Armado. Bravo lauslo., Yeta W. Rommel, Tesis de Grado de la Universidad Católica de Guayaquil, 1993.