

Estudio de caso:

**Vulnerabilidad de los sistemas de
agua potable frente a deslizamientos**



ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD
Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la
ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD

La presente publicación es un resumen del informe preparado por los ingenieros José Grases, Iván Contreras y Gabriel Grases, cuyo título original es “Vulnerabilidad de los sistemas de agua potable y alcantarillado frente a deslizamientos, sismos y otras amenazas naturales – caso estudio”, 1997, el que evalúa la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento de agua potable Tuy I, de la ciudad de Caracas, Venezuela.

Dicho trabajo fue elaborado en cumplimiento del contrato con la Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud, dentro del marco de cooperación con la División de Ayuda Humanitaria del Ministerio de Relaciones Exteriores de la República Alemana.

El texto fue editado en el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
Objetivos y alcance	5
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DE LAS AMENAZAS NATURALES	7
Sismos	7
Vientos	11
Amenazas hidrometeorológicas	13
CAPÍTULO 3: GUÍA PARA IDENTIFICAR PROBLEMAS DE DESLIZAMIENTOS	15
Clasificación del tipo de fallas de taludes	15
Factores que influyen la estabilidad de los taludes	21
Caracterización del talud mediante ensayos	31
Evaluación de la estabilidad de un talud	35
Métodos para estabilizar taludes	38
CAPÍTULO 4: VULNERABILIDAD DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA ...	43
Matriz de vulnerabilidad	43
Vulnerabilidad de los componentes	43
CAPÍTULO 5: PROCEDIMIENTOS PARA EVALUAR LA CONFIABILIDAD DEL SISTEMA ANALIZADO	53
Tiempo de rehabilitación	53
Selección de escenarios	56
CAPÍTULO 6: ESTUDIO DE CASO	59
Geología general de la región	59
Antecedentes de inestabilidad de suelos y laderas en la región	59
Descripción del sistema	62
Modelo del sistema y probabilidades de falla	66
Conclusiones	71
CAPÍTULO 7: MATRICES DE VULNERABILIDAD	73
REFERENCIAS CITADAS EN EL TEXTO	85

ANEXO A: PROCEDIMIENTOS PARA EVALUAR EL POTENCIAL A LA LICUEFACCIÓN EN DEPÓSITOS GRANULARES	91
Estimación de la resistencia cíclica promedio del depósito a la licuefacción	91
Estimación del esfuerzo sísmico impuesto por el sismo	93
Evaluación del potencial de licuefacción	93
ANEXO B: GLOSARIO	97

RESUMEN

Este trabajo sintetiza los resultados de un estudio cuantitativo de vulnerabilidad del sistema de agua potable Tuy I que abastece a la ciudad de Caracas. En su preparación se han empleado los métodos y procedimientos establecidos en las normas vigentes de ingeniería, con énfasis en los eventuales efectos que la inestabilidad de los taludes y la amenaza sísmica pueden ejercer en los sistemas de agua potable.

Se ha puesto particular interés en los problemas de los taludes; se presenta una guía para identificar taludes o terrenos de pendiente moderada potencialmente inestables; y se ha incorporado la actividad sísmica y la evaluación del potencial de licuefacción de suelos.

La vulnerabilidad de los componentes del sistema se cuantifica en términos probabilísticos. Para ello se ha combinado: (a) la estadística disponible sobre los efectos conocidos en los componentes debido a sismos pasados; (b) los resultados de análisis dinámicos, en casos particulares, de la respuesta estructural a los sismos y vientos máximos esperados en la región y; (c) regresiones probabilísticas entre los movimientos máximos del terreno.

Para aplicar de modo confiable la metodología de los tiempos de rehabilitación con fines de cuantificación de la vulnerabilidad propuesta por CEPIS/OPS, es preciso disponer de un historial de averías o interrupciones del servicio debidamente documentado con tiempos de rehabilitación, costos, fuerza laboral, materiales y equipo.

Entre los aportes de este trabajo, destacan los siguientes:

- (1) Con los procedimientos normativos disponibles y las guías que se incluyen se puede evaluar cuantitativamente la vulnerabilidad de los sistemas de agua potable y alcantarillado
- (2) Los procedimientos empleados para el cálculo de la confiabilidad permiten seleccionar estrategias preventivas que reducen a valores tolerables el riesgo de las interrupciones del servicio.
- (3) La recopilación de información, tanto instrumental como de campo sobre el origen, intensidad y consecuencias de los desastres naturales debe ser hecha en forma sistemática para fundamentar de modo adecuado las estrategias de prevención y diseño.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La experiencia recogida sobre el impacto de los desastres naturales en los sistemas de agua potable y alcantarillado revela que para reducir la vulnerabilidad a niveles aceptables se requiere de acciones preventivas y de diseños de ingeniería adecuados a las amenazas existentes en la zona donde se ubican los sistemas.

En este trabajo se analizan problemas específicos del suministro de agua potable, algunos de los cuales se aplican a los sistemas de alcantarillado con algunas diferencias.

En términos generales, el análisis de un determinado sistema de agua o alcantarillado requiere información confiable sobre la intensidad y frecuencia de las diversas amenazas naturales que pueden afectar la zona donde se encuentra ubicado el sistema. Este tipo de información cualitativa se presenta en la figura 1.1 con fines de ilustración y trata de ser representativa de las áreas ubicadas en la región norte-central de Venezuela.

Los sismos, vientos y tormentas, aún cuando son comunes y de diferente intensidad en los países de América Latina y el Caribe, pueden afectar directamente los componentes de los sistemas de agua y alcantarillado y pueden incidir en la calidad, cantidad y continuidad del suministro. Esto se ilustra en la figura 1.2, la cual no se ha llevado a un mayor nivel de detalle para facilitar su comprensión.

Este trabajo enfatiza el análisis de vulnerabilidad frente a la inestabilidad de los taludes y sismos, y toma en consideración la diversidad de sus posibles efectos.

Las estadísticas sobre daños por sismos en los sistemas de conducción, almacenamiento, tratamiento y distribución de agua, y alcantarillado son una valiosa fuente de información, pues orientan sobre los aspectos críticos que deben ser analizados con más detenimiento. En el cuadro 1.1 se presenta el resumen de una muestra de casos identificados en la literatura sobre el impacto de los sismos en sistemas de agua potable (Ramírez 1997).

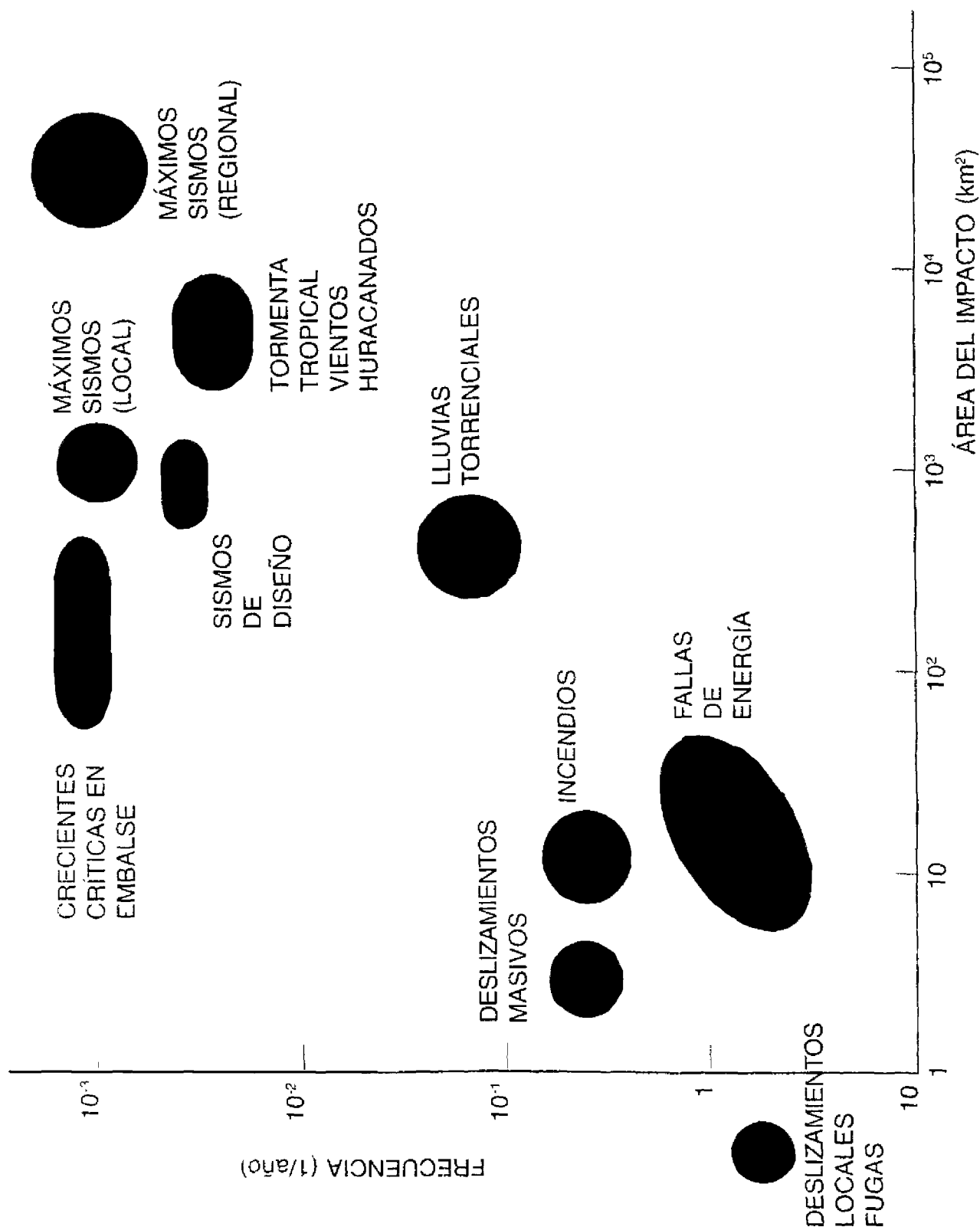


Figura 1.1

Rango aproximado de frecuencias y áreas de impacto de diferentes amenazas naturales

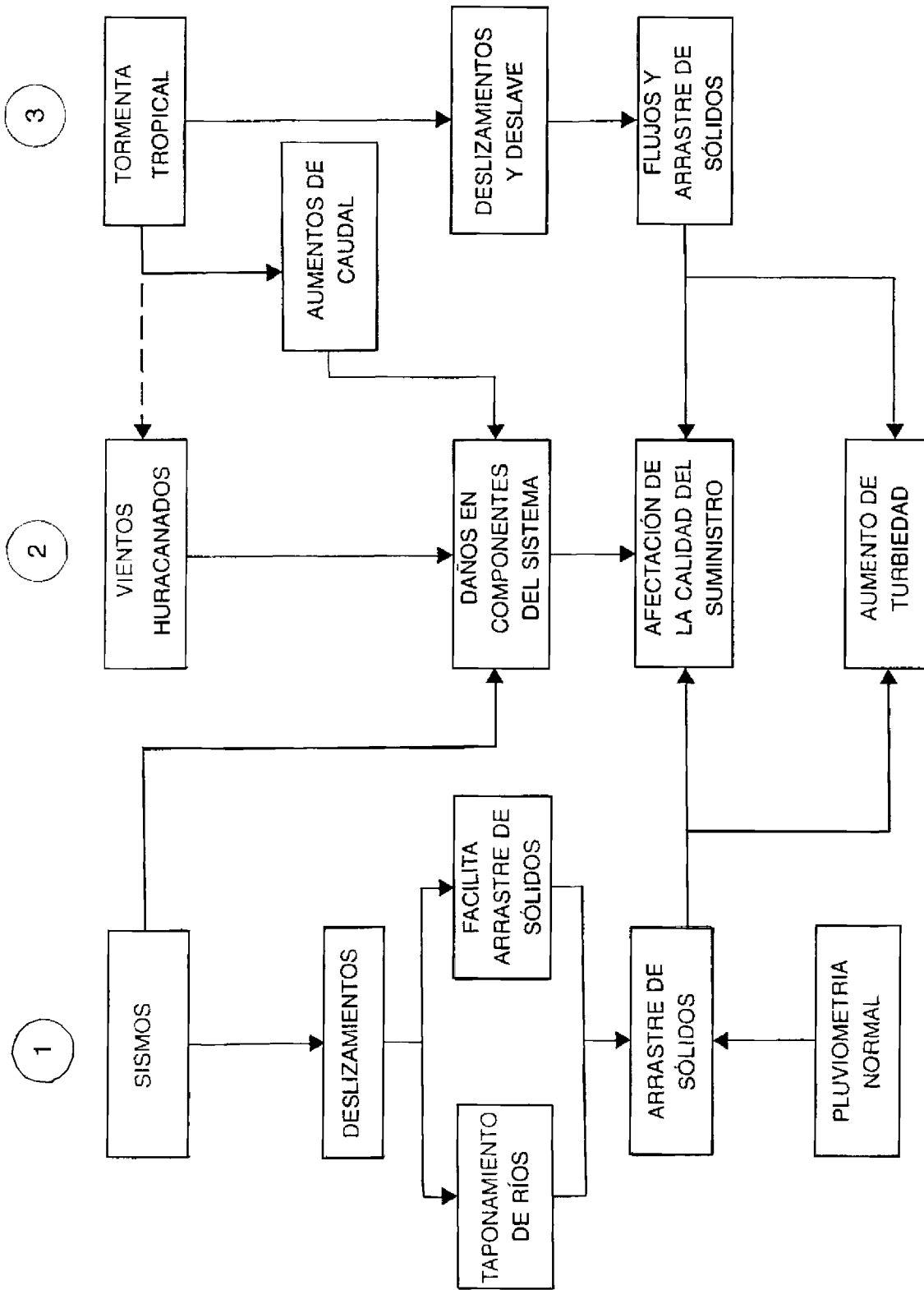


Figura 1.2

Esquema de los posibles efectos de los sismos, huracanes o tormentas tropicales sobre un sistema de abastecimiento de agua

Cuadro 1.1
Sismos que han afectado sistemas de agua potable, transporte de líquidos y alcantarillado
(Ramírez 1997)

Evento	Mag Ms	Efectos
Santa Rosa, California, Estados Unidos 01-10-69	5,7	Daños en el sistema de distribución y en tanques de almacenamiento; represa fisurada.
San Fernando, California, Estados Unidos 09-02-71	6,6	Daños en represas, interrupción del suministro, tanques dañados y efectos en la calidad del agua.
Managua, Nicaragua 23-12-72	6,2	El movimiento de fallas activas dentro de la ciudad ocasionó 100 roturas en las tuberías principales de distribución y en tanques
Cotabato, Filipinas 17-08-76	7,9	Roturas en juntas de tuberías falta de agua para combatir el fuego
San Juan, Argentina 23-11-77	7,4	Daños en los sistemas por fenómenos generalizados de licuefacción del terreno.
México 19-09-85	8,1	Daños en tuberías subterráneas en la red de 72.000 km de la ciudad por movimientos del terreno. Alrededor de 5.000 roturas en el acueducto de Xochimilco y daños en acueductos provenientes del sur.
San Salvador 10-10-86	5,4	Daños en la red de agua potable y alcantarillado (2.400 roturas por asentamientos diferenciales)
Spirak, Armenia 07-12-88	6,8	Daños en la planta de tratamiento y en las tuberías del sistema principal de aducción de agua; estos últimos por deslizamiento de rocas.
Loma Prieta, Estados Unidos 17-10-89	7,1	Sistema afectado por interrupción de la energía eléctrica Daños en la planta de pretratamiento. Daños en tuberías que cruzan fallas geológicas y en suelos aluvionales.
Limón, Costa Rica 22-04-91	7,4	Daños en fuentes de abastecimiento y alta turbiedad (hasta 100.000 UNT), lo cual anuló las plantas de tratamiento. En 60% del área de una de las cuencas de abastecimiento, hubo desestabilización generalizada que tardará unos ocho años en recuperarse
Erzincan, Turquía 13-03-92	6,8	Daños menores en el sistema de aducción y más importantes en el de distribución.
Northridge, California Estados Unidos 17-01-94	6,7	Destrucción de tuberías matrices de concreto de hasta 120" de diámetro que abastecen plantas de tratamiento de Los Angeles. Igualmente, rotura de tuberías de acero de 120" de diámetro con fugas considerables. Daños menores en plantas de tratamiento y en túneles de aducción y más graves en tanques de almacenamiento.
Kobe, Japón 17-01-95	7,2	Colapso de tuberías matrices de suministro de agua. Tuberías subterráneas de distribución destruidas por asentamientos Los incendios no pudieron ser apagados, en parte, por falta de agua.

Objetivos y alcance

El contenido de esta publicación ha seguido la metodología del análisis de vulnerabilidad de sistemas de agua potable y alcantarillado propuesta por el CEPIS y se ha organizado en las dos fases siguientes:

- 1.^a fase: Selección, reconocimiento e inspección del sistema de abastecimiento de agua potable e identificación de situaciones que puedan comprometer la integridad de alguno de sus componentes. Evaluación de la vulnerabilidad a las amenazas naturales de origen geológico e hidrometeorológico. En la figura 1.3 se reproduce el mapa de zonificación sísmica de la norma vigente en Venezuela.
- 2.^a fase: Los estudios de esta fase son más especializados y usualmente están respaldados por:
 - a) la normativa vigente;
 - b) las estadísticas sobre los efectos;
 - c) la participación de profesionales especializados.

Los aspectos de la evaluación referidos al cálculo de la estabilidad de taludes y el potencial de licuefacción no se encuentran generalmente en la normativa, razón por la cual se han elaborado ad-hoc.

Los resultados de los estudios y evaluaciones anteriores tienen por finalidad la cuantificación de las amenazas naturales y la caracterización de la vulnerabilidad física y operacional de los componentes del sistema. Para el estudio detallado de sistemas constituidos por múltiples componentes disímiles, expuestos a amenazas naturales de origen muy diferente (sismos, vientos o tormentas tropicales), se requiere la participación de un equipo de especialistas que escapa al alcance del presente estudio.

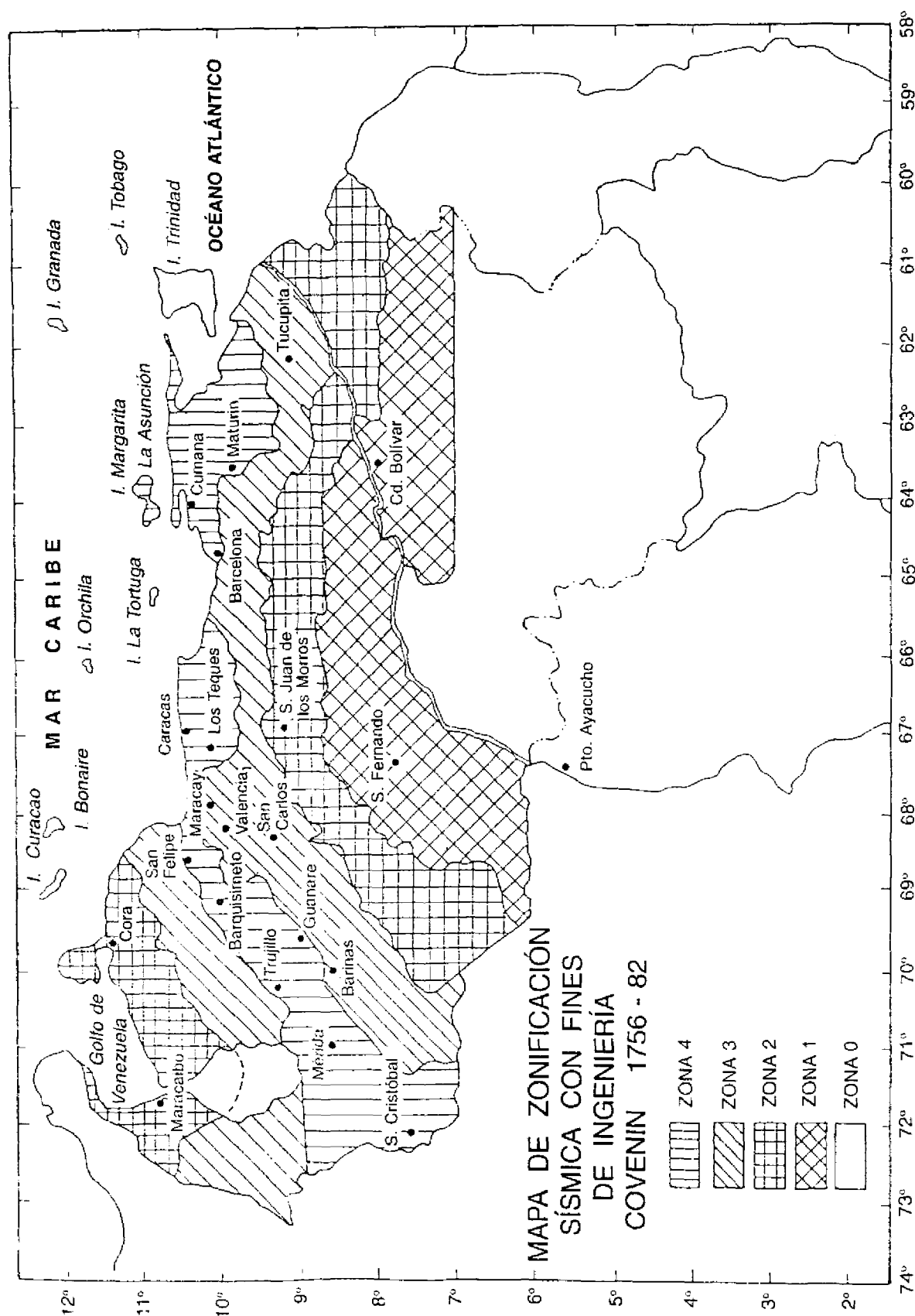


Figura 1.3
Mapa de zonificación sísmica de Venezuela COVENIN 1756 (1982)
 Edificaciones antisísmicas. FONDONORMA, Caracas.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZACIÓN DE LAS AMENAZAS NATURALES

A continuación se discuten las amenazas sísmicas e hidrometeorológicas, incluida su caracterización para el análisis de vulnerabilidad de los diferentes componentes del sistema. En el cuadro 2.1 se identifican las amenazas.

Cuadro 2.1
Amenazas naturales

Origen	Acciones y variables
Inestabilidad de taludes	• Gravitatorio: repteo de bloques • Sismo: deslizamiento instantáneo o progresivo • Lluvia: deslave, aumento, turbiedad del afluente
Vibraciones por sismos	• Efectos locales • Desplazamientos temporales
Desplazamientos permanentes	• Movimientos de fallas geológicas • Inestabilidad de soportes
Viento	• Fuerzas laterales en la infraestructura expuesta a vientos

SISMOS

- Movimientos vibratorios:

Para el análisis de los movimientos vibratorios del terreno se han seguido los criterios y requerimientos de la norma venezolana COVENIN (1756).

En este estudio, los valores de la amenaza sísmica varían a lo largo de los 34 km del sistema por la distribución de las fallas geológicas.

- Incorporación de la intensidad modificada de Mercalli

Tomando como base la interpretación de los efectos conocidos de sismos anteriores, para el área estudiada se han adoptado las tasas medias anuales de ocurrencia de intensidad de Mercalli en suelos competentes y se ha utilizado la metodología de la AFPS (1990) que se muestra en el cuadro 2.2.

Cuadro 2.2
Tasas medias anuales de ocurrencia de intensidad de Mercalli en suelos
competentes del área de estudio

Intensidad de Mercalli (IMM)	Tasa media anual (1/año)	
	Áreas hasta 15 km al sur del valle de Caracas	Áreas a $\pm$ 20 km del río Tuy
VI	0,03	0,025
VII	0,011	0,008
VIII	0,006	0,001
IX	0,003	0,0004 (*)
X	0,001 (*)	---

(*) No asignado en tiempos pasados

- Desplazamientos máximos en fallas activas

Considerando que el sistema de tuberías estudiado cruza fallas activas predominantemente transcurrentes, se emplearon las correlaciones entre longitud de falla, magnitud (M_s) y desplazamiento máximo propuestas por Wells y Coppersmith (1994). De acuerdo con esas relaciones y las longitudes de las fallas geológicas activas anotadas en la figura 2.1 se han estimado los valores de magnitud Richter (M_s) y los desplazamientos máximos que se presentan en el cuadro 2.3.

Cuadro 2.3
Magnitud Richter (M_s) y desplazamientos máximos (D) asociados
a las fallas geológicas de la figura 2.1

Falla geológica	Magnitud Richter M_s	Desplazamiento máximo esperado D(m)
San Antonio San Diego Pichao	6,4 - 6,6	0,4 - 0,8
Tácata El Ávila Araguaita	6,5 - 6,7	0,5 - 1,0
Aragua	6,8 - 7,0	0,7 - 1,2
San Sebastián	7,6 - 7,8	2,0 - 3,3

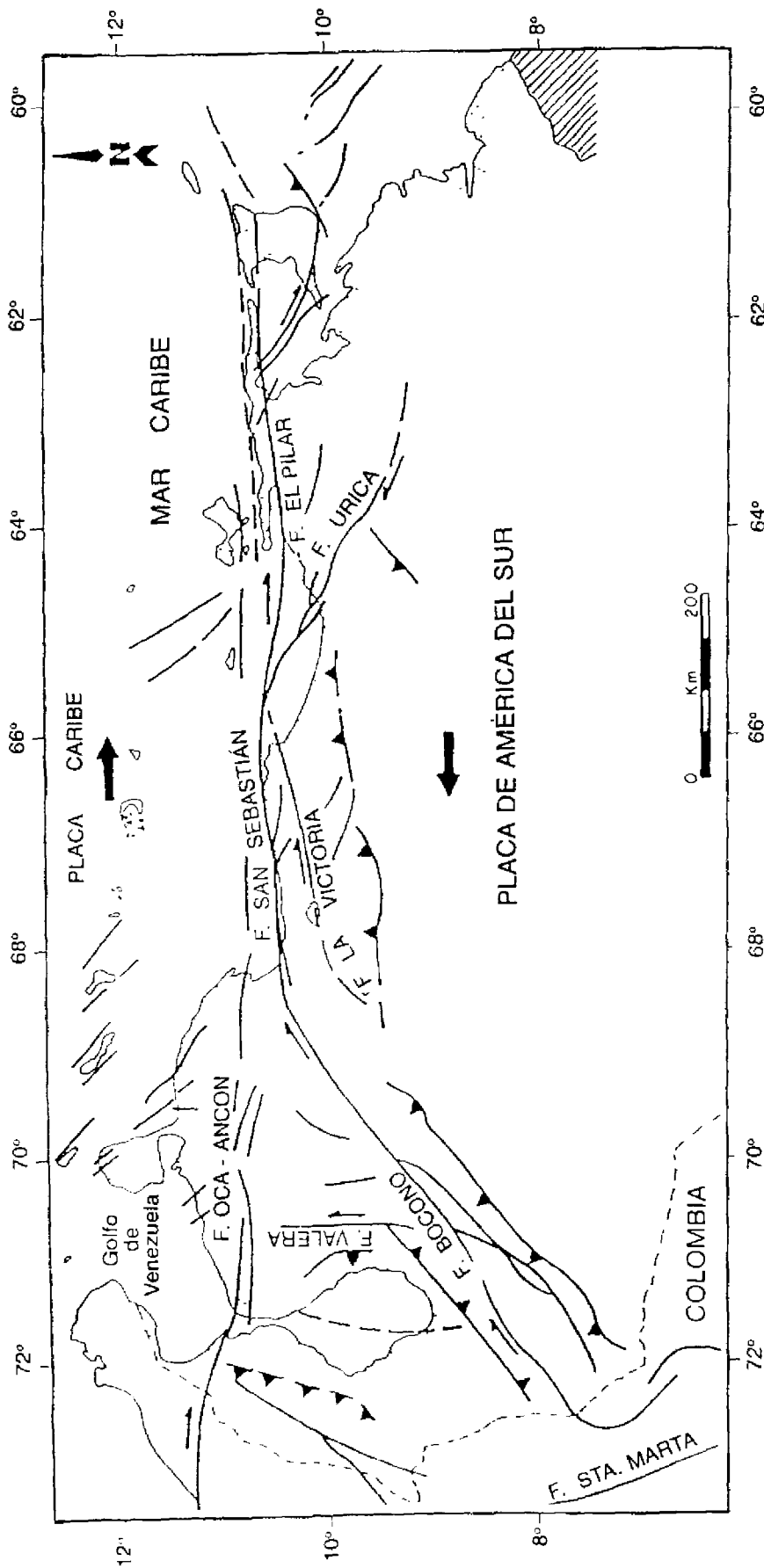


Figura 2.1
Fallas importantes en Venezuela

- Potencial de licuefacción

La información disponible sobre el área estudiada no identifica suelos potencialmente licuables.

- Deslizamientos (información estadística)

Durante la ocurrencia de un sismo, hay dos acciones principales que pueden dar lugar a la inestabilidad de zonas con fuerte pendiente: (a) las fuerzas inerciales pueden generar esfuerzos que exceden temporalmente la resistencia al corte y producir un desplazamiento pendiente abajo; (b) las deformaciones causadas por las sacudidas pueden producir pérdida de resistencia en materiales frágiles (por ejemplo rocas cementadas). Las estadísticas de Keefer (1984) y los umbrales de deslizamientos dados en los diferentes grados de las escalas de intensidad de Mercalli (Brazee 1979; Grunthal 1993) sirvieron de base para la elaboración del cuadro 2.4.

Cuadro 2.4
Umbrales de intensidad sísmica para diferentes tipos de deslizamientos

Tipos de deslizamientos o fallas	Umbral de intensidad sísmica
Caída o deslizamientos de rocas y pequeños deslizamientos de suelos.	Eventos cercanos de baja magnitud Richter (4 a 4,5) con IMM del orden de VI o más.
Deslizamientos repentinos de bloques de suelos; casos aislados.	
Deslizamientos repentinos de bloques de roca, cantidades masivas de roca.	Eventos relativamente cercanos con magnitud Richter 5 a 5,5, con IMM del orden de VII o más.
Avalanchas de rocas o suelos. Agrietamientos y roturas en paredes libres de roca sólida.	Magnitud Richter del orden de 6,5 con IMM del orden de VIII o más.
Deslizamientos y desprendimientos importantes de suelos y roca; frecuente en topografías irregulares.	Intensidad IMM grado IX o más.
Deslizamientos masivos de gran extensión; posible bloqueo de ríos y formación de nuevos lagos.	Intensidad IMM por lo menos grado X

Fuente: Brazee 1979; Grunthal 1993

La identificación de áreas en las cuales pueden presentarse situaciones como las descritas en el cuadro 2.4 requiere estudios de sitio detallados y la aplicación de los conceptos técnicos que se describen más adelante.

Los resultados de las estadísticas de Keefer sugieren que los deslizamientos pueden ocurrir para grados de intensidad inferiores a los valores indicados en la escala de Mercalli. En el cuadro 2.5 se sintetiza la estadística presentada por Keefer para tres tipos de inestabilidad del terreno: deslizamientos menores, agrietamientos en paredes de roca sólida y desparramamiento lateral de suelos.

Cuadro 2.5
Riesgo de inestabilidad de taludes

Caso de inestabilidad	Porcentaje de casos observados con IMM igual o menor que:						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Pequeños deslizamientos en depósitos de arena y grava.	5	33	76	90 (*)	100		
Agrietamiento y rotura de paredes de roca sólida.		12	40	72	96 (*)	100	
Desparramamiento lateral de terrenos planos. Fisuras apreciables.		14	36	77	91	100	(*)

*Caracterización con grado de intensidad en la escala de Mercalli.

VIENTOS

- Distribución de velocidades máximas

Es bien sabido que la distribución de velocidades máximas de viento depende de la duración del registro. A fin de comparar los datos suministrados a partir de estaciones venezolanas (COVENIN 2003 1986) con datos de las Antillas Menores (CUBIC 1989), se adoptó como velocidad máxima de tiempo el valor promedio durante 10 minutos de registro continuo. En el cálculo de las solicitaciones se aplican los factores de ráfaga que especifican las normas para esa duración de registro. En la figura 2.2 se comparan las distribuciones de velocidad del viento correspondientes a cinco localidades: Dominica (CUBIC 1989), Güiría (INTEVEP 1983), Maiquetía y Maracay (COVENIN 2003 1986) y Milano (Floris C. et. al.

1990). La línea gruesa corresponde a los valles del Tuy donde se encuentra el sistema de agua potable estudiado; esta distribución puede considerarse conservadora si se compara con los valores normativos (figura 1.3).

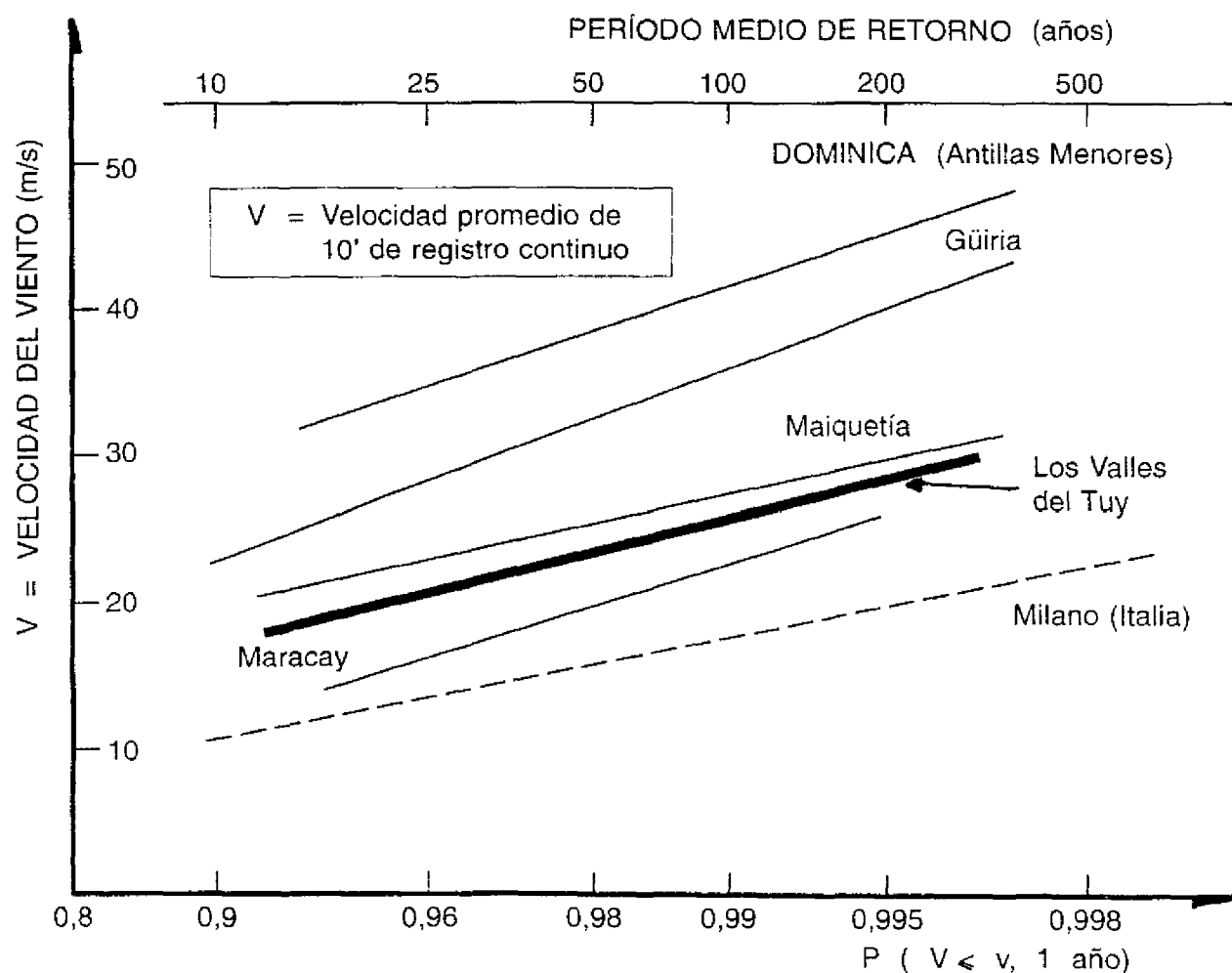


Figura 2.2
Distribución de valores extremos de vientos máximos anuales

- Cálculo de esfuerzos debidos al viento

Para el cálculo de las solicitaciones debidas a vientos se ha empleado las metodologías establecidas por Wells y Coppersmith (1994) y COVENIN 2003 (1986). Estas se han aplicado para el caso particular de estructuras tipo chimenea de equilibrio de gran altura.

AMENAZAS HIDROMETEOROLÓGICAS

- Caudales extremos

Para evaluar la seguridad de los puentes de acceso y cruces de tuberías sobre ríos frente a las crecidas, se requiere conocer los caudales extremos. Dado que dos de los puentes del sistema de agua potable estudiado se encuentran sobre el río Guaire, se obtuvo la variación de caudales hasta períodos de retorno de 1.000 años (figura 2.3) (Suárez 1997).

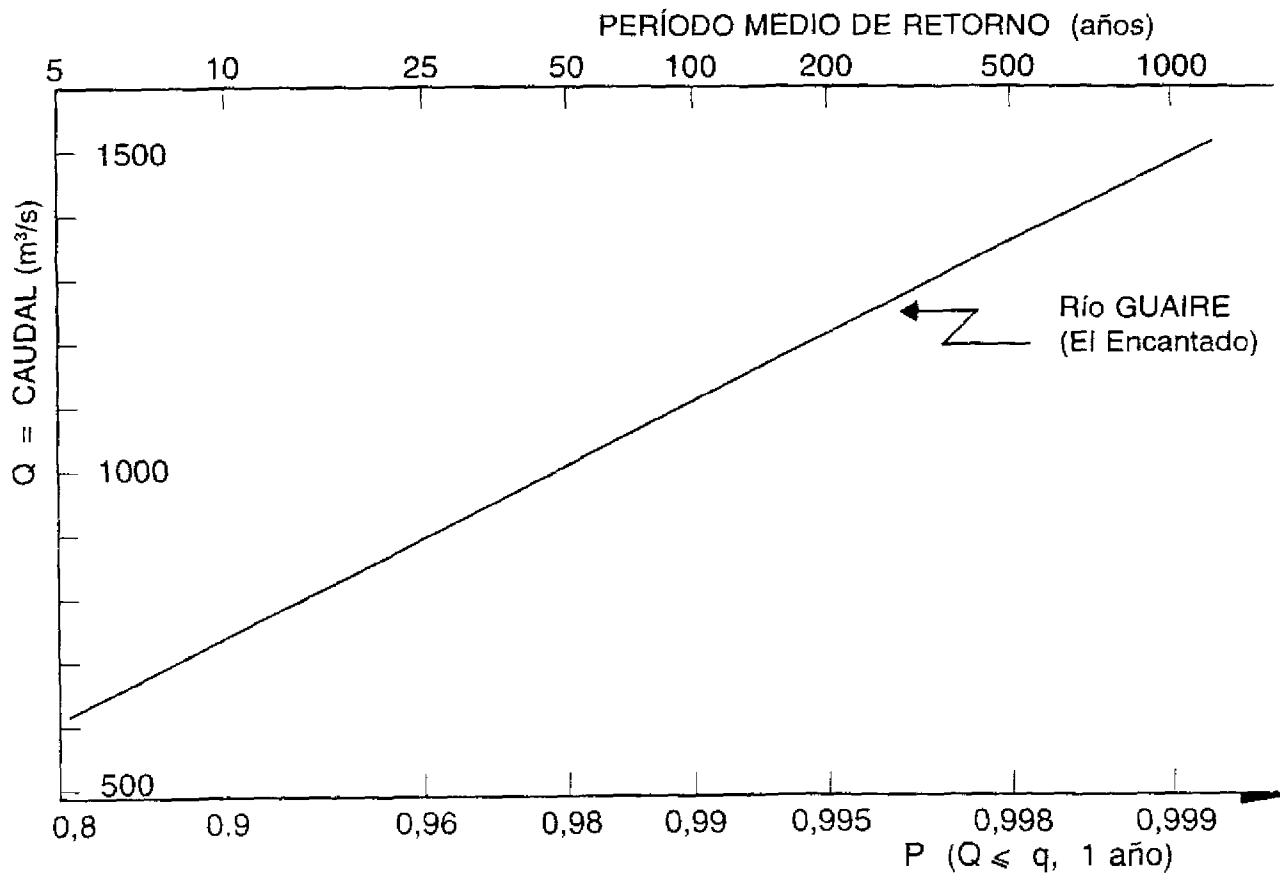


Figura 2.3

Distribución de valores extremos de caudales; la abscisa representa la probabilidad de no excedencia anual del caudal Q

- Pluviometría

Para el cálculo del volumen de agua que drena de las cuencas para alimentar los embalses y tomas del sistema se requiere información sobre la distribución de las precipitaciones.

En la figura 2.4 se dan los valores medios de la precipitación mensual en la estación Observatorio Cagigal, cercana al sistema estudiado, para un lapso de observación de 50 años, entre 1947 y 1996, (Armada de Venezuela 1997). Obsérvese que en término medio, la precipitación acumulada anual alcanza 828 mm.

- Arrastre de sólidos

Los problemas propios de los arrastres de sólidos asociados al régimen de precipitaciones no se tratan en este estudio. Al respecto pueden consultarse a Williams y Bernrt (1977) y el Manual of engineering handbook (1979)

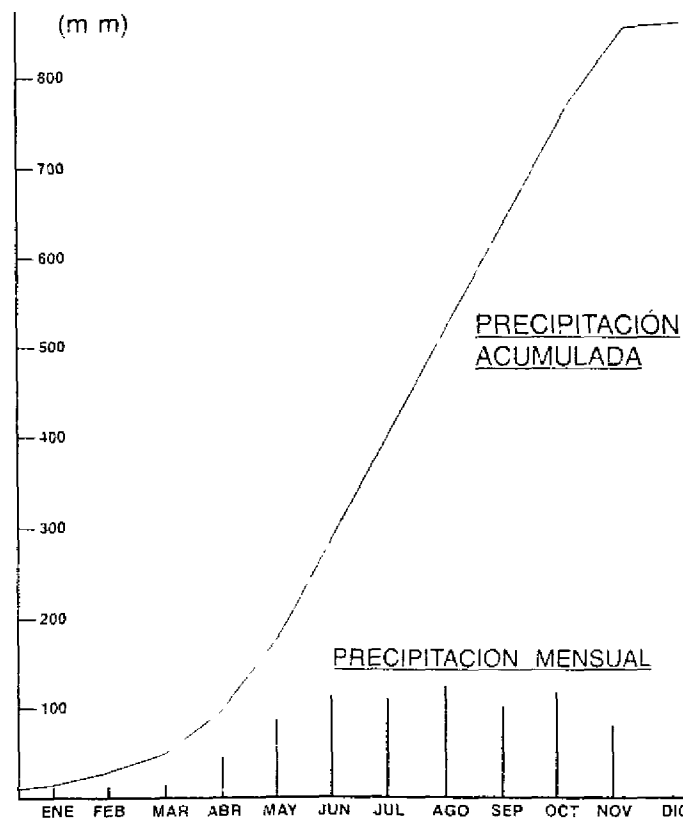


Figura 2.4

**Valores medios de precipitación mensual: Observatorio Cagigal (Caracas, 1035 msnm)
lapso de observación: 1947-1996. Armada de Venezuela (1997)**