

DESEMPEÑO DE INSTALACIONES HOSPITALARIAS DURANTE SISMOS ESTRATEGIA PARA  
LA REDUCCION DE LA  
VULNERABILIDAD

JOSE GRASES (VENEZUELA)

RESUMEN

Durante los últimos 19 años mas de 100 instalaciones hospitalarias que sirven a una población estimada de 6 a 7 millones de personas en 9 países diferentes de America han sido afectados por sismos. Cerca de una quinta parte se desplomaron o fueron demolidas como consecuencia de los daños sufridos. Esto representa pérdidas humanas irreparables, así como la desaparición de 12.000 camas de atención hospitalaria cuyo costo es del orden de US\$ 700.- millones.

Los criterios para el diseño sísmorresistente de edificaciones - fueron incorporados a las normas hace medio siglo aproximadamente, tiempo durante el cual han sufrido cambios importantes, tanto en su confiabilidad, como en la identificación de las zonas geográficas que requieren consideraciones antisísmicas. Aún en las normas vigentes, los hospitales son tratados, al igual que los museos, estaciones de policia, etc, como edificaciones importantes, lo cual se traduce en un incremento de 20% a 60% de las fuerzas laterales. Tal estrategia de diseño resulta inadecuada, ya que no asegura el desempeño esperado de edificaciones cuya operación es fundamental en los momentos posteriores a un sismo intenso. Esta observación cobra particular vigencia, si se tiene presente que un elevado porcentaje de las edificaciones en cuestión fueron construidas con criterios antisísmicos considerados obsoletos en la actualidad; por ejemplo, mas del 70% de las camas de hospitalización en Venezuela estan ubicados en zonas de elevado peligro sísmico, en instalaciones que en su gran mayoría fueron construidas antes del último cambio importante de normas en 1982.

En este trabajo se discuten los aspectos anteriores, se resumen las etapas a seguir en el calculo de la vulnerabilidad a sismos, se comparan las especificaciones de diseño para hospitales de 11 países latinoamericanos y se propone un procedimiento para seleccionar las acciones de diseño en base a niveles de desempeño prefijados asociados a probabilidades de excedencia pre establecidos.

1.- Introducción

De una manera general, los planes hospitalarios para la atención de desastres presuponen un evento externo y víctimas traídas al hospital. Un terremoto, sin embargo puede crear además, un desastre interno como consecuencia de un desempeño inadecuado de la instalación (Tabla 1, Ref ).

1.1- Estrategia de prevención

Los criterios y prescripciones para el diseño sismo-resistente de edificaciones fueron incorporadas en la normativa edilicia de los países americanos a fines de la década de los 30 e inicios de los 40. Tales normativas han evolucionado considerablemente durante el último medio siglo tanto en el rigor de su contenido e incremento de las fuerzas laterales, como en la ampliación progresiva de las áreas consideradas como de mayor peligro sísmico. En la Tabla 2 se ilustra esto último para el caso de Venezuela.

TABLA 2    CAMBIOS EN LA ZONIFICACION SISMICA DE VENEZUELA SEGUN LAS NORMAS APLICADAS EN EL DISEÑO DE HOSPITALES

Lapso de vigencia de la norma.	Número de zonas sísmicas	Áreas de máximo peligro sísmico referidas al área territorial de Venezuela(%).
1947	3	0,9
1955	3	5,3
1967	4	8,5
1982	5	13,1

Las edificaciones hospitalarias se han venido tratando en las normas como edificaciones de importancia excepcional, al igual que las estaciones de policía, museos y similares, lo cual se traduce como un incremento en las fuerzas la-

TABLA N° 1

CRONOLOGIA DE SUCESOS EN EL AREA DE HOSPITALES V.A.  
 AFECTADOS POR EL TERREMOTO DE SAN FERNANDO 9-Feb-1971 (Ref. )

Hora Local	Tiempo transcurrido (horas)	Observaciones
6,01 Am (09-Febrero)	0	Sucede el sismo. Dos edificios del V.A. con unos 80 ocupantes, colapsaron; sin servicio telefonico, el equipo de radio está en un edificio dañado. El mensaje solicitando ayuda, vfa automovil, es mal interpretado y esta es enviada a una dirección errada.
7,23Am	1,38	El Jefe de Bomberos sobrevuela en helicóptero, vé daños, aterriza, habla con un médico y solicita ayuda por radio.
7,40 Am	1,7	Llegan primeros socorros
9,05 Am	3,1	150 ocupantes, algunos heridos de edificaciones hospitalarias, han sido retirados
12,00Am	6	Equipos necesarios y personal de rescate se encuentra en el sitio.
3,00 Pm		El area es declarada zona de desastre.
Media Tarde	10	20 sobrevivientes rescatados; 19 cuerpos extraños no se conoce con precisión el número de atrapados.
4 Pm (11-Febrero)	58	Rescate de la última persona con vida.
10 Am (13-Febrero)	100	Extracción del último cuerpo sin vida
12 Am	102	Remoción del 95% de los escombros.

terales el cual varia entre un 20% y un 60% en las normas de los diferentes paises del area (vease la Sección 3). Aún - cuando no indicado en forma explicita, se sobreentiende que tal tratamiento tiene por finalidad asegurar la capacidad operativa de la instalación; dado que, en término medio, los sismos causan tres veces más heridos que muertes especialmente entre los grupos de edades extremas, es de particular relevancia preservar los servicios de cirugía de emergencia y resucitación, necesidades estas reportadas con elevada frecuencia en los informes de campo (Ref. 2;8).

#### 1.2- Efectos de sismos recientes en instalaciones hospitalarias

La experiencia de las dos últimas décadas en el continente Americano ha revelado que, aún en aquellos paises donde se han aplicado normas sísmicas modernas en la construcción de las edificaciones hospitalarias, estas han llegado a derrumbarse total o parcialmente como consecuencia de sismos; otras han sufrido daños tan graves que han tenido que ser demolidas. Los daños en elementos no estructurales dentro de la edificación, la caída de objetos y equipos, la rotura de vidrios y los efectos consecuenciales, han obligado a desalojar numerosas instalaciones y han impactado de modo desfavorable en la capacidad de atención ante situaciones de emergencia.

Desde el año 1971 se tiene conocimiento de mas de un centenar de edificaciones hospitalarias adversamente afectadas por los sismos en America, de las cuales un 18% tuvieron que ser demolidas o se arruinaron totalmente como consecuencia de las sacudidas del terreno (Figura 1). Si bien es cierto que, por falta de datos, se estan ignorando aquellas edificaciones hospitalarias que tuvieron un comportamiento o desempeño adecuado, es evidente que en el diseño y construcción de tales edificaciones, fundamentales en las situaciones de emergencia que pueden generar los terremotos, hay aspectos que deben ser reviv-

sados si se desea asegurar su operatividad inmediatamente después de sismos intensos.

Antes de tratar este aspecto, tema central de este trabajo, se describe brevemente la situación en Venezuela.

### 1.3- El caso particular de Venezuela

De acuerdo a los datos recabados (Ref. 3), para 1986 en Venezuela habia un total de 534 edificaciones hospitalarias, con un total de 47.411 camas. Su distribución, según la institución responsable ó propietaria, y el año de construcción, se indica en la Tabla 3. En ella se constata que mas de la mitad del total de edificaciones fueron construidas con anterioridad a 1969, año practicamente coincidente con el importante cambio de normas antisísmicas que se llevó a cabo en Septiembre de 1967 como consecuencia de los efectos del terremoto que en Julio de ese año afectó la capital del país (Ref. 2). De igual modo, solo una de cada seis edificaciones (16,5%) se ha beneficiado del último cambio de normas antisísmicas promulgadas a fines del año 1982 (Ref. 4).

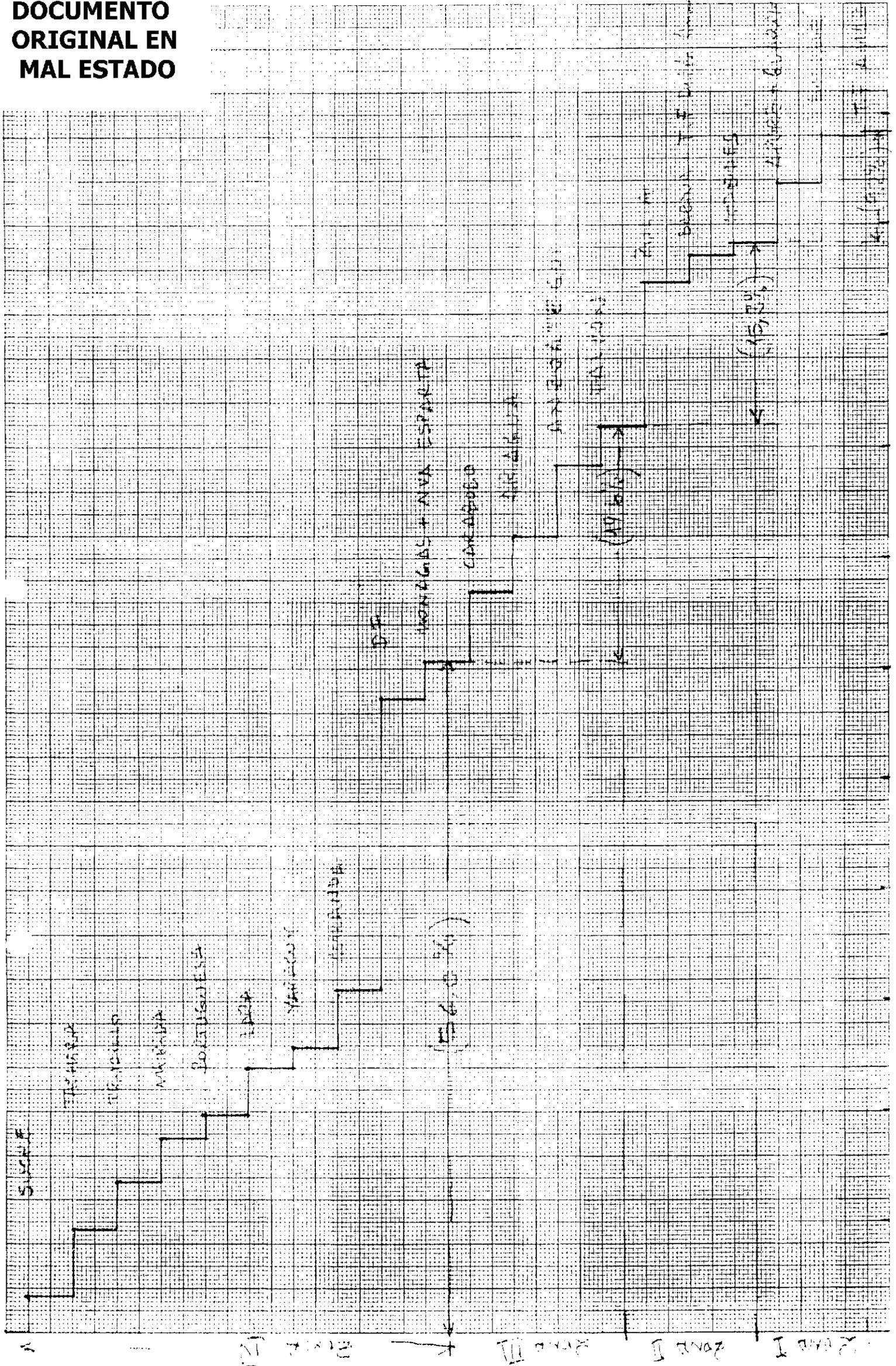
Lo anterior reviste importancia en relación al tema que nos ocupa, ya que de acuerdo a los mapas de zonificación sísmica vigentes, las tres cuartas partes de las instalaciones hospitalarias se encuentran ubicadas en las zonas de mayor peligro sísmico del país. Esto se ha ilustrado en la Figura 2, en la cual se presenta la distribución acumulada de instalaciones hospitalarias desde los Estados de mayor peligro sísmico hasta los de mas bajo peligro sísmico; la distribución de camas es similar.

De acuerdo a estas estadísticas, seis de cada ocho edificaciones hospitalarias en Venezuela (75%) se encuentran ubicadas en zonas donde el peligro sísmico es importante, cuatro de las cuales (50%) estan en las zonas de mayor peligro sísmico del país. Por otra parte, salvo casos excepcionales, 1 de cada 2 hospitales fue diseñado con normas antisísmicas que se consideraron obsoletas en 1967 y solo 1 de cada 6 es probable que se ajustara a las normas vigentes promulgadas en 1982.

TABLA 3  
DISTRIBUCION DE INSTALACIONES HOSPITALARIAS Y CAMAS SEGUN AÑO DE CONSTRUCCION, EN VENEZUELA

Institución responsable ó Propietaria	Anteriores a 1969		1969-1979		1983-1986	
	Hosp.	camas	Hosp.	camas	Hosp.	camas
M.S.A.S. (1)	33	19297	57	4503	30	2587
I.V.S.S. (2)	17	1677	-	1539	12	2532
Beneficencia(?) Municipi- pales	13	2376	2	450	2	462
Min. Defensa	5	1323	-	-70	3	-147
Estadales	60	2591	-55	-2367	-5	-224
Lucrativas	129	2908	110	5026	42	1720
Otras: fundaciones ,etc.	21	1379	-2	-57	5	-94
Total:	333	31551	113	9024	88	6836
%	62,4	66,5	21,2	19,0	16,5	14,4

- (1) Ministerio de Sanidad y Asistencia Social  
(2) Instituto Venezolano de los Seguros Sociales



## 2.- Vulnerabilidad a sismos y su evaluación

En adición a los factores usuales que condicionan la vulnerabilidad de las construcciones a las acciones vibratorias de los sismos, las edificaciones hospitalarias tienden a ser muy grandes y en ellas se han empleado criterios de diseño sísmorresistente que, implícitamente, presuponen daños en los elementos portantes del sistema resistente a sismos. Por otra parte, muchos hospitales son de construcción anterior a la instauración de normativas en las cuales se aplican principios fundamentales de la Ingeniería Sísmica y se incorpora información sismológica y tectónica en los mapas de zonificación con fines de Ingeniería.

En relación a lo anterior, en los Estados Unidos de Norteamérica se consideran menos vulnerables aquellos hospitales diseñados con la norma UBC de 1976 ó posterior (Ref.5). o aquellos que se ajustan al California Hospital Act de 1972 (Ref.6) ó a los que satisfacen la Ref 7; debe tenerse presente que los primeros códigos para el diseño sísmorresistente del sur de California son de mediados de la década de los 30 y es hasta 1950 cuando se aplicaron al norte de ese Estado.

### 2.1- Particularidades de las instalaciones hospitalarias

Entre las particularidades que deben tenerse presente en la evaluación de la vulnerabilidad y diseño de instalaciones hospitalarias, destacan las cuatro siguientes:

- i. Ocupación: albergan en forma permanente gran número de personas; pacientes, visitantes, personal médico y de servicio, así como suplidores. muchos pacientes deben estar rodeados de equipos delicados, cuyo funcionamiento requiere energía eléctrica y, ocasionalmente gases riesgosos como el oxígeno. En la Tabla 4 se anotan

sobrecargas típicas de diseño

TABLA 4  
SOBRE CARGAS PARA EL PROYECTO DE INSTALACIONES HOS-  
PITALARIAS

Designación o uso del espacio hospitalario	Sobrecarga mínima a usar en el diseño (Ref.24) (kg/m <sup>2</sup> )
Habitación	175
Sala de operación y laboratorios	300
Corredores	300
Oficinas de archivo	500
Oficina de atención al público	250
Deposito de cadáveres	600
Escaleras y vías de escape	500

ii. Complejidad: en las instalaciones de salud se requiere una planificación cuidadosa para combinar las funciones de hotel y oficinas, con las de laboratorio, equipamiento y almacenes; muchas de estas áreas son internas y no tienen luz natural. Después de un sismo intenso se ha constatado que pacientes, personal de servicio y visitantes llegan a crear una gran confusión, especialmente si falla el

servicio de energía; esto se agrava si las vías de escape se encuentran bloqueadas por mobiliario volcado y objetos desprendidos.

iii.- Dependencia de servicios vitales: el funcionamiento de instalaciones de salud depende de servicios tales como energía eléctrica y agua. En instalaciones extensas, los sistemas de comunicación son esenciales (vease Tabla 1), así como los de circulación vertical (ascensores y montacargas), los cuales pueden quedar rápidamente fuera de servicio hasta ser debidamente inspeccionados.

iv.- Áreas críticas: para el tratamiento de pacientes ó de heridos son esenciales los suministros de fármacos, vendas, etc; aquellos peligrosos requieren almacenamiento preventivo (drogas, material radioactivo). Igualmente, las historias clínicas son vitales. Externamente, debe asegurarse la libre circulación de ambulancias.

## 2.2 Vulnerabilidad de las edificaciones hospitalarias

En la cuantificación de la vulnerabilidad a eventuales sismos futuros, es preciso distinguir las edificaciones no afectadas por sismos de aquellas que han sufrido algún daño como consecuencia de movimientos sísmicos intensos.

### 2.2.1 Edificaciones no afectadas por sismos

En la evaluación de la vulnerabilidad es preciso distinguir las cuatro etapas siguientes:

- A. cuantificación del peligro sísmico e influencia de las condiciones locales del subsuelo (espectros, riesgo de licuefacción, estabilidad de taludes, peligro de maremotos)
  
- B. selección de los críterios de verificación y seguridad de elementos estructurales, no estructurales y de equipamiento a las acciones sísmicas (inspección, evaluación preliminar cualitativa, identificación de áreas potencialmente críticas)
  
- C. descripción y caracterización de la edificación (año de construcción, normativa vigente, configuración y geometría, fundaciones, estructura resistente a sismos, materiales, capacidades resistentes), de las instalaciones y servicios.
  
- D. evaluación de la seguridad en función del desempeño esperado de: la edificación, los elementos no estructurales y el equipamiento (selección de modelos matemáticos, análisis dinámico, identificación de áreas críticas, cálculo de solicitaciones y verificaciones).

En base a los resultados de la evaluación de vulnerabilidad, procede la toma de decisiones: no intervenir, intervenir (equipamiento, elementos no estructurales ó elementos estructurales), o demolición. Entre las recomendaciones de la evaluación de la vulnerabilidad se recomienda señalar en capítulo aparte, las acciones a tomar en caso de una alerta de un inminente próximo terremoto.

### 2.2.2 Edificaciones afectadas por sismos

La evaluación de edificaciones hospitalarias que han sido afectadas por sismos requiere la intervención de especialistas con el fin de evaluar los daños estructurales y no estructurales. Los primeros pueden ser obvios (evidentes), o no ser fácilmente detectables, con implicaciones en la capacidad portante de la estructura; los segundos pueden llegar a ser generalizados, dando la impresión de inseguridad aún cuando pudiesen no afectar directamente la capacidad resistente de la edificación.

De una manera general después de una detallada inspección y levantamiento de daños, la evaluación de la vulnerabilidad obedece a un esquema similar al indicado en el caso anterior. En la toma de decisiones debe considerarse la edad de la edificación, su funcionalidad el grado de afectación de servicios (electricidad, agua, gas, teléfono, ascensores, generadores de apoyo, equipos básicos como esterilización) y su eventual costo de reparación o reposición.

### 2.3. Elementos no estructurales

En la Ref 9 se presenta información detallada sobre la vulnerabilidad de los elementos no estructurales. Algunos aspectos propios del funcionamiento y de las condiciones de operación, se dan en las Refs. 10 y 11.

La experiencia demuestra que hay muchas medidas de tipo preventivo, poco onerosas que pueden ser adoptadas en las instalaciones para reducir de modo efectivo la vulnerabilidad a sismos: verificación de anclajes, medidas para evitar el volcamiento de equipos, estantes y la caída de objetos, etc.

### 3.- Diseño sismorresistente de nuevas edificaciones hospitalarias según las normas vigentes.

Tomando en consideración el desempeño de edificaciones hospitalarias constatado en sismos recientes, así como la necesidad de establecer criterios y procedimientos para la evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad, procede revisar los requerimientos establecidos en las normas vigentes para el diseño de hospitales.

Las normas, aún cuando inadecuadas en sus primeras versiones, modificadas (actualizadas) con una frecuencia aproximada de 10 a 15 años, se han venido aplicando desde hace cerca de medio siglo. En esta sección se comparan las fuerzas requeridas por las normas de once países de Latinoamérica, así como las hipótesis de desempeño implícitas.

#### 3.1 Coefficiente sísmico

Al igual que para otras edificaciones, las normas para el diseño sismorresistente de hospitales establecen los requerimientos correspondientes a la determinación de las fuerzas laterales inducidas por las vibraciones del terreno. La suma de todas las fuerzas laterales aplicadas, denominada corte basal ( $V_0$ ), dividido por el peso de la edificación ( $W$ ) es denominado coeficiente sísmico ( $C$ ) y puede tomarse como un índice del nivel de protección contra futuros sismos establecidos en las normas; se sobreentiende que las fuerzas laterales, y por tanto el coeficiente sísmico, están a nivel cedente.

A los fines de la comparación que se presenta mas adelante, resulta ventajoso expresar  $C$  según el formato usual en buena parte de las normas modernas, que para los rangos de períodos y alturas moderadas en edificaciones hospitalarias, puede expresarse como:

$$C = \frac{V_0}{W} = \frac{A_0 \alpha \beta}{R} \quad T \leq T^* \quad (1a)$$

$$C = \frac{V_0}{W} = \frac{A_0 \alpha \beta^{0,85}}{\left(\frac{T^*}{T}\right)^p} \quad T > T^* \quad (1b)$$

donde:

$A_0$  = aceleración espectral para  $T=0$ ; igual a la aceleración máxima del terreno (% g)

$\alpha$  = factor de importancia

$\beta$  = factor de amplificación dinámica para  $T < T^*$

0,85 = factor de modificación de cortantes que toma en cuenta el efecto del número de pisos y de los modos superiores; se adopta como constante para simplificar la presentación

$R$  = factor de reducción por ductilidad; depende del sistema estructural resistente a sismos

$T^*$  = período de esquina, función del tipo de suelo(seg)

$T$  = periodo fundamental (seg)

$p$  = exponente función del tipo de suelo, que caracteriza el factor de amplificación dinámica para  $T > T^*$ .

Así, aún cuando el valor de  $C$  haya sido establecido en otras formas, tales como: tablas, gráficos o relaciones empíricas, pueden ejecutarse comparaciones entre algunos parámetros básicos de interés.

### 3.2- Coefficiente sísmico según normas Latinoamericanas

En la Tabla 5 se anotan los valores de  $C$  calculados de

TABLA 5  
COEFICIENTE SISMICO DE DISEÑO EN ZONAS DE MAYOR PELIGRO SISMICO  
(SISTEMA APORTICADO ; MAXIMA DUCTILIDAD PERMISIBLE) (vease Tabla 7 )

PAIS	AÑO	COEFICIENTE SISMICO				REFERENCIA
		R;0,5	R;1,0	A;0,5	A;1,0	
ARGENTINA	1983	0,193	0,122	0,245	0,245	15
CHILE	1989	0,067	0,067	0,150	0,071	19
COLOMBIA	1984	0,114	0,072	0,120	0,108	21
COSTA RICA	1986	0,069	0,035	0,145	0,071	20
CUBA	1984	0,179	0,090	0,287	0,143	12
EL SALVADOR	1986	0,206	0,130	0,206	0,130	14
GUATEMALA	1979	0,115	0,084	0,153	0,107	18
NICARAGUA	1983	0,202	0,143	0,256	0,181	16
PERU	1977	0,065	0,040	0,152	0,112	13
REPUBLICA DOMINICANA	1979	0,118	0,074	0,118	0,111	17
VENEZUELA	1982	0,098	0,056	0,106	0,106	4

acuerdo a las normas de once países de América Latina, para el diseño de la misma instalación hospitalaria, ubicada en la zona de máximo peligro sísmico de acuerdo al mapa de zonificación sísmica de cada norma. A los fines de esta comparación se han supuesto dos construcciones de concreto armado: una rígida, de pocos niveles ( $T= 0,5$  seg) y otra flexible, de mas niveles ( $T= 1,0$  seg); en ambos casos, supuestos en suelo rocoso ó en suelo aluvional. Se comparan así las cuatro situaciones indicadas en la Tabla 6.

TABLA 6  
DESIGNACION DE LAS CUATRO SITUACIONES ESTUDIADAS Y  
CARACTERIZACION DEL TIPO DE SUELO

Tipo de suelo	CARACTERIZACION			periodo fundamental y designación de casos.			
	p	T* (seg)	$\beta$	Edificio rígido		Edificio flexible	
				T(seg)	designación.	T(seg)	designación.
Rocoso	0,8	0,4	2,2	0,5	R:0,5	1,0	R:1,0
Aluvional	0,6	1,0	2,0	0,5	A:0,5	1,0	A:1,0

Se indica igualmente en la tabla la caracterización de los dos tipos de suelo, en base a los parámetros de las expresiones 1a y 1b, de acuerdo a la norma venezolana vigente (Ref 4).

La distribución acumulada de los valores C de la Tabla 5 (Fig 3) ilustra claramente que la misma edificación, ubicada en condiciones de subsuelo similares, debe diseñarse con fuerzas sísmicas que difieren entre 2,7 veces (caso A:0,5)

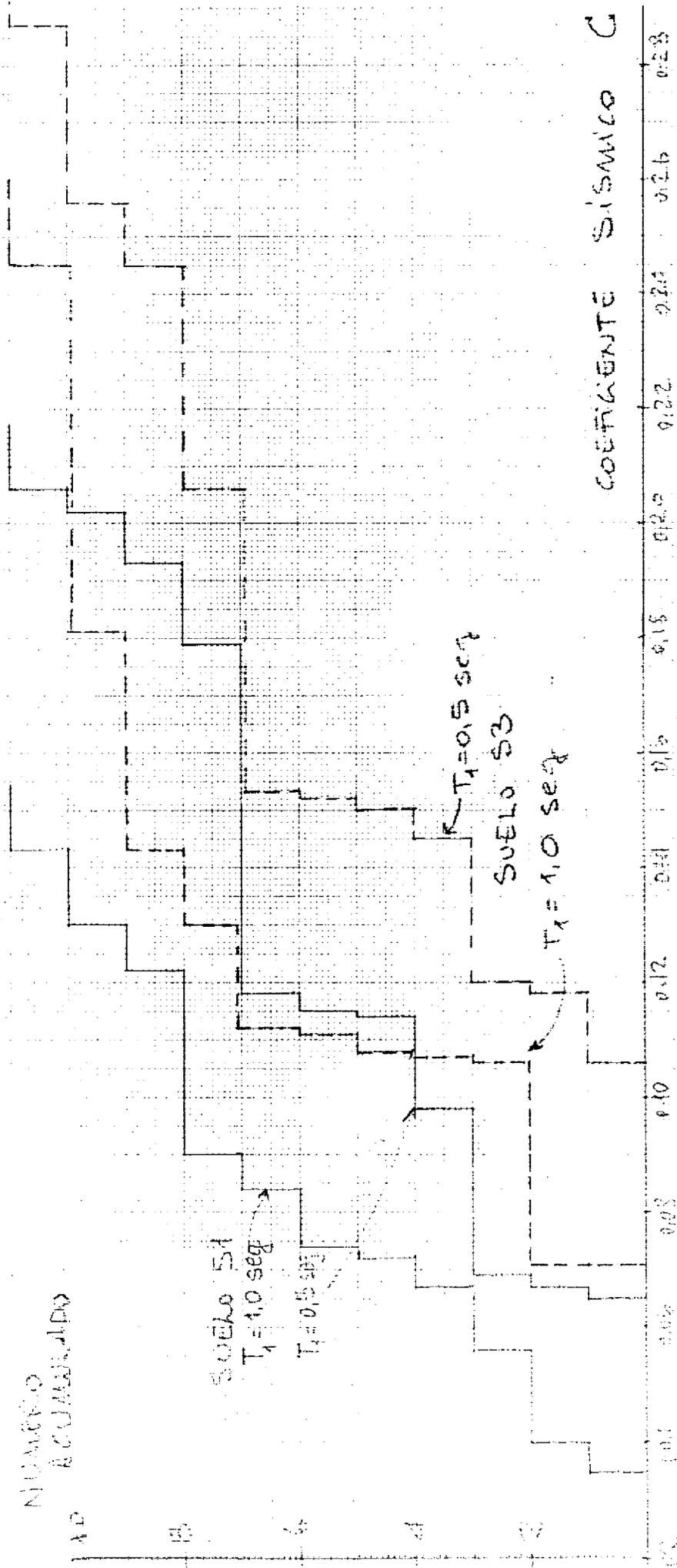
**DOCUMENTO ORIGINAL EN MAL ESTADO**

DISTRIBUCIÓN ACCUMULADA DE COEFICIENTES SISMICOS PARA

EL DISEÑO DE UNA INSTALACION HOSPITALARIA EN LA ZONA DE MAYOR PELIGRO SISMICO 2 (CONDICIONES DE SUELO, DISEÑOS DE FUNDACIONES)

DE 11 PAISES LATINOAMERICANOS

NUMERO ACUMULADO



y 4,1 veces (caso R: 1,0). Estas diferencias no son atribuibles al empleo de métodos constructivos disímiles ya que se ha supuesto un sistema constructivo --pórtico de concreto armado--cuyas características y diseños pueden considerarse aproximadamente iguales en todo el continente.

### 3.3- Acercaciones máximas del terreno $A_0$ y factor de importancia $\alpha$

Si bien en algunas normas la aceleración máxima del terreno  $A_0$  a ser utilizada en el diseño viene dada en forma explícita, en otras ha debido ser inferida a partir de las ecuaciones 1a y 1b, y los valores de  $C$  anotados en la Tabla 5 ; los rangos obtenidos se dan en la Tabla 7. En esta, se anotan los valores de  $\alpha$  y  $R$  establecidos en el código correspondiente; en el caso de Cuba, Nicaragua y El Salvador, el  $A_0$  obtenido es poco confiable ya que para su cálculo fué preciso hacer las hipótesis indicadas. Excluidos estos 3 países,  $A_0$  oscila entre 0,20 g y 0,60 g;  $\alpha$  oscila entre 1,2 y 1,6 y el producto  $\alpha A_0$  entre 0,26 g y 0,84g.

En la casi totalidad de los casos se desconocen, o no se indican, las probabilidades de excedencia anuales asociadas a tal producto.

### 3.4- Valor de R

De particular interés resulta en la Tabla 7 el hecho de que para el diseño sismorresistente de edificaciones hospitalarias se autorizan-- o se infieren al aplicar el formato de las ecuaciones 1a y 1b-- valores de  $R$  del orden de 6 ó mas. Es sabido que en la medida que  $R$  excede la unidad se esperan incursiones inelásticas, tanto mas importantes cuanto mayor sea ese factor de reducción  $R$ . La experiencia demuestra que tales incursiones representan daños estructurales, no estructurales y de funcionamiento de la instalación; por tanto, el valor de  $R$  asociado a los diseños debe reducirse si se

TABLA 7

VALORES DEL FACTOR  $\alpha$ , DEL COEFICIENTE DE REDUCCION R Y DE LA ACELERACION MAXIMA DEL TERRENO AO.

PAIS	$\alpha$	FACTOR DE REDUCCION R					Ao (g)
		R:0,5	R:1,0	A:0,5	A:1,0		
ARGENTINA	1,40	6	6	6	6	0,53-0,60 <sup>(1)</sup>	
CHILE	1,25	11,7 <sup>(1)</sup>	6,7 <sup>(1)</sup>	5,7 <sup>(1)</sup>	12,0 <sup>(1)</sup>	0,40	
COLOMBIA	1,20	6	6	6	6	0,30	
COSTA RICA	1,60	6	6	6	6	0,30	
CUBA	1,60	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	0,38-0,63 <sup>(1)</sup>	
EL SALVADOR	1,50	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	0,48-0,58 <sup>(1)</sup>	
GUATEMALA	1,50	6,1 <sup>(1)</sup>	4,8 <sup>(1)</sup>	5,0 <sup>(1)</sup>	7,1 <sup>(1)</sup>	0,30	
NICARAGUA	1,26 <sup>(3)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	0,51-0,76 <sup>(1)</sup>	
PERU	1,30	6	6	6	6	0,20-0,41 <sup>(1)</sup>	
REPUBLICA DOMINICANA.	1,30	7	7	7	7	0,37-0,44 <sup>(1)</sup>	
VENEZUELA	1,25	6	6	6	6	0,30	

- (1) inferido en base a las ecuaciones 1a y 1b
- (2) supuesto
- (3) zona 6; diferente para otras zonas

desea limitar los daños como consecuencia de sismos intensos.

### 3.5.- Resultados de la comparación de normas

De la revisión de normas presentada; se desprenden las siguientes observaciones de interés:

- a. las fuerzas sísmicas especificadas para el diseño sismorresistente de una misma edificación hospitalaria, ubicada en el mismo tipo de suelo, en las zonas de mayor peligro sísmico de los países analizados, difieren entre sí hasta en un factor de 4,1. No se concluye de la revisión de las normas que esto sea consecuencia de diferencias en el peligro sísmico.
- b. la aceleración máxima del terreno  $A_0$  oscila entre 0,20g y 0,60g, y el factor de uso (ó de importancia) para instalaciones hospitalarias varía entre 1,2 y 1,6; las implicaciones en las probabilidades de excedencia de la aceleración  $\alpha \cdot A_0$ , cuyo valor oscila entre 0,26g y 0,84g, no es evaluado en las normas consultadas.
- c. los factores de reducción por ductilidad, autorizados o inferidos, para el diseño del sistema estructural analizado (pórticos de concreto armado), implican incursiones inelásticas importantes, asociadas a daños estructurales y no estructurales, los cuales se considera tienen una elevada probabilidad de interferir o anular el funcionamiento de una instalación hospitalaria. Esta observación sigue siendo válida para el caso en que el factor  $\alpha$  sea interpretado como reductor de la demanda de ductilidad en la forma  $R/\alpha$ .

En adición a los 3 puntos anteriores, debe destacarse que en ninguno de los cuerpos normativos consultados se establecen criterios de desempeño que aseguren el funcionamiento de insta

laciones hospitalarias en caso de sismos intensos. Estas edificaciones, también denominadas de importancia especial (Ref 22), deben mantenerse en operación; durante y después de un sismo; para ello no basta con la mayorización del coeficiente sísmico con un factor  $\alpha > 1,0$ . En la próxima sección se trata este aspecto.

#### 4. Proposición para el diseño y/o verificación de edificaciones hospitalarias a sismos

Para satisfacer uno de los objetivos fundamentales del diseño sismorresistente de hospitales, es preciso establecer claramente el desempeño esperado de la instalación bajo movimientos sísmicos de diferente probabilidad de ocurrencia. Tal estrategia, como se verá, permite la selección de los movimientos de diseño, los cuales pueden hacerse en forma congruente con los establecidos contra otras amenazas de la naturaleza, tales como vientos huracanados, sobrecargas por nieve o cenizas volcánicas, etc.

Una de las cualidades deseadas para un desempeño sísmico satisfactorio, es la capacidad que debe tener la estructura para absorber y disipar energía durante su respuesta sin pérdida apreciable de la capacidad portante. Esta es la protección más eficiente para el caso en que las aceleraciones espectrales, excedan las prefijadas. Tal capacidad se logra con una estructuración de miembros dúctiles que facilite la redistribución de solicitaciones con lo cual se pueda aprovechar íntegramente la capacidad portante de la estructura.

Adicionalmente, la capacidad de predicción de solicitaciones es más confiable en edificaciones de configuración regular tanto en planta como en altura; esto es debido a que el análisis se lleva a cabo con un modelo idealizado elástico lineal, aún cuando en la realidad los espectros presuponen incursiones inelásticas que difieren considerablemente de la respuesta lineal.

#### 4.1 Desempeño esperado

Las acciones de diseño y /ó reforzamiento sismorresistente tienen por objetivo asegurar que la edificación hospitalaria pueda cumplir la función de atención despues de un sismo, minimizando el riesgo de disrupción como consecuencia del mismo. De una manera general se desea:

- i que la edificación permanezca estable aun despues de un sismo muy intenso(destructor), El daño a las instalaciones debe ser limitado,reparable y que no amenace vidas, asegurando el funcionamiento de los servicios de emergencia.
- ii que el personal médico y asistente, los pacientes y visitantes que ocupen la instalación o se encuentren en sus inmediaciones, esten protegidos durante un terremoto intenso. Su eventual evaçuación rapida y segura,debe garantizarse.
- iii que la entrada a la instalación del personal de rescate y energía esté libre y no sea riesgosa.

En base a lo anterior es posible establecer niveles de desempeño,consistentes con las funciones que deba cumplir la instalación. En la Tabla 8 se proponen cuatro niveles de desempeño (PL1 a PL4), a ser utilizados en la selección de las acciones sísmicas de diseño de edificaciones hospitalarias de concreto armado ubicadas en areas urbanas; la referencia al tipo de material está relacionada al valor de R indicado.

#### TABLA 8

DESCRIPCION DE LOS NIVELES DE DESEMPEÑO PARA LA SELECCION DE LAS ACCIONES SISMICAS.EDIFICACIONES HOSPITALARIAS DE CONCRETO ARMADO.

Nivel de desempeño	Desempeño esperado de la edificación hospitalaria	Valor de R	Probabilidad de ocurrencia	Periodo medio de retorno (años)
PL1	Respuesta elástica de la edificación. sin daños visibles. instalación operativa 100%	1	Sismos con una elevada probabilidad de ocurrencia durante la vida útil de la edificación (64% de excedencia en 45 años)	45
PL2	Sin daños estructurales de importancia; algún daño no estructural reparable. Equipamiento no afectado. instalación operativa 100%.	1,5	Sismos que pueden ocurrir con una probabilidad de excedencia de 20% en 45 años. Pueden ser los más intensos en zonas de elevado peligro sísmico	202
PL3	Daños estructurales limitados; reparaciones menores. Daños no estructurales controlados. Algunos equipamientos e instalaciones de servicio pueden ser afectados. Instalación operativa en un 50%	2	Sismos de ocurrencia poco probable durante la vida útil de la edificación (10% de excedencia en 45 años)	428
PL4	Daño estructurales importantes; reparaciones. Daños no estructurales generalizados. Instalación no operativa, aún cuando su desplome es improbable.	3	Sismos muy poco probables durante la vida útil de la instalación (5% de excedencia en 45 años)	878

La aplicación de los criterios anteriores--u otros similares que incorporen otras amenazas---permite seleccionar las acciones de diseño tomando en consideración el desempeño esperado de la edificación y sus instalaciones. En áreas rurales la exigencia en los niveles de desempeño puede obedecer a otras estrategias.

#### 4.2. Selección de los movimientos de diseño

Los resultados de los estudios de peligro sísmico en sitios determinados revelan que las funciones de distribución acumulada pueden ser descritas por exponenciales del tipo:

$$F_A(a) = e^{-t(a/a^*)^{-q}} \quad (2)$$

donde:

- t= horizonte de tiempo considerado (años)
- a= valor particular de la aceleración máxima del terreno (gal)
- a\*= valor característico de a (gal)
- q= exponente función de la peligrosidad sísmica del sitio.

Su forma típica se dá en la Figura 4. Seleccionada una vida útil de t años--por ejemplo 45 años--los niveles de desempeño propuestos en la Tabla 8 se indican en la Figura 4.

Como ilustración, los niveles de desempeño propuestos se aplican en la selección de los movimientos máximos del terreno para el diseño de un hospital de concreto armado supuesto. en tres localidades de peligro sísmico diferente. Su caracterización, en suelos rocosos y en términos de los parámetros de la ecuación 2, se da en la Tabla 9.

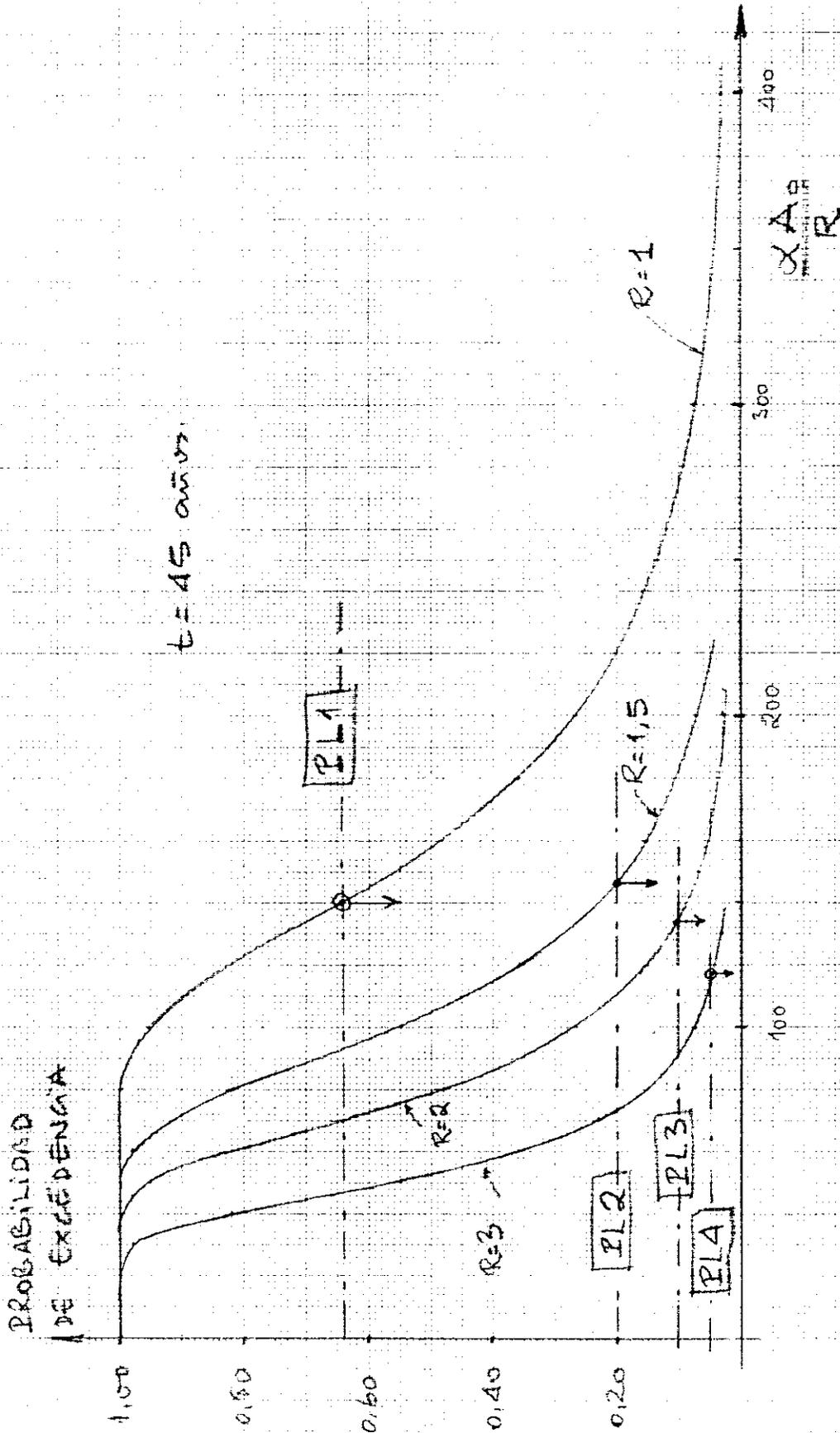


FIGURA A

TABLA 9  
CARACTERIZACION DEL PELIGRO SISMICO EN TRES LOCALI-  
DADES; SUELOS ROCOSOS

Localidad	Peligro sísmico	Caracterización		(1) Ao (gal)
		a* (gal)	q	
1	Muy elevado; pro- pio de lugares cercanos a gran- des fallas geoló- gicas activas.	55	2,90	460
2	Elevado; represen- tativo de las zo- nas sísmicas de máximo peligro - sísmico en la cos- ta Caribe de Amé- rica del Sur	45	3,33	286
3	Bajo; típico de - las zonas sísmi- cas alejadas de areas ó fuentes sismogénicas.	20	5,00	69

(1) 10% de excedencia en 50 años (475 años de período de retorno) usual en códigos modernos.

Manteniendo el formato de las ecuaciones 1a y 1b es fácil calcular el valor de  $\alpha A_o/R$  para los cuatro niveles de desempeño de la Tabla 8. Observese que con la formulación probabilística de esa tabla, el coeficiente  $\alpha$  puede ser ignorado; o sea, el valor de la aceleración que satisfaga las probabilidades establecidas, es  $\alpha A_o$ . Los resultados se dan en la Tabla 10.

TABLA 10  
VALORES DE  $\alpha$  Ao/R (gal) CORRESPONDIENTES A LOS NIVELES  
DE DESEMPEÑO PROPUESTOS, EN LAS TRES LOCALIDADES INDI-  
CADAS EN LA TABLA 9.

Localidad	Nivel de Desempeño (Tabla 8)			
	PL1	PL2	PL3	PL4
1	204	242*	230	195
2	141	147*	134	117
3	43*	40	34	27

Las aceleraciones señaladas con un \* son los máximos a usar en el diseño, directamente en las ecuaciones 1a y 1b.

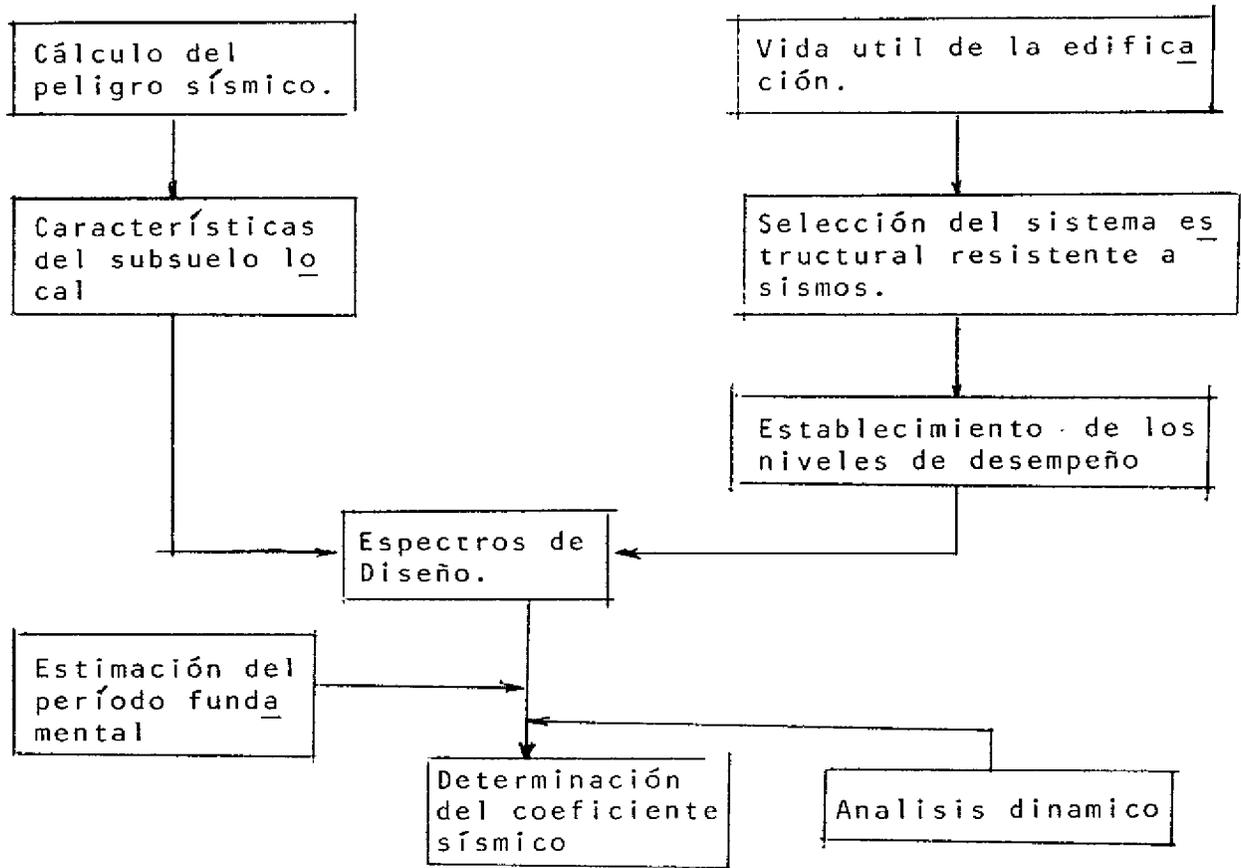
#### 4.3 Determinación de los coeficientes sísmicos de diseño

Los coeficientes sísmicos de diseño, calculados directamente de las ecuaciones 1a y 1b, para las dos condiciones de subsuelo y dos periodos fundamentales indicados en la Tabla 6, Sección 3.2, se comparan en la Tabla 11 con los rangos de valores presentes en las normas examinadas para la zona sísmica de mayor peligro (Tabla 5)

Se han determinado así, coeficientes sísmicos de diseño que incorporan explícitamente la vida útil, el peligro sísmico el subsuelo local, el sistema estructural resistente a sismos y el desempeño esperado de la edificación. Esquemáticamente, la determinación del coeficiente sísmico es hecha en la forma que se indica en el siguiente diagrama de bloques.

TABLA 11  
COMPARACION DE COEFICIENTES SISMICOS DE DISEÑO.

	Coeficientes sísmicos de diseño					
	Suelo rocoso		Suelo aluvional			
	R:0,5	R:1,0	A:0,5	A:1,0		
Localidad 1: muy elevado peligro sísmico.	0,38	0,22	0,42	0,42	0,42	
Localidad 2: elevado peligro sísmico.	0,24	0,14	0,27	0,27	0,27	
Localidad 3: bajo peligro sísmico.	0,07	0,04	0,07	0,07	0,07	
Rango de valores de las normas examinadas (Tabla 5)	0,206-0,065	0,143-0,035	0,287-0,106	0,245-0,071		



Observese que en los niveles de desempeño se asocian probabilidades de excedencia de los movimientos seleccionados. Esto significa que si bien se minimiza el riesgo de daños importantes, estos pueden ocurrir y limitar las condiciones de funcionamiento aun cuando el riesgo de inestabilidad es pequeño. Con ello se desea enfatizar que una cosa es perder un hospital por derrumbe y otra diferente es perderlo temporalmente por limitaciones de operatividad, en situaciones excepcionales, las cuales pueden ser subsanadas fácilmente.

#### 4.4 Criterios de análisis y verificación

Aun cuando la edificación satisfaga los deseables criterios de regularidad, condición necesaria para el empleo de métodos simplificados de análisis, es recomendable emplear

métodos de análisis dinámico. Se identifican así acoplamientos torsionales, eventuales irregularidades y se mejora la predicción de sollicitaciones en los elementos portantes. Ocasionalmente, la verificación sísmica ha sido hecha mediante Análisis en el tiempo, bajo la acción de historias de aceleraciones, lo cual permite un control más confiable del comportamiento inelástico así como la identificación de regiones críticas.

Adicionalmente a la verificación de la capacidad resistente--coeficiente sísmico--los desplazamientos absolutos y relativos de los entrepisos deben limitarse como protección a los componentes no estructurales. Su magnitud es función del tipo de instalación.

#### 5.- Observaciones y Conclusiones

- i De acuerdo a la información disponible relativa a sismos Americanos sucedidos en las 2 últimas déca das, estos han afectado algo más de un centenar de edificaciones hospitalarias, de las cuales cer ca del 20% se han derrumbado o han tenido que ser demolidas.
- ii Este hecho amerita atención tomando en cuenta que alrededor de las 2/3 partes de la población de America Latina habita en zonas donde pueden ocurrir sismos intensos. En el caso particular de Venezuela, las estadísticas sobre la ubicación de instalaciones hospitalarias revelan que alrededor del 75% de ellas se encuentran en áreas de peligro sísmico elevado; uno de cada dos hospitales fué diseñado y construido según normativas antisísmicas consideradas obsoletas desde 1967.
- iii La estrategia usual de prevención empleada por los Ingenieros Projectistas contra la posible acción

de los sismos desde hace medio siglo, consiste en la aplicación de las normativas vigentes. Estas exigen la aplicación de fuerzas entre 1,2 y 1,6 veces mayores que para las edificaciones destinadas a viviendas u oficinas, lo cual por si solo y por las razones que se indican en este trabajo, no aseguran un desempeño adecuado.

- iv Tomando en cuenta el señalamiento anterior, se propone en este trabajo un procedimiento para seleccionar las acciones de diseño en base a niveles de desempeño prefijados, asociados a probabilidades de excedencia pre-establecidas. Este requiere la determinación cuantitativa del peligro sísmico, lo cual es práctica común en obras cuyo mal funcionamiento pueda dar lugar a situaciones catastróficas.