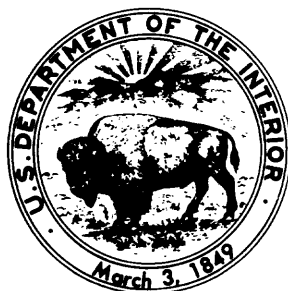


UNITED STATES
DEPARTMENT OF THE INTERIOR
GEOLOGICAL SURVEY

PROCEEDINGS OF CONFERENCE XXXVI

A WORKSHOP ON "ASSESSMENT OF GEOLOGIC HAZARDS AND RISK IN
PUERTO RICO"

MAY 14-16, 1986
SAN JUAN, PUERTO RICO



Open-File Report 87-008

This report is preliminary and has not been edited or reviewed for conformity with U.S. Geological Survey publication standards and stratigraphic nomenclature. The views and conclusions contained in this document are those of the authors and should not be interpreted as necessarily representing the official policies, either expressed or implied, of the United States Government. Any use of trade names and trademarks in this publication is for descriptive purposes only and does not constitute endorsement by the U.S. Geological Survey.

Reston, Virginia
1987

C-1 40064 (226)

cover 2

Knowledge Utilization Series
Reports To Date

Open File 84-770	Proceedings of the Symposium on the New Madrid Seismic Zone
Open File 84-772	Primer on Improving the State of Earthquake Hazards Mitigation and Preparedness
Open File 86-185	A Workshop on "Probabilistic Earthquake Hazards Assessments"
Open File 87-008	A Workshop on "Assessment of Geologic Hazards and Risk in Puerto Rico"

For Ordering Information Contact:

U.S. Geological Survey
Books and Open-file Reports
Services Section
Federal Center, Building 41
Box 25425
Denver, Colorado 80225

C-2 40064 /226

Enclosed p. 8

FOREWORD

RAISING PUBLIC AWARENESS CONCERNING GEOLOGIC RISKS

Opening remarks of the Honorable Alejandro Santiago-Nieves, Secretary of the Department of Natural Resources of the Commonwealth of Puerto Rico, at the opening session of the Third Annual Workshop on Geologic Hazards in Puerto Rico, held at the Caribe Hilton Hotel, San Juan, Puerto Rico, Wednesday 14 May 1986.

It is my privilege to welcome the participants in this annual workshop once again in the name of the Honorable Rafael Hernandez Colon, Governor of Puerto Rico. The Governor would like you to know that he continues to support the several programs related to mitigation of natural hazards, including earthquakes, floods, hurricanes, and landslides. I know that he would have liked to welcome you personally, but there are many competing demands for his time, and he begs to be excused this morning. In view of our experiences during the past year, the Governor is very conscious of the need for this kind of conference to help raise the awareness of the people of Puerto Rico to the ever present possibility of natural disasters. He has directed that all the agencies involved with planning and emergency preparedness join forces to that end.

I want to express my gratitude to Dr. Walter Hays of the U.S. Geological Survey (USGS) for his effort in arranging this conference, and to the members of the Steering Committee, including the Federal Emergency Management Agency (FEMA), the University of Puerto Rico, and the staff of my Department of Natural Resources.

The year 1985 witnessed a number of major natural disasters, which served to remind us of the fact that even when they occur at a great distance from urban centers, such events can have severe impacts on human settlements. First, there was an earthquake in Chile in March. In May, Puerto Rico suffered severe floods. In September, a seismic event on the west coast of Mexico generated tremendous damage in the metropolis--over 200 miles away. In October, unusually heavy rains were responsible for a rockslide in Ponce that claimed almost 100 lives. In November, a volcanic eruption in Colombia caused floods and mudflows that took several thousand lives. The people of Puerto Rico responded with generous assistance to all those events.

After the Mameyes rockslide and other events associated with the extraordinary rainfall of the first week in October, we built upon our previous experiences to assure that the FEMA's Regional Interagency Hazard Mitigation Report would involve the major local agencies as well as Federal representatives. The Planning Board and the Department of Natural Resources became directly involved in that effort, particularly in the working sessions of the Interagency group that formulated the statement of problems and recommendations. As a result, I believe that the report and its recommendations will produce major benefits for Puerto Rico and its people.

The major element, of course, was the impetus to undertake the landslide inventory that was recommended by last year's geologic risk workshop. After sending several specialists to Puerto Rico to observe the nature and extent of landslide activity, the USGS has assigned funds for this important activity,

103 40064

and the Department of Natural Resources as submitted a proposal for the work that is required to produce an island-wide inventory of landslide areas and of areas that may be susceptible to future landsliding. The efforts will require at least five years to complete, even with the cooperation of the University of Puerto Rico.

Another result of the FEMA Interagency Hazard Mitigation Report has been a revision of the Puerto Rico Flood Hazard Mitigation Plan which was first prepared in 1980. This has required the modification of our Coastal Zone Management Program task related to coastal hazards. The island-wide hazard mitigation plan has now been modified in accordance with the FEMA report, so that they will be come appendages to the global plan, with greater detail for each affected area.

The experience we have obtained from these exercises has spurred us to expand our public education program. This year, the five weeks from the beginning of May to the first week in June have been dedicated to education concerned with environmental quality, health, and natural resources. As you can observe in the program available for distribution, we are trying to combine several aspects of public education in this activity, including both this conference on geological hazards and our conference on hurricane preparedness during the first week in June. Dr. Neil Frank, the Director of the National Hurricane Center, will be the principal speaker at the conference on June 5, 1986. I extend a cordial invitation to all of you to attend that important event.

One of my primary concerns is how to promote public awareness of the potential natural hazards and what each individual and family can do, at little or no expense, to protect lives and property. This is not a task for a single agency. Every agency of the Government has a role to play in that effort. In addition, we are reaching out to the private sector, for every businessman and plant manager has an interest in the matter, both to protect corporate property and the health and safety of employees and to assure that the minds of employees are relieved of concern about their homes and families while they are at work. We will be reaching out to insurance companies, as well as to the Chamber of Commerce and the Manufacturers' Association, both to provide them with vital information and to enlist their assistance and sponsorship in the effort to reach all sectors of the population.

I hope your conference will be successful and look forward to my appearance on Friday with the Honorable Patria Custodio, Chairman of the Planning Board.

new odd p8

PROLOGO

CREANDO CONCIENCIA EN EL PUBLICO SOBRE RIESGOS GEOLOGICOS

Comentarios del Honorable Alejandro Santiago Nieves, Secretario del Departamento de Recursos Naturales del Estado Libre Asociado de Puerto Rico, en la reunión de apertura del Tercer Taller Anual sobre Riesgos Geológicos en Puerto Rico, ofrecido en el Hotel Caribe Hilton, San Juan, Puerto Rico, el día miércoles 14 de mayo de 1986.

Me complace mucho darles la bienvenida de nuevo a ustedes, los participantes de este taller anual, en nombre del Honorable Rafael Hernández Colón, Gobernador de Puerto Rico. El señor gobernador desearía hacerles partícipes de su continuado apoyo a los distintos programas relacionados con la mitigación de peligros naturales, del tipo de terremotos, inundaciones, huracanes y derrumbamientos.

Es de mi conocimiento personal que al señor gobernador le hubiese complacido el poder darles la bienvenida personalmente, pero debido a compromisos previos ruega ser disculpado en esta reunión. Dada nuestras experiencias durante este año pasado, el señor gobernador está muy conciente de la necesidad de este tipo de conferencia que facilitan el crear conciencia en el pueblo puertorriqueño sobre la perenne posibilidad de que ocurra algún desastre natural. El señor gobernador ha ordenado que todas las agencias conectadas con la planificación y preparativos de emergencia aúnen sus esfuerzos en un fin común.

Desearía expresar mi agradecimiento al doctor Walter Hays del Servicio Geológico de los Estados Unidos por haber organizado esta conferencia. De igual modo, desearía agradecer a los miembros del Comité Timón, incluyendo a la Agencia Federal de Manejo de Emergencias, a la Universidad de Puerto Rico y a los miembros de mi Departamento de Recursos Naturales.

El año 1985 fue testigo de numerosos desastres naturales, lo que nos recuerda que aún dado el caso de estos desastres ocurran a grandes distancias de centros urbanos, este tipo de evento puede tener efectos perjudiciales a los asentamientos humanos. Primero, Chile experimentó un terremoto en marzo. En Mayo, Puerto Rico se vió afectado por inundaciones serias. En septiembre, un evento sísmico a lo largo de la costa occidental de Méjico generó daños enormes en la metropoli, ubicada a una distancia de 200 millas. En octubre, lluvias torrenciales ocasionaron un derrumbamiento en Ponce a un costo de 100 vidas. Y en noviembre

una erupción volcánica en Colombia ocasionó inundaciones y flujos de fango, lo cual representó la pérdida de miles de vidas. El pueblo puertorriqueño respondió generosamente a estos eventos, especialmente a los dos más cercanos a él: Ciudad de Méjico y Ponce.

Luego de las experiencias del derrumbamiento de Mameyes y de otros eventos asociados con los llubias excesivas durante la primera semana de octubre, no aseguramos ahora que el Informe Interagencial Regional de FEMA sobre la Mitigación de Riesgos incluyese a las principales agencias locales, al igual que a representantes federales. La Junta de Planificación y el Departamento de Recursos Naturales se vieron envueltos directamente en este esfuerzo, particularmente en las sesiones de discusión del grupo interagencial, el cual formuló el planteamiento de los problemas y las recomendaciones. Como consecuencia, creo que el Informe y sus recomendaciones producirá mayores beneficios para Puerto Rico y para su gente.

El componente principal, por supuesto, fue establecer el ~~inputu~~ inputu necesario para llevar a cabo el inventario del derrumbamiento, el cual fue recomendado por el taller sobre riesgos geológicos del año pasado. Luego de haber enviado varios especialistas a Puerto Rico con el fin de observar la naturaleza y el alcance del derrumbamiento, el Servicio Geológico asignó fondos para esta importante actividad. Por otro parte, el Departamento de Recursos Naturales ha sometido una propuesta en la cual se estipula el tipo de trabajo que sería necesario para producir un inventario para toda la Isla en áreas de derrumbamiento y en áreas que pudiesen ser susceptibles a unos derrumbamientos futuros.

Otro resultado del Informe Interagencial ha sido la revisión del Plan de Mitigación de Riesgos de Inundaciones de Puerto Rico, el cual fue redactado en 1980. Esto ha requerido la modificación de nuestra tarea relacionada con los riesgos costaneros del Programa de Manejo de la Zona Costanera. El Plan de Mitigación a nivel de la Isla ha sido modificado de acuerdo al Informe de FEMA. Un nuevo sistema está siendo diseñado para los planes de mitigación de riesgos de las inundaciones locales a fin de que se conviertan en anexos al plan global, ofreciendo así, información más detallada para cada área afectada.

La experiencia obtenida de estos intentos nos ha motivado a expandir nuestro programa de educación pública. En este año, las cinco semanas comprendidas de principios de mayo a la primera semana de junio han sido dedicadas a la educación pública, tocando temas como lo son la calidad del ambiente, la salud, y los recursos naturales. Como podrá observar, en el programa disponible para distribución, estamos tratando de combinar varios aspectos de la educación pública en este programa incluyendo a ambos, esta conferencia sobre riesgos geológicos y nuestra conferencia sobre preparativos contra huracanes en la primera semana de junio. El doctor Neil Frank, Director del Centro Nacional de Huracanes, sería el orador principal en la conferencia del 5 de junio de 1986. Deseo extenderles una invitación cordial a todos ustedes.

Uno de mis preocupaciones primordiales ha sido como fomentar la conciencia pública sobre posibles peligros naturales y los que cada individuo y familia pueden hacer, a un costo mínimo, para salvaguardar sus vidas y propiedades. Esto no es una tarea para una sola agencia. Cada agencia del gobierno tiene un rol que desempeñar en este esfuerzo. Además, estamos haciendo un llamado al sector privado, ya que cada hombre o mujer de negocios y cada gerente de planta física tiene un interés real en este asunto, no tan sólo para poder proteger la propiedad de la empresa sino también para poder proteger la salud y seguridad de los empleados, y para asegurar la tranquilidad de éstos en cuanto a la protección de sus viviendas y familias mientras ellos desempeñan en sus labores. Nos acercaremos a compañías de seguros, al igual que a la Cámara de Comercio y a la Asociación de Industriales para ofrecerles información de vital importancia y para solicitar su ayuda y auspicio en este esfuerzo de tratar de alcanzar a todos los sectores de la población.

Mi deseo es que su conferencia será exitosa y anticipo entusiasmado mi aparición el viernes junto a la Honorable Patria Custodio, Presidente de la Junta de Planificación.

new 088 P. 81

TABLE OF CONTENTS

	Page
<u>BACKGROUND INFORMATION AND CONCLUSIONS OF THE WORKSHOP</u>	
Background and Summary of the Workshop on "Assessment of Geologic Hazards and Risk in Puerto Rico" by Walter Hays and Paula Gori	
Introduction.....	1
Issues Associated with the Implementation of Loss-Reduction Measures in Puerto Rico.....	2
The 19 September 1985 Mexico Earthquake.....	9
The 10 October 1986 San Salvador Earthquake.....	9
Description of Earthquake Hazards that could occur in the Puerto Rico area.....	12
Elements Involved in an Assessment of the Potential Risk from Earthquakes in the Puerto Rico Area.....	15
Workshop Procedures.....	17
Plenary Sessions and Discussion Group Seminars.....	18
Acknowledgments.....	21
References.....	22
Next Steps - The Role of the Department of Natural Resources by Alejandro Santiago Nieves.....	23
Los Sigüientes Pasos - El Rol Del Departamento de Recursos Naturales by Alejandro Santiago Nieves.....	28
<u>FUNDAMENTAL KNOWLEDGE ON GEOLOGIC HAZARDS IN PUERTO RICO</u>	
Historic Earthquakes and the Earthquake Hazard of Puerto Rico by William R. McCann.....	34
Evaluating Earthquake Recurrence in the Northeastern Caribbean: Lessons from the 1985 Mexico Earthquake and Areas of Future Research in Puerto Rico by David Schwartz.....	43
Earthquake Vulnerability Study for the Metropolitan Area of San Juan, Puerto Rico by Jose Molinelli.....	49
Foro Sobre La Vulnerabilidad Sismica Del Area Metropolitana De San Juan by Rafael Jimenez, James Joyce, Samuel Díaz, Pedro Jimenez, Alejandro Soto, Hermenegildo Ortiz, and Ruth Carreras.....	114
Forum on Puerto Rico Vulnerability Study By Rafael Jimenez-Perez.....	178

Landslide Hazards of Puerto Rico by Randall Jibson.....	183
--	-----

Engineering Geologic Exploration at the Existing Mameyes Ward (Western, Northern, and Eastern Areas Adjacent to the Landslide) by Carlos Rodríguez-Molina.....	189
--	-----

INFORMATION ON THE 19 SEPTEMBER 1985 MEXICO EARTHQUAKE

Informe Preliminar Comisión de Estudio Terremoto del 19 de Septiembre de 1985 Ciudad de México, República de México by Ruth Carreras, Samuel Díaz, Rafael Jiménez, José Molinelli, Hermenegildo Ortiz, Carlos Rodríguez, and Miguel Santiago.....	194
---	-----

El Terremoto Mexicano del 19 Septiembre de 1985 by Richard Krimm.....	257
--	-----

Earthquake Response of Structures by Samuel Díaz Hernández.....	263
--	-----

Alternativas a Causas De Fallas Estructurales José A. Martínez Cruzado.....	268
--	-----

INFORMATION PREPARED FOR WORKING GROUP SEMINARS

Ground Shaking Hazard and Vulnerability of Structures Rafael Jiménez-Pérez.....	275
--	-----

Site Amplification--An Important Consideration in the Vulnerability Analyses for Puerto Rico by Walter W. Hays.....	281
---	-----

Ductility vs Vulnerability in Major Earthquakes by Bernardo Deschappelles.....	293
---	-----

Aspectos Fundamentales de la Geología y la Sismología Para la Microzonación Sísmica en España: Un Ejemplo By Walter W. Hays.....	299
--	-----

Proposal for the Preparation of a Landslide Assessment and Mapping Program for Puerto Rico by Carlos Rodríguez Molina and Luis Vázquez Castillo.....	351
--	-----

The Importance of Training in Earthquake Hazards Mitigation by Walter Hays and Paula Gori.....	359
---	-----

INFORMATION ON EMERGENCY RESPONSE AND BUILDING CODE

Planificación de Manejo de Emergencias by Ruth Carreras and Mariano Vargas.....	374
--	-----

Status of Puerto Rico Building Code by Miguel Santiago.....	382
--	-----

APPENDIX A: TECHNICAL TERMS

Glossary of Terms Used in Probabilistic Earthquake Hazards
Assessments..... A-1

Glosario de Terminos para Analisis Probabilistico de los Riesgos y
Peligros Sismicos..... A-8

APPENDIX B: STRONG MOTION ACCELEROGRAPHS

List of Strong Motion Accelerographs in Puerto Rico as of April 1986.. B-1

APPENDIX C: PUBLICATIONS

List of the Federal Emergency Management Agency's Earthquake Hazards
Reduction Publications..... C-1

APPENDIX D: PARTICIPANTS IN 1986 WORKSHOP

List of Participants..... D-1

APPENDIX E: CONFERENCES TO DATE

List of Conferences to Date..... E-1

APPENDIX A: TECHNICAL TERMS

Glossary of Terms Used in Probabilistic Earthquake Hazards
Assessments..... A-1

Glosario de Terminos para Analisis Probabilistico de los Riesgos y
Peligros Sismicos..... A-8

APPENDIX B: STRONG MOTION ACCELEROGRAPHS

List of Strong Motion Accelerographs in Puerto Rico as of April 1986.. B-1

APPENDIX C: PUBLICATIONS

List of the Federal Emergency Management Agency's Earthquake Hazards
Reduction Publications..... C-1

APPENDIX D: PARTICIPANTS IN 1986 WORKSHOP

List of Participants..... D-1

APPENDIX E: CONFERENCES TO DATE

List of Conferences to Date..... E-1

[new add P&J]

**UNITED STATES
DEPARTMENT OF THE INTERIOR
GEOLOGICAL SURVEY**

PROCEEDINGS OF CONFERENCE XXXVI

**A WORKSHOP ON "ASSESSMENT OF GEOLOGIC HAZARDS AND RISK IN
PUERTO RICO"**

**May 14-16, 1986
San Juan, Puerto Rico**

Sponsored by:

**Department of Natural Resources, Puerto Rico
Puerto Rico Planning Board
Puerto Rico College of Engineers
Puerto Rico Geological Survey
Federal Emergency Management Agency
U.S. Geological Survey**

EDITORS

**Walter W. Hays and Paula L. Gori
U.S. Geological Survey
Reston, Virginia 22092**

Open-File Report 87-008

Compiled by Carla Kitzmiller

This report is preliminary and has not been edited or reviewed for conformity with U.S. Geological Survey publication standards and stratigraphic nomenclature. The views and conclusions contained in this document are those of the authors and should not be interpreted as necessarily representing the official policies, either expressed or implied, of the United States Government. Any use of trade names and trademarks in this publication is for descriptive purposes only and does not constitute endorsement by the U.S. Geological Survey.

**Reston, Virginia
1987**

1A3 40004-226 MB

PREFACE

Puerto Ricans face the threat of life, injuries, and social and economic impacts from the recurrence of a large, damaging earthquake such as the one that occurred on October 11, 1918, near Mayaguez, Puerto Rico. In the 69 years since that earthquake, the population density and the building wealth exposed to the earthquake threat have increased sharply; whereas, applications of earthquake hazards mitigation and preparedness strategies have lagged behind the accumulated knowledge on earthquake hazards.

The goal of this publication, a permanent record of the third workshop held in 1986 on earthquake and geologic hazards in the Puerto Rico area, is to encourage the implementation of loss-reduction measures by Puerto Ricans. This publication, the fifth in the knowledge utilization series of the U.S. Geological Survey, contains high-quality information that can be applied in many different ways in Puerto Rico including:

- o Advocacy for public policy to deal with geologic and earthquake hazards in the context of other natural and man-made and technological hazards.
- o Response planning.
- o Vulnerability studies.
- o Education and training programs to increase hazard awareness and preparedness.
- o Hazard mitigation strategies (for example, seismic provisions for a modern building code, seismic microzonation, land-use plans, criteria for design, construction, and review of critical facilities including community lifeline systems, and guidelines for retrofit and strengthening of existing structures and facilities).
- o Agendas for future research to close gaps in knowledge that presently limit applications.

We commend Puerto Rico for its achievements. We believe that Puerto Ricans are now in a strong position and are capable of carrying out all of these applications and others during the next 5-10 years.

Richard Krimm
Federal Emergency Management Agency

Walter Hays
U.S. Geological Survey

106 40004

W

new eds pg 1

BACKGROUND AND SUMMARY FOR
WORKSHOP ON "ASSESSMENT OF GEOLOGIC HAZARDS AND RISK IN PUERTO RICO"

by

Walter W. Hays and Paula L. Gori
U.S. Geological Survey
Reston, Virginia 22092

INTRODUCTION

Seventy earth scientists, engineers, planners, emergency management specialists, and public officials participated in a 2-day workshop on "Assessment of Geologic Hazards and Risk in Puerto Rico." The workshop, convened under the auspices of the National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP), was held in San Juan, Puerto Rico, on May 14-16, 1986. The sponsors of the workshop were the Puerto Rico Department of Natural Resources (DNR), the Puerto Rico Planning Board, Puerto Rico College of Engineers, Puerto Rico Geological Survey, the Federal Emergency Management Agency (FEMA), and the U.S. Geological Survey (USGS).

This workshop was the third in the Commonwealth of Puerto Rico and the thirty-sixth in a series of workshops and conferences throughout the Nation that the USGS has sponsored since 1977, usually in cooperation with FEMA, the lead agency in the NEHRP. The two prior workshops in Puerto Rico were held in April 1984 and May 1985. Each past workshop sponsored by USGS and FEMA had two general goals: 1) bringing together participants having experience in the production and use of knowledge of the earthquake hazards of ground shaking, surface fault rupture, earthquake-induced ground failure, regional tectonic deformation, and where applicable, tsunamis and seiches, and 2) strengthening new and ongoing activities in the State, Commonwealth, or region to mitigate losses from earthquake hazards. This workshop had the same general goals as in the past, but it also had new goals:

- 1) To build on the plans, information and research networks and support systems, and high levels of knowledge, concern, and commitment developed in 1985 as a consequence of the seminar at Mayaguez on "Fundamentals of Earthquake Engineering" (convened by Earthquake Engineering Research Institute with sponsorship by the National Science Foundation and the Office of Foreign Disaster Assistance of the Department of State) and the workshop on "Reducing Potential Losses from Earthquake Hazards" (convened by USGS/FEMA/DNR) at Dorado.
- 2) To disseminate information and preliminary research results derived from the September 1985 Mexico earthquake, emphasizing the relevant facts gathered by the Puerto Rican investigative team for incorporation into Puerto Rico's earthquake preparedness program.
- 3) To disseminate information on the October 1985 Mameyes, Puerto Rico, landslide disaster, emphasizing the facts that can motivate generic research on the landslide process and be used to improve emergency response planning.

- 4) To distill the technical and societal lessons learned from the 1985 Mexico earthquake and the 1985 Mameyes landslide disaster and to transfer and apply these lessons in planning, research, mitigation, response, and recovery programs currently underway in Puerto Rico.
- 5) To provide information for both the technical expert and the nontechnical decisionmaker--planner--implementor.
- 6) To strengthen the ad hoc Puerto Rican "working groups" in earthquake engineering, formed in 1984, as credible resources in Puerto Rico to foster implementation of loss-reduction measures for all types of geologic hazards.

ISSUES ASSOCIATED WITH THE IMPLEMENTATION OF LOSS-REDUCTION MEASURES IN PUERTO RICO

Information and experience gained by USGS, FEMA, National Science Foundation, and National Bureau of Standards since 1977 in the NEHRP have shown that the implementation process is as complex as any research study (Figure 1). In every earthquake-prone region of the Nation, including Puerto Rico, two principal issues impede implementation. They are:

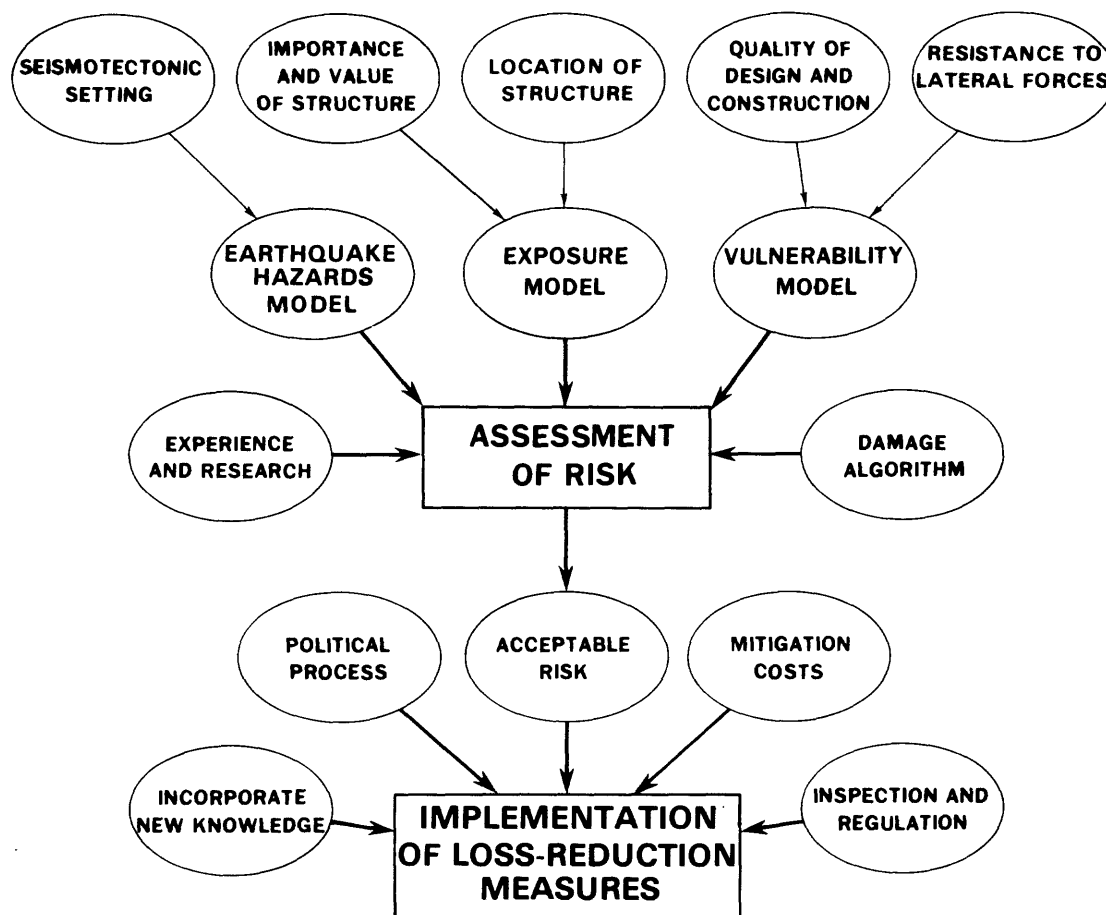


Figure 2.--Schematic illustration of the critical elements of the earthquake-hazards-reduction implementation process. The flow is from top to bottom. Earthquake experience seems to be needed to drive the process of implementation in almost every community.

- Do the people have the will to implement loss-reduction measures for earthquakes without the occurrence of a major earthquake?
- How much more will loss-reduction measures for earthquakes cost and will the required money come from reprogramming or from new sources?

Experience since 1977 in the NEHRP has shown that implementation of loss-reduction measures tends to happen when 5 critical interrelated elements are present (Figure 2). Each element is described below.

Knowledge Utilization Pyramid

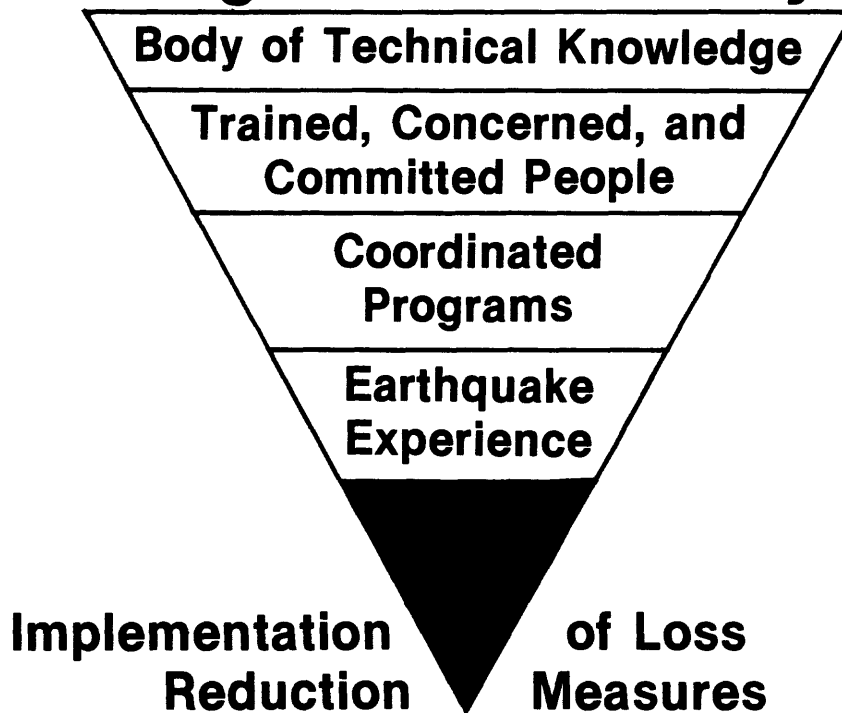


Figure 2.--Schematic illustration of the critical elements of the earthquake hazards-reduction implementation process. The flow is from top to bottom. Earthquake experience seems to be needed to drive the process of implementation in almost every community.

Element 1: Existence of a Technical Data Base--Effective implementation in Puerto Rico requires explicit knowledge of the nature and extent of the earthquake hazards of ground shaking, surface fault rupture, earthquake-induced ground failure, and regional tectonic deformation in each urban area (Figure 3). The quantity and quality of the geologic, seismological, engineering seismology, and engineering data bases are the two most important factors that facilitate making assessments of the earthquake hazards and risk in a region and devising and implementing measures that will reduce potential losses from future earthquakes.

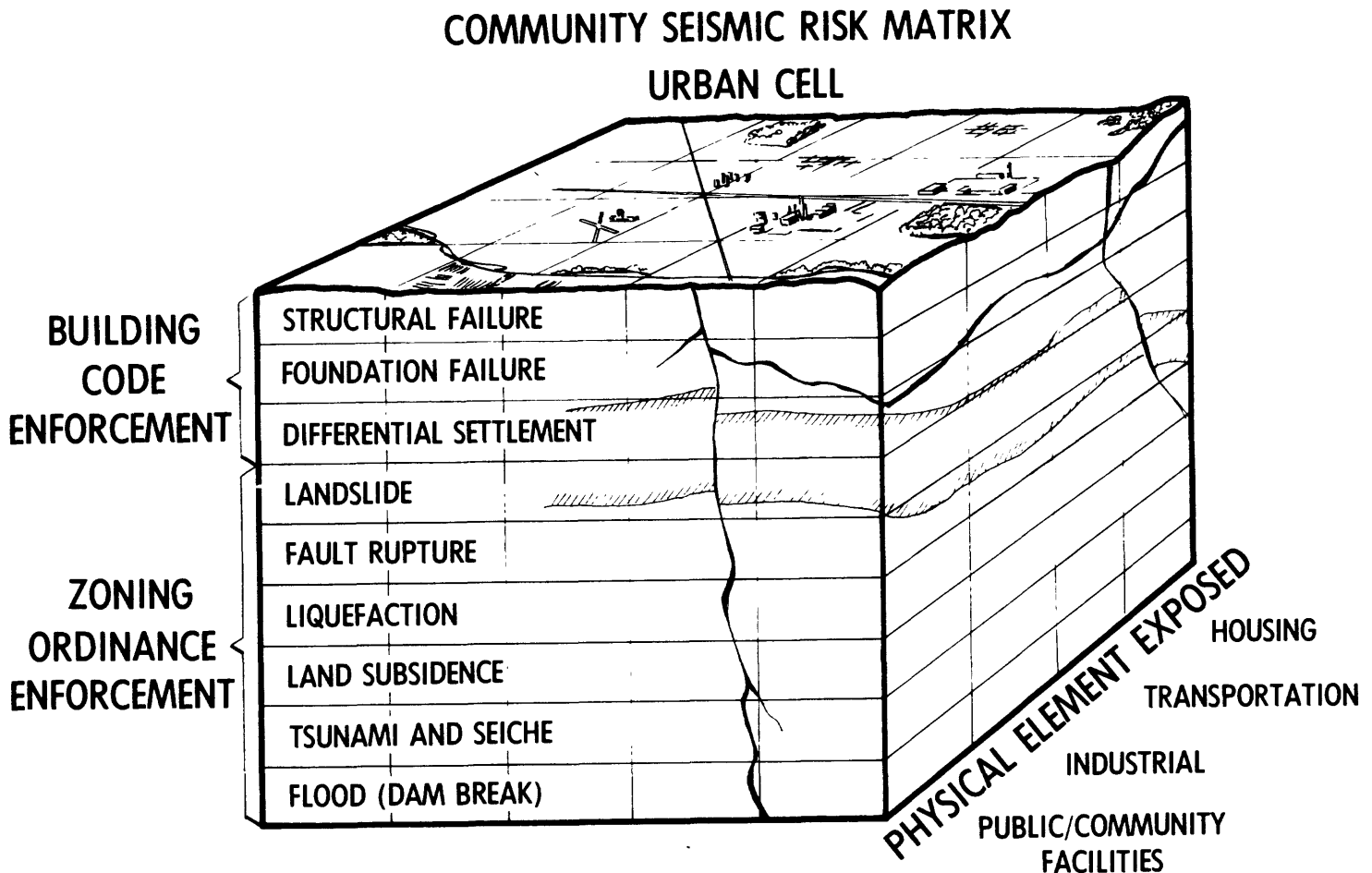


Figure 3. Schematic illustration of a community facing potential losses from the earthquake hazards of ground shaking, surface fault rupture, earthquake-induced ground failure, and regional tectonic deformation. Every community has the capability to implement a wide range of loss-reduction measures to minimize the potential impacts. Decisionmakers in the community must decide which loss-reduction measures are most cost effective and take the lead in implementing them before the damaging event occurs. Professionals have a major role in providing credible information and in devising a wide range of loss-reduction measures for the decisionmaker to select from. Cost is the main issue.

Using the definition that an issue is defined as a question for which expert opinion is divided between "yes" and "no," the critical issues of implementation that are directly related to the technical data bases in Puerto Rico are:

- Can the existing data be utilized to foster implementation of loss-reduction measures or must the data be translated, extrapolated, or augmented?
- Are enough data available for implementation of loss-reduction measures?
- Are the data at the right scale?
- Can the data be extrapolated beyond the limitations of the technical data bases to address specific requirements of users in a reasonable, yet conservative manner, that provides an adequate margin of safety?

Technical data are required on three scales:

- global (map scale of about 1:7,500,000 or larger) to give the "big picture" of the inter- and intraplate forces.
- regional (map scale of about 1:250,000 or larger) to define the physical parameters and their range of values that provide a framework of understanding of the spatial and temporal characteristics of earthquake hazards in a region.
- local (map scale of about 1:24,000 or smaller) to determine the physical parameters and their range of values that control the local earthquake-resistant design requirements. Site-specific design requirements are not satisfied by this scale; they are based on site-specific data.

The available data must be integrated and analyzed, quantifying uncertainty as appropriate, to obtain explicit answers to the questions:

- Where have earthquakes occurred in the past? Where are they occurring now?
- How big in terms of epicentral intensity and/or magnitude were the past earthquakes? How big can future earthquakes be? Has the maximum magnitude earthquake ever occurred?
- What physical effects (hazards) have past earthquakes caused? What was their extent spatially and temporally? What was their level of severity?
- What were the causative mechanisms for each earthquake? Each hazard?
- How often (on the average) do earthquakes of a given magnitude (or epicentral intensity) occur? How often on the average, does ground shaking of a certain level occur?
- What are the viable options for mitigating the earthquake hazards expected to occur in the region in a 50-year exposure time (the useful life of ordinary buildings).

Element 2: Trained, Concerned, and Committed People--Trained, concerned, and committed people are required in Puerto Rico to analyze the technical data bases, to extrapolate beyond the limits of the data, and to translate the basic data into maps and other products so that practical and reasonable loss-reduction measures can be devised. The critical issues of implementation that are directly related to Puerto Ricans are:

- Is appropriate training available to transfer the state-of-the-art and the state-of-practice to professionals?
- Can people and decisionmakers who have never experienced a damaging earthquake be motivated to have increased concern about earthquakes and their effects?
- Can people who have been uncommitted in the past with respect to implementation of loss-reduction measures be transformed into people who are committed to providing leadership for changing the "status quo" of implementation?

The Puerto Ricans who make the implementation process happen must deal with a wide range of geologic, seismological, and engineering seismology data and produce credible, practical loss-reduction measures. To succeed, they must know that there are differences in the perspectives of scientists/engineers and decisionmakers (described in Table I) and have experience in minimizing these differences.

Table I
Differences in the perspectives of scientists/engineers and decisionmakers
(from Szanton, 1981).

Attributes	Perspectives	
	Scientists/Engineers	Decisionmakers
1. Ultimate objective	Respect of Peers	Approval of electorate
2. Time horizon	Long	Short
3. Focus	Internal logic of the problem	External logic of the problem
4. Mode of thought	Inductive, generic	Deductive, particular
5. Most valued outcome	Original insight	Reliable solution
6. Mode of expression	Abstruse, qualified	Simple, absolute
7. Preferred form of conclusion	Multiple possibilities with uncertainties emphasized	One "best" solution with uncertainties

Element 3: Programs--The data, information, and people provide the resource base for programs in Puerto Rico such as: 1) research studies, 2) the assessment of earthquake hazards, vulnerability, and risk for specific urban areas, 3) a seismic safety organization, 4) mitigation and preparedness actions, 5) and the implementation of new and improved loss-reduction measures. The success of each program depends on: how well it is focused, how well it is integrated, and how

well it is coordinated between the various disciplines and agencies. The critical issues of implementation that are directly associated with programs in Puerto Rico are:

- Do the expected benefits justify the cost and the anguish associated with reallocation of resources?
- Are the technological, societal, and political considerations appropriately balanced?
- Does the program have a definite ending point; if not, should it? Can the end point be negotiated before the program begins?

Element 4: A Damaging Earthquake--A damaging earthquake always provides the best opportunity to acquire unique geologic, seismological, engineering, and social science information and to foster implementation of specific loss-reduction measures in a community. The critical issues of implementation that are directly related to the occurrence of a damaging earthquake in Puerto Rico are:

- Does the earthquake provide relevant information for stimulating earthquake preparedness in Puerto Rican communities?
- Can useful "lessons" be extracted from the earthquake experience and applied in Puerto Rico?

The following types of investigations are typically conducted after a damaging earthquake and provide a rapid way of collecting new data and knowledge (Hays, 1986).

- Geologic studies--field investigations to determine the nature, degree, and spatial distribution of surface faulting, regional tectonic deformation, landslides, liquefaction, and wave inundation from seiches and tsunamis.
- Seismological studies--measurement programs using arrays of portable seismographs to locate earthquakes comprising the aftershock sequence, to define the spatial extent of the fault rupture zone and its temporal changes, and to determine the focal mechanisms of the earthquake.
- Engineering Seismology Studies--measurement programs using arrays of portable strong motion accelerographs and broad band seismographs to measure the characteristics of strong ground motion at various epicentral locations underlain by various soil-rock columns, using both the main shock and the aftershock sequence.
- Engineering Studies--Investigations on a building-by-building scale to determine the nature, degree, and spatial distribution of damage to a wide range of structures, including: low-, medium-, and high-rise buildings, lifelines, and critical facilities.
- Societal Studies--Investigations to determine how the populace reacts before, during, and after an earthquake and to devise ways the new technical information can be transformed into public policy and new or improved loss-reduction measures.

When a long time has elapsed since the last historic damaging earthquake, as in the 1811-1812 New Madrid earthquakes in the Mississippi valley, 1886 in Charleston, South Carolina, 1918 in Puerto Rico or when no historic earthquake has occurred such as along the Wasatch front, Utah, a scenario earthquake can be used to foster the implementation process by heightening awareness and concern. The main issues associated with scenario earthquakes are:

- Is the scenario earthquake sufficiently credible in terms of present knowledge that it will be used to guide the development of a Puerto Rican community's response plans?
- Is the scenario earthquake realistic in terms of the actual geologic setting of the community and the social and political conditions in the community and, if so, will it be used as the basis for specific mitigation activities?

Element 5: Loss Reduction Measures--A wide range of practical loss-reduction measures are now available for implementation in Puerto Rican communities. The two overriding issues of implementation that are directly related to each loss-reduction measure being considered are:

- How much more does the loss-reduction measure cost in comparison with the cost of maintaining the "status quo?"
- Who will pay?

Loss-reduction measures can be grouped in the following categories:

- Hazard maps - Maps showing the relative severity and spatial variation of a specific hazard (for example, the ground-shaking hazard) that can be used in applications ranging from design guidelines to seismic microzonation to regulations.
 - Design criteria - Criteria for siting a wide range of structures (including those covered by building codes as well as by other regulations), such as: public buildings, schools, private buildings, critical public facilities, dams, hospitals, and nuclear power plants.
 - Guidelines and regulations - Guidance for regional and urban planning to improve land-use in the context of earthquake hazards.
 - Seismic microzonation - A procedure that utilizes the existing technical data as a basis for the division of a region into zones expected to experience the same relative severity of a specific earthquake hazard in a given exposure time (such as the level of ground shaking expected in a 50 year period).
- Seismic microzonation provides design criteria that will enable the user to select the most suitable part of the area for the proposed use.
- Inspection and review - Procedures to regulate design and construction, practices.

- Education and training - Short- and long-term activities designed to close specific gaps in knowledge. Training prepares people to do a wider variety of tasks than they could do without training.
- Response and recovery planning - Planning that improves the capability of the region to respond effectively to a damaging earthquake and to recover as quickly as possible.

THE 19 SEPTEMBER 1985 MEXICO EARTHQUAKE

Because of its relevance for Puerto Rico, the 1985 Mexico earthquake was discussed in some detail in the workshop. The seismotectonic processes are similar in the Puerto Rico area (an area where the Caribbean plate is being underthrust by the American plate and large earthquakes ($M_s=7.5$) occur about once every 80 years) and in Mexico (an interplate zone of thrust faulting where the Cocos tectonic plate is being subducted beneath the North American plate and large-to-great earthquakes occur one to several times each century). The Mexico earthquake provided new knowledge having value for research, mitigation, and response planning in the Puerto Rico area, reminding the earthquake engineering community that:

- Earthquakes tend to recur where they occurred in the past. Faults have a lifecycle and an average recurrence interval for earthquakes of various magnitudes. Earthquakes also fill seismic gaps along the boundaries of major tectonic plates.
- The soil column can cause site amplification of a factor of 5 or more under conditions of low to intermediate levels of dynamic shear strain and levels of peak ground accelerations that are on the order of 4% of gravity. This phenomenon can occur at sites underlain by soft soil located as far away as 400 km (250 mi) from the epicenter (for example, in Mexico City).
- Soil-structure interaction that increases the potential for severe damage and collapse of buildings can occur when the dominant period of the rock motion is the same as the dominant periods of the response of the soil column and the response of the building.
- If the state-of-earthquake-preparedness and mitigation actions in an urban area before a damaging earthquake are advanced, a damaging earthquake will not be a disaster.

THE 10 OCTOBER 1986 SAN SALVADOR EARTHQUAKE

The San Salvador earthquake occurred just before this report went to press; therefore, this section was included to provide timely information on this small but very damaging earthquake. The following information is abstracted from the post earthquake investigation by Earthquake Engineering Research Institute.

The earthquake caused an estimated 1,500 deaths, 7,000 to 10,000 injuries, \$1.5 billion in damage, and left approximately 250,000 people homeless in spite of the fact that the earthquake only had a magnitude (M_s) of 5.4. The contributing factors to the destructiveness of the earthquake include:

- The focal depth of the earthquake was shallow (about 8 km).

- The earthquake occurred directly beneath the city of San Salvador. The causative strike-slip type fault did not break the ground surface. The distribution of the aftershock sequence suggests that rupture occurred on a patch approximately 7 km long and 1 to 11 km in vertical extent below the surface of the ground. The fault ruptured to the northeast as a consequence of tectonic stresses, not volcanic processes.
- The earthquake, although small, generated large ground motions in San Salvador. The ground motions which were recorded in San Salvador had values of peak horizontal ground acceleration ranging from 0.34 g to 0.71 g, peak horizontal ground velocity ranging from 32 cm/sec to 80 cm/sec, and peak horizontal ground displacement ranging from 4 to 15 cm. The vertical accelerations reached 0.5 g. The duration of shaking was short (4 to 5 seconds) and the spectra were rich in short-period energy (0.05-0.8 second).

Figure 4 shows a comparison of the time histories for the San Salvador earthquake recorded at the Centro de Investigaciones Geotecnicas (CIG) located 4.3 km from the epicenter and corresponding time histories recorded in the 1971 San Fernando, California earthquake and the 1966 Parkfield, California earthquake. The response spectra for each of these sets of strong motion records are shown in Figure 5.

1971 SAN FERNANDO EARTHQUAKE

ML = 6.4

PACOIMA DAM. S16E

1966 PARKFIELD EARTHQUAKE

ML = 5.5

CHOLAME NO. 2. N05E

1986 SAN SALVADOR EARTHQUAKE

MS = 5.4

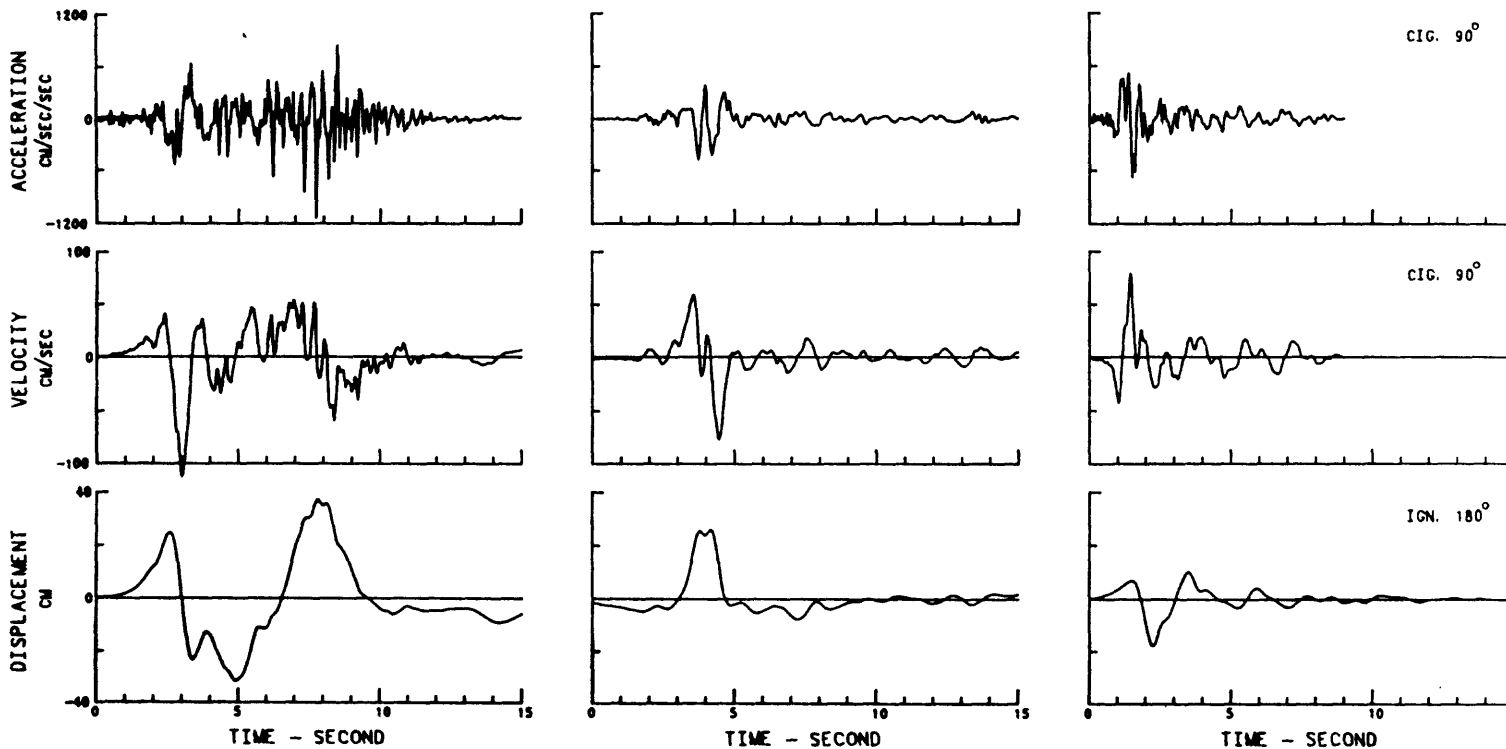


Figure 4.--Comparison of acceleration, velocity, and displacement records from the 1986 San Salvador earthquake with records from the 1971 San Fernando and 1966 Parkfield earthquakes. Some engineers now believe that the Parkfield earthquake would have been damaging had it occurred directly under an urban area instead of an unpopulated area.

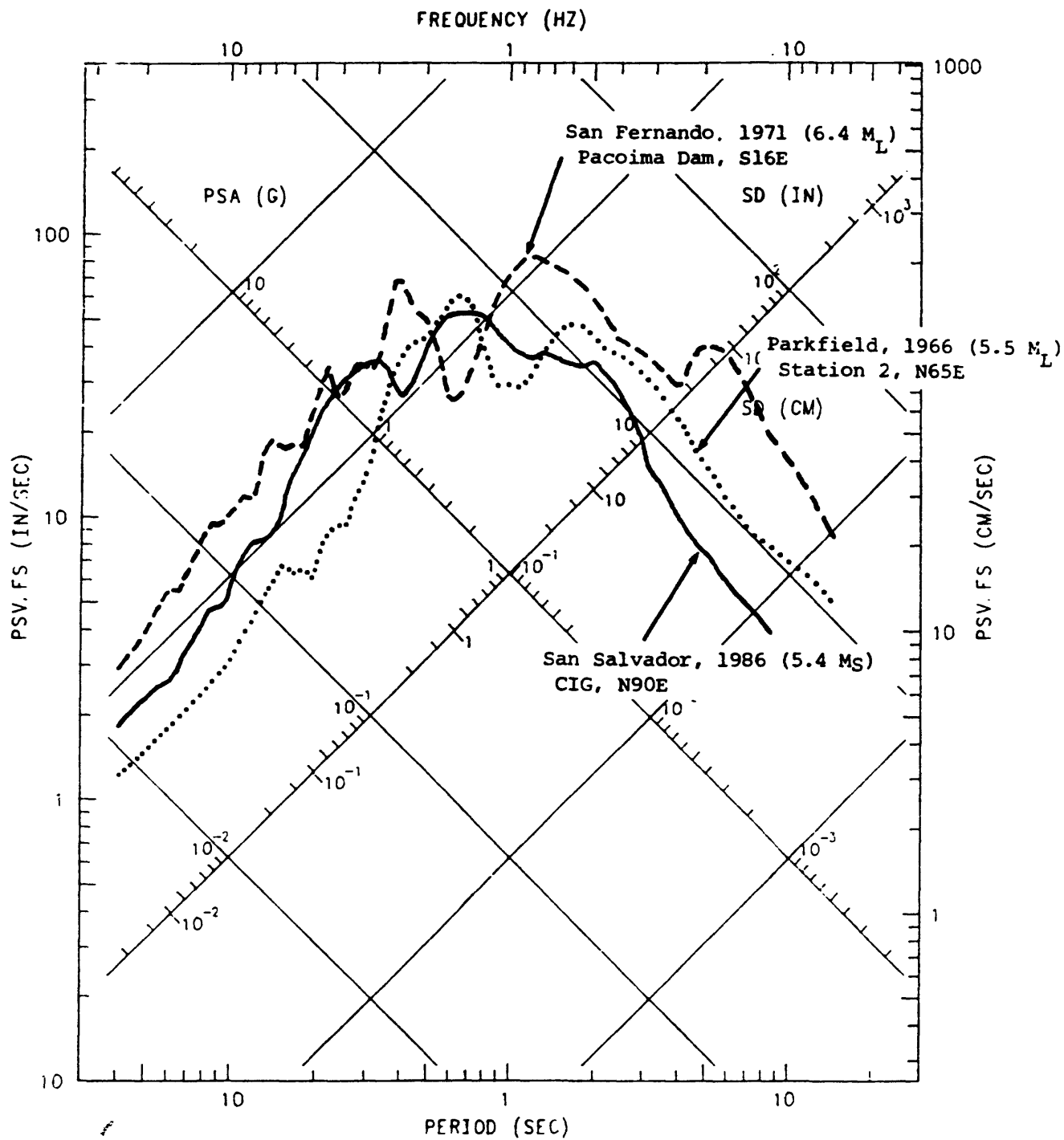


Figure 5.--Comparison of response spectra for the records shown in Figure 4. The San Salvador earthquake, although small, was a significant earthquake because of its location directly under the urban area.

Damage in San Salvador was widespread and extensive. Approximately 10 midrise (3-10 story) engineered buildings were either severely damaged or collapsed, including the American Embassy. Some 30 other midrise engineered buildings also experienced damage, but it was less severe. Five of the eight health care facilities experienced major damage. The damage to buried lifeline systems (water and sewer) was extensive. Fire caused about 20 of the fatalities. Damage to nonengineered homes and buildings was extensive.

The earthquake triggered hundreds of landslides. The slides (mainly rock falls and rock slides) occurred mainly on cut-bank slopes along streams and roadways within unconsolidated volcanic ash and pumice units of Late Pleistocene and Holocene age. One large slide accounted for about 200 of the fatalities. No liquefaction-induced lateral-spread failures or liquefaction-induced sand volcanoes were observed.

Since the earthquake was a "direct hit," it was devastating in its own right. However, El Salvador is suffering from a civil war and the losses from the earthquake made the impact on the people and economy even more serious. San Salvador is facing a difficult recovery phase.

DESCRIPTION OF EARTHQUAKE HAZARDS THAT COULD OCCUR IN THE PUERTO RICO AREA

All of the physical effects (hazards) described in this section can occur in the Puerto Rico area. However, it is important to place some upper bounds on what may happen when a large (magnitudes of 7 to 8) or great (magnitudes of 8 and larger) earthquake recur in the Puerto Rico area.

The earthquake, a sudden abrupt release of slowly accumulating strain energy, usually occurring within a few to few tens of cubic kilometers (miles) of the Earth's crust, produces mechanical energy that is propagated in the form of seismic waves radiating from the earthquake focus in all directions through the Earth. When the energy of the high-frequency (short-period) body waves (P and S waves) arrives at the surface of the Earth, surface waves having low frequencies (long periods) are formed. The frequency and amplitude of the vibrations produced at points on the Earth's surface (and hence the severity of the earthquake) depend on the amount of mechanical energy released at the earthquake focus, the distance and depth of the focus relative to the point of observation, and the physical properties of the column of soil and rock at the point of observation.

Effects--Large (such as the M=7.5 event that occurred west of Mayaguez in 1918) and great (such as the 1985 Mexico event) earthquakes are nature's most devastating phenomena causing considerable damage and loss in a matter of seconds (Figure 6). The onset of a large or great earthquake is usually initially signaled by a deep rumbling sound or by disturbed air making a rushing sound, followed shortly by a series of violent motions of the ground. The surroundings seem to disintegrate. Often the ground fissures with large permanent displacements--21 feet horizontally in San Francisco in 1906 and 47 feet vertically at Yakutat Bay, Alaska in 1899. Buildings, bridges, dams, tunnels, or other rigid structures are sheared in two or collapse when subjected to this permanent displacement. Vertical accelerations, on the other hand, are more damaging to lifeline systems such as pipelines, and tunnels. Ground vibrations can exceed the force of gravity (980 cm/sec/sec) and be so severe that large trees are snapped off or uprooted. People standing have been knocked

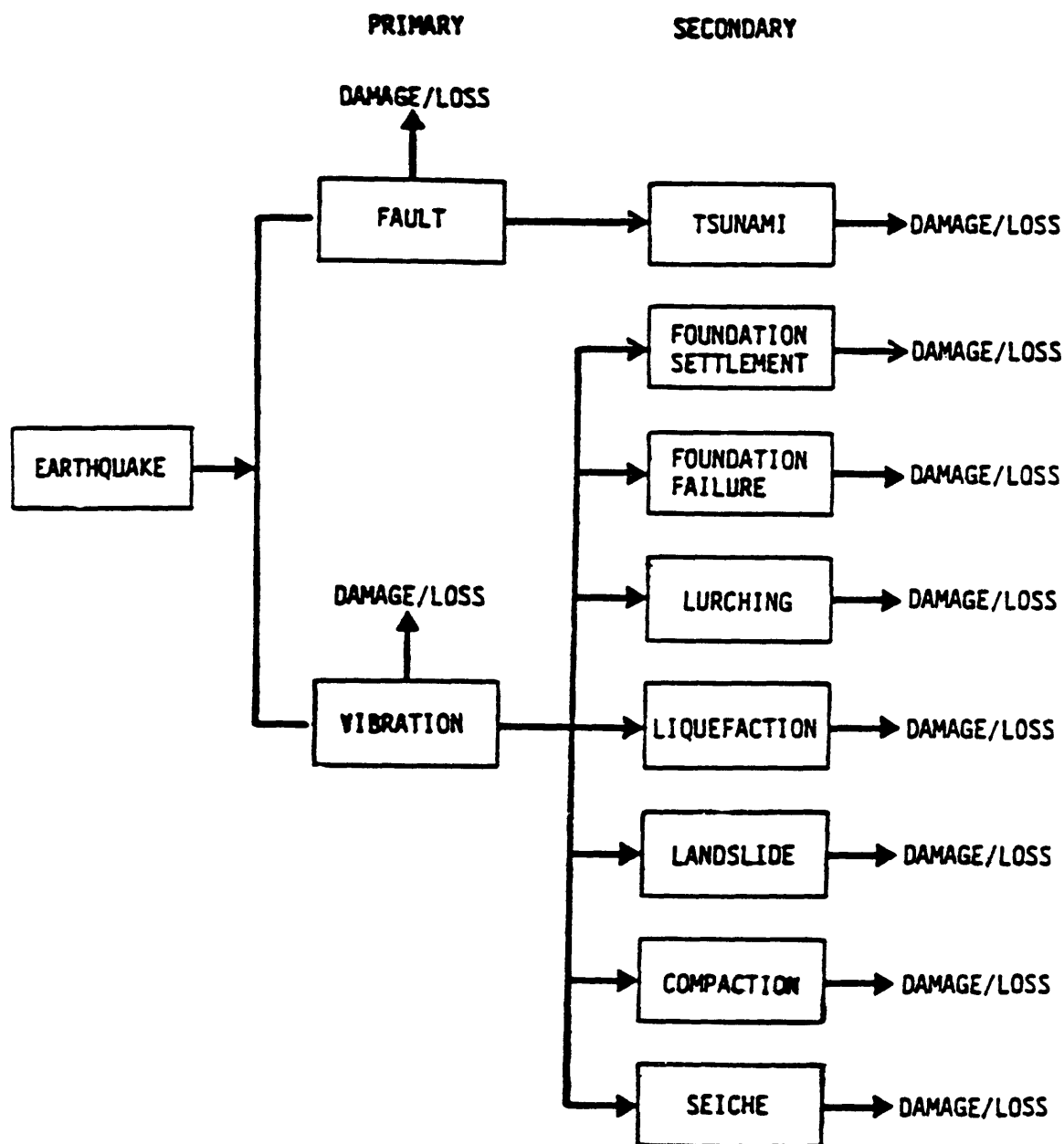


Figure 6.--Schematic illustration of the range of physical effects that are usually generated by an earthquake. These physical effects cause socio-economic losses unless steps are taken to mitigate them. Adequate knowledge now exists to mitigate all of these effects in a community without incurring extraordinarily large costs.

down and their legs broken by the sudden horizontal ground accelerations that are more damaging to buildings than vertical ground accelerations.

As the ground vibrations continue, structures having different frequency-response characteristics begin to vibrate. Sometimes resonate vibrations result. The resonance effect is particularly destructive, since the amplitude of the vibration increases (theoretically without limits) and usually causes structural failure. Adjacent buildings having different frequencies of response can vibrate out of phase and pound each other to pieces (as in the 1985 Mexico earthquake). In any case, if the elastic strength of the structure is exceeded, cracking, spalling, and--often--complete collapse results. Chimneys, high-rise buildings, waste tanks, and bridges are especially vulnerable to long-period ground vibrations; whereas, low-rise buildings are especially vulnerable to short-period vibrations.

The walls of high-rise buildings without adequate lateral bracing frequently fall outward, allowing the floors to cascade one on top of the other crushing the occupants between them. In countries where mudbricks and adobe are used extensively as construction materials, collapse is often total even to the point of returning the bricks to dust.

Secondary effects such as landslides, fires, tsunamis (in coastal areas), seiches, and flood waves can be generated in a large to great earthquake.

Landslides are especially damaging, and in some cases have accounted for the majority of the life loss. The 1970 earthquake in Peru caused more than 70,000 deaths, and 50,000 injuries. Of those killed, 40,000 were swept away by a landslide which fell 12,000 feet down the side of Mt. Huascaran. The landslide roared through Yungay and Rauachirca at 200 miles/hr, leaving only a raw scar where the villages had been.

Regional tectonic deformation, the unique feature of a great earthquake, can cause changes in elevation over an area of tens of thousands of square miles. This effect destroyed ports and harbors in the 1964 Prince William Sound, Alaska earthquake.

The threat from fire frequently increases due to the loss of firefighting equipment destroyed by earthquake ground shaking and the breaking of the water mains by ground failures. Blocked access highways can hinder the arrival of outside help. The secondary effect of fire is well illustrated by the San Francisco earthquake of 1906, in which only approximately 20 percent of the half billion dollars in damage was estimated to have been due the earthquake, while the remainder was caused by the fire, which burned out of control for several days. One of the greatest disasters of all times, the Kwanto, Japan, earthquake in 1923, also resulted from large fire losses. Almost 40 percent of those killed perished in a firestorm which engulfed an open place where people had gathered in an attempt to escape the conflagration.

Tsunamis, long-period water waves caused by the sudden vertical movement of a large area of the sea floor during an undersea earthquake, are particularly destructive. As a tsunami reaches shallow water around islands, the heights of the wave increases many times, some times reaching as much as 80 feet. Tsunamis and ground shaking differ in their destructive characteristics. Ground shaking causes destruction mainly in the vicinity of the causative

fault; whereas, tsunamis cause destruction both locally and at very distant locations from the area of tsunami generation. Both the earthquakes of November 18, 1867, and October 11, 1918, in the Puerto Rico area had destructive tsunamis associated with them with the maximum wave height being about 30 feet.

Other secondary effects include the disruption of electric power and gas service; both effects contribute to fire damage. Also, highways and rail systems are frequently put out of service, presenting special difficulties for rescue and relief workers.

Water in tanks, ponds, and rivers is frequently thrown from its confines. In lakes, an oscillation known as "seiching" can occur, causing the water to surge from one end to the other, reaching great heights and overflowing the banks.

Aftershocks of a great earthquake can last for several decades. They can trigger additional losses and disrupt the populace.

ELEMENTS INVOLVED IN AN ASSESSMENT OF POTENTIAL RISK IN THE PUERTO RICO AREA

Puerto Rico is presently conducting a study to assess the potential risk from earthquake hazards. The assessment of the potential risk (chance of loss) from earthquake hazards in an urban area is a complex task requiring:

- An earthquake hazards model.
- An exposure model (inventory).
- A vulnerability model.

Each model is described briefly below.

Earthquake Hazards Model--Assessment of risk is closely related to the capability to model the earthquake hazards of ground shaking, surface fault rupture, earthquake-induced ground failure, and regional tectonic deformation. Most of the spectacular damage and loss of life in an earthquake is caused by partial or total collapse of buildings as a consequence of the severity and duration of the horizontal ground shaking. Amplification of ground motion by the soil-rock column is an important factor in the definition of the ground shaking hazard. However, ground failures triggered by ground shaking (i.e., liquefaction, lateral spreads) can also cause substantial damage and losses. For example, during the 1964 Prince William Sound, Alaska, earthquake, ground failures accounted for about 60% of the estimated \$500 million total loss with landslides, lateral spread failures, flow failures, and liquefaction causing damage to highways, railway grades, bridges, docks, ports, warehouses, and single family dwellings. Surface faulting, which is generally confined to a long narrow area, has not occurred anywhere in the Eastern United States except possibly in the 1811-1812 New Madrid earthquakes. Surface faulting, which generally always occurs in earthquakes of magnitude 5.5 or greater in the Western United States, has damaged lifeline systems and single family dwellings, but has not directly caused deaths and injuries.

The earthquake hazards model must answer the following questions:

1. Where have past earthquake occurred? Where are they occurring now?
2. Why are they occurring?
3. How often do earthquakes of a certain size (magnitude) occur?
4. How bad (severe) have the physical effects (hazards) been in the past?
How bad can they be in the future?
5. How do the physical effects (hazards) vary spatially and temporally?

Exposure Model--The spatial distribution of things and people exposed to earthquake hazards is called inventory. The inventory is one of the most difficult models to characterize because it changes with time and as existing buildings are altered. For risk assessment, the term structure is used to refer to any object of value that can be damaged by the earthquake hazards of ground shaking, surface faulting, earthquake-induced ground failure, and regional tectonic deformation. Some generalizations involving sampling theory are usually made to facilitate the inventory process. The various categories of structures include:

1. Buildings (residential, agricultural, commercial, institutional, industrial, and special use).
2. Utility and transportation structures (electrical power structures, communications, roads, railroads, bridges, tunnels, air navigational facilities, airfields, and water front structures).
3. Hydraulic structures (earth, rock, or concrete dams, reservoirs, lakes, ponds, surge tanks, elevated and surface storage tanks, distribution systems, and petroleum systems).
4. Earth structures (earth and rock slopes, major existing landslides, snow, ice, or avalanche areas, subsidence areas, and natural or altered sites having scientific, historical, or cultural significance).
5. Special structures (conveyor systems, ventilation systems, stacks, mobile equipment, tower, poles, signs, frames, antennas, tailing piles, gravel plants, agricultural equipment, and furnishings, appendages, and shelf items in the home or office).

Vulnerability Model--A structure consists of many elements. In principle, to predict losses, the contribution of each individual element making up the total response of a structure must be modeled. In practice, certain simplifications and generalizations are made to facilitate the modeling and the analysis.

Vulnerability is a term describing the susceptibility of a structure or a class of structures to damage. The prediction of the actual state of damage that a structure will experience when subjected to a particular earthquake hazard (such as ground shaking) is very difficult. The difficulty is due to:

- Irregularities in the quality of the design and construction (e.g., some are designed and built according to earthquake-resistant design provisions of a building code; some are not).
- Variability in material properties.

- Uncertainty in the level of ground shaking induced in the structure as a function of magnitude, epicentral distance, and local site geology.
- Uncertainty in structural response to earthquake ground shaking, especially in the range where failure occurs.

A fragility curve that shows probability of damage versus level of ground motion can be used to represent failure of a specific type of structure (or elements of a structural system) when it is exposed to the dynamic forces of ground shaking. For most structures, damage occurs as a function of the amplitude, frequency composition, and duration of ground shaking and manifests itself in various damage states ranging from "no damage" to "collapse." Specification of the damage states of a structure is very difficult because each damage state is a function of the lateral-force-resisting system of the structure and the severity of the hazard expressed in terms of forces.

Options for Planning, Research, and Mitigation--In conjunction with an assessment of the potential risk from earthquake hazards, explicit answers are needed for the following questions:

- What are the viable options for planning, research, mitigation, response, and recovery to reduce potential losses from earthquake hazards?
- What research is needed to provide sound technical and societal bases for devising loss-reduction measures.

The answers are needed to optimize the implementation process.

WORKSHOP PROCEDURES

The workshop was designed to enhance the interaction between all participants and to facilitate achievement of the general and specific objectives of the workshop stated earlier in the report. The following procedures were used:

Procedure 1: A planning meeting was held at the FEMA Office in New York on December 1985. Representatives of the Department of Natural Resources, the Federal Emergency Management Agency, and the U.S. Geological Survey participated in the meeting and produced the workshop agenda.

Procedure 2: A combination of lectures, discussion group seminars, interactive group discussions, and program planning was used to encourage the participants to address and solve various parts of the overall problem of research, earthquake preparedness, and implementation.

Procedure 3: Research reports and preliminary technical papers by selected participants were commissioned and prepared in advance of the workshop. These documents, along with relevant USGS and FEMA reports, were distributed at the workshop for use as basic references and a framework for discussion. The technical reports and papers prepared by the participants were finalized within 60 days after the workshop and are contained in this publication as a permanent record.

Procedure 4: Scientists, engineers, planners, emergency management specialists, and public officials gave oral presentations in six plenary

sessions and four discussion group seminars. A seminar format was adopted for the discussion groups to enhance exchange of information. Also, most of the presentations were in Spanish to facilitate communication. The objectives were to: 1) integrate scientific research and hazards awareness and preparedness knowledge, 2) define the scope of the problem indicated by the session theme, 3) clarify what is (and is not) known about earthquake hazards in the Puerto Rico area and, 4) identify areas where knowledge is still critically needed. These presentations served as a summary of the state-of-knowledge and gave a multidisciplinary perspective.

Procedure 5: A certificate was awarded to each participant at the end of the workshop.

PLENARY SESSIONS AND DISCUSSION GROUP SEMINARS

The themes, objectives and speakers for each plenary session and discussion group seminar are described below. The sequence denotes their chronological order in the workshop.

SESSION I WELCOME, OBJECTIVES, AND BACKGROUND INFORMATION

--The Honorable Alejandro Santiago Nieves, Secretary,
Department of Natural Resources
--Walter Hays, U.S. Geological Survey

Seismotectonic Setting of Mexico and Puerto Rico

Objective: A brief summary of the geologic and seismological knowledge on Mexico and Puerto Rico.

Speakers:

--David Schwartz, U.S. Geological Survey
--William McCann, Lamont-Doherty Geological Observatory (now
with the University of Puerto Rico, Mayaguez)

Landslide Hazards of Puerto Rico

Objective: A review of the overall landslide hazards on Puerto Rico and a summary report of the 1985 Mameyes landslide event.

Speaker:

--Randy Jibson, U.S. Geological Survey

Puerto Rico Vulnerability Study

Objective: A status report of the Puerto Rican vulnerability study initiated in 1985 and a preliminary evaluation of the results.

Speakers:

--Mariano Vargas, Department of Natural Resources
--Rafael Jimenez, University of Puerto Rico

Discussion Group Seminars

Four simultaneous seminars were held in small discussion groups to address different concerns in Puerto Rico.

Objective: The objectives of each seminar was to motivate participants to address the questions: 1) What is happening in Puerto Rico to increase preparedness and to foster the implementation of other loss-reduction measures, and 2) what can the Commonwealth of Puerto Rico do to improve its capability to assess the risk, disseminate the information, and implement loss reduction measures?

Seminar 1: Ground Shaking Hazard and Vulnerability of Structures

Leaders: --Rafael Jimenez, University of Puerto Rico
--Bernardo Deschappelles, Consulting Engineer
--Walter Hays, U.S. Geological Survey

Seminar 2: Ground Failure Hazards and Land-use Planning and Regulation

Leaders: --Hermenegildo Ortiz, University of Puerto Rico
--Jose Rodriguez, Puerto Rico Planning Board

Seminar 3: Economic Impact and Public Awareness

Leaders: --Fernando Zalacain, University of Puerto Rico
--Mariano Vargas, Department of Natural Resources
--Richard Krimm, Federal Emergency Management Agency
--Paula Gori, U.S. Geological Survey

Seminar 4: Professional Awareness and Building Codes

Leaders: --Samuel Diaz, ARPE
--Enrique Ruiz, College of Engineers

SESSION II: ACTIVITIES IN PUERTO RICO

Objective: To discuss the kinds of earthquake preparedness activities that are underway in Puerto Rico and to address the following questions: 1) What is happening in Puerto Rico to increase preparedness and the implementation of other loss-reduction measures, and 2) what suggestions can participants of this seminar make to assist the Commonwealth of Puerto Rico in assessing the risk, disseminating the information, and implementing loss reduction measures?

Speakers: Panelists representing the four discussion group seminars

SESSION III: REPORT OF COMMISSION ON MEXICO EARTHQUAKE

Objective: To present the report of the Commission on the Mexico Earthquake
To communicate and discuss the principal results of the post-earthquake investigation of the September 19, 1985, Mexico earthquake.

Speakers: --Ruth Carreras, Department of Natural Resources
--Miguel Santiago, University of Puerto Rico
--Rafael Jimenez, University of Puerto Rico
--Samuel Diaz, ARPE
--Carlos Rodriguez, University of Puerto Rico
--Hermenegildo Ortiz, University of Puerto Rico
--Jose Martinez, University of Puerto Rico
--Juan Taraza, Puerto Rico Cement

Panel discussion on experiences in Mexico and their application in Puerto Rico

Panelists: Richard Krimm, Federal Emergency Management Agency, Headquarters
--Ruth Carreras, Department of Natural Resources
--Miguel Santiago, University of Puerto Rico
--Rafael Jimenez, University of Puerto Rico
--Samuel Diaz, ARPE
--Carlos Rodriguez, University of Puerto Rico
--Hermenegildo Ortiz, University of Puerto Rico
--Jose Martinez, University of Puerto Rico
--Juan Taraza, Puerto Rico Cement

SESSION IV: REPORT ON MAMEYES LANDSLIDE AND OTHER LANDSLIDE HAZARDS IN PUERTO RICO

Objective: To communicate the current knowledge of landslide hazards in Puerto Rico and to recommend specific activities to accelerate mitigation actions

Speakers: --Carlos Rodriguez Molina, Caribbean Soil Testing, Inc.
--Alejandro Soto, University of Puerto Rico
--Ramon Alonso, Department of Natural Resources

SESSION V: EMERGENCY RESPONSE PLANNING IN PUERTO RICO

Objective: To communicate the current status of emergency response planning in Puerto Rico

Speakers: --Ruth Carreras, Department of Natural Resources
--Heriberto Acevedo, Department of Civil Defense

SESSION VI: CONSIDERATION OF THE NEXT STEPS

Objective: Does Puerto Rico have problems in the topical areas covered in this workshop? If we don't know, how do we find out? If the answer is "yes," how do we solve these problems? If lacking, can the required technology be transferred to Puerto Rico? How?

Speakers: --Alejandro Santiago Nieves, Department of Natural Resources
--Patria Custodio, Puerto Rico Planning Board

CLOSURE

Speakers: --Ruth Carreras, Department of Natural Resources
--Richard Krimm, Federal Emergency Management Agency, Headquarters
--Walter Hays, U.S. Geological Survey

APPENDICES

Four appendices are included with this report. They are:

Appendix A: Glossary of technical terms used in the evaluation of earthquake hazards assessments. (English and Spanish)

Appendix B: Strong Motion accelerograph stations in Puerto Rico.

Appendix C: FEMA's Earthquake Hazards Reduction Publications.

Appendix D: List of participants in the workshop.

ACKNOWLEDGMENTS

The valuable contributions of the Steering Committee: Ruth Carraras, Department of Natural Resources, Leandro Rodriguez, University of Puerto Rico, Jose Molinelli, University of Puerto Rico, Phil McIntyre, Federal Emergency Management Agency, Stan McIntosh, Federal Emergency Management Agency, Gary Johnson, Federal Emergency Management Agency, and Paula Gori, U.S. Geological Survey are gratefully acknowledged. The special contributions made by Ruth Carreras and her staff at the Department of Natural Resources are acknowledged with deep appreciation. Professors Miguel Santiago and Rafael Jimenez also made extraordinary contributions to the success of the workshop.

Carla Kitzmiller, Lynne Downer, and Shirley Carrico (USGS) provided administrative support for the workshop, travel, and the proceedings.

REFERENCES

- Gori, P. L., and Hays, W. W., eds. 1984, Proceedings of Conference XXIV, A workshop on "Geologic Hazards in Puerto Rico," U.S. Geological Survey Open-File Report 84-761, 156 p.
- Hays, W. W., and Gori, P. L., eds. 1985, Proceedings of Conference XXX, A workshop on "Reducing Potential Losses from Earthquake Hazards in Puerto Rico," U.S. Geological Survey Open-File Report 85-731, 325 p.
- Hays, W. W., ed., 1982, Proceedings of Conference XV, a workshop on "Preparing for and responding to a damaging earthquake in the Eastern United States," U.S. Geological Survey Open-File Report 82-220, 197 p.
- Hays, W. W., 1986, The importance of postearthquake investigations: Earthquake Spectra, v. 2, p. 653-668.
- Szanton, Peter, 1981, Not well advised: Russell Sage Foundation and Ford Foundation, 81 p.
- Earthquake Engineering Research Institute, 1986, San Salvador Earthquake, unpublished briefing notes, El Cerito, Ca., 21 p.

NEXT STEPS - THE ROLE OF THE DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES

Remarks of the Honorable Alejandro Santiago Nieves, Secretary of the Department of Natural Resources of the Commonwealth of Puerto Rico, before the Third Annual Workshop on Geologic Hazards in Puerto Rico, at the Caribe Hilton Hotel, San Juan, Puerto Rico, on Friday, 16 May 1986

I am pleased to be able to share with you this morning some ideas that have been generated by this conference.

On Wednesday morning, I spoke briefly about some of the possibilities for our public awareness program. Today, I want to touch specifically on the role of the Department of Natural Resources in the areas of research and preparedness related to geologic hazards.

We know that Puerto Rico is subject to almost every kind of natural disaster: earthquakes, floods, hurricanes, landslides, and tsunamis. Now we are advised that we must begin to prepare ourselves against a new threat: the slow rise in the level of the sea that is a result of the release of carbon dioxide into the atmosphere. We have been told that the National Academy of Sciences will issue a report later this year confirming the existence of that phenomenon and projecting a rise in sea level of about one foot in the next 30 years.

What can we do about it and the other hazards to reduce losses to life and property within the mandate of existing statutes?

The Department of Natural Resources was established by the Legislative Assembly as an agency to administer the Island's natural resources: the water, soils and minerals, as well as the many different kinds of living resources.

The statute requires us to maintain a balance between conservation of resources for the use of future generations and their beneficial use for the present population. The Department has, among its specialists, representatives of a broad range of disciplines: biologists, ecologists, foresters, geologists, limnologists, oceanographers and zoologists, plus architects, engineers, lawyers and a Ranger Corps. We promulgate regulations concerning the use of certain resources, and our Ranger Corps is responsible for enforcing them. But in general terms, our regulatory powers are minimal when compared to those of the Planning Board. What, then is our role in disaster preparedness?

The work we have been carrying on related to natural disasters started as one element of the Puerto Rico Coastal Zone Management Program. A task on coastal hazards was initiated in 1978. Before one year had passed, however, that task was transformed by Hurricane David and Tropical Storm Frederick into a much broader responsibility under Executive Order 3669 of the Governor, which made the Department responsible for preparing flood hazard mitigations plans when required as a condition of the Federal disaster assistance. The initial effort has always been supported by funds provided under the coastal zone management program of the U.S. Department of Commerce. It still continues, but when the Congress this year extended the life of the coastal zone program, they included a requirement that the local matching share of the program funds must be increased from 20 per cent to 50 per cent within the next few years.

When the Federal Emergency Management Agency announced the national program aimed at reducing losses from hurricanes and earthquakes, the Department of Natural Resources took action to insure that Puerto Rico was included in

both programs, and subsequently was assigned the responsibility for the initial vulnerability analyses. FEMA has been providing very small sums of money for these programs. The work has proceeded slowly, because it has been necessary to organize new units within the Department to undertake activities that were not comprehended in the statutes. Now, as a result of last year's tragedy at Mameyes, we expect to receive funding from the U.S. Geological Survey for a special study of landslide activity in Puerto Rico.

Because of the Department's continuing major concern with water resources, the Legislative Assembly transferred to it the responsibility for flood control activity. When FEMA created its State Assistance Program, related to the National Flood Insurance Program, the Department accepted the responsibility for developing the public awareness and monitoring program. The Department has negotiated contracts with FEMA for other projects under the flood insurance program, including the insurance rate study of the Río Guanajibo and the current special work on hurricane storm surges along the coast, which will serve as a basis for modifying the flood insurance rate maps.

We do not operate in a vacuum. The Department depends upon the Planning Board, the University of Puerto Rico, and other agencies for much of the data and other information necessary for the conduct of essential studies. Some work has been contracted to the Board and to the University, as well as to individual faculty members. Further, the Department does not make direct use of the products of these activities, but passes them on to the State Civil Defense Agency, for use in developing plans for responding to specific kinds of emergency situations, or to the Planning Board, to guide its planning and

regulation of land use in general and in the taking of decisions in specific instances.

I stated on Wednesday that the task of raising public awareness about geologic hazards that exist in Puerto Rico is too much for one agency. I find that such a task is not actually contemplated in the statutes, and that a new approach is necessary. Although the Department is reasonably well equipped to conduct vulnerability studies, and does have an Office of Information and Publications which produces reports and materials for public education about natural resources, it is not in a position to compel cooperation, much less the participation of other government agencies, or of the private sector.

Further, most of the effort related to vulnerability analysis has been conducted with Federal funds. We know that unless the course of Federal budgeting is dramatically altered within the next few months, the Gramm-Rudman-Hollings Act will cause most of the Federal programs on which we depend to be drastically reduced, if not eliminated. Therefore, we must begin now to seek other resources to support these activities, if indeed they are considered important.

In addition, I believe that there must be a much higher level of awareness about natural hazards in Puerto Rico, and that there is much more information that must be brought together, through research into historic events as well as special research into economic engineering, geologic, seismic and social aspects of natural hazards. Puerto Rico has many engineers, lawyers, economists, and sociologists, and a few geologists, but at present there is no professionally trained seismologist working on the Island.

In the light of that situation, I strongly urge the establishment of a commission to review the situation and to recommend to the Governor and the Legislative Assembly a program of action along the following lines:

1. Establish a high level advisory council to consider all aspects of hazard mitigation related to natural hazards;
2. Develop a program of studies and research designed to fill existing gaps in our knowledge about such events;
3. Design and implement a program of public awareness, involving all levels of society and all economic sectors;
4. Estimate the resources required on a long term basis, and obtain a legislative commitment for funding, possibly to be supplemented by resources from foundations, Federal programs, and the private sector.

The concept has not been worked out in detail, but I believe it could follow the pattern of the Southern California Earthquake Preparedness Project, a very small group of dedicated people who have generated excellent materials and support within its area of concern. I believe that such a group must be non-partisan, and outside of the government, although it should receive public agency support. I am willing for the Department to play a key role in developing the activity, but I do not have the resources to carry it on alone.

I invite the suggestions and especially the support of the participants in this workshop, to improve the concept and to implement it.

Thank you for your attention.

LOS SIGUIENTES PASOS - EL ROL DEL DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES

PONENCIA DEL HON. ALEJANDRO SANTIAGO NIEVES, SECRETARIO DEL
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES DEL ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO,
ANTE EL TERCER TALLER ANUAL SOBRE RIESGOS GEOLÓGICOS EN PUERTO RICO,
EN EL HOTEL CARIBE HILTON, SAN JUAN, PUERTO RICO EL DÍA VIERNES
16 DE MAYO DE 1986

DR. HAYS, DOÑA PATRIA, DAMAS Y CABALLEROS PRESENTES. ME COMPLACE MUCHO
EL PODER COMPARTIR CON USTEDES EN ESTA MAÑANA. ALGUNAS IDEAS QUE HAN SURGIDO
DE ESTE TALLER.

EN LA MAÑANA DEL MIÉRCOLES, MENCIONÉ BREVEMENTE ALGUNAS DE LAS POSIBILIDADES
EXISTENTES PARA NUESTRO PROGRAMA DE CONCIENTIZACIÓN AL PÚBLICO. EN EL DÍA DE
HOY, ME GUSTARÍA TRATAR ESPECÍFICAMENTE EL TEMA DEL ROL QUE DESEMPEÑA EL DEPAR-
TAMENTO DE RECURSOS NATURALES EN LAS ÁREAS DE INVESTIGACIÓN Y PREPARATIVOS
CONCERNIENTES A PELIGROS GEOLÓGICOS. ESTAMOS CONSCIENTES DE QUE PUERTO RICO
ESTÁ SUJETO A CASI TODO TIPO DE DESASTRES NATURALES: TERREMOTOS, INUNDACIONES,
HURACANES, DERRUMBAMIENTOS Y TSUNAMIS. AHORA NOS DEBEMOS IR PREPARANDO PARA
UNA NUEVA AMENAZA: EL LEVE CRECIMIENTO QUE LA EMISIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO
EN LA ATMÓSFERA ESTÁ OCASIONANDO EN EL NIVEL DEL MAR. SE NOS HA INFOR-
MADO QUE LA ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS SOMETERÁ UN INFORME, MÁS ADELANTE, EN
DONDE SE CONFIRMARÁ LA EXISTENCIA DE ESTE FENÓMENO. EN ESTE INFORME SE ESTIMA
UN CRECIMIENTO EN EL NIVEL DEL MAR DE ALREDEDOR DE UN PIE, PARA LOS PRÓXIMOS
30 AÑOS.

¿QUÉ SE PUEDE HACER EN CUANTO A ESTO Y A OTROS PELIGROS PARA REDUCIR LOS
RIESGOS A LAS VIDAS Y LAS PROPIEDADES DENTRO DE LO ESTIPULADO EN LOS ESTATUTOS
EXISTENTES?

EL DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES FUE CREADO POR LA ASAMBLEA LEGISLATIVA COMO AGENCIA ADMINISTRADORA DE LOS RECURSOS NATURALES DE LA ISLA, ENTIÉNDASE AGUA, SUELOS Y MINERALES Y LOS DISTINTOS TIPOS DE RECURSOS VIVIENTES. EL ESTATUTO REQUIERE DE NOSOTROS QUE SE MANTENGA UN BALANCE ENTRE LA PRESERVACIÓN DE RECURSOS PARA EL USO Y BENEFICIO DE GENERACIONES FUTURAS Y SU USO EN EL PRESENTE. EL DEPARTAMENTO CUENTA ENTRE SUS ESPECIALISTAS CON REPRESENTANTES DE NUMEROSOS CAMPOS: BIÓLOGOS, ECÓLOGOS, GUARDABOSQUES, GEÓLOGOS, LIMNÓLOGOS, OCEANÓGRAFOS, ZOÓLOGOS, AL IGUAL QUE ARQUITECTOS, INGENIEROS, ABOGADOS Y EL CUERPO DE VIGILANTES. NOSOTROS PROMULGAMOS LOS REGLAMENTOS EN CUANTO AL USO DE CIERTOS RECURSOS Y NUESTRO CUERPO DE VIGILANTES SE ENCARGA DE IMPLANTARLOS. SIN EMBARGO, EN TÉRMINOS GENERALES, NUESTROS PODERES REGULATORIOS SON MÍNIMOS COMPARADOS A LOS DE LA JUNTA DE PLANIFICACIÓN.

¿CUÁL ES, ENTONCES, NUESTRO ROL EN PREPARATIVOS CONTRA DESASTRES?

EL TRABAJO EN EL CUAL NOS HEMOS VENIDO DESEMPEÑANDO CONCERNIENTE A DESASTRES NATURALES COMENZÓ COMO PARTE DEL PROGRAMA DE MANEJO DE LA ZONA COSTANERA DE PUERTO RICO. UNA TAREA DEL PROGRAMA, SOBRE PELIGROS COSTANEROS, FUE INICIADA EN 1978. ANTES DE HABERSE FINALIZADO EL AÑO, Y DEBIDO AL HURACÁN DAVID Y A LA TORMENTA TROPICAL FEDERICO, ESTA ACTIVIDAD SE CONVIRTIÓ EN UNA RESPONSABILIDAD DE MAYOR ENVERGADURA EN 1979. BAJO LA ORDEN EJECUTIVA No. 3669, SE TRANSFORMÓ ESTA TAREA EN LA OBLIGACIÓN DE PREPARAR PLANES DE MITIGACIÓN DE PELIGROS DE INUNDACIÓN, CUANDO ASÍ FUESE REQUERIDO COMO UNA CONDICIÓN DE ASISTENCIA FEDERAL CONTRA DESASTRES. ESTE ESFUERZO INICIAL HA SIDO APOYADO SIEMPRE CON FONDOS PROVISTOS POR EL DEPARTAMENTO DE COMERCIO FEDERAL BAJO EL PROGRAMA DE MANEJO DE LA ZONA COSTANERA. AUNQUE EL ESFUERZO AÚN CONTINÚA, YA QUE EL CONGRESO HA ADOPTADO UNA MEDIDA EXTENDIENDO

LA DURACIÓN DEL PROGRAMA, A LA VEZ SE REQUIERE QUE EL PAREO LOCAL CORRESPONDIENTE SEA AUMENTADO DE UN 20 POR CIENTO A UN 50 PORCIENTO EN LOS PRÓXIMOS AÑOS. CUANDO LA AGENCIA FEDERAL DE MANEJO DE EMERGENCIAS ANUNCIÓ EL OBJETIVO DE LOS PROGRAMAS NACIONALES DE REDUCIR LAS PÉRDIDAS OCASIONADAS POR HURACANES Y TERREMOTOS, EL DRN QUISO ASEGURARSE DE QUE PUERTO RICO FUESE INCLUIDO EN AMBOS PROGRAMAS. COMO CONSECUENCIA, SE LE FUE ASIGNADA LA RESPONSABILIDAD DEL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD INICIAL. FEMA HA ESTADO CONTRIBUYENDO CON CANTIDADES MUY PEQUEÑAS PARA ESTOS PROGRAMAS. DEBIDO A QUE EL DEPARTAMENTO HA TENIDO QUE CREAR NUEVAS UNIDADES PARA DESEMPEÑAR LAS ACTIVIDADES NECESARIAS - UNIDADES NO INCLUIDAS EN LOS ESTATUTOS - EL TRABAJO SE HA DESARROLLADO MUY LENTAMENTE. EN EL PRESENTE, COMO RESULTADO DE LA TRAGEDIA OCURRIDA EN MAMEYES EL AÑO PASADO, CONTAMOS CON LOS FONDOS DEL SERVICIO GEOLÓGICO DE LOS E.E.U.U. PARA UN ESTUDIO ESPECIAL SOBRE ACTIVIDAD DE DERRUMBAMIENTO EN PUERTO RICO.

DADO EL CONTINUADO INTERÉS DEL DEPARTAMENTO CONCERNIENTE A LOS RECURSOS DE AGUA, LA ASAMBLEA LEGISLATIVA LE TRANSFIRIÓ A ÉSTE LA RESPONSABILIDAD DEL CONTROL DE INUNDACIONES. CUANDO FEMA CREÓ EL PROGRAMA DE ASISTENCIA A LOS ESTADOS, ASOCIADO AL PROGRAMA NACIONAL DE SEGUROS CONTRA INUNDACIONES, EL DEPARTAMENTO ACEPTÓ LA RESPONSABILIDAD DE DESARROLLAR LA CONCIENCIA PÚBLICA Y LA DEL PROGRAMA DE MONITORÍA. EL DEPARTAMENTO HA NEGOCIADO ALGUNOS CONTRATOS CON FEMA PARA OTROS TIPOS DE TRABAJOS BAJO EL PROGRAMA DE SEGUROS CONTRA INUNDACIONES. INCLUIDOS EN ESTO ESTÁN, EL ESTUDIO DE LA TASA DE SEGUROS CONTRA LAS INUNDACIONES PARA EL RÍO GUANAJIBO Y EL TRABAJO ESPECIAL EN PROCESO SOBRE MAREAS ALTAS GENERADAS POR TORMENTAS HURACANADAS A LO LARGO DE LA COSTA, EL CUAL SERVIRÁ COMO BASE PARA LA MODIFICACIÓN DE LOS MAPAS FEDERALES DE TASAS DE SEGUROS CONTRA INUNDACIONES.

NO ESTAMOS OPERANDO DENTRO DE UN VACÍO. EL DEPARTAMENTO CUENTA CON LA JUNTA DE PLANIFICACIÓN, LA UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO Y OTRAS AGENCIAS PARA OBTENER MUCHOS DE LOS DATOS E INFORMACIÓN NECESARIA PARA LLEVAR A CABO ALGUNOS DE SUS ESTUDIOS. PARTE DEL TRABAJO HA SIDO ASIGNADO A LA JUNTA Y A LA UNIVERSIDAD Y A MIEMBROS INDIVIDUALES DE LA FACULTAD. APARTE, EL DEPARTAMENTO NO HACE USO DIRECTO DE LOS RESULTADOS DE ESTAS ACTIVIDADES SINO QUE ÉSTOS LE SON ASIGNADOS A LA AGENCIA ESTATAL DE LA DEFENSA CIVIL, PARA QUE SEAN UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DE PLANES DE RESPUESTA A LAS DISTINTAS SITUACIONES DE EMERGENCIA. DE IGUAL MANERA, LA JUNTA DE PLANIFICACIÓN LOS UTILIZA COMO GUÍA EN LA PLANIFICACIÓN Y REGULACIÓN DEL USO DEL TERRENO EN GENERAL, AL IGUAL QUE EN SITUACIONES O CASOS ESPECÍFICOS QUE REQUIERAN UNA ACCIÓN DE LA JUNTA.

COMO PLANTEÉ EL MIÉRCOLES, LA TAREA DE AUMENTAR LA CONCIENCIA PÚBLICA ACERCA DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS EXISTENTES EN PUERTO RICO ES EXCESIVA PARA UNA SOLA AGENCIA. DE HECHO, CONSIDERO QUE DICHA TAREA NO ESTÁ INCLUIDA EN LOS ESTATUTOS, POR LO QUE SE NECESITA ESTABLECER UN NUEVO ACERCAMIENTO. AUNQUE EL DEPARTAMENTO ESTÁ MODERADAMENTE BIEN EQUIPADO PARA LLEVAR A CABO ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD, Y CUENTA CON UNA OFICINA DE INFORMACIÓN Y PUBLICACIONES, LA CUAL PRODUCE INFORMES Y PANFLETOS PARA ORIENTAR AL PÚBLICO ACERCA DE LOS RECURSOS NATURALES, EL DEPARTAMENTO NO CUENTA CON EL PODER NECESARIO PARA ASEGURAR LA COOPERACIÓN, Y AÚN MENOS, LA PARTICIPACIÓN DE OTRAS AGENCIAS O DEL SECTOR PRIVADO.

MÁS AÚN, LA MAYOR PARTE DE LOS ESFUERZOS ESPECIALES REALIZADOS, RELACIONADOS A LOS ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD, HAN SIDO LLEVADOS A CABO CON FONDOS FEDERALES. SABEMOS QUE A MENOS QUE EL PROCESO PRESUPUESTARIO FEDERAL

SEA ALTERADO CONSIDERABLEMENTE EN LOS PRÓXIMOS MESES, EL ACTA GRAMM-RUDMAN HOLLINGS OCASIONARÁ QUE MUCHOS DE LOS PROGRAMAS FEDERALES CON LOS CUALES HEMOS CONTADO, SEAN REDUCIDOS NOTABLEMENTE, SINO SON ELIMINADOS POR COMPLETO. POR CONSIGUIENTE, DEBEMOS BUSCAR EN ESTOS MOMENTOS OTRAS FUENTES DE RECURSOS QUE APOYEN ESTAS ACTIVIDADES SI ES QUE DE HECHO SON CONSIDERADAS IMPORTANTES.

ADEMÁS, CONSIDERO QUE SE DEBE CREAR UN NIVEL DE CONCIENCIA PÚBLICA ACERCA DE LOS PELIGROS NATURALES EN PUERTO RICO MUCHO MÁS ELEVADO. EN ADICIÓN, HAY MUCHA MÁS INFORMACIÓN QUE DEBE DE SER RECOPIADA A TRAVÉS DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN SUCESOS HISTÓRICOS, AL IGUAL QUE EFECTUAR TRABAJOS DE INVESTIGACIONES ESPECIALES EN ECONOMÍA, INGENIERÍA, GEOLOGÍA Y LOS ASPECTOS SÍSMICOS Y SOCIALES DE LOS PELIGROS NATURALES. PUERTO RICO CUENTA CON MUCHOS INGENIEROS, ABOGADOS, ECONÓMICOS, SOCIÓLOGOS Y ALGUNOS GEÓLOGOS, PERO EN ESTE MOMENTO, NO EXISTE NINGÚN SISMÓLOGO PROFESIONAL TRABAJANDO EN LA ISLA. EN VISTA DE ESTA SITUACIÓN, INSTARÍA FUERTEMENTE A LA CREACIÓN DE UNA COMISIÓN QUE REVISASE ESTA SITUACIÓN Y RECOMENDARA AL GOBERNADOR Y A LA ASAMBLEA LEGISLATIVA UN PROGRAMA DE ACCIÓN SIGUIENDO LAS SIGUIENTES NORMAS:

1. ESTABLECER UN CONSEJO ASESOR A ALTO NIVEL QUE CONSIDERE TODOS LOS ASPECTOS DE LA MITIGACIÓN DE PELIGROS RELACIONADOS CON DESASTRES NATURALES.
2. DESARROLLAR UN PROGRAMA DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES DISEÑADO PARA SÚPLEMENTAR NUESTRO CONOCIMIENTO ACERCA DE ESTOS EVENTOS.
3. DISEÑAR E IMPLEMENTAR UN PROGRAMA DE CONCIENTIZACIÓN PÚBLICA QUE ENVUELVA A TODOS LOS SECTORES DE LA SOCIEDAD Y DE LA ECONOMÍA.

4. HACER UN ESTIMADO DE LOS RECURSOS QUE SE NECESITAN A LARGO ALCANCE;
OBTENER UN APOYO LEGISLATIVO PARA LA ASIGNACIÓN DE FONDOS; ESTO
ÚLTIMO, POSIBLEMENTE SUPLEMENTADO POR FUNDACIONES, PROGRAMAS FEDERA-
LES Y LA INDUSTRIA PRIVADA.

LA IDEA GENERAL NO HA SIDO DETALLADA AÚN, PERO CONSIDERO QUE PODRÍA
IMITAR EL MODELO DEL PROYECTO DE PREPARATIVOS CONTRA TERREMOTOS DE CALIFORNIA
DEL SUR, SIENDO ÉSTE UN PEQUEÑO GRUPO DE PERSONAS MUY DEDICADAS QUE HAN GENE-
RADO DENTRO DE ESTA AREA UN MATERIAL Y APOYO EXCELENTE. CREO QUE DICHO
GRUPO DEBE SER UNO NO-AFILIADO Y FUERA DEL SISTEMA DE GOBIERNO, AÚN CUANDO
RECIBA EL APOYO DE UNAS AGENCIAS PÚBLICAS.

ESTOY DISPUESTO A QUE EL DEPARTAMENTO JUEGUE UN PAPEL IMPORTANTE EN EL
DESARROLLO DE ESTA ACTIVIDAD, PERO NO CONTAMOS CON LOS RECURSOS PARA LLEVAR
ÉSTO A CABO SÓLOS.

ESTOY DISPUESTO A ACEPTAR SUGERENCIAS Y ESPECIALMENTE, EL APOYO DE LOS
PARTICIPANTES DE ESTE TALLER EN CUANTO A CÓMO MEJORAR E IMPLEMENTAR ESTA
IDEA.

MUCHAS GRACIAS POR LA ATENCIÓN PRESTADA.

HISTORIC EARTHQUAKES AND THE EARTHQUAKE HAZARD OF PUERTO RICO

William R. McCann

Lamont-Doherty Geological Observatory
Palisades, New York, 10964

Puerto Rico lies in the northeastern portion of the Caribbean seismic zone. Most seismic activity to date has occurred in the offshore regions surrounding the island. This fact, when combined with marine reflection and other geophysical data indicate that Puerto Rico and the Virgin Islands share a coherent tectonic block that lies in the plate boundary zone between the North American and Caribbean plates.

PUERTO RICO TRENCH

To the north of Puerto Rico lies the Puerto Rico trench (Figure 1), the site of active oblique subduction of the North American plate beneath the island. In this century several strong earthquakes (M_s 6-7) have occurred there, and in the historic record there is evidence for a possible great earthquake (8-8.25 M_s) in 1787. The main sources of strong shocks may not come from the large thrust fault that lies beneath and off the north coast of the island, but rather from the two rather complicated sections of that fault, to the northwest of the island and to the north of the Virgin Islands, that branch off from the Puerto Rico Trench. Strain rates in the Puerto Rico trench may be an order of magnitude greater than in the fault zones found around the western, southern and eastern parts of the island.

MUERTOS TROUGH

To the south of the island lies the Muertos trough (Figure 1). This deep, linear feature exhibits all of the characteristics

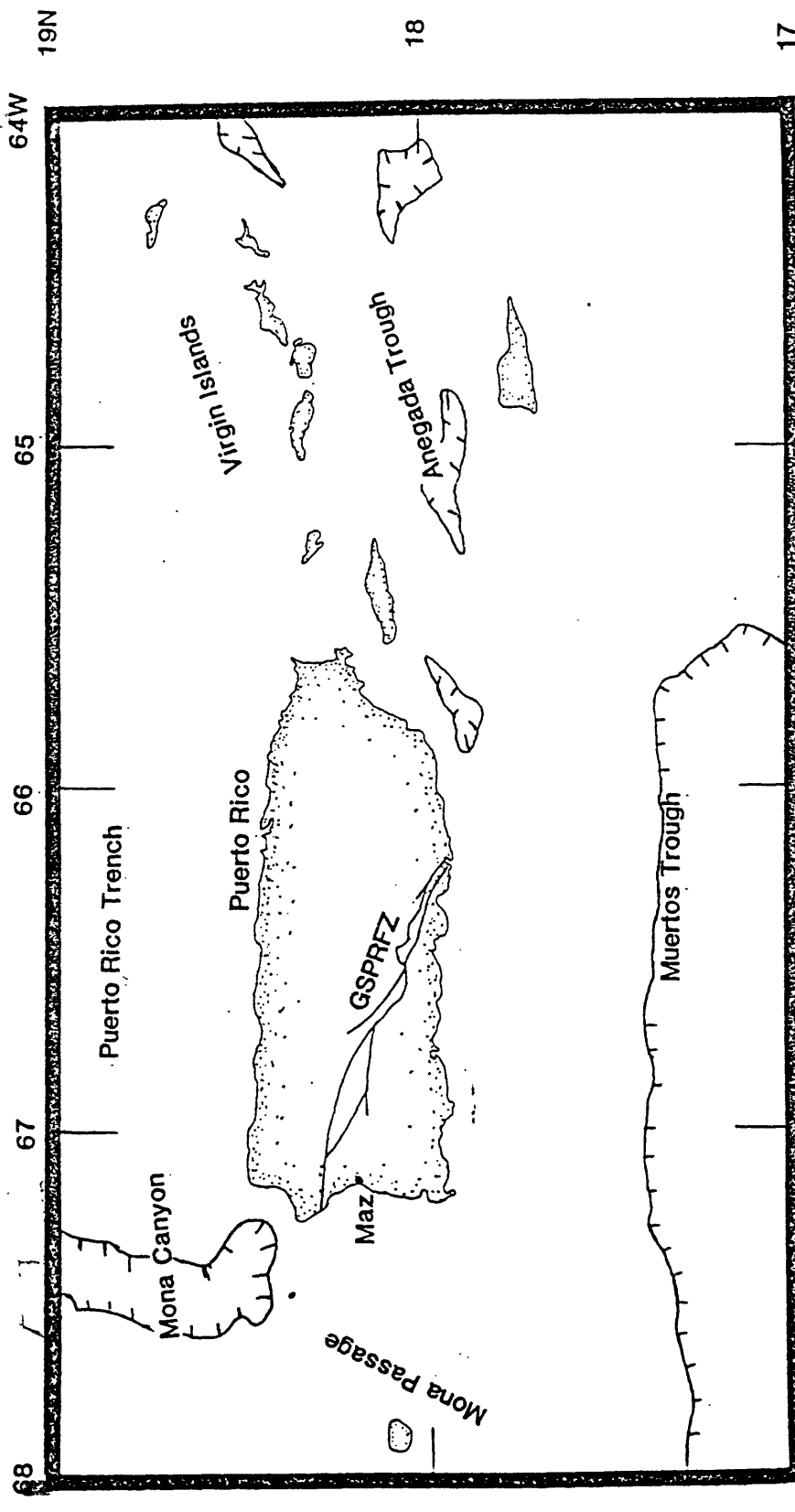


Figure 1. Major geologic/tectonic features near the island of Puerto Rico. GSPRFZ is the Great Southern Puerto Rico Fault Zone. MAZ is Mayaguez.

of the site of active underthrusting. Seismic activity in this century is much lower than the levels found for the Puerto Rico trench to the north, suggesting that the rate of motion of the faults in the south is much lower than on the faults to the north. Nevertheless, strong earthquakes, with apparently local origin, of about Modified Mercalli intensity V or more shook the south coast in 1908 and 1967. Other strong shocks which may be significant, but for which the data are few, occurred in 1740, 1787, 1844 and 1903. In each of these cases the earthquakes clearly occurred in the southern part of the island or the region immediately offshore, but in no case was faulting observed onland.

MONA PASSAGE

To the west of Puerto Rico lies the Mona Passage, a complex tectonic element separating Puerto Rico from Hispaniola. The strong differences in the Miocene to recent tectonic activity observed on these two islands demonstrates the importance of the Mona Passage region in the plate tectonics of the region. Its exact role is still rather obscure and the seismic activity to date does not shed much light on this enigmatic feature. The great southern Puerto Rico fault zone (GSPRFZ) passes offshore to form the southern boundary of the northerly trending Mona Canyon (Figure 1). To the south of the GSPRFZ, both off and onshore, are several fault systems, but none of them appear to be as prominent as the GSPRFZ. Asencio (1980) reports the location of several shallow microearthquakes in this southwestern corner of Puerto Rico. Perhaps the regional stress is partially relieved here by failure on faults associated with the numerous serpentinite

bodies. They may be more prone to failure than faults cutting other rock types found in Puerto Rico.

The west coast of Puerto Rico has experienced more strong shocks and certainly has sustained more damage than the south coast. Historic earthquakes of the Mayaguez region (MAZ, Figure 1) include several strong shocks of the more active Mona canyon region to the northwest. It is therefore more difficult, with the data on hand, to distinguish between the numerous possible sources. One of the strongest shocks in the history of Puerto Rico occurred in 1918, but we have little information about its source characteristics, fault dimension or orientation.

ANEGADA TROUGH

Off the south east coast of Puerto Rico lies the southwestern terminus of the Anegada Trough. This active tectonic feature has produced at least one damaging earthquake in the last 200 years, that of 1867. McCann (1984) estimated the magnitude of that shock at about 7.5, based on a comparison of the observed intensities with those of the shock in 1918 in northwestern Puerto Rico. There are at least four other parts of this trough that have faults long enough to produce shocks larger than 7.0Ms. Again the rates of movement along these faults is probably an order of magnitude less than the rates of motion in the Puerto Rico trench.

RECURRENCE INTERVALS OF STRONG SHOCKS

The historic record of Puerto Rico provides sufficient data to begin to estimate the recurrence intervals of widely felt shocks (greater than Modified Mercalli VII). Figure 2 displays

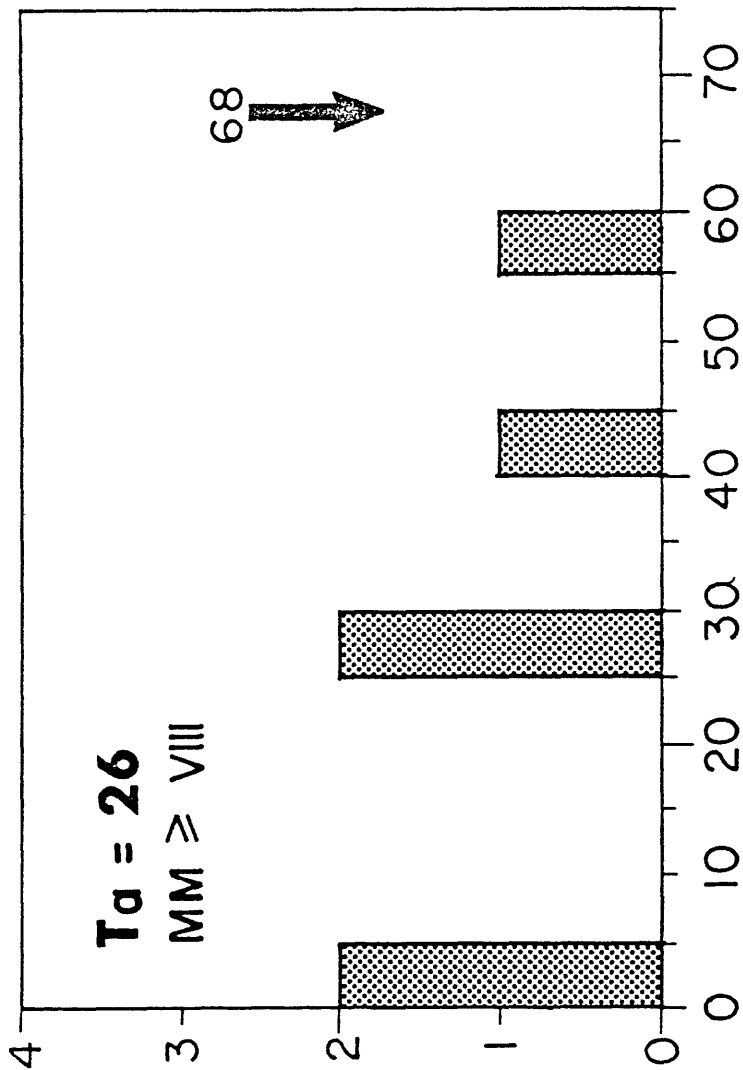


Figure 2. Cumulative number of intervals between events of intensity VIII or larger. Average time between events (Ta) is 26 years. Sixty eight years have passed since the last strong shock.

the times of occurrence of strong shocks. In this analysis we are forced to use all events of either intensity VII or VIII and greater affecting any given part of the island. So the recurrence times are for the interval of time between successive events affecting any part of Puerto Rico. Recurrence intervals of any given site are likely to be less. Recurrence times vary by more than an order of magnitude from 2 years to more than 68 years. Most of the recurrence times fall between 29 and 68 years. The very short recurrence times (2 years) probably represent complex faulting processes. The historic data indicate that two or three times every century Puerto Rico experiences a strong earthquake. If these data are an accurate representation of the level of seismic activity for Puerto Rico, they demonstrate that Puerto Rico is now in the time frame for another strong earthquake ($MM > VII$). Figures 3 and 4 display, in bar graph format, the numbers of events that have occurred with the varying recurrence intervals. For intensity VIII or larger (Figure 3) one can clearly see that in the last two centuries, the island has not experienced such a long interval without a shock as the one it is now observing. Similarly for intensity VII or larger (Figure 4), one can see the generally shorter recurrence intervals and the great length of time that has passed since the last strong shock.

CONCLUSIONS

The information collected in the last decade has clarified our understanding of the nature of the seismic zone near Puerto Rico. Numerous active faults are located in the offshore region; some may extend onshore. The historic record indicates that two or three times every century Puerto Rico is shaken by a strong

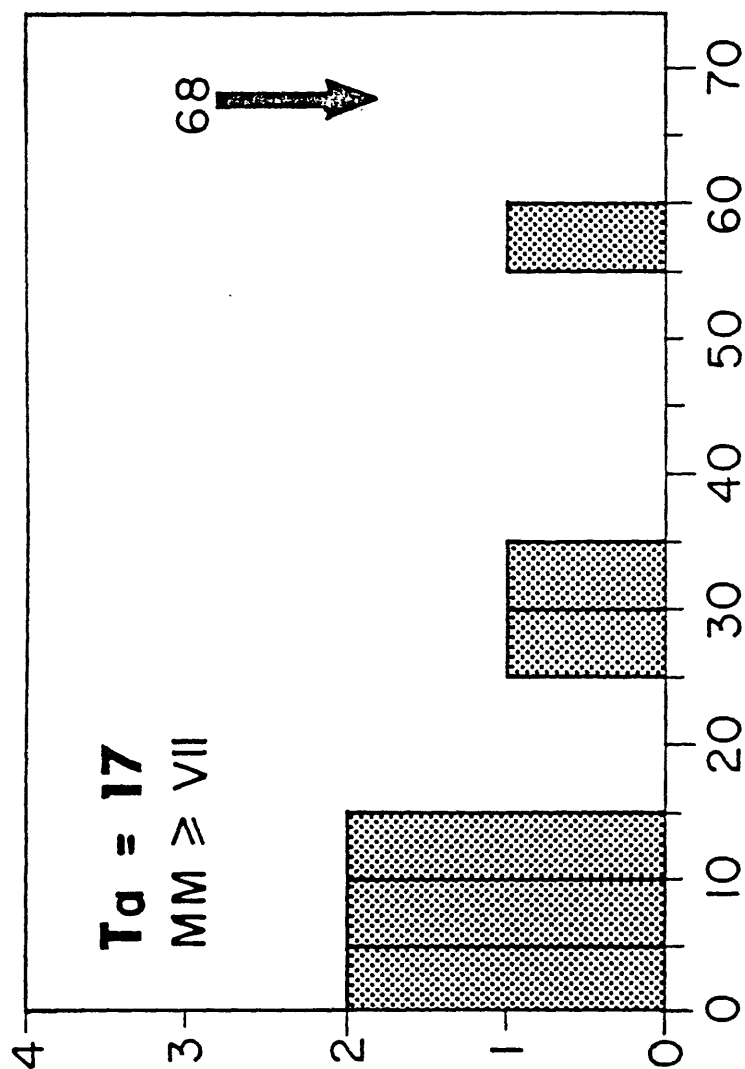


Figure 3. Same as figure 2, but for intensity VII.

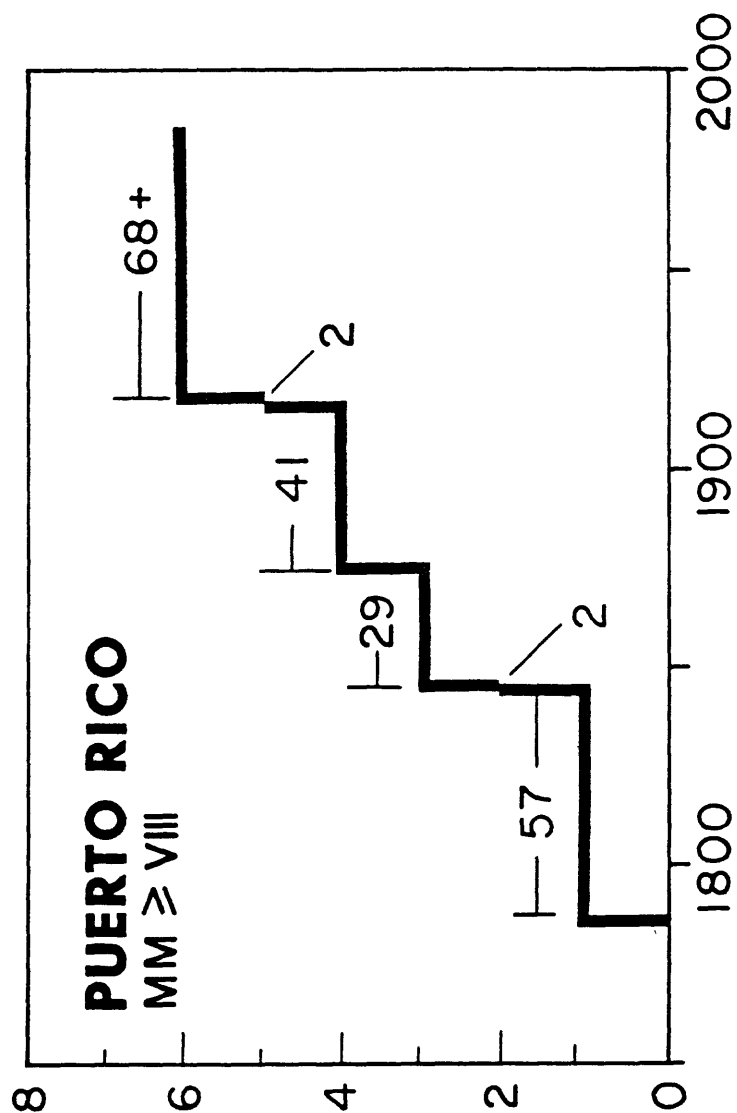


Figure 4. Cumulative number of events of intensity VIII or larger since 1787. Note that the present interval (68 years) is larger than any other previously observed. This suggests that Puerto Rico is probably likely to experience a strong earthquake sometime in the near future.

earthquake. Given that the last strong shock occurred over 68 years ago the island is now in a period when another strong shock may occur.

EVALUATING EARTHQUAKE RECURRENCE IN THE NORTHEASTERN CARIBBEAN:
LESSONS FROM THE 1985 MEXICAN EARTHQUAKE
AND AREAS OF FUTURE RESEARCH IN PUERTO RICO

David P. Schwartz
U.S. Geological Survey
Menlo Park, California

The Mexican Earthquake - Insights into Earthquake Behavior

The Mexican earthquake of 19 September 1985 can provide important insights into understanding earthquake behavior along subduction zones. In this regard, it has applications to evaluating earthquake recurrence on seismic sources that affect Puerto Rico. Large magnitude earthquakes along coastal Mexico result from subduction of the Cocos plate below the North American plate along the section of Middle America trench referred to as the Mexican subduction zone. The rate of plate convergence is high, about 6 to 7 cm/yr. The 19 September earthquake had a magnitude of $M_w = 8.1$, and ruptured an approximately 160 km length of the plate boundary. It was followed on 21 September by a $M_w = 7.6$ aftershock that extended an additional 75 km south from the south end of the mainshock rupture. The location of the 19 September earthquake was no surprise. It filled a recognized seismic gap, called the Michoacan gap, that had been defined on the basis of the location of historical and instrumentally recorded earthquakes along the Mexican subduction zone (Singh and others, 1981). Mexico has experienced 42 earthquakes of $M \geq 7$ since about 1900. However, with the exception of a $M = 7.3$ event in 1981, the Michoacan gap had experienced no events during this time although large earthquakes had repeatedly occurred to the north and south. The important point is that because of the high rate of plate convergence and the resulting large number of events, a pattern of seismicity emerged that led to the recognition of where the next large earthquake along the zone was most likely to occur.

Characterizing Seismic Sources in Puerto Rico

The historical seismic record for Puerto Rico extends back to 1524 (see Asencio, 1980; McCann and Sykes, 1984). Between then and the present earthquakes have caused damage across the island. Many of these have been large magnitude events, such as the $M_s 7.5$ 1918 Mona Canyon earthquake or the $M 8$ to $8\frac{1}{4}$ 1787 Puerto Rico trench earthquake. An important observation is that

* U.S. Geological Survey, Menlo Park, CA 94025.

damaging earthquakes in Puerto Rico have been produced by a variety of different sources. These include the interface between the Caribbean and North American plates in the Puerto Rico trench, faults associated with the Mona Canyon graben, faults in the Muertos trough, faults in the Anegada Passage, faults in Hispaniola, and shallow crustal onland faults in Puerto Rico.

As noted, the Mexican subduction zone is characterized by a high convergence rate, a large number of earthquakes concentrated along the plate interface, and a rate of seismicity high enough that earthquakes repeat in the same source region so that space-time plots can be made and future behavior can be estimated. In contrast, the strain rate across the Caribbean-North American boundary is lower (2 cm to 4 cm/yr) and the strain is distributed on a variety of complex structures. Therefore, interpreting the space-time pattern of past earthquakes, and estimating the location of future earthquake activity, is more difficult in the Puerto Rico region.

McCann and Sykes (1984) and McCann (1985) have estimated the expected magnitude for the different source zones in the northeastern Caribbean using historical seismicity data and the present day understanding of the tectonic framework. They also estimated the seismic potential (likelihood of an earthquake) of some of these zones. The seismic potential is based on the elapsed time since the most recent large earthquake on a given source. Therefore, the longer the elapsed time the higher the potential. This approach assumes that on a regional basis recurrence intervals on sources that produce events of the same size are approximately the same. The assumption may be reasonable for major sources, such as the Puerto Rico trench, where strain rates are higher and strain accumulation and release may tend to be linear. However, for many faults the repeat time of the same size earthquake can be highly variable, especially when the faults are located away from a major plate boundary. Given the possible variability in the timing of events on an individual source, and the limitations of the historical record, is there anything that can be done to extend the seismic history of Puerto Rico back beyond the historical record to more fully develop an understanding of the long term pattern of earthquakes for the Puerto Rico area?

Potential Paleoseismic Studies in Puerto Rico

During the past ten years the integration of geologic, seismologic, and geophysical information has led to a much better, though still far from complete, understanding of the relationships between faults and earthquakes in space and time. Geologic studies, especially a few highly focused fault-specific studies, have shown that individual past large-magnitude earthquakes can be recognized in the geologic record and that the timing between events can be measured. Such investigations of prehistoric earthquakes have developed into a formal discipline called paleoseismology. Additionally, they have yielded information on fault slip rate, the amount of displacement during individual events, and the elapsed time since the most recent event. These data can be used in a number of different ways and have led to the development of new approaches to quantifying seismic hazards (see review by Schwartz and Coppersmith, 1986). Specifically, they have allowed us to begin to develop models of fault zone segmentation, which can be used to evaluate both the size and potential location of future earthquakes on a fault zone, and also earthquake recurrence models, which provide information on the frequency of different size earthquakes on a fault. At the same time, significant advances have been made in developing earthquake hazard models that use probabilistic approaches. These are particularly suited to incorporating the uncertainties in seismic source characterization and our evolving understanding of the earthquake process.

For Puerto Rico, there appear to be three types of paleoseismic investigations using geologic data that have the potential to provide information on longer term earthquake recurrence on the island. These are: 1) Quaternary geologic studies of onland faults; 2) marine terrace studies; and 3) paleoli-quefaction studies.

Quaternary geologic studies of onland faults. Little is known about the seismic potential of the many onland faults that cross the island, especially major faults such as the Great Southern Puerto Rico fault zone. Microearthquake monitoring in western Puerto Rico (Asencio, 1980) clearly shows the widespread occurrence of small events in the shallow crust (upper 25 km) and indicates that this area is being actively stressed. Asencio (1980) suggests that deformation is occurring along surface or near-surface geologic structures

although the microearthquake activity did not clearly delineate major individual faults. However, lack of microearthquake activity on a fault does not demonstrate that the fault is inactive or is not capable of producing moderate to large magnitude earthquakes. Many major active faults, for example the segment of the San Andreas fault that ruptured for 430 km in the M 8 1857 earthquake or the Wasatch fault in Utah that has produced as many as 18 magnitude 7 to 7.5 events in the past 8,000 years, cannot be defined on the basis of their present day seismic activity.

Careful and focused mapping of the relationships between Quaternary deposits and faults can provide significant data on fault activity and behavior. This includes using fluvial and alluvial deposits, stream terraces, and soils to date the timing of slip on a fault. These kinds of studies can provide information on whether or not a fault is active within the present tectonic regime, the fault slip rate, the amount of time since the last large earthquake on the fault, and the size of past events. These types of studies have been extremely successful in providing information on fault behavior and earthquake recurrence in a wide variety of tectonic environments and geomorphic settings.

Marine terraces. Many subduction zone earthquakes produce uplift of the coastline that results in the formation of terraces. These are referred to as coseismic terraces. The 19 September Mexican earthquake caused coastal uplift of 0.5 to 1.5 m. By comparison, the 1964 Alaska earthquake produced terraces 3.5 m in height and prior Alaskan events resulted in uplifts as high as 9 m. In New Zealand, Japan, and Alaska, sequences of coseismic terraces have been dated and they provide direct information on the recurrence times of large earthquakes. In addition, the heights of individual terraces can be used to estimate the similarity or difference in size of successive events. Uplifted marine terraces are observed in Puerto Rico and are especially well developed in the northwest, west, and southwest parts of the island. Terrace levels of uncertain lateral extent have been noted at elevations of 2 m to 35 m; more extensive terraces have been recognized at elevations of 50m, 80-100 m, 120 m, 160 m, and 350 m (Weaver, 1968). Submarine terraces also appear to be present. The degree to which individual terraces, especially the lower terraces, represent coseismic deformation or another mechanism of terrace formation (uplift due to folding or tilting) is not presently known. The terraces provide

a means to measure long term rates of uplift, which can then be factored back into estimates of earthquake recurrence. They may have the potential to provide information on the source, size, timing, and style of deformation of offshore events. The Puerto Rico marine terraces deserve careful reevaluation in light of recent ideas about coastal deformation, mechanisms of terrace formation, and Pleistocene sea level changes (see review by Lajoie, 1986).

Paleoliquefaction. Liquefaction frequently occurs during moderate to large earthquakes. Recent studies of the 1886 Charleston, South Carolina earthquake have shown that by trenching locations where liquefaction has occurred historically, geologic relationships are exposed that make it possible to define the number, and date the timing, of previous liquefaction events (Obermeir, *et al.*, 1985) . This type of study can provide important data on the recurrence of the level of ground motion necessary to produce liquefaction at a particular site. This approach is especially useful when a specific causative fault cannot be identified, perhaps because it lies offshore. Liquefaction has occurred during historical Puerto Rican earthquakes, most recently in the Añasco area during the 1918 event. Sites of liquefaction during this and other earthquakes could be identified in the field (using old photographs, damage reports) and trenched to estimate recurrence.

Information on the space-time pattern of past earthquakes in the northeast Caribbean provides an important framework for forecasting the most likely locations and sizes of future damaging earthquakes in Puerto Rico. Important advances in our present understanding can be made through careful reevaluation of the historical and instrumental seismicity record, which can lead to refinement of the locations, hypocentral depths, and source mechanisms for many of these events. Paleoseismological techniques, including Quaternary geologic mapping of onland faults, marine terrace studies, and paleoliquefaction investigations have the potential to extend our knowledge of earthquake recurrence significantly beyond the historical record, therefore providing information on long term earthquake behavior for use in earthquake hazard models.

References

- Asencio, E., 1980, Western Puerto Rico seismicity: *U.S. Geological Survey Open-File Report 80-192*, 135 p.
- Lajoie, K.R., 1986, Coastal tectonics: *Studies in Geophysics--Active Tectonics*, National Academy Press, Washington, D.C., p. 95-124.
- McCann, W.R., and Sykes, L.R., 1984, Subduction of aseismic ridges beneath the Caribbean plate: Implications for the tectonics and seismic potential of the northeastern Caribbean: *Journal of Geophysical Research*, v. 89, p. 4493-4519.
- McCann, W.R., 1985, The earthquake hazards of Puerto Rico and the Virgin Islands in Proceedings of Conference XXX: *U.S. Geological Survey Open-File Report 85-731*, p. 53-72.
- Obermeier, S.F., Gohn, G.S., Weems, R.E., Gelinas, R.L., and Rubin, M., 1985, Geologic evidence for recurrent moderate to large earthquakes near Charleston, South Carolina: *Science*, v. 227, p. 408-411.
- Schwartz, D.P., and Coppersmith, K.J., 1986, Seismic hazards: New trends in analysis using geologic data: *Studies in Geophysics--Active Tectonics*, National Academy Press, Washington, D.C., p. 215-230.
- Singh, S.K. Kastiz, L., and Hauskov, J., 1981, Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: a reexamination: *Bulletin, Seismological Society of America*, v. 81, p. 827-844.
- Weaver, J.D., 1968, Review of geomorphical and Pleistocene research in the Caribbean: unpublished manuscript, University of Puerto Rico, 16 p.

EARTHQUAKE VULNERABILITY STUDY FOR THE METROPOLITAN AREA OF SAN JUAN, PUERTO RICO

by
Jose Molinelli
Consultant to Department of Natural Resources
San Juan, Puerto Rico

Introduction

Among natural hazards earthquakes are one of the most devastating catastrophic events. When an earthquake occurs near a populated area, widespread destruction of life and property takes place. The island of Puerto Rico is situated in a tectonically active zone and has experienced the effects of large earthquakes in the past. The 1918 and 1867 earthquakes had an estimated magnitude of 7.5 and were accompanied by destructive tsunamis. These events caused hundreds of deaths and millions of dollars in losses. In 1787 an earthquake with an estimated magnitude of 8-8.25 severely shocked the northern coast of Puerto Rico. Similar events are likely to occur in the future.

Fortunately, a large earthquake has not affected the island in the past 62 years. During this period the population has tripled and urban areas have expanded proportionally. Presently, a significant portion of the residential, commercial, industrial, and transportation infrastructure is located on geologic materials that are vulnerable to earthquake induced geologic hazards. Thus, the potential damage created by future earthquake events is greater today than ever before.

This study examines the seismic vulnerability of the San Juan metropolitan area by mapping the spatial distribution of geologic hazards and estimating the likely damage in these zones. Three important geologic hazards are considered: ground shaking, liquefaction, and landsliding. Evaluation of the tsunami hazard is beyond the scope of this study.

* Eds. This paper is reprinted from Conference XXX.

Each geologic hazard is mapped according to three levels of susceptibility determined by the geologic hydrologic, and geomorphic characteristics of each zone. Damage is estimated by adapting the procedures recommended by the Rice Center (1983) for the application of earthquake risk analysis techniques to land use planning. The tasks of the earthquake vulnerability analysis are to

- 1) define tectonic setting and regional seismicity
- 2) identify sources of seismicity
- 3) define regional attenuation
- 4) select an earthquake hazard level for the analysis
- 5) define the geology of the study area
- 6) define and map ground shaking hazard
- 7) define and map liquefaction hazard
- 8) define and map landslide hazard
- 9) estimate damage ratio for each of the hazard zones

Identification of risk situations is necessary for local disaster preparedness, land use planning, estimation of economic losses, identification of measures for reducing expected economic loss, and for the selection and implementation of mitigation strategies.

Tectonic Setting and Regional Seismicity

The present tectonic regime of the Caribbean region differs markedly from that of the past. Malfait and Dinkelman (1972) proposed that the Caribbean and East Pacific Plates formed a single unit that separated during the Eocene (fig.1). Most of the northern boundary of the northeastern Caribbean Plate changed from a convergent to a transcurrent type of boundary (fig.2). Recent work by Sykes et al., (1982) shows the opposite; the Plate's margin is convergent, suggesting that only the angle of subduction changed as the Plate evolved. The present seismicity results from the North American Plate moving 3.7 cm./year WSW with respect to the Caribbean Plate. (Sykes et al., 1982).

Seismic activity in the Caribbean Region extends northward from South America through the Atlantic side of the Lesser Antilles and Puerto Rico, then streaks westward through Hispaniola, the Cayman Trough, and Middle America. This belt of high seismicity corresponds to the boundary of the Caribbean Plate, which is nearly aseismic below the Caribbean Sea.

Earthquakes epicenters along the Caribbean Plate margin coincide with convergent and transcurrent plate boundaries. The Cayman Trough is characterized by relatively narrow belts of seismicity caused by left lateral strike-slip motion along steeply dipping fault planes. Right lateral strike-slip motion characterizes the southern boundary of the Caribbean Plate north of Venezuela. Wider belts of seismicity are present in zones where convergent processes are occurring. Plate convergence is presently active from Hispaniola to Trinidad at the north and east portions of the Plate, and on its western boundary along Central America.

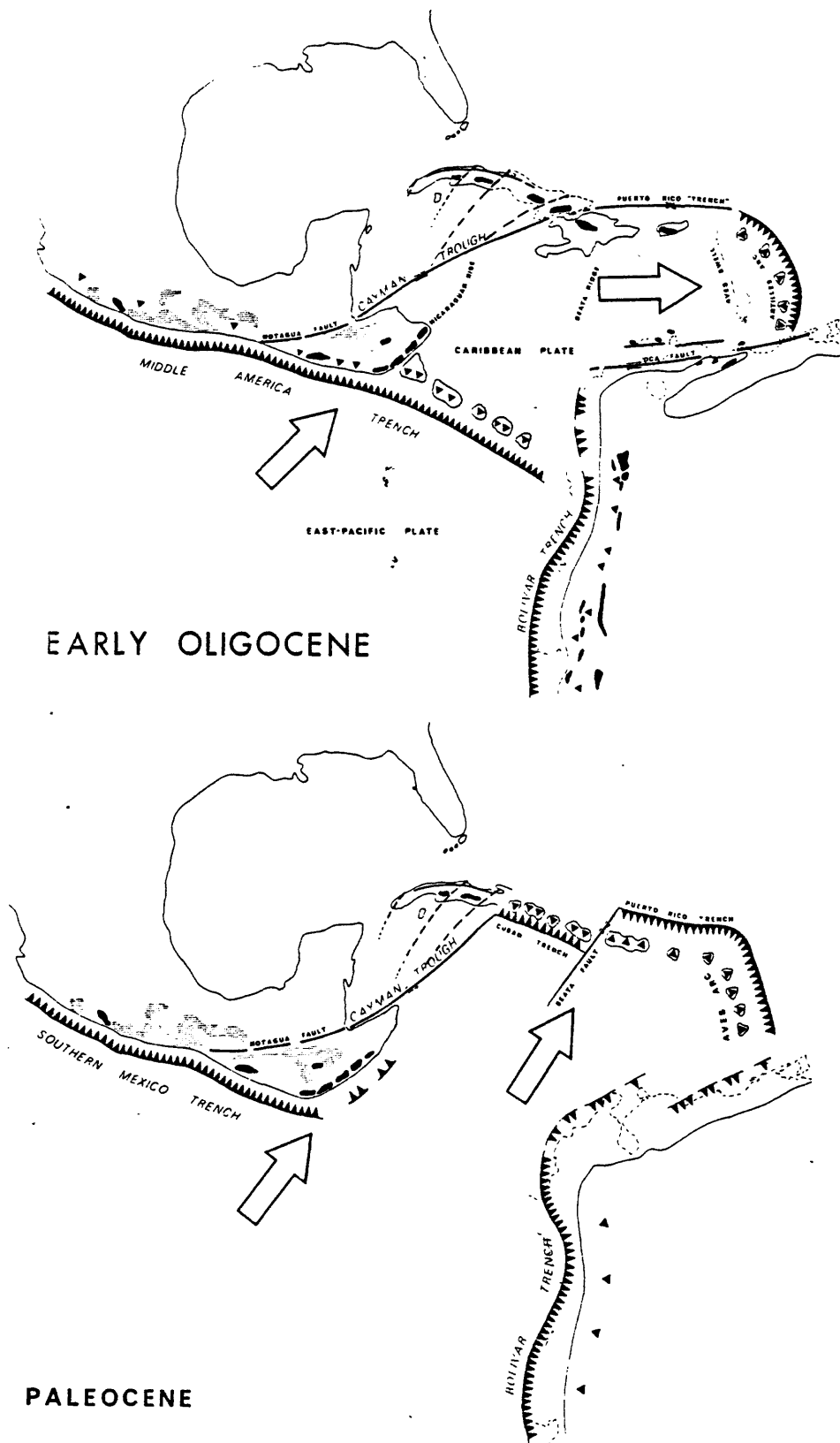


Figure 1. Distribution of plate boundaries and movement during the Paleocene and Early Oligocene (From Malfeit and Dinkelman, 1972).

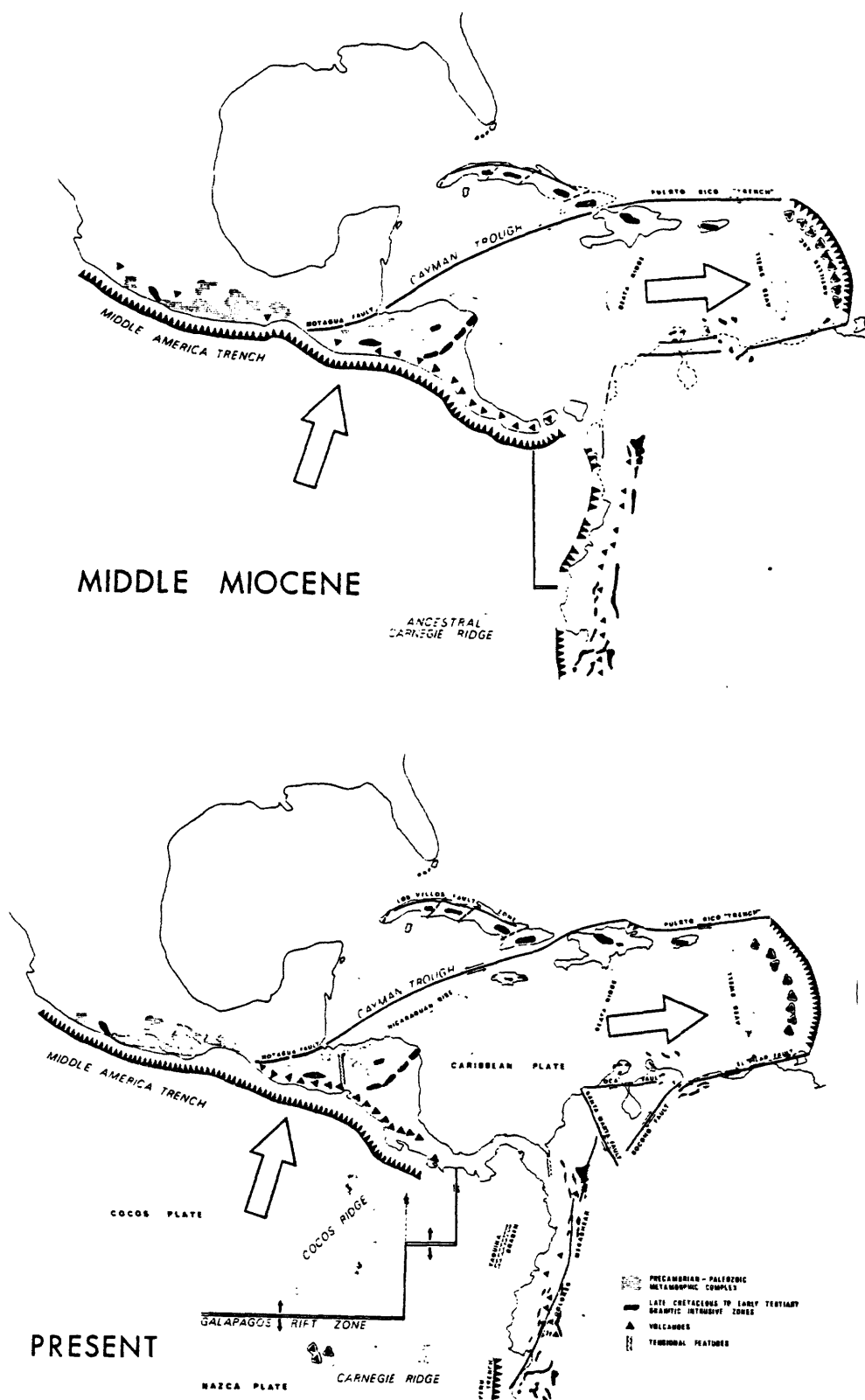
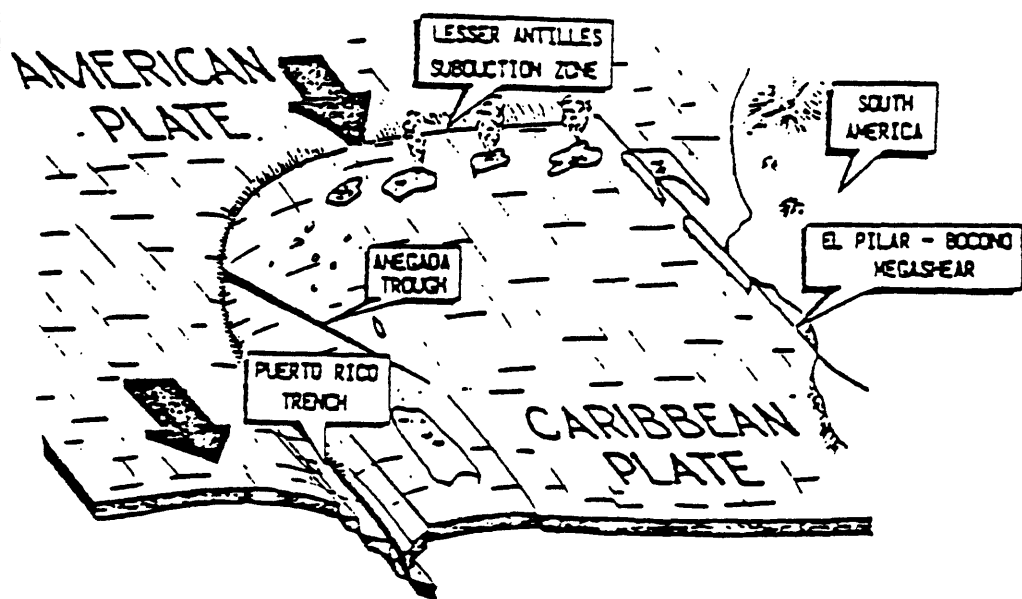
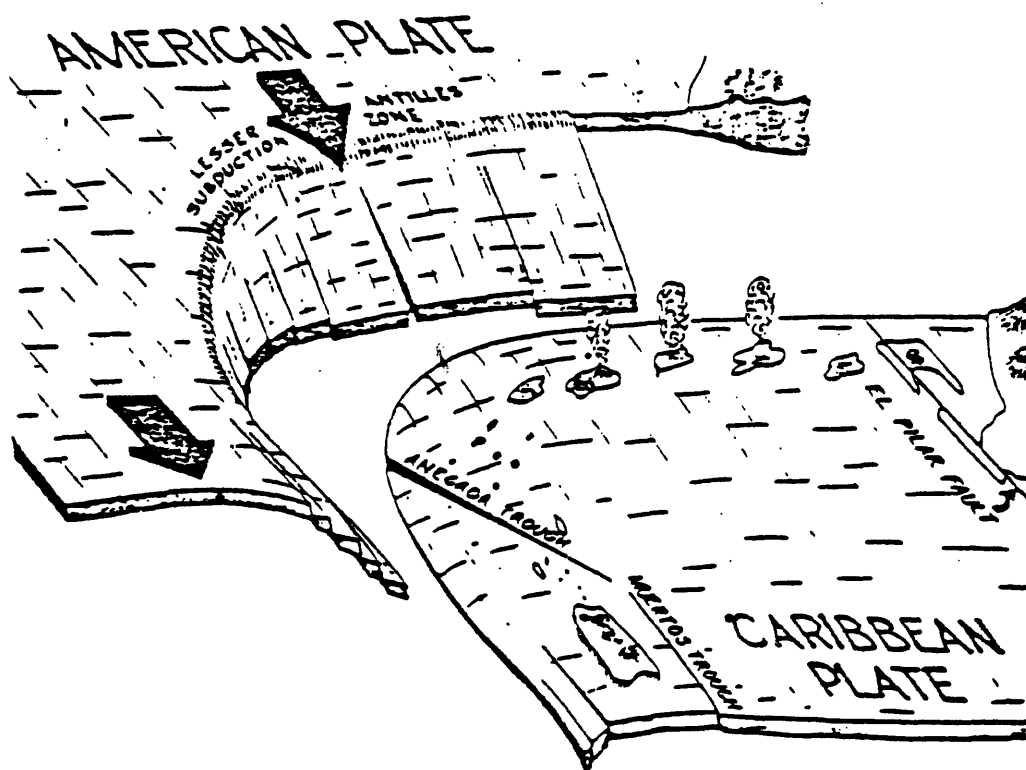


Figure 2.--Distribution of plate boundaries and movement during the Middle Miocene and Holocene (From Malfait and Dinkelman, 1972).

Hypocentral distribution of seismicity in the Caribbean indicates a dip of seismic activity from the Atlantic Plate margin toward the Caribbean Sea. The foci of these earthquakes are distributed on well-defined planes that dip into the mantle. Dipping planes of seismicity define the position of the North American Plate which is plunging into the Earth's mantle beneath the Caribbean Plate (fig.3). The results from data collected by the Puerto Rico Seismic Network firmly establish the existence and configuration of the North American lithospheric plate below the Puerto Rico-Island block. Intermediate-depth earthquakes located by the Puerto Rico Seismic Network form a prominently inclined seismic zone dipping about 45-60 degrees from the Puerto Rico Trench to a depth of about 150 km. under the island (fig. 4).



A. View is toward the southeast with American and Caribbean plates intact.



B. Plates pulled apart to allow visualization of subsurface configuration.

Figure 3. Boundary configuration of the North American and Caribbean plates (From Schell and Tarr 1978).

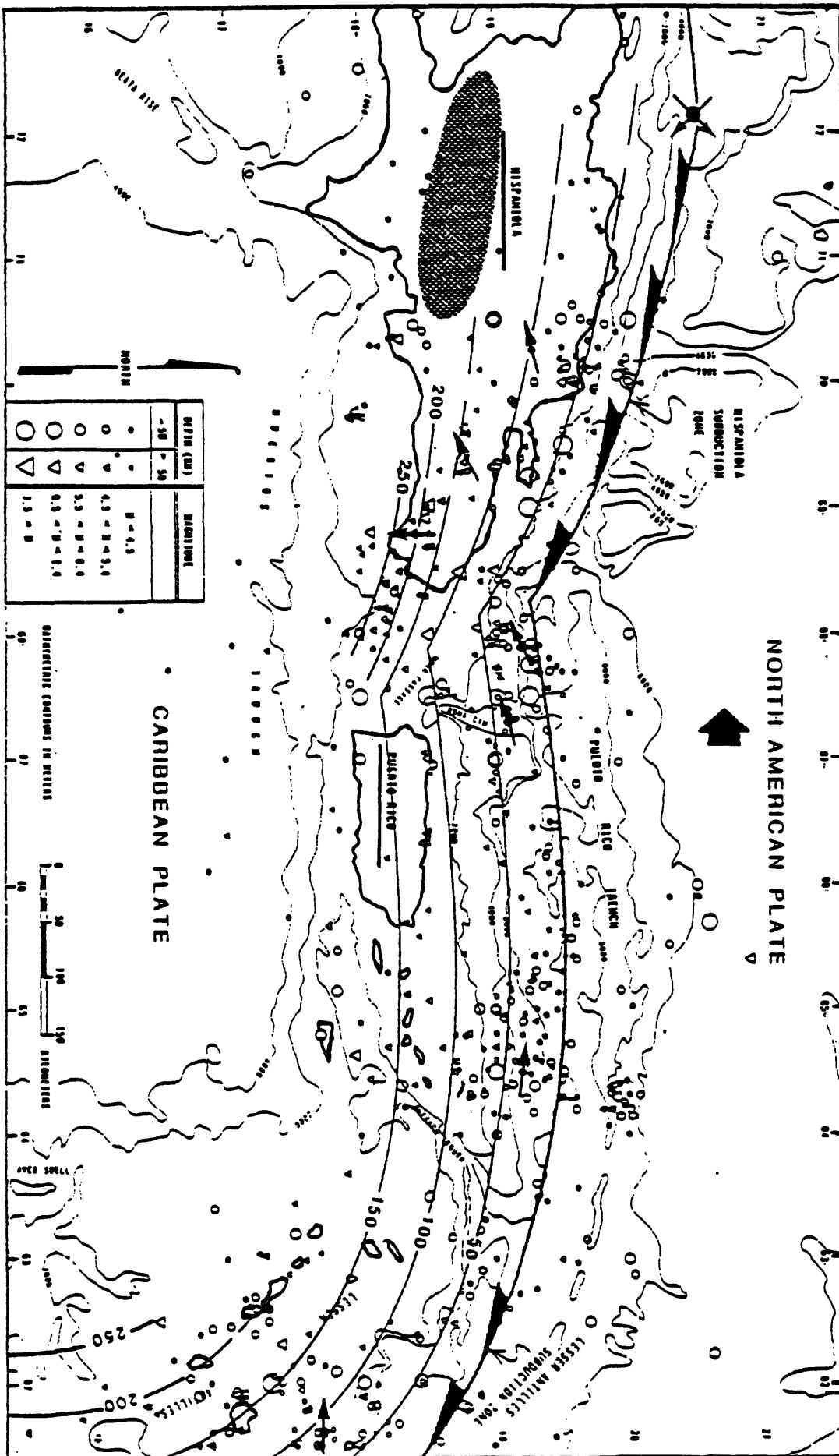


Figure 4. Major plate-tectonic features and seismicity in the northeastern Caribbean sea region (From Schell and Tarr).

The Sources of Seismicity

The on-site seismicity of Puerto Rico is characterized by the general absence of large and shallow events on the island itself. Small magnitude events of generally less than magnitude 3 typify its seismicity (Dart et. al. 1980). The largest shallow earthquakes on the island were located west of Guajataca in the northwest and near La Parguera in the southwest (NORCO-NP-1-ER, 1972).

Seismic events with epicenters in Puerto Rico are not likely to cause significant damage. The essentially undeformed nature of Middle Tertiary limestones and the absence of evidence of faulting indicate a long period of tectonic stability with respect to surface faulting. Thus, the probabilities of ground rupture due to faulting in San Juan are very low.

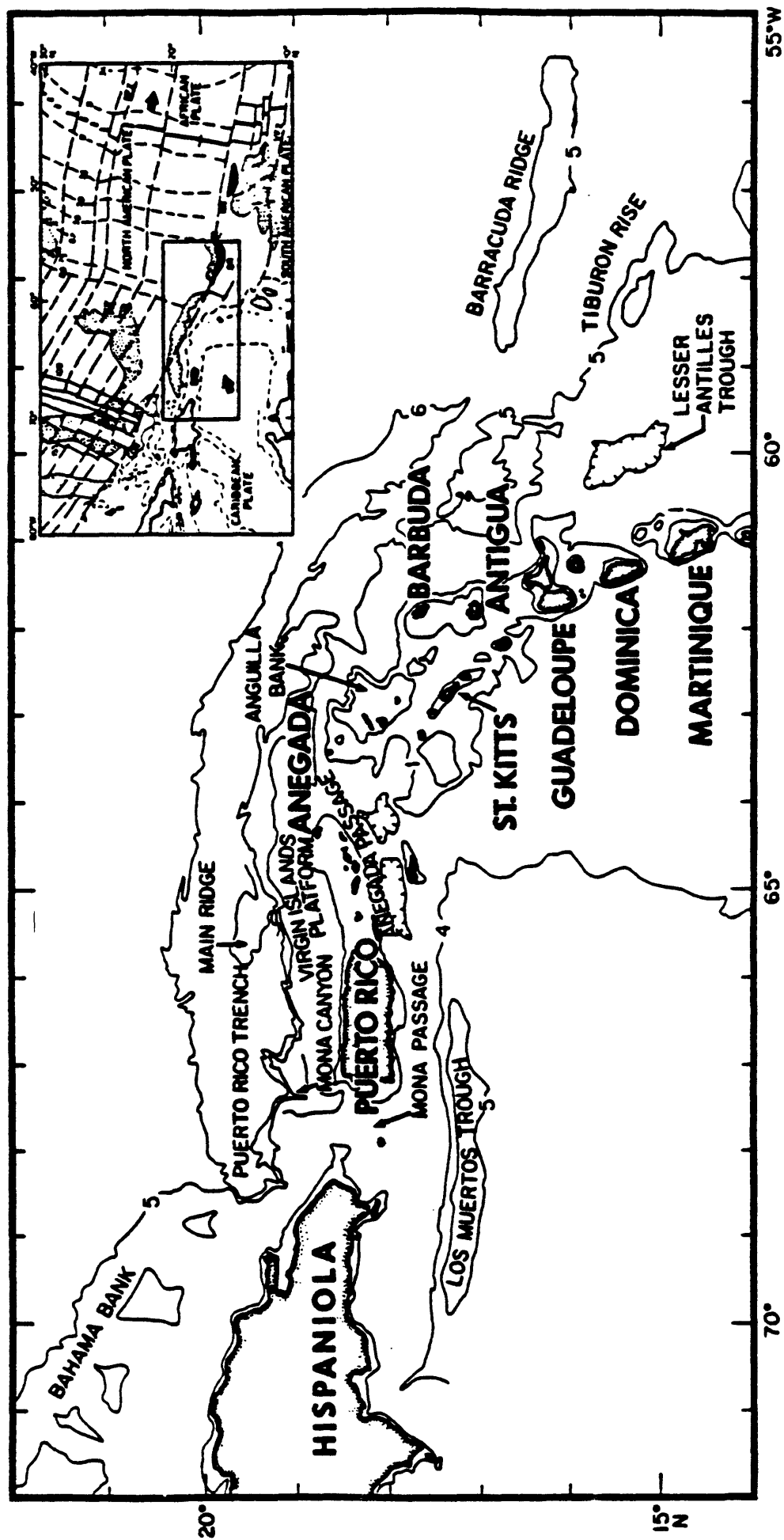
The off-site seismicity is the product of seismically active offshore zones where large magnitude events have occurred in the past. The most significant, seismically active, tectonic features capable of generating large earthquakes are the Puerto Rico Trench, the Mona Canyon-Mona Passage area, the Anegada Passage, and the northern portion of the Muertos Trough along the southern slope of the Puerto Rico insular shelf (fig.5).

The Puerto Rico Trench forms an arc that extends about 100 km north of the eastern cape of Hispaniola to approximately 200 km east of Barbuda. It parallels the north-eastern Caribbean arc system. The Trench axis lies at a depth of 8 km north of the Puerto Rico-Virgin Islands platform. The Puerto Rico Trench is bounded by high angle faults with a structural configuration suggestive of a downdropped block. Most seismic events are of shallow focus and occur in clusters where the Mona Canyon meets the Puerto Rico Trench northwest of Puerto Rico and in the area immediately

northwest of Anegada. Fault zones just south of the Trench are likely to produce earthquakes with magnitudes as large as 8 to 8.25 (McCann, 1984). Puerto Rico is approximately 60 km from the southern wall of the Trench. The closest fault zone south of the Trench that extends to the sea floor is about 35 km north (NORCO-NP-1-ER pag 9.c-15) of the north central coast.

The Mona Canyon-Mona Passage area is located between Puerto Rico and the Dominican Republic. Seismic activity is largely concentrated on the western side of the Mona Passage. The most prominent features of the passage are the north and north-westerly striking gravens extending from the Muertos Trough in the South to the Puerto Rico Trench in the north. The Mona Canyon graven seems to be the source of the 1918 earthquake ($M=7.5$) which, in conjunction with a tsunami that flooded the coastline, caused widespread destruction in the north-western region of Puerto Rico. The earthquake was probably caused by vertical displacements of the faults bounding the Canyon (Reid and Taber, 1918).

The seismicity along the Muertos Trough is low compared to that of the Puerto Rico Trench. The Muertos Trough is located approximately 75 km south of Puerto Rico. It extends from south of the Dominican Republic to near the St. Croix Ridge. This structure is likely to be a subduction zone where the northern margin of the Venezuelan Basin moves underneath Puerto Rico. This may indicate that Puerto Rico is a smaller plate or block separating the larger plates (McCann, 1984). Major quakes with a long repeat time are likely to occur on the slope south of Puerto Rico. Contrary to the eastern region where any fault rupturing during an event is of limited length (McCann, 1984), the western and central parts of the insular shelf's



Place Names and general bathymetry of northeastern Caribbean

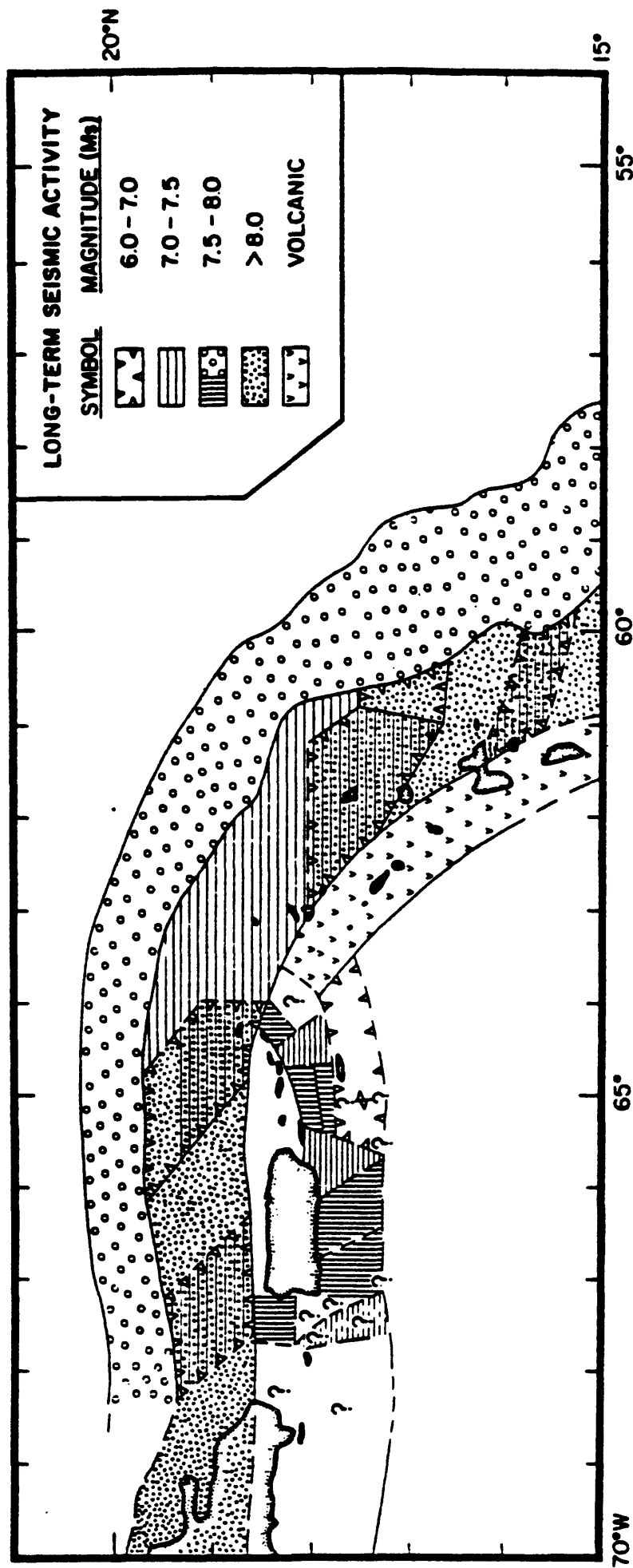
southern slope are likely to generate major earthquakes (M=7-8) because the tectonic blocks are bounded by long faults.

The Anegada Passage, lying 50 km east of Puerto Rico, consists of several basins and ridges that separate St. Croix from the Puerto Rico-Virgin Islands platform. Complex geologic features are present around the Virgin Islands and St. Croix basins. Faults in the northern wall of the Virgin Islands Basin are a likely source of strong shocks (M=7-8). The large earthquake of 1867 presumably originated along the northern flank of the Virgin Islands Basin (Reid and Taber, 1919). Although McCann's (1984) work concludes that the major earthquake hazard comes, not from great earthquakes to the north, but from major ones occurring closer to the land, this author concludes that the major earthquake hazard to the Metropolitan Area of San Juan comes from the Puerto Rico Trench to the north for the following reasons:

a) The San Juan metropolitan area is closer to the Puerto Rico Trench (approx. 60 km.) than to the Anegada Passage (approx. 100 km.) or the Mona Canyon (approx. 120 km.)

b) Following McCann, the frequency of great seismic events in the Puerto Rico Trench may not be different from that of major events originating from faults closer to the land. Thus, closer epicentral distance and great events with the same frequency of major ones closer to the island expose the metropolitan area of San Juan to a higher hazard from this zone.

c) The portion of the Puerto Rico Trench north of San Juan is a zone of little seismicity likely to experience maximum magnitudes about 8.8.25 perhaps every 200 years (minimum value) (McCann 1984 Fig 6).



Estimate of long-term activity of shallow focus along the Caribbean - North American plate boundary

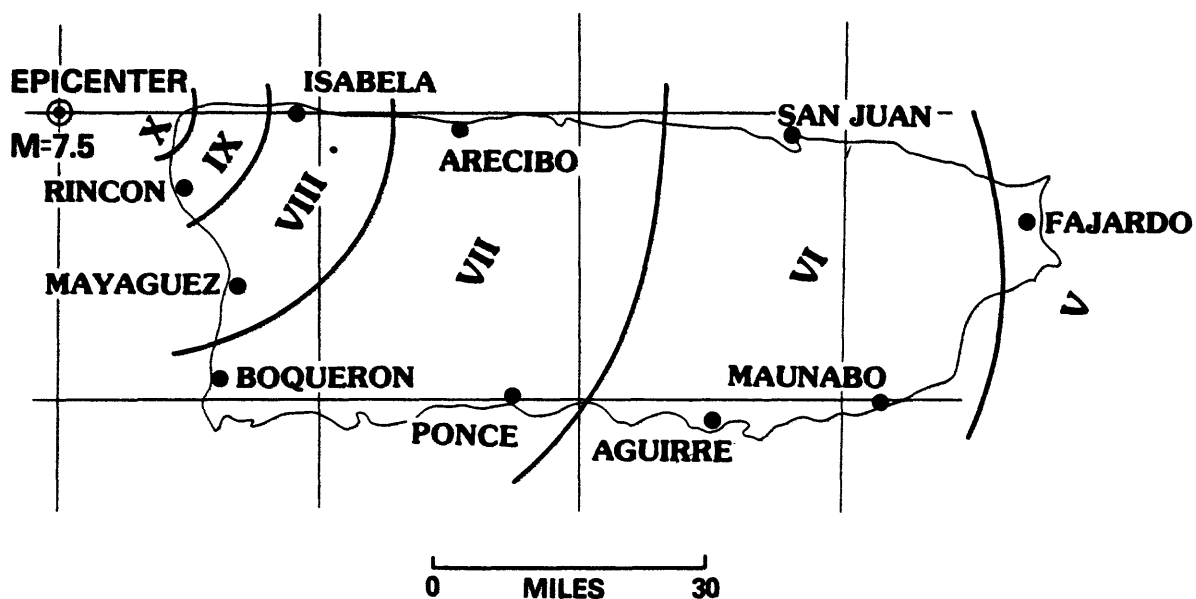
Fig. 6

From McCann and Sykes, 1984

Attenuation

The appropriate estimation of earthquake energy attenuation is a fundamental part of the seismic vulnerability analysis because energy attenuation, as determined by path parameters, determines ground motion intensity on a regional scale. The lack of strong ground motion records and the limited usefulness of attenuation rates from other geographical areas require the use of isoseismal maps from past earthquake events in the area. The critical data contained in an isoseismal map are the values of maximum intensities reported at various locations either in Modified Mercalli or Rossi-Forel intensity scales. These values are plotted on an iso-intensity contour map. The isoseismal map for the earthquake of October 11, 1918 and November 18, 1867 are shown in fig.8 and 9 respectively. The contours can be deceiving because isoseismal maps typically represent intensity values reported at sites underlain by alluvium or unconsolidated materials. Because these sites undergo more intense ground motion than sites underlain by rock, attenuation functions derived from an isoseismal map without regard for the local site geology may overestimate ground motion at the site of interest (Hays, 1980).

The regional earthquake intensity attenuation used in this study is presented in fig 10. Differences of up to 1 on the Modified Mercalli intensity scale occurred between sites located in good and poor foundation conditions during the October 11, 1918 earthquake. This shows the effect of local ground conditions on earthquake ground motions. These intensity attenuation relations are equivalent to a reduction of 2 orders of magnitude at an epicentral distance of 120 kilometers. This relation is consistent with that shown for the July 7, 1970 earthquake in Figure 11 (Capacete, 1972).



From Western Geophysical Research Inc.

Figure 8. Isoseismal Map of the October 11, 1910 Puerto Rico Earthquake.
(Intensities are Rossi-Forel).

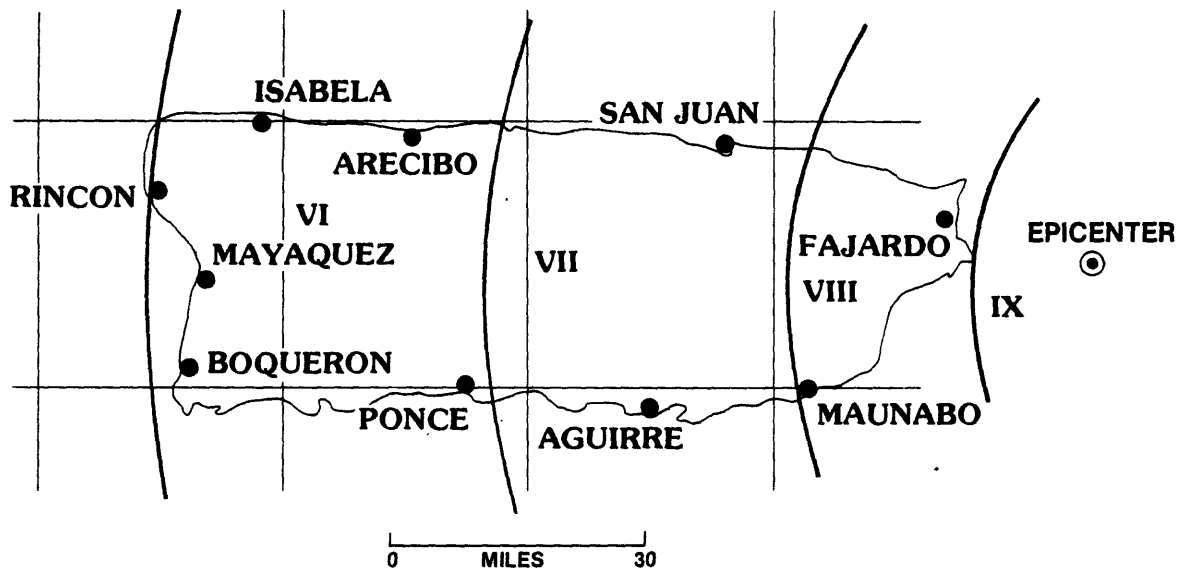


Figure 9. Isoseismal Map of the November 18, 1867 Virgin Island Earthquake (Intensities are Rossi-Forel).

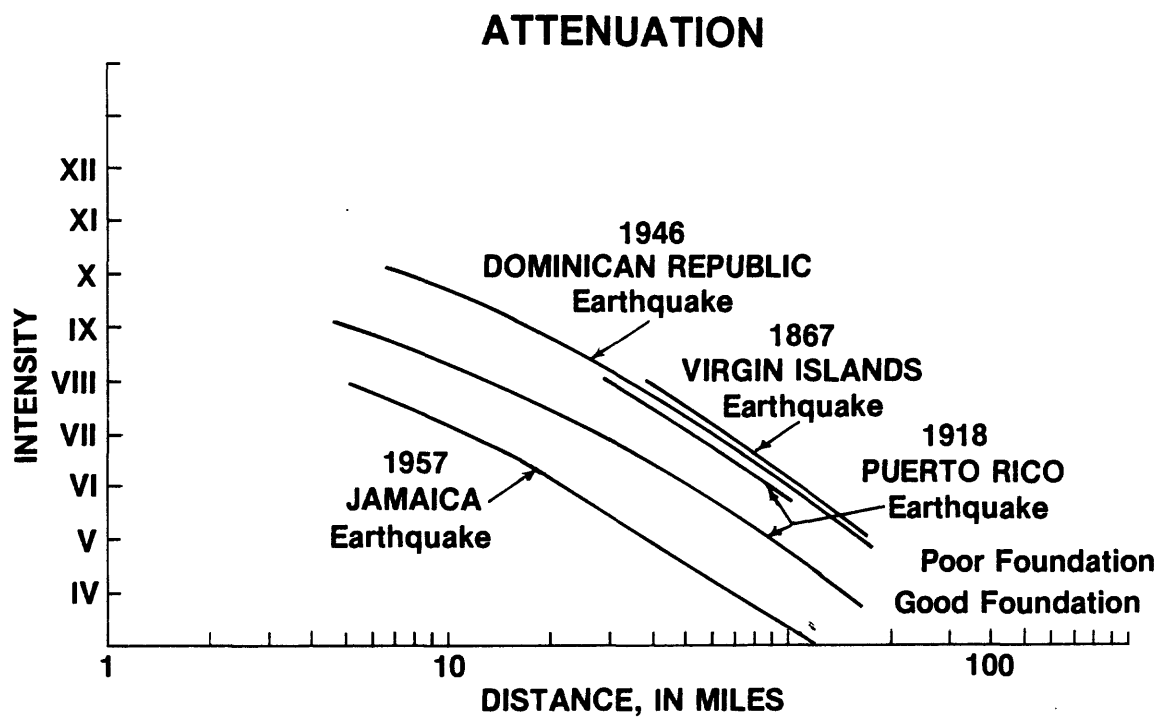


Figure 10. Regional earthquake intensity attenuation.

. Prince William Sound Earthquake of 1964 $M = 8.3$
 Δ Puerto Rico Earthquake of July 7, 1970, $M = 5.8$ $\Delta = 120$ miles

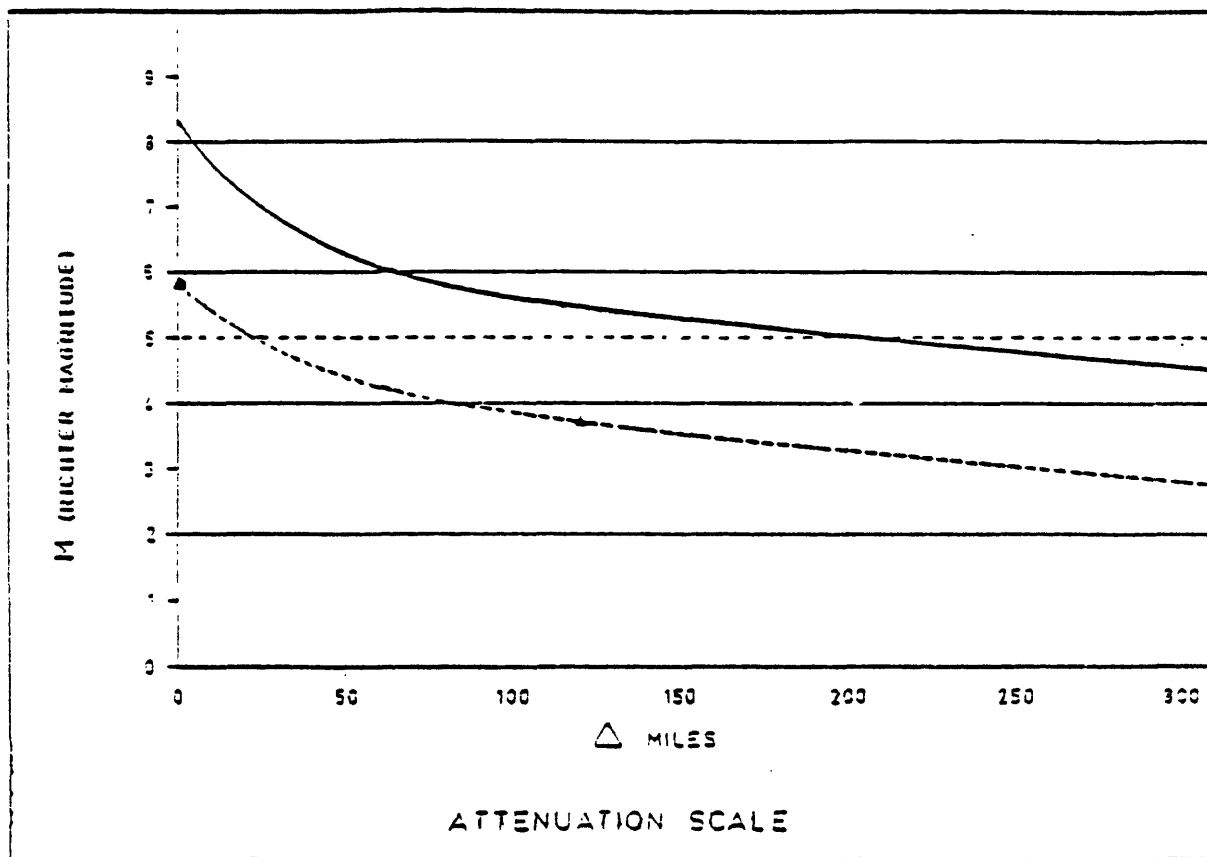


Figure 11. Earthquake attenuation curve for the July 7, 1970, earthquake (From Capacete, 1971).

Selection of Earthquake Hazard Level

A probabilistic approach that incorporates judgement of the researcher is used in the selection of the earthquake hazard level for this study. An earthquake recurrence analysis prepared by the Department of Natural Resources (personal communication: Anselmo De Portu) using a catalogue of all instrumentally located earthquakes within 330 kms. of San Juan between 1915 and 1983 shows the one hundred year earthquake to be of an order of magnitude 8 on the Richter Scale (Appendix I). This is approximately the same order of magnitude as the largest earthquake in the historic record (8.0-8.25) (table 1). While great earthquakes ($M \leq 7.75$) will occasionally occur in the Puerto Rico Trench 50 to 100 kms to the north of the Island, the historic record and regional tectonic framework suggest that major shocks ($M=7-7.5$) occur on intraplate faults close to the Island just as frequently (McCann, 1984). These events (1867, 1918) did not cause serious damage in San Juan, but on the east and northwest coasts. The 1867 and 1918 earthquakes generated intensities equivalent to VI and V to VI at San Juan and Río Piedras. The historic record indicates that San Juan has experienced an intensity VIII to IX only once-- the 1787 earthquake. On the other hand, the Island as a whole, over a period of 450 years, had been subjected to one earthquake of intensity VIII or IX and to intensities VII to VIII five times (der Kiureghian and Ang, 1975). Thus, in terms of intensity, the island of Puerto Rico experiences on the average an MM intensity of VIII once every hundred years. Return periods in terms of intensity are presented below.

<u>Return period in years</u>	<u>MMI</u>	<u>Estimated maximum acceleration</u>
50	VII	.15
90	VII-VIII	.18
100	VII-VIII	.19
200	VIII	.25
450	VIII-IX	.33
500	IX	.35

(der Kiureghian and Ang, 1975).

Different criteria can be used to select a particular earthquake hazard level. Return periods of 500 years (maximum credible earthquake), of 100 years (widely used in flood plain management), and 50 years (approximate structure life in some areas) have been suggested for use in earthquake risk analysis (Rice, 1983). The maximum credible earthquake focuses on lower probability events with return periods of 300 years or more. The most probable earthquake considers a shorter return period of 100 years. Introducing conservatism in the selection of the maximum possible earthquake that can damage San Juan requires the selection of the maximum historical earthquake (Slemmons, 1982) (8-8.25) and moving it the closest credible epicentral distance to the study area (approx. 60 kms.). Such earthquakes will produce maximum intensities of X to XI, causing very severe to total damage in the San Juan metropolitan area. Its return period greatly exceeds the useful life of

most building structures. A more realistic estimate is obtained by selecting a smaller but more frequent earthquake capable of causing significant damage. In addition, the damage pattern of the selected hazard level should exceed the threshold for most secondary geologic hazards. In this way, damages produced by higher levels of ground motion will change proportionally but not areally, permitting the estimation of likely damages for different hazard levels.

The 100 year earthquake, capable of producing an estimated MM intensity of VIII, fits the above requisites. Such intensity is felt in Puerto Rico (on the average) once every 100 years. Although San Juan experienced a similar intensity only once, conservatism dictates the use of the maximum intensity felt in Puerto Rico every 100 years.

Thus the selected hazard level is MM intensity VIII. Such intensity can be caused by an earthquake Richter magnitude 8 with epicenter 120 km north of San Juan.

TABLE I

Most destructive earthquakes felt on Puerto Rico

<u>Date</u>	<u>Estimated Maximun Intensity</u>	<u>Description</u>
1524-1528	VI	The Añasco house of Juan Ponce de León and other strong buildings were destroyed. The shock was felt strongest in the north, from Mayaguez to Añasco
1615 Sept. 8	VI	The earthquake and hurricane did much damage and caused great suffering in Puerto Rico. Epicenter probably in or near Santo Domingo. Many aftershocks during the next 40 days.
1717	VII	Very strong and damaging earthquake. The San Felipe Church in Arecibo was completely ruined. The 100 year old parish house in San German was destroyed.
1740	VI	The earthquake totally destroyed the Guadalupe Church in Ponce.
1787	VIII-IX	A violent earthquake felt over the entire Island. Many churches and chapels destroyed. In San Juan great damage was done to the forts of el Morro and San Cristobal as well as to the docks and the Cathedral.
1844	VI	Severe earthquake of 30 seconds duration. The origin may have been north of Puerto Rico. Several houses and some public buildings were demolished or cracked. In San Juan nearly all stone houses were cracked.

<u>Date</u>	<u>Estimated Maximum</u> <u>Intensity</u>	<u>Description</u>
1846 November 28	VI	Felt throughout the Island, Epicenter probably in the Mona Passage. More intense in the northwestern part of Puerto Rico.
1867 November 18	VII-VIII	This was the great Virgin Islands earthquake that caused very great damage, specially in the eastern part of Puerto Rico. The shock was followed by a severe tsunami
1875 December 8	VI	Strong earthquake knocked down some chimneys at sugar mills and damage was reported in Arecibo and Ponce.
1906 September 27	V-VI	Heavy double shock with epicenter north of Puerto Rico. In San Juan objects were overturned and people were frightened and confused, but material damage was not done.
1918 October 11	VIII	Disastrous earthquake accompanied by tsunami. Very great damage to the west coast of Puerto Rico. Epicenter in the Mona Canyon northwest of Mayaguez.
1946 August 4	VI	Strong earthquake with epicenter in the Dominican Republic caused general alarm and fear. No loss of life or serious property damage.
1946 August 8	VI	Strong earthquake of short duration accompanied by tsunami affected mostly the west coast. People terribly frightened, but no significant damage was done.

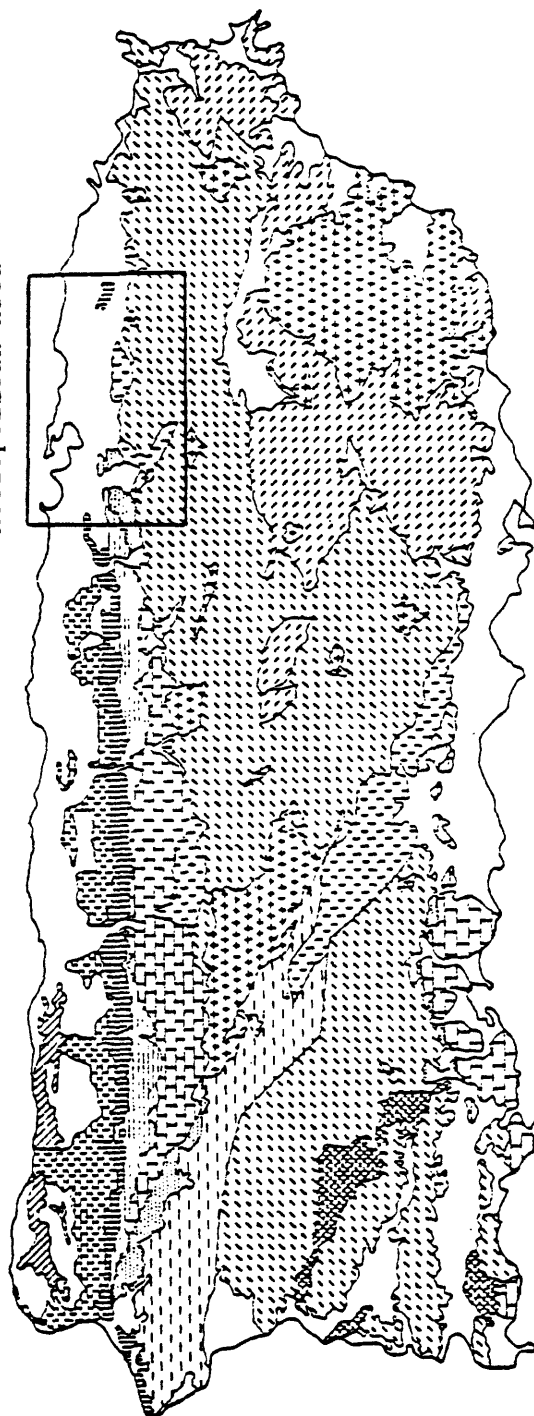
Geology

The San Juan metropolitan area lies on the northern flank of a thick sequence of highly deformed and faulted early Cretaceous to Early Tertiary volcanic and sedimentary rock. Mid-Tertiary epiclastic and limestone sequences rest over the deformed volcanic core. Late Tertiary and Quaternary unconsolidated to semiconsolidated terrigenous materials overlie most of the Mid-Tertiary formations and portions of the volcanic core (fig. 12). The geology and the stratigraphic summary of the metropolitan area of San Juan appear in fig 13.

Three physiographic regions are present in the study area: the interior volcanic upland province, the northern Karst province, and the Coastal Plain province (fig. 14). These provinces are characterized by a unique combination of relief, landforms, and geology.

The interior upland shows the effects of fluvial erosion over a complex sequence of volcanic and sedimentary deposits of Cretaceous and Early Tertiary age. The Cretaceous rocks were formed during a period when volcanism and sedimentation were dominant geological processes. The lower Cretaceous rocks consist primarily of lava, lava breccia, tuff and tuffaceous breccia with some thin bedded sandstone, siltstone, and limestone. When exposed they are thickly weathered. Upper Cretaceous rocks consist of tuffaceous sandstone, siltstone, breccia, conglomerate, lava, tuff, and some pure and impure limestone lenses. When exposed they, too, are deeply weathered (Briggs and Akers, 1965; Briggs, 1964). The collision of the Caribbean Plate with the North American Plate by the end of the Mesozoic gave rise to the "Caribbean Orogeny" (Malin et al., 1972). At the end of orogeny (Middle Eocene), most Cretaceous

San Juan
Metropolitan Area



Simplified geologic map of Puerto Rico

From BeInroth (1969)

Fig. 12

Stratigraphic summary of the San Juan area, Puerto Rico

General designation	Stratigraphic unit	Brief description	Approx. thickness (feet)	Age
	Made-ground and fill.			
	Beachrock pavement.....	Carbonate-cemented beach sand. Some iron-oxide cementation.....		
	Recent littoral deposits.....	Beach sand and associated sand aprons; forédures.....		Recent
	Floodplain alluvium.....	Mostly silt and clay.....		
	Bay mud.....	Soft black mucky silt and clay.....		
	Pleistocene littoral deposits.....	Reef rock, eolianite, and paleosols.....		Pleistocene
	Santurce sand.....	Quartz sand and white clayey sand.....		Pleistocene and Pliocene (?)
	Older alluvium.....	Red silty to sandy clay.....		
	Unconformity			
Middle Tertiary sequence.	Ayamón limestone.....	Thick-bedded, light-colored, dense limestone.....	950+	
	Aguada formation.....	Friable sandstone, clay, and concretionary limestone.....	325	early Miocene
	Unconformity			
	Intrusive igneous rocks.....	Diabase, granodiorite porphyry, and augite andesite porphyry.....		
	Fajardo formation.....	Light-colored ash siltstone, siliceous siltstone and chert, interfingering graywacke, conglomerate, and impure limestone.....	3,000+	early Eocene (?) or late Paleocene (?)
	Figuera volcanics.....	Hornblende andesite breccia, minor flow, limestone member at base.....	>3,000	
	Local unconformity			
	Trujillo Alto limestone.....	Fossiliferous medium-bedded to massive limestone.....	900—	
	Monacillo formation.....	Graywacke and conglomerate; commonly red or purple.....	940	
	Frailes formation (Leprocomio limestone member and La Muda limestone member).	Massive lapilli tuff with some stratified shale, siltstone, and graywacke. Leprocomio limestone member at top and La Muda limestone member near base.	2,350	Late Cretaceous
Older complex.....	Tortugas andesite.....	Augite andesite breccia and flows.....	1,300	
	Guaynabo formation.....	Graywacke, conglomerate, and shale.....	4,500	
	Hato Puerto tuff.....	Massive volcanics and metavolcanics and some stratified ash.....	(?)	Late Cretaceous (?)

468543—59—3

Stratigraphic summary of the metropolitan area of San Juan

Fig. 13

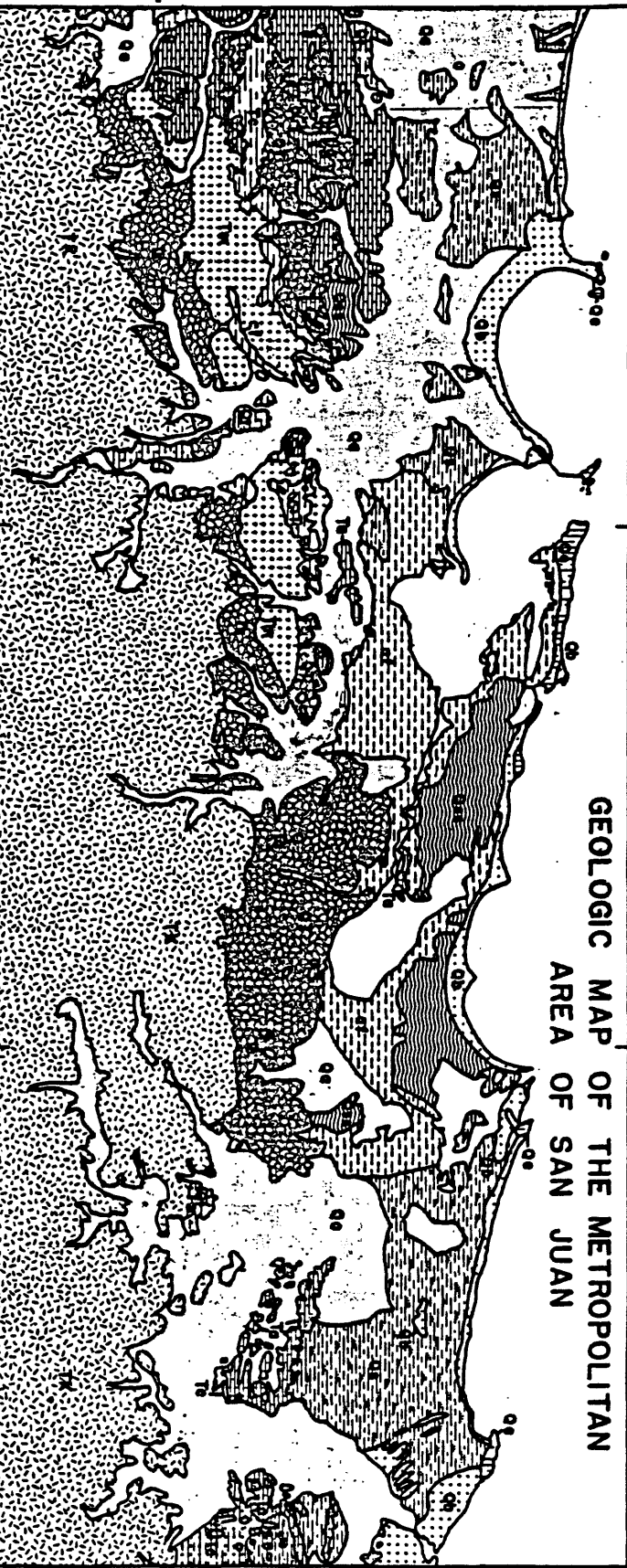
86°18'

86°07'30"

86°00'

86°32'30"

GEOLOGIC MAP OF THE METROPOLITAN AREA OF SAN JUAN



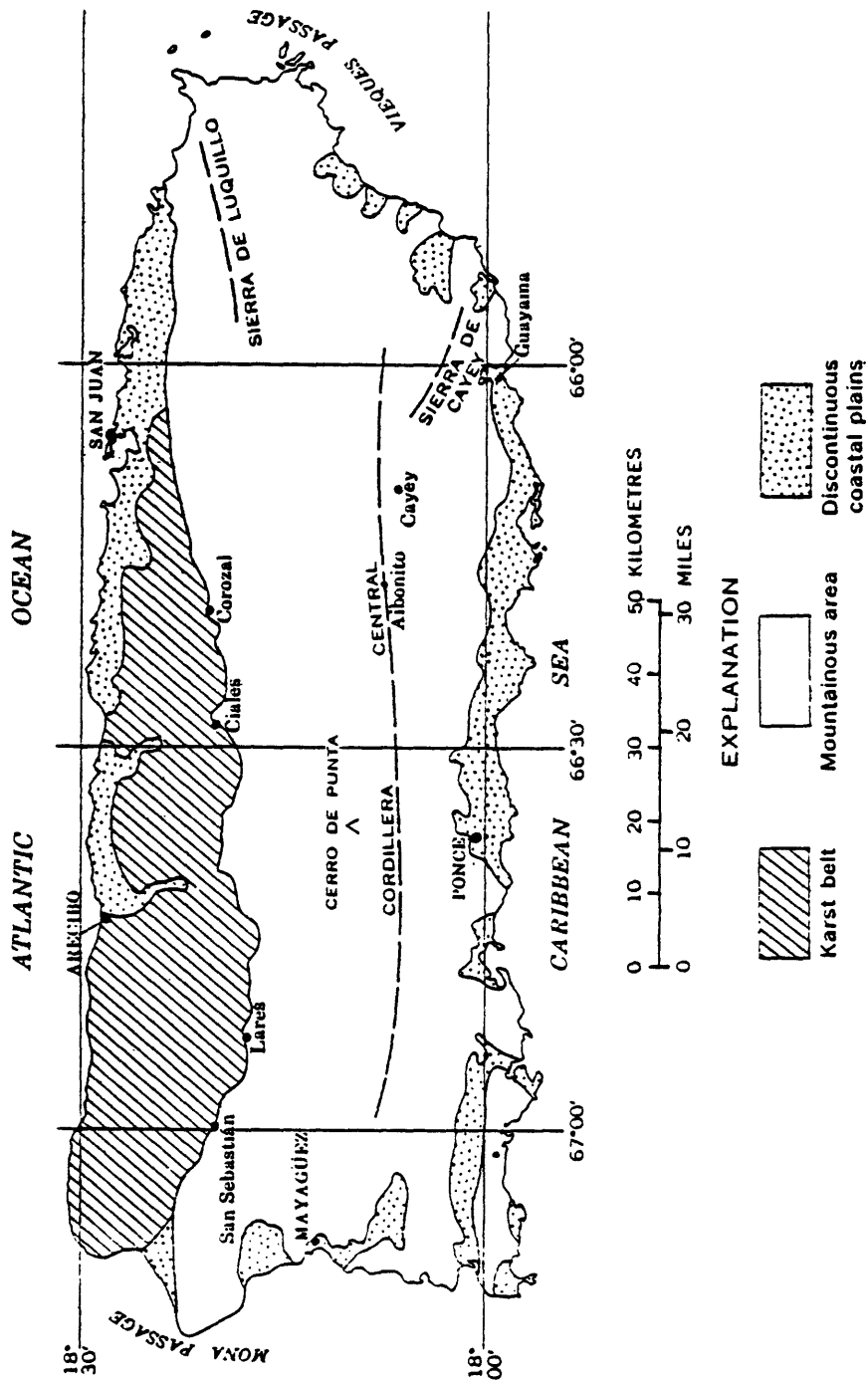
Adapted from GEOLOGIC MAP AND SECTION IN NORTHERN
PUERTO RICO, U.S.G.S., 1978

Prepared for José Meléndez by Thelma Vero
April 1980

DESCRIPTION OF MAP UNITS

	ARTIFICIAL FILL (HOLOCENE) - Sand, limestone, and volcanic rock		TERRACE DEPOSITS (PLEISTOCENE) - Clay, sand, and gravel deposits		Rio Indio Limestone Member - Compact, but cherty, fragmental limestone, mostly pale-yellowish-orange
	ALLUVIUM (HOLOCENE) - Sand, clay, gravel, and cobbles		UNDIFFERENTIATED SURFICIAL DEPOSITS (QUATERNARY AND TERTIARY) - Clay, sandy clay, and sand deposits		BUCARABONES SAND (MIOCENE AND OLIGOCENE) - Grayish-orange to yellowish-brown, highly crossbedded medium to coarse calcareous sand
	LANDSLIDE DEPOSITS (HOLOCENE) - Mixture of well-sorted clay, and limestone rubble		AYANAHON LIMESTONE (MIOCENE) - White to very pale orange, locally pale-yellow and grayish-pink, very pure fossiliferous limestone and Ayanahon Limestone (Miocene) - Thick layers of very pale orange to pink bedded calcareous chert with cherty and rubby limestone		SAN SEBASTIÁN FORMATION (OLIGOCENE) - Reddish-brown and gray sandy calcareous clay
	BEACH DEPOSITS (HOLOCENE) - Sand composed of rounded grains of quartz, volcanic rock, and shell		CIDAO FORMATION (MIOCENE AND OLIGOCENE) - Typical beds of calcareous clay, earthy limestone, and marl, very pale orange to pale yellowish-orange and moderate-orange-pink		UNDIFFERENTIATED LOWER TERTIARY AND CRETACEOUS FORMATIONS - Limestone, calcareous sandstone and siltstone, buff breccia, lava, granodiorite and quartz diorite
	SWAMP DEPOSITS (HOLOCENE) - Sandy mud and clayey sand		GUADALUPE ARROYO LIMESTONE MEMBER - Very finely crystalline to dense, very pale orange to pale-grayish-orange limestone		
	SOTOMAYOR LIMESTONE (PLEISTOCENE) - Fossiliferous calcareous sandstone composed of fine to coarse grains of shell fragments and quartz				
	SILICA SAND DEPOSITS (PLEISTOCENE) - Very pure fine to very fine quartz sand				





Map from Puerto Rico showing principal physiographic divisions

From Monroe (1976)

Fig. 14

and Early Tertiary rocks had been faulted, folded and intruded. Early Tertiary rocks were formed during a mountain building period. Both intrusive and extrusive igneous activity were the dominant geologic processes.

Intrusive rocks emplaced during the orogeny are mainly granodiorite, quartz-diorite, diorite and some minor quartz porphyry, gabbro, and amphibolite. Associated with the intrusives are zones of hydrothermal alteration and contact metamorphism (Hildebrand, F.A., 1961).

Paleocene and Eocene deposits consist of siltstone, sandstone, conglomerate, lava, and tuff. They are locally deeply weathered.

The northern Karst province in the study area consists essentially of the following formations; San Sebastian, Cibao, Aguada, and Aymamon (Monroe, 1973, 1976, 1977, 1980, Pease and Monroe 1977). The San Sebastian formation is at the base of the Mid-Tertiary sequence, lying unconformably over Cretaceous volcanics and sedimentaries. The formation is heterogeneous and contains clayey sand, lenses of sandy clay, pebbles, and cobbles. South of San Juan it grades upward into thin bedded, fine sand and mottled clay. The thickness is greater than 40 meters. The Cibao formation consists of an argillaceous marl, chalky limestone, and thin beds of sand and clay. Outcropping members are Miranda sand, upper member, and Quebrada Arenas and Rio Indio limestone. The Aguada formation consists of alternating beds of indurated calcarenite and clayey to chalky limestone. Its thickness ranges from 70 to 35 meters. Conformably overlying the Aguada is the Aymamon limestone formation consisting of massive to thickly bedded, very pure fossiliferous limestone (Monroe, 1980, 1973). Sinkhole formation is a potential hazard in the Aymamon and Aguada limestone formations.

The Coastal plain province consists of Late Tertiary and Quaternary deposits. Late Tertiary sequences include older alluvial deposits, high terrace deposits, alluvial fans (Hato Rey Formation), alluvium and river terrace deposits, silica sands, beach deposits, swamps, eolianite, and artificial fill.

Older alluvial deposits, high terrace deposits, and alluvial fans consist of varying proportions of clay, silt, and sand, mainly red or mottled red. The material is deeply weathered, stiff, and hard. Most of the non-quartz components are altered into clays. They are unrelated to present stream alluviation.

Holocene alluvium and river terrace deposits of Pleistocene age consist of sand, clay, and sandy clay. Beds of sand containing gravel are present at the sides of the Río Grande de Loíza, Río Grande de Bayamón, and Río La Plata. Thickness is variable, but as much as 20 meters has been penetrated in the Bayamón and San Juan quadrangle areas, possibly as great as 100 meters at the sides of the Río Grande de Loíza .

Silica sands of Holocene to Pleistocene age consist of very pure quartz sand 99% silica but locally containing organic matter.

The deposits grade downward into compact, ferruginous sand, mapped as blanket deposits, having a thickness ranging from 1 to 4 meters. In Santurce it was named Santurce sand (Kaye 1959). The outcrop of the Santurce sand is generally a loose, very well-sorted, medium grain, almost pure sand. It grades downward into the Older Alluvium where the cohesive nature of the clay binder imparts a great, dry strength. Erratic variations in the density of sand occurs with depth.

Beach deposits consist of sand composed largely of fine quartz mixed with minor quantities of shell and volcanic rock fragments on beaches and abandoned beach ridges in the Carolina quadrangle area. Deposits are generally medium to coarse sand in other zones. Thickness varies from 1 to 5 meters but may reach more than 13 meters in the Luis Muñoz Marín Airport area (Kaye, 1959). Beach rock is commonly present in the intertidal zone due to sand cementation.

Eolianites are cemented dunes consisting of sand and clayey sand, friable to consolidated, crossbedded, calcareous, eolian sandstone composed of fine to coarse grains of shell fragments and quartz. The maximum thickness ranges from 20 to 30 meters.

Together with beach and eolianite deposits of Holocene age, swamp deposits dominate the northern portions of the study area. They consist of sandy muck and clayey sand generally underlaid by peat formed in mangrove swamps. The peat is very compressible, generally 10 meters thick. Peat is the weakest foundation soil in the area.

Artificial fill has been placed over swamps, sections of the San Juan Bay, and in valleys to provide foundation for housing and industrial development. Fill material generally consists of sand, limestone, and volcanic rock. More than one third of the bay shoreline has been filled or dredged, mostly after 1940.

Ground Shaking

Ground shaking is by far the most important earthquake induced geologic hazard in the metropolitan area of San Juan. It is caused by the sudden release of elastic strain energy stored in the rocks. This process (faulting) generates different waves that propagate from the rupture zone. Two classes of waves are generated: body and surface waves.

Body waves consist of compressional (P) and shear (S) waves. They traverse the Earth's interior with different velocities and motions. Surface waves are Love and Rayleigh waves that travel more slowly than body waves. Body waves are mainly high frequency vibrations that are likely to make low buildings resonate. Surface waves cause mainly low frequency vibrations more efficient in making tall buildings vibrate. When buildings cannot resist earthquake vibrations generated by these waves, damage occurs (Hays , 1981).

It has long been recognized that different locations at essentially the same epicentral distance experience large variations in the distribution of damage due to the influence of local geologic and soil conditions on ground motion. Soil conditions such as thickness, water content, physical properties of the unconsolidated material, bedrock topography, geometry of the unconsolidated deposits and underlying rock, among others, can modify the ground surface motions by changing the amplitude and frequency content of the motion. Amplification of ground motion in a period range that coincides with the natural period of vibration of the structure explains the distribution of damage (Hays , 1980). Shorter period waves oscillate in the same frequency range as lower buildings, affecting such structures close to the epicenter. Longer period waves, which oscillate in the same frequency range as taller buildings, travel farther and can affect such buildings at relatively great distances from the epicenter. This is a potentially serious hazard in the metropolitan

area of San Juan because tall buildings can resonate with higher period waves generated by relatively distant earthquakes offshore.

Local soil conditions modify the seismic input by generating maximum accelerations at lower periods for stiff soils where short height structures are likely to suffer more damage. In soft soils maximum accelerations occur at higher periods where taller structures are subjected to the worst conditions.

In general, areas underlaid by thick deposits of uncompacted artificial fill, by soft, water saturated mud, or by unconsolidated stream sediment, shake longer and harder than areas underlaid by bedrock (Brown and Kockelman, 1983). During the October 11, 1918 earthquake, the La Playa sector of Ponce was more severely shaken than the higher part of the city. Humacao suffered far more than other towns in the same area because it was built upon the alluvium. The greatest damage was registered in Aguada and Añasco, both located on alluvial deposits, while Rincón, built on bedrock and closer to the epicenter than Añasco, suffered much less damage (Reid and Taber, 1919).

Three main deposits are mapped in terms of ground shaking hazard. The lowest hazard is assigned to rock outcrops, high terrace, alluvial fan, older alluvial, and blanket deposits. Rock outcrops include Cretaceous and Early Tertiary volcanic and sedimentary rocks; Middle Tertiary formations such as Cibao, Aymamon, Aguada and San Sebastian, and eolianites. The rest are semiconsolidated deposits of Pleistocene and Miocene age characterized by being stiff, hard, and compact. Depth ranges from less than 10 meters in Carolina to more than 100 meters in San Juan and less than 50 meters in Bayamón (Monroe, 1973, 1977; Pease and Monroe, 1977). Diagenesis has resulted in a material that behaves much like bedrock.

All zones of moderate to high ground shaking hazard include all alluvial deposits of Holocene age and some terrace deposits of Pleistocene age. The deposits are present in the floodplains of Río Bayamón, Río Piedras, and Río Grande de Loíza. In Carolina the sand, clay, and sandy clay beds are up to 100 meters thick. Beds of sand, clay, and sandy clay exceed 20 meters in San Juan and Bayamón. These zones are much more vulnerable to ground shaking than the "stiff" clays but are considered, in general, less vulnerable than artificial fills placed over swamp and lagoonal deposits.

Fill materials have been shown to behave very poorly during earthquakes (Munich Re, 1973). Extensive filling of mangrove swamp (Fig. 15) with fill material ranging from rock and sand, to soft, black, mucky clays dredged from the bottom of San Juan Bay after 1940, have created potentially unstable conditions. Manmade fills consisting of materials ranging from silt to sandy gravel have failed during earthquakes due to liquefaction of the basal zone of the fills themselves or in natural foundation materials underlying the fills (Keefer, 1984). In fact, flow failures carried away large sections of the port facilities at Seward, Wittier and Valdez, Alaska during the 1964 Prince William Sound Earthquake. Ground shaking induced failures caused the sinking of Port Royal in Jamaica 1692. Although the conditions where these events took place are not exactly the same as those present in San Juan Bay, the possibility of ground failure of portions of the artificial fill surrounding the Bay during a large earthquake cannot be discarded. The presence of relatively deep fill materials over swamp deposits and very high water tables place these areas under a combined high ground failure and ground shaking hazard. Ground shaking damages result

* Figures 15 and 16 are not available.

from the interaction of ground motion with the building structure. Ground motion characteristics are mainly determined by the depth of the focus, its magnitude, attenuation, and local ground response. The most important of these factors have been discussed earlier in this report. Building damageability depends mainly on the building ordinances and their effectiveness, design and construction technology, type of building structure, and location.

In Puerto Rico, building regulations containing lateral force provisions for earthquake went into effect in September, 1954. Prior to that date buildings were constructed using individual standards selected by each builder; but a building code alone is no guarantee of an adequate building performance during an earthquake. Other factors such as the experience of the designers, material quality, quality of workmanship, and supervision affect damageability. Steinbrugge (1962), during an inspection of several buildings in the metropolitan area of San Juan, found that in many buildings earthquake provisions and workmanship requirements were not effectively policed by the Puerto Rico Planning Board. Design errors and poor workmanship were commonly found even in the larger buildings.

Today, potentially serious deficiencies are present in the actual building code. Leandro Rodríguez (1984) emphasizes that the present building code does not consider ductility, does not address soil structure interaction, does not consider the importance of the structure (for example the same design criteria are used for hospital and for a one-family house), and does not recommend earthquake resistant designs for underground lifeline structures. Thus, in spite of the building

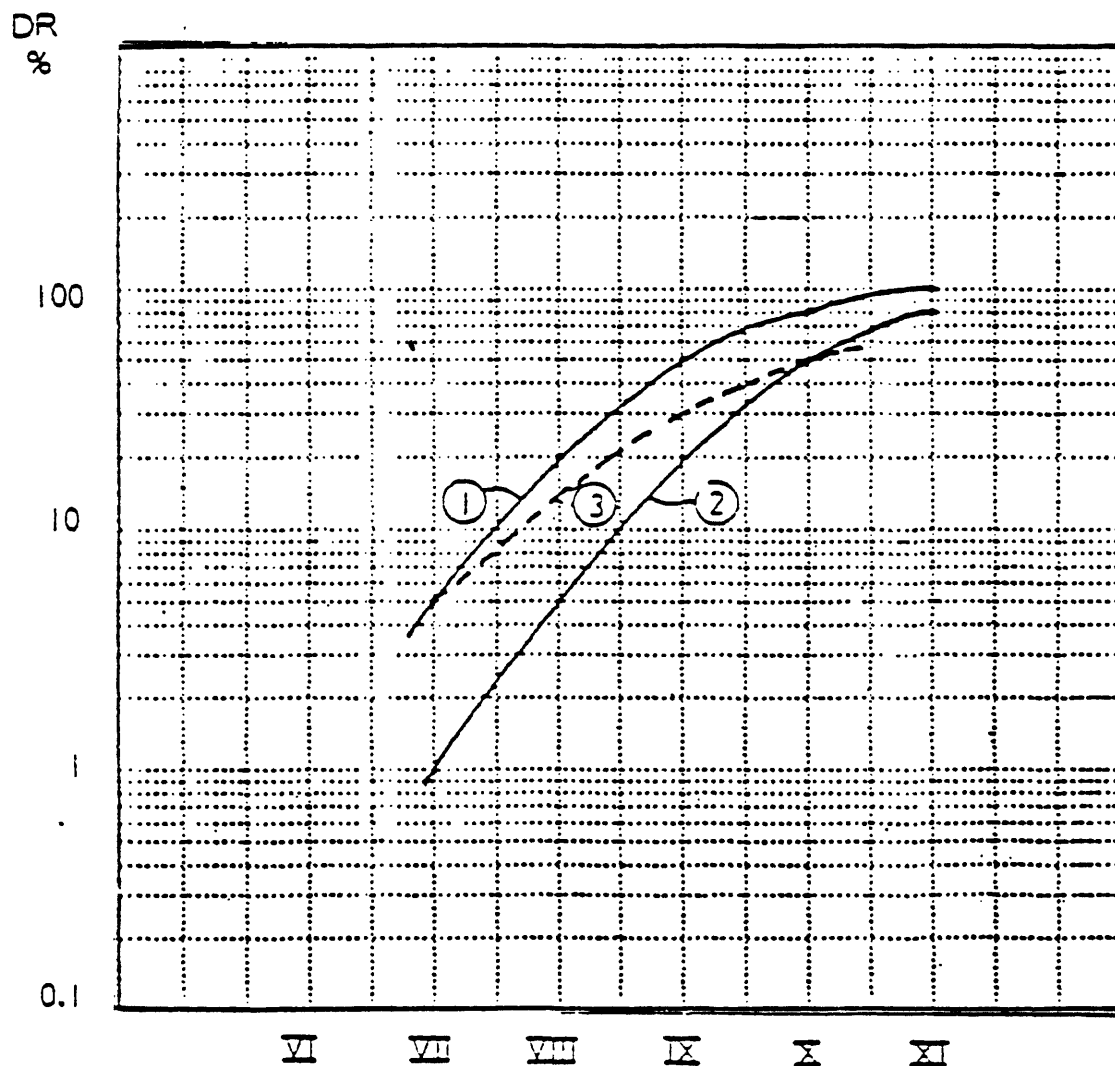
regulations, a significant number of structures in the metropolitan area are not likely to resist earthquake loadings adequately. Fortunately, the Seismic Committee of the Colegio de Ingenieros, Arquitectos y Agrimadores has submitted to the Puerto Rican Building Permits and Regulation Administration an updated proposal for the design of earthquake resistant structures in Puerto Rico.

Damage assesment of ground shaking hazard follows the procedures recommended by Rice (1983). Most of the information presented below originates from this source. The methodology considers only damage to buildings. Other facilities such as plants, dams, lifelines, etc., are outside its scope. Damage assesment is obtained by overlaying a building inventory map on the hazard map.

The structure response for different types of buildings, ground motion, and soil condition is based on past earthquake experience. The predicted damage is expressed as percent loss or damage ratio. This widely used parameter represents the ratio of the cost of repair to the replacement cost. For individual buildings, damage ratios beyond .5 are considered total losses. Since damage ratios of .3 already correspond to severe damage states, damage ratios typically vary from 0 to .3, increasingly rapidly to 1. The damage ratio for different building types are presented in figure 16.

The dominant type of building structure in the metropolitan area of San Juan is shear wall with seismic design (estructuras a base de muros de corte con diseño sísmico). Damage ratios for other types of structures are shown in fig. 17. Areas of low ground shaking amplification (B-1) correspond to a MM1 of VIII. In areas with moderate to very high ground

motion amplification (B-2), damage ratios were raised .75 intensity (MMI). In areas with high ground motion amplification (B-3) damage ratios were raised 1.0 intensity (MMI). Damage ratios for ground shaking, liquefaction and landslides are shown in table2 .



- 1 Modern Construction. No seismic design.
- 2 Modern Construction. Seismic design.
- 3 Average damage ratio used by Muchener Ruckversicherungs-Gesellschaft (verbally communicated to Sauter and Shah, 1978).

Figure 16. Average damageability for "modern construction" taken from Sauter and Shah, 1978; originally from "Guatemala 1976 Earthquake of the Carribbean Plant," Muchener Ruckversicherungs-Gesellschaft, Munich.

TABLE 2

Generalized Damage Ratio Estimates

<u>Hazard Zone</u>	<u>% Area</u>	<u>Damage Ratio</u>
A-1	2	.35
	98	.05
A-2	5	.35
	95	.05
A-3	10	.35
	90	.07
B-1	100	.05
B-2	90	.15
	10	.35
B-3	20	.35
	80	.20
C-1	2	.10
	98	.05
C-2	5	.10
	95	.05
C-3	15	.10
	85	.05

Hazard zones are shown in the Earthquake-Induced Geologic Hazard Map included with this study.

Liquefaction

Although landslide is chiefly a hillside process, earthquakes can also cause ground failure in the lowland due to the process of liquefaction. When cohesionless water-saturated materials are subjected to earthquake vibrations, the tendency to compact is accompanied by an increase in pore water pressure in the soil due to load transfer from soil particles to pore water. Drainage can occur, but if restricted, pore water pressure can rise to an amount equal to the weight of the column of soil above the soil layer. Under this condition the soil may suffer great deformations and behave like a fluid rather than like a solid for a short period of time. Any structures, fills, and embankments located on liquifying soil will undergo deformations. These can be caused by lateral spreads, flow failures, and by the loss of bearing strength. In addition, ground settlement and sand boils can occur. The settlement of sand is principally caused by the horizontal shear component of motion. Lee and Albasia (1974) found that vertical settlements from drainage effects may be as much as 3% of the height of the affected soil layer. If sands are saturated, ground subsidence might be expected from soil compaction and water drainage at stresses less than required to induce complete liquefaction. The volumetric settlements from pore water pressure lower than that causing liquefaction are generally less than 1%.

Geologic conditions favoring liquefaction are: 1) a potentially liquefiable bed or lense of porous, well-sorted sand, 2) water saturation of intergranular pore spaces in the bed or lens, 3) confinement of pore water by impermeable layers above and below the liquefiable bed, and 4) proximity of the liquefiable bed to the surface (50 feet or less).

Liquefaction occurs mainly where sands and silts have been deposited during the last 10,000 years and where ground water is within 10 meters of the surface. Generally, the younger and looser the sediment and the higher the water table, the more susceptible the soil is to liquefaction. In Puerto Rico, liquefaction was observed in the lowlands of Rincón during the October 11, 1918 earthquake. Water, bringing up sand, issued from cracks. The same phenomenon was observed in Añasco, but here the water brought up black sand. Liquefaction was reported in sandy, saturated alluvial materials in areas where the earthquake intensity (Rossi-Forel) was greater than VII (Reid and Taber, 1918). Massive water drainage from alluvial soils increased stream discharge for days after the earthquake.

Three major factors are conducive to liquefaction: ground shaking, a shallow water table, and sandy materials. In terms of ground shaking, the selected hazard level of MMI VIII is capable of generating cyclic stresses strong enough to cause liquefaction in the study area. The predominant minimum intensity for coherent slides and lateral spreads and flows is MMI VII. The lowest intensity reported is MMI V (Keefer, 1984). Thus, the study area will experience an MMI of 1 to 2 above the predominant minimum liquefaction threshold. Shallow water tables and sand deposits coincide in river channels, dunes, beach deposits, deltas, silica sand deposits, flood plains, and other topographic lowlands. In these areas the water table is usually less than two meters deep and rarely exceeds five meters.

Areas susceptible to liquefaction are mapped according to geomorphic setting, landforms, types and age of geologic deposits, and water table depth. These factors are used to estimate areas of high, moderate, and low susceptibility. In large scale mapping, more refined methods based on boring

logs and standard penetration tests (techniques developed by Seed and Idriss, 1971, and Seed, 1979) may be used to determine liquefaction potential. Included in areas of moderate to high susceptibility are Holocene beach deposits composed of sand consisting of grains of quartz, volcanic rock and shells. Thickness ranges from one to five meters. A second area is found in the Carolina quadrangle where fine to medium sands are present on beaches, coastal dunes, and abandoned beach ridges. It is usually not thicker than ten meters, and the water table is less than two meters. Areas of high susceptibility include the very fine and loose sands of Cangrejos Arriba with a thickness ranging from one to four meters and a high ground water table. Within these zones the ground failure potential is high in areas lacking lateral confinement, differentially loaded, loose sand deposits, or gentle slopes. Areas of low to moderate susceptibility include the older deposits of Holocene-Pleistocene age composed of almost pure silica sands derived from ferruginous sand by leaching. Loose sands are present on the surface. The degree of compaction increases irregularly with depth. Kaye (1958) noted the following features: 1) Great uniformity of sorting of the sand material 2) Lack of carbonate cementing material 3) High dry strength, imparted by clay, that acts as a binder 4) Erratic variation in the density of the sand with depth. Zones of low susceptibility are older Pleistocene silica sand deposits in the Bayamón quadrangle. They are one to four meters thick, and the water tables are generally deeper than in younger deposits. The liquefaction potential is not exclusive of beach and silica sand deposits, but a very high potential is locally present in river channels, deltas, uncompacted fills, and lagoonal and

flood plain deposits less than 500 years old. Due to map scale limitations these areas are not mapped independently. Swamp and lagoonal deposits (hydraquents) are extensive in the study area and were mapped separately as zones with high liquefaction potential. Recent flood plain deposits are vulnerable where the alluvium is composed of cohesionless materials such as silt, silty sand, or fine grained sand. Most of the alluvium in the study area is composed of clay, sandy clay, and sand. Liquefaction induced flow failures and lateral spreading toward river channels are likely to occur where saturated sand lenses are present. Lateral spreading of flood plain deposits toward river channels destroyed more than 200 bridges during the 1964 Alaska earthquake. They are particularly destructive to pipelines and water mains, a factor which impeded the effort to fight the fire that ignited during the San Francisco earthquake (Hays, 1981). During the 1918 earthquake the Aguadilla water supply pipe over Rio Culebrinas was ruptured by compression when the concrete piers supporting the pipe moved more than 2 meters towards each other across the stream (Reid and Taber, 1918).

Liquefaction damage assesment requires the mapping of potentially susceptible sedimentary materials (table 3), the estimation of the percent area affected by liquefaciton, and the estimation of the damage ratio. Liquefaction mapping criteria have been presented above. The estimation of the percent area affected by liquefaction is done by adapting the procedures proposed by Rice (1983) based on the topographic and geologic conditions, soil profile characteristics, level of earthquake shaking, and liquefaction potential assesment using Seed's (1969) criterium. The resercher's subjective judgement is critical in the evaluation, specially when detailed data is not available.

The percentage of area affected by liquefaction and the corresponding damage ratio for a magnitude 6 earthquake is shown in figure 17. The selected earthquake hazard level (MMI VIII) approximately corresponds to a peak ground acceleration of .2g. and an earthquake Richter Magnitude 6 (fig. 18). The percent area affected by liquefaction is 17 percent and the damage ratio is .35 according to fig. 18. Because portions of the areas mapped under moderate to high potential have higher blow counts (for example, indurated sand and beach rock) the percent area affected by liquefaction is overestimated. A conservative estimate of the percent area affected by liquefaction based on this researcher's judgement assigns 10 percent to areas of moderate to high susceptibility, and 2 percent to areas mapped under low susceptibility. These estimates can be improved by examining specific site profile characteristics and Standard Penetration Test results throughout potentially liquefiable deposits.

TABLE 2

Estimated Susceptibility of Sedimentary deposits to Liquefaction During Strong Seismic Shaking

From Youd and Perkins 1978

Type of Deposit (1)	General Distribution of Cohesionless Sediments in Deposits (2)	Likelihood That Cohesionless Sediments, When Saturated, Would Be Susceptible to Liquefaction (by Age of Deposit)			
		<500 yr (3)	Holocene (4)	Pleistocene (5)	Pre-Pleistocene (6)
		(a) Continental Deposits			
River channel	Locally variable	Very high	High	Low	Very low
Flood plain	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Alluvial fan and plain	Widespread	Moderate	Low	Low	Very low
Marine terraces and plains	Widespread	-	Low	Very low	Very low
Delta and fan- delta	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
Lacustrine and playa	Variable	High	Moderate	Low	Very low
Colluvium	Variable	High	Moderate	Low	Very low
Talus	Widespread	Low	Low	Very low	Very low
Dunes	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
Loess	Variable	High	High	High	Unknown
Glacial till	Variable	Low	Low	Very low	Very low
Tuff	Rare	Low	Low	Very low	Very low

(continued)

Type of Deposit (1)	General Distribution of Cohesionless Sediments in Deposits (2)	Likelihood That Cohesionless Sediments, When Saturated, Would Be Susceptible to Liquefaction (by Age of Deposit)			
		<500 yr (3)	Holocene (4)	Pleistocene (5)	Pre-Pleistocene (6)
		(a) Continental Deposits (cont'd)			
Tephra	Widespread	High	High	?	?
Residual soils	Rare	Low	Low	Very low	Very low
Sebka	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
(b) Coastal Zone					
Delta	Widespread	Very high	High	Low	Very low
Esturine	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Beach	Widespread	Moderate	Low	Very low	Very low
• High wave energy	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
• Low wave energy	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Lagoonal	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Fore shore	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
(c) Artificial					
Uncompacted fill	Variable	Very high	-	-	-
Compacted fill	Variable	Low	-	-	-

LIQUEFACTION POTENTIAL
PERCENTAGE OF AREA AFFECTED
FOR A MAGNITUDE 6 EARTHQUAKE

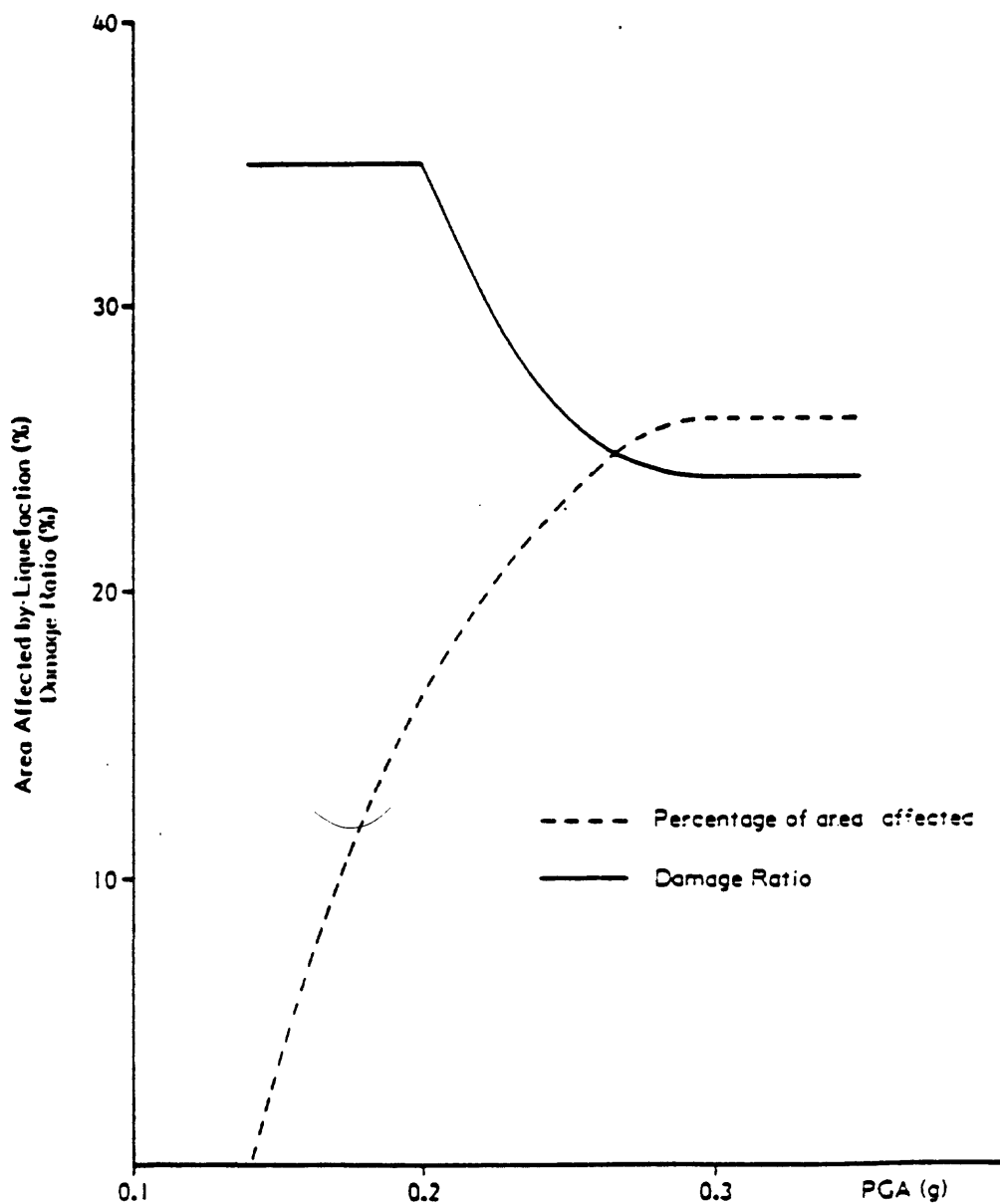


Figure 17

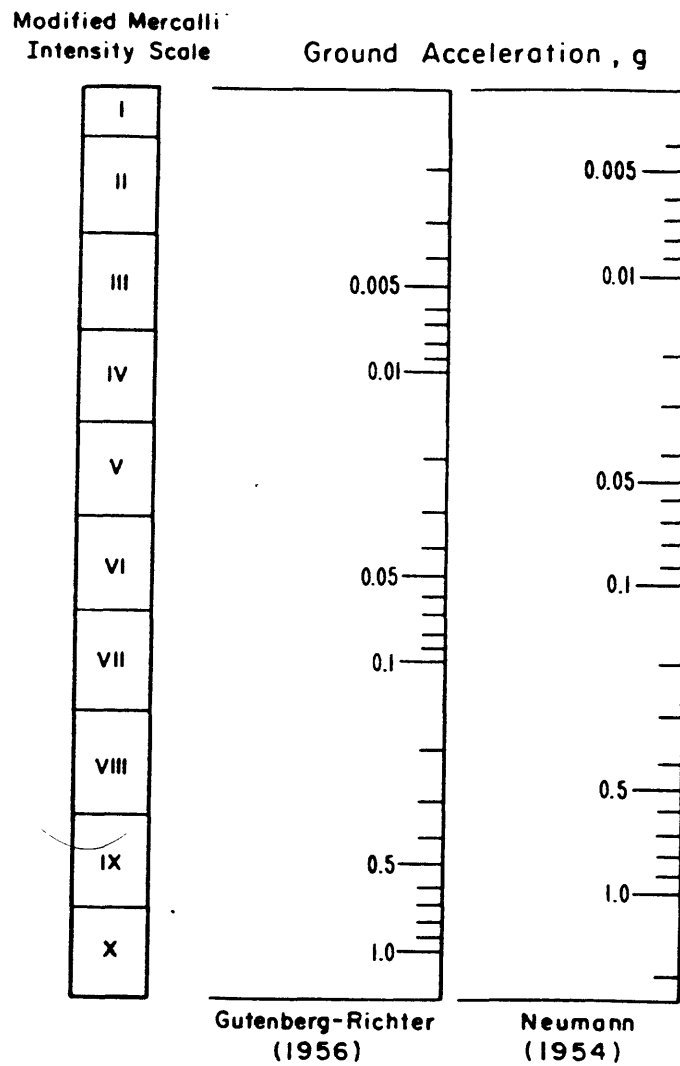


Figure 19. Intensity and acceleration relations proposed by Neumann, and Gutenberg and Richter (From Hays, 1980).

Landslides

The term landslide, as used in this report, refers to all types of slope movements including falls, flows, slides, and topples.

Two main features that control earthquake induced landslides are slope inclination and the types and characteristics of the geologic materials beneath the slope. Ground motion can trigger landslides when slopes are subjected to repeated loadings consisting of irregular pulses that weaken and eventually loosen rock and soil materials forcing them down the slope. Keefer (1984) studied the relationship between earthquake magnitude and areas affected by landslides, and the epicentral distance and Modified Mercalli Intensity at which different landslides occur. Areas affected by landslides show a strong correlation with magnitude. Generally, landslides are caused by events greater than M. 4.0. The selected hazard level can trigger landslides over an area up to 100,000 km². This is extensive enough to cover the whole island of Puerto Rico, assuming the epicenter of the selected hazard level is along the southern wall of the Puerto Rico Trench. In addition, the epicentral distance from the study area is closer than the minimum distance of 200 kilometers required to experience all types of ground failure. At a given epicentral distance, different areas experience different intensities. The selected hazard level will produce an MM intensity of VIII to IX (deep alluvium), a value up to 2 intensities above the predominant minimum seismic shaking intensities required to trigger disrupted slides and falls (MMI VI) and coherent slides, lateral

spreads, and flows (MMI VII). Thus, ground motion in San Juan, given the areal, epicentral, and intensity characteristics of the selected hazard level, is strong enough to cause landslides, especially in steep slope areas and near weak geologic materials. The mapping of areas susceptible to landsliding takes into consideration slope inclination as a primary factor affecting slope stability. In general, steep slope areas are chief sites of instability mainly through their control of the downslope component of the weight of slope material. However, the degree of stability depends considerably on the geologic material underlying the slope. Granular non-organic soils with little cohesion and low frictional strength are the most susceptible to failure. In addition, highly fractured or jointed rock, or rock which displays any other type of discontinuity, especially if planes are open, is susceptible to failure (Rice, 1983). Degree of susceptibility to landslides is mapped as high, moderate to high and low.

Zones of high susceptibility in the study area include those areas where geologic formations are characterized by a high landslide incidence due to steep slopes in vulnerable material, and the presence of a weak geologic stata below more resistant ones. Consequently, the Cibao - Aguada and San Sebastian terciary formations, and the Mucarabones sand are areas of high susceptibility. The first two formations show a high incidence of landslides extending along a considerable portion of their outcrop from Aguadilla to the southwestern portion of the San Juan metropolitan area. The geologic contact along steep scarpments where the Aguada formation rests on clay and sandy clay of the the Cibao formation is potentially unstable. In similar humid, tropical, geomorphic environments earthquakes have triggered rotational slumps involving failure of

incompetent, plastic strata beneath limestone (Simonett, 1967).

Large landslides occur where the thick clayey beds of the San Sebastian formation beneath the Lares limestone are exposed along a scarpment that extends from Corozal to the west coast (Monroe, 1964). Although the Lares limestone is not present in the study area due to its eastern grading into the Mucarabones sand, steep portions of the clayey and pebbly San Sebastian and the Mucarabones sand are mapped as highly susceptible area.

Areas mapped as moderate to high susceptibility are located mainly at the southern portion of the San Juan metropolitan area where the interior mountainous uplands begin. Slope inclinations range from 12 to 32 degrees but do not show any significant incidence of landsliding except along steep-sided excavations, such as roadcuts (Molinelli, 1983). Soils are mostly Inceptisols, characterized by shallow depth (40 cm.) over slightly weathered bedrock, and Ultisols, moderately deep to deep soils (1.5 m. deep) (Soil Survey, San Juan). When dry, the high clay content of these residual soils imparts a high cohesive stability to the slopes, greatly reducing their vulnerability to the probable earthquake. On the other hand, protracted periods of rain can saturate the soils, increasing the pore water pressure, reducing the shear strength, and increasing the shear stress with the weight of the water. Under these conditions, the probable earthquake can trigger a large amount of debris, earth flow, and slides. In humid, tropical, geomorphic environments similar to those mapped as moderate susceptibility, the percentage area that has failed during an earthquake of similar magnitude as the probable earthquake ranges from 25 to 40 percent (Simonett, 1967; Pain, 1972).

Areas mapped as low susceptibility include nearly flat slope zones (less than 10 degrees inclination) and very stable rock outcrops. Included in this mapping unit are the low relief portions of the San Sebastian formation and Rio Piedras siltstone, the Guaynabo formation, the Guaracanal Andesite, and the Frailes formation. Most of these areas are presently urbanized, a process that has further leveled the topography. There is little likelihood of significant downslope movement, except along excavations. The rock outcrops included within this unit are the Aymamón and Aguada limestone formations and eolianites. In spite of steep slopes, limestones, along with other formations of Tertiary age, are considered the most stable rock in Puerto Rico (Monroe, 1979). Case hardening by solution and immediate redeposition in situ stabilize the slope (Monroe, 1976). Eolianites are very stable except where undermining has taken place due to mechanical and chemical weathering associated with wave action.

Not all slopes with landslide potential will actually fail at the selected hazard level. To estimate the expected percentage area of slope failure, criteria that reflect engineering judgement based on geological data and past earthquake experience (Rice, 1983) are incorporated. A conservative estimate of percentage area of failure assigns a value of 2 to 15 percent to areas of low, moderate, and high susceptibility (Fig. 19). These values can more than double if the earthquake occurs after a protracted period of rain when the shear strength of the soil is lower. Landslide damage assessment assumes that for a given landslide potential, the percentage of area affected is the same as the percentage of buildings that suffer landslide induced damage. In addition, damage ratios (percent loss) are shifted arbitrarily by .5 intensity (Rice 1983).

COMMONWEALTH OF PUERTO RICO
DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES

PLANNING RESOURCES AREA

GENERALIZED EARTHQUAKE INDUCED GEOLOGIC HAZARDS MAP FOR THE SAN JUAN METROPOLITAN AREA

	GROUND MOTION AMPLIFICATION	LIQUEFACTION POTENTIAL	GROUND FAILURE POTENTIAL
A - 1	NOT SIGNIFICANT	LOW	VERY LOW
A - 2	NOT SIGNIFICANT	LOW TO MODERATE	LOW
A - 3	NOT SIGNIFICANT-TO LOW	MODERATE TO HIGH	HIGH-WHERE THE MATERIALS ARE NOT Laterally CONFINED AND MODERATELY SLOPING
A - 3 - S	HIGH	HIGH-IN SAND COVERED LAGOONAL DEPOSITS	HIGH-IN SAND COVERED LAGOONAL DEPOSITS
B - 1	NOT SIGNIFICANT	NONE	VERY LOW
B - 2	MODERATE TO VERY HIGH	HIGH-SPECIALY WHERE THE MATERIALS ARE NOT Laterally CONFINED	HIGH-ALONG RIVER BANKS SLUMP, FLOWS AND LATERAL SPREADS
B - 3	HIGH	HIGH-SPECIALY IN THE LOOSE SANDS LAGOONAL DEPOSITS	HIGH-SLUMPS-FLOWS AND LATERAL SPREADS
C - 1	NOT SIGNIFICANT	NONE	LOW
C - 2	NOT SIGNIFICANT	NONE	MODERATE TO HIGH
C - 3	NOT SIGNIFICANT	NONE	HIGH

SCALE 1:40,000



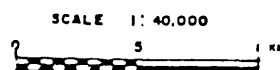
405 40064

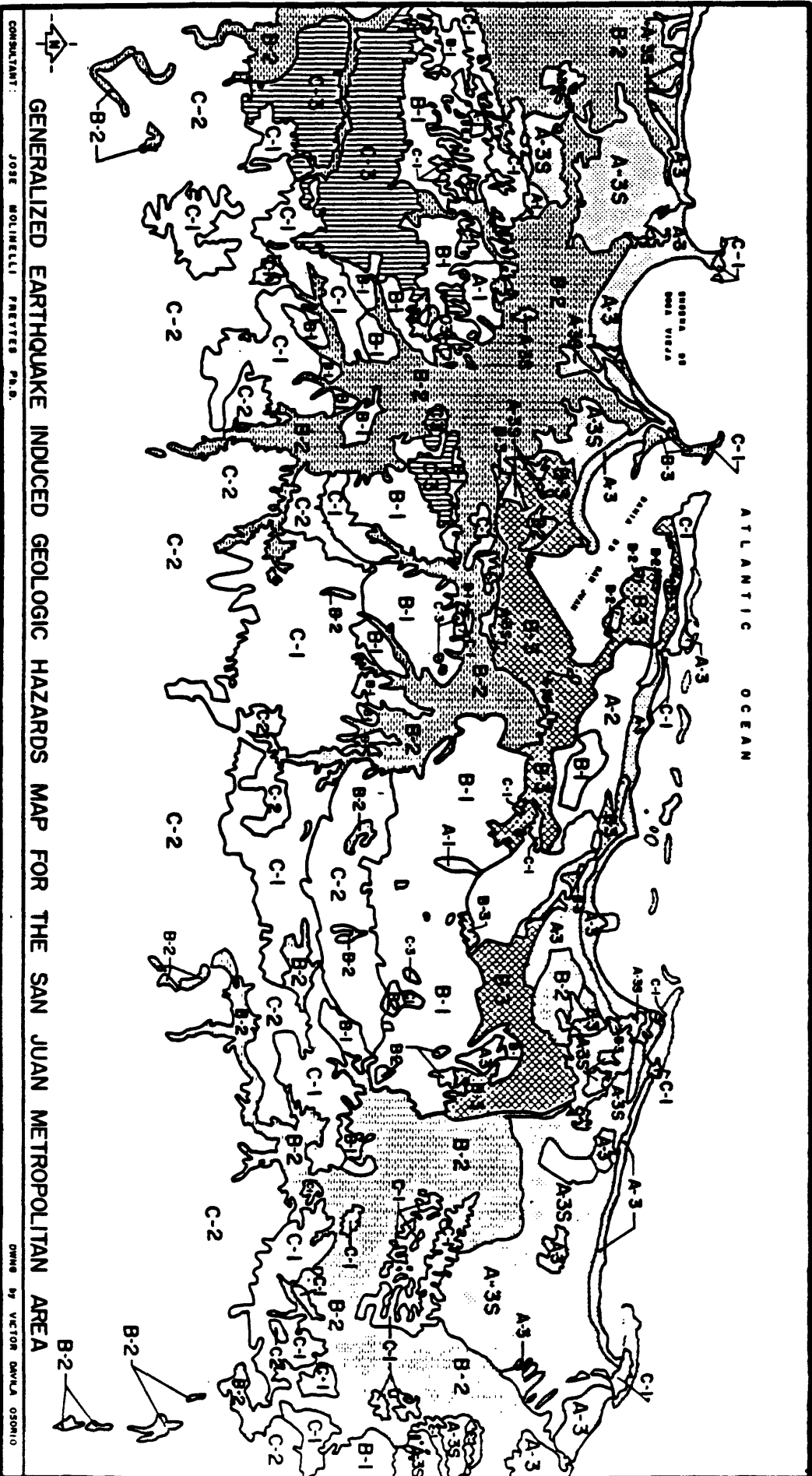
COMMONWEALTH OF PUERTO RICO
DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES

PLANNING RESOURCES AREA

GENERALIZED EARTHQUAKE INDUCED GEOLOGIC HAZARDS MAP FOR THE SAN JUAN METROPOLITAN AREA

	GROUND MOTION AMPLIFICATION	LIQUEFACTION POTENTIAL	GROUND FAILURE POTENTIAL
A - 1	NOT SIGNIFICANT	LOW	VERY LOW
A - 2	NOT SIGNIFICANT	LOW TO MODERATE	LOW
A - 3	NOT SIGNIFICANT-TO LOW	MODERATE TO HIGH	HIGH-WHERE THE MATERIALS ARE NOT LATERALLY CONFINED AND MODERATELY SLOPING
A - 3 - S	HIGH	HIGH-IN SAND COVERED LAGOONAL DEPOSITS	HIGH-IN SAND COVERED LAGOONAL DEPOSITS
B - 1	NOT SIGNIFICANT	NONE	VERY LOW
B - 2	MODERATE TO VERY HIGH	HIGH-SPECIALLY WHERE THE MATERIALS ARE NOT LATERALLY CONFINED	HIGH-ALONG RIVER BANKS SLUMP, FLOWS AND LATERAL SPREADS
B - 3	HIGH	HIGH- SPECIALLY IN THE LOOSE SANDS LAGOONAL DEPOSITS	HIGH-SLUMPS-FLOWS AND LATERAL SPREADS
C - 1	NOT SIGNIFICANT	NONE	LOW
C - 2	NOT SIGNIFICANT	NONE	MODERATE TO HIGH
C - 3	NOT SIGNIFICANT	NONE	HIGH





Summary and Conclusions

The tectonic setting and regional seismicity of the northeastern Caribbean expose the island of Puerto Rico to a high seismic hazard. Large magnitude events in 1918 (est. magnitude 7.5), 1867 (est. magnitude 7.5 - 7.75), and 1787 (est. magnitude 8.-8.25) caused hundred of deaths and millions of dollars in material losses. Similar events will occur in the future. Off-shore faults in the Puerto Rico Trench, Mona Passage-Mona Canyon area, Anegada Passage, and the Muertos Trough are the most important potential earthquake sources in the Puerto Rico area. The Puerto Rico Trench, approximately 60 km. north of the metropolitan area of San Juan, poses the greatest hazard to the study area due to its proximity and high seismic potential (est. magnitude 8.8.25). On the basis of earthquake magnitude and intensity recurrence, regional attenuation and this researcher's judgement, the selected earthquake hazard level (most probable earthquake) for the risk analysis corresponds to a Modified Mercalli intensity VIII. This value is used as the basis for damage estimation.

The geology and geomorphology of the study area were defined as a preliminary step to mapping earthquake-induced geologic hazards. Three hazards were defined for the study area; ground shaking, landslides, and liquefaction. A map depicting hazard zones was prepared showing three levels of susceptibility for each hazard. Damage ratio was estimated for each zone adapting the procedures recommended by the Rice Center for earthquake risk analysis. The most important geologic hazards in the metropolitan area of San Juan are ground shaking, liquefaction and landslides. The analysis concludes that the most vulnerable areas are the

artificial fills placed over swamp deposits around San Juan Bay, Caño Martín Peña and Laguna San José and the alluvial deposits in the floodplains of Río Grande de Loíza, Río Piedras and Río Bayamón. Both areas are exposed to a high ground shaking and ground failure hazard. Located in these zones are important lifelines such as the Bahía de Puerto Nuevo thermoelectric plant, transmission lines, electric energy substations, water treatment plants, pumping stations, water mains, docks, airport facilities and vital expressways that link the capital with the rest of the Island.

Moderate to high liquefaction potential is present in the alluvial deposits of the floodplains of Río Grande de Loíza, Río Piedras and Río Bayamón and in the loose saturated sands near the coasts. Located in these zones are a large number of high rises and housing units, airport facilities, roads, water mains, pumping stations, and other lifelines.

Moderate to high landslide potential is present in the southern portion of the study area. Landslide damage potential in this zone varies with the antecedent moisture conditions of the hillslopes. An earthquake after a protracted period of rains can severely affect lifelines specially roads, where slope excavations, overloading, removal of lateral support, and other similar situations cause potentially unstable slope conditions.

It is recommended that earthquake mitigation strategies focus on high risk zones on the artificial fills surrounding the Bay and lagoons, the floodplains of Río Grande de Loíza, Río Bayamón and Río Piedras, and localized zones near the coast characterized by a moderate to high liquefaction

potential. Site specific geotechnical studies should be conducted in areas of greater risk in order to assess the specific vulnerability.

Puerto Rico must prepare for a big earthquake. A significant portion of the residential, commercial and transportation infrastructure are located in hazardous zones. Today the potential damage that will be created by a large earthquake event is greater than ever before. This study is a step in the efforts to prepare the Island for such an event.

Bibliography

- A. Der Kiureghian and
H.S. Ang 1975, A Line Source Model For Seismic
Risk Analysis. Civil Engineering
Studies S.R. S. No. 419
- Beinroth F. H. 1969, An outline of the Geology of
Puerto Rico - Bulletin 213
Agricultural Experimental Station
University of Puerto Rico, Mayaguez
Campus
- Brazee R.J. 1980, Reevaluation of Modified Mercalli
Intensity Scale for Earthquakes Using
Distance as Determinant
NUREG/CR-1804 NOAA Tech. Memo. EDIS NGSDC-4
- Briggs, R.P. and
Akers, J.P. 1965, Hydrogeologic Map of Puerto Rico and
Adjacent Areas. Hydrologic Investigations
Atlas HA-197. U.S. Geological Survey
Washington D.C.
- Briggs, Reginald P. 1964, Provisional Geologic Map of Puerto Rico
and Adjacent Areas: U.S. Geological Survey
Miscellaneous Geologic Investigations Map I-392
- Brown and Kockelman 1983, Geologic Principles for Prudent Land use.
G.S.P.P. 946
- Capacete J.L. 1977, Comportamiento de los Suelos Durante los
Terremotos- Revista del Colegio de Ingenieros
Arquitectos y Agrimensores - April-May-June
- Capacete J.L. 1972, Earthquake Damage Potential
Revista del Colegio de Ingenieros Arquitectos
y Agrimensores de Puerto Rico
Jan- Feb- March
- Capacete J.L. 1971, Seismic Design of Structures in Puerto
Rico. Revista del Colegio de Ingenieros,
Arquitectos y Agrimensores de Puerto Rico
Vol. XXI Jan- Feb - March Num. 1
- Case, J.E. and
Holcomb, T.L. 1980, Geologic Tectonic Map of the Caribbean
Region - U.S. Geological Survey - Misc. Invest.
Ser. Map, I - 1100
- Dart, R.L., Tarr A.C.,
Carver D.L., Wharton M.K. 1977, Puerto Rico Seismic Network Data Report
of Earthquakes Located by the Programs HYP071
and Hypoellipse July 1, 1975- December 31, 1977
Geological Survey Circular 821

- Deere Don E. 1955, Engineering properties of the Pleistocene and recent Sediments of the San Juan Bay Area, Puerto Rico Thesis-University of Illinois - Urbana
- EERI 1983, Evaluation of Seismic Hazards, and Decisionmaking in Earthquake Resistant Design Seminar Annual Meeting of Earthquake Engineering Research- Institute - Reno Nevada
- Ferritto J.M. 1982, Evaluation of Earthquake - Induced Ground Failure A Draft Technical Report of Subcommittee 7, "Evaluation of Site Hazards" - Open File Report 82-880
- Gauchat U.P. and Schodek D.L. 1984, Patterns of Housing Type and Density: A Basis For Analyzing Earthquake Resistance - Department of Architecture, Graduate School of Design Harvard University - Cambridge, Ma.
- Glover L. III 1971, Geology of the Coamo Area P.R., and its Relation to the Volcanic Arc-Trench Association G.S.P.P. 636
- Hays W.W. 1984, Evaluation of the Earthquake Ground-Shaking Hazard A workshop on "Geologic Hazards in Puerto Rico" April 4-6 San Juan, P.R. - Open File Report 84-761
- Hays W.W. 1981, Facing Geologic and Hydrologic Hazards - Earth-Science Considerations Geological Survey Professional Paper 1240-B U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Hays W.W. 1980, Procedures For Estimating Earthquake Ground Motions Geological Survey Professional Paper 1114 p - 1-69
- Hildebrand F.A. 1961, Hydrothermally Altered Rock in Eastern, Puerto Rico U.S.G.S. pp. 424-B p.B-219 - p.221
- Keefer D.K. 1984, Landslides Caused by Earthquakes Geological Society of America Bulletin, V.95, p. 406-421
- Kaye C.A. 1959, Shoreline Features and Quaternary Shoreline Changes Puerto Rico - Geological Survey Professional Paper 317-B
- Kaye C. A. 1959, Geology of the San Juan Metropolitan Area Puerto Rico Geological Survey Professional Paper 317-A
- Lee, K.L. and Albasia, A. 1974, Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands, Journal of the Geotechnical Division, ASCE, No. GT4 Apr. 1974
- Lennis Berlin G. 1980, Earthquakes and the Urban Environment Vol. I,II,III C.R.C. Press Inc.
- Mailfait T.B. 1972, Circum-Caribbean Tectonic and Igneous Activity and the Evolution of the Caribbean Plate. G.S. Am. Bull V. 83 p. 251-272
- Dinkelman M.G.

- McCann W.R. 1984, On the Earthquake Hazard of Puerto Rico and the Virgin Islands. A Workshop on "Geologic Hazards in Puerto Rico. April 4-6, 1984 San Juan Puerto Rico Open File Report 84-761 - U.S. Geological Survey
- McCann W.R. and Sykes, L.R. 1984, Subduction of Aseismic Ridges Beneath the Caribbean Plate: Implications for the Tectonics and Seismic Potential of Northeastern Caribbean. Journal of Geophysical Research, in press.
- Mitchell James K. 1983, Multiple Hazard Mitigation Report of a Workshop on Mitigation Strategies for Communities Prone to Multiple Natural Hazards - NRC - NAS
- Molinelli José A. 1984, Geomorphic Processes Along the Autopista Las Americas in North Central Puerto Rico: Implications for Highway Construction, Design, and Maintenance- University Microfilms International - Ann Arbor, Michigan
- Molnar, P. and Sykes, L.R. 1969, Tectonics of the Caribbean and Middle America Regions from Focal Mechanisms and Seismicity, Geol. Soc. of A.Bul. 80,pp. 1639-1684
- Monroe Watson H. 1980, Some tropical Landforms of Puerto Rico, Geological Survey Professional Paper - 1159 USGPO, Washington
- Monroe, W.H. 1980, Geology of the Middle Tertiary Formations of Puerto Rico Geological Survey Professional paper 953 U.S.G.P.O. Washington
- Monroe W.H. 1979, Map Showing Landslides and Areas of Suceptibility to Landsliding in Puerto Rico Miscellaneous Investigations Series Map I-1148
- Monroe W.H. 1977, Geologic Map of the Carolina Quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map I - 1054 - Scale 1:20,000
- Monroe W.H. 1976, The Karst Landforms of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Professional Paper 899, 69. p.
- Monroe W.H. 1973, Geologic Map of the Bayamón Quadrangle, Puerto Rico Miscellaneous Geologic Investigations. Map I-751 U.S. Geological Survey
- Monroe W.H. 1973, Geologic Map of the Bayamón Quadrangle, Puerto Rico U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map I-751, Scale 1:20, 000

- Monroe W.H. 1964, Large Retrogressive Landslides in North-Central Puerto Rico: U.S. Geological Survey - Profesional Paper 501-B, p. B123-B125
- Munich RE 1973, Managua, A Study of the 1972 Earthquake Munchener Ruckversicherungs - Gesellschaft Munich Re
- NORCO-NP-ER 1972, North Coast Nuclear Plant No. 1 PRWRA Environmental Report - U.S. Atomic Energy Commission Docket No. 50-376 P.9-C-13 - 9.C-23
- Pain C.F. 1972, Characteristics and geographic effects of Earthquake initiated landslides in the Adelbert Range, Papua -New Guinea - Eng. Geol., 6:261-274
- Pease, M.H., and Monroe, W.H. 1977, Geologic Map of the San Juan Quadrangle: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map I-1010 Scale 1:20,000
- Petrouski Jakin T. 1978, Seismic Microzoning and Related Problems - p.48-65 In The Assesment and Mitigation of Earthquake Risk UNESCO
- Rice 1983, Earthquake Risk Analysis for Land Use Planning: Draft Technical Report - Houston: Rice Center, Inc.
- Reid, H. and Taber, S. 1920, The Virgin Islands Earthquakes of 1867-1868, Bull. of the Seism. Soc. of Am., 10, 9-30
- Reid, H.F. and Taber 1918, The Puerto Rico Earthquake of 1918, with Descriptions of Earlier Earthquakes: Report of the Earthquake Investigation Comission, U.S. G.P.O. Washington, D.C. 74 p.
- Rodríguez L. 1984, How Can Better Earthquake Resistant Design of structures and lifelines Reduce losses From Damaging earthquakes. pag. 122
A workshop on Geologic Hazard in Puerto Rico - April 4-6, 1984 - Open File Report 84-761
- Sauter, F. 1979, Damage Predictions from Earthquake Insurance, Proceedings of the 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Stanford, California, pp. 99-108
- Sauter, F., and H.C. Shah 1978, Estudio de Seguro Contra Terremoto. A Report Prepared for Instituto Nacional de Seguros
- Schell, B.A., and Tarr, A.C., 1978, Plate Tectonics of the Northeastern Caribbean Sea Region: Geologic Mijnbouw, V. 57, p. 319-324

Seed and Idriss	1971, Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. Vol. 97 SMG,
Seed H. B.	1979, Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation For Level Ground During Earthquakes Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE, 105 GT2 pag. 201-251
Seguinot J.B.	1983, Coastal Modification and Land Transformation of the San Juan Bay Area: Puerto Rico University Microfilms - Ann Arbor Michigan
Simonett D.S.	1967, Landslide Distribution and Earthquakes in the Bewani and Torricelli Mountains New Guinea. Statistical Analysis p. 64-84 Land Form Studies from Australia and New Guinea. Ed. by Jennings J.N. and Mabbut J. A. Australian National University Press - Canberra
Slemmons B.D.	1983, Fault Activity and Maximum Earthquakes EERI Seminar Evaluation of Seismic Hazards and Decisionmaking in Earthquake Resistant Design.
Slemmons, D.B.	1982, Determination of Design Earthquake Magnitudes for Microzonation Proceedings of the Third International Earthquake Microzonation Conference, Volume I of III, p. 119 - 130.
Steinbrugge	1962, Earthquake Hazard in Puerto Rico From the Insurance Standpoint - Puerto Rico Inspection and Rating Bureau, San Juan, P.R.
Sykes, L., McCann W.R., Kafka A.	1982, Motion of the Caribbean Plate During Last Seven Millions Years and Implication For Earlier Cenozoic Movements, Journal of Geophysical Research, 87, 10656 - 10676
Sykes, L.R. and Ewing, M.	1965, The Seismicity of The Caribbean Region, Journal of Geophysical Research. , 70, 5065-5074
Tera-Corp	1980, Seismic Hazard Analysis A methodology For the Eastern United States Tera Corporation NUREF/ CR-1582 Vol-2
Undro	1977, Análisis de Vulnerabilidad Combinada Metodología y Estudio de la Zona Metropolitana de Manila - Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Caso de Desastres Ginebra

UNPD

1982, Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region Project Executed by UNESCO in Association with UNDRO. Vol-A- Seismology, Seismotectonics, Seismic Hazard and Earthquake Prediction Vol-B- Vulnerability and Seismic Hazard

Vit Karnik and
S.T. Algermissen

Seismic Zoning The Assessment and
Mitigation of Earthquake Risk - p-11-47 UNESCO

Youd L.T. and
Perkins D.M.

1978, Mapping Liquefaction - Induced Ground
Failure Potential Journal of the Geotechnical
Engineering Division April 1979, GT4 p.433-446

MEMORIAS

FORO SOBRE LA VULNERABILIDAD
SISMICA DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN JUAN

Dr. Rafael Jiménez
Organizador

Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Puerto Rico
Mayagüez, Puerto Rico

4 de diciembre de 1985

INTRODUCCION

El Departamento de Ingeniería Civil con el auspicio del Departamento de Recursos Naturales celebró un foro sobre la vulnerabilidad sísmica del área metropolitana de San Juan, con el objetivo primordial de examinar la información recientemente presentada sobre la vulnerabilidad sísmica del área para analizar las conclusiones obtenidas hasta el momento y poder hacer recomendaciones pertinentes para el futuro. En primer lugar, se presentará el estudio de la vulnerabilidad sísmica para el área de San Juan preparado por el doctor José Molinelli, para el Depto. de Recursos Naturales, con el ánimo de identificar las áreas más susceptibles y de mayor vulnerabilidad del área metropolitana en términos de los daños inducidos por fenómenos geológicos. El segundo objetivo es presentar resultados principales del estudio de licuación que se han estado realizando en el RUM específicamente en el Depto. de Geología del RUM por el Prof. Alex Soto para poder comparar los resultados de ambos estudios.

En tercer lugar los estudios existentes sobre la vulnerabilidad sísmica de San Juan deben de calibrarse de tal forma que las conclusiones primordiales de los mismos respondan a las realidades de Puerto Rico. Esta calibración debe de hacerse por lo menos en las siguientes áreas: a) Selección de intervalos de recurrencia para establecer los mapas de zonificación sísmica y para el diseño sísmico de estructuras. b) Selección del evento crítico para la determinación de la vulnerabilidad sísmica en base al terremoto más probable o al terremoto máximo. c) Determinación de los parámetros sísmicos inducidos por el terremoto seleccionado en base a criterios objetivos tales como aceleración, velocidad o desplazamiento, o en base a criterios subjetivos tales como la escala modificada Mercalli. d) Determinar el potencial de daños geológicos que puede inducir el terremoto esperado en términos de

deslizamientos de masas, licuación de arenas y la magnitud de la amplificación de movimientos sísmicos en la superficie de depósitos profundos de baja consistencia.

Debemos además, identificar los trabajos adicionales necesarios para poder seguir obteniendo información en cuanto a la susceptibilidad sísmica del área metropolitana de San Juan y finalmente debemos de finalizar el foro con unas recomendaciones o conclusiones que sean útiles para las agencias que tienen la responsabilidad de mitigar los efectos devastadores de un evento sísmico.

PLATE TECTONICS IN THE VICINITY OF PUERTO RICO - IMPLICATIONS FOR
THE SEISMIC VULNERABILITY OF SAN JUAN

by

Dr. James Joyce
Department of Geology
University of Puerto Rico
Mayaguez, P.R. 00708

A. Introduction

The objective of this paper is to describe the plate tectonic setting and seismic activity in the vicinity of Puerto Rico and to discuss their effect on the seismic vulnerability of San Juan. The present work is based on several recent publications which have dealt with Caribbean tectonics and seismicity. A list of these publications and others related to the problem are included in the bibliography. Readers should consult papers by Sykes et al. (1982) and McCann and Sykes (1984) for complete description of the seismicity and submarine features of the Puerto Rico Trench discussed in the present study. The purpose of the present study is to stimulate more detailed and rigorous research into the seismic potential of the Puerto Rico Trench.

B. Plate Tectonics and Seismicity

Earthquakes are produced by the release of elastic strain energy during slip along faults. The vast bulk of seismic activity or earthquakes around the world are confined to boundary zones between lithospheric plates (the rigid, outer 100 km of the earth). Plate boundaries can be divided into four types based on the sense of motion between the two adjacent plates.

1. Divergent boundaries occur where relative plate motions are at a high angle and away from the boundary. This type of boundary develops spreading ridges and forms oceanic crust.
2. Convergent boundaries occur where relative plate motions are at a high angle and towards the boundary. This type of boundary forms subduction zones which are characterized by inclined zones of increasing earthquake focal depths. Oceanic trenches typically occur at the shallow end of the seismic zones and volcanism is found where the seismic zone reaches about 100 km. The inclined seismic zones are produced by underthrusting and sinking of oceanic lithosphere.
3. Strike slip boundaries occur where relative plate motions are opposed and parallel to the boundary. These boundaries are characterized by one or more vertical faults with dominantly horizontal displacement such as the San Andreas Fault of California.
4. Oblique convergent boundaries occur where relative motions are at low to moderate angles and towards the boundary. These boundaries are mixtures of type 2 and 3.

Seismic activity occurs at all plate boundaries both as a product of interplate slip and intraplate deformation. Both convergent and strike

slip boundaries produce large magnitude earthquakes and have been responsible for death and destruction in many parts of the world.

C. The Northern Caribbean Plate Boundary

Puerto Rico and the Greater Antilles lie along the seismically active plate boundary between the North American and Caribbean Plates (Sykes et al., 1982). The plate boundary is located in the Puerto Rico Trench north of Puerto Rico, the Virgin Island and the northern Lesser Antilles. West of Hispaniola the boundary is marked by the Cayman Trough. The plate boundary zone passes through Hispaniola which results in complex seismicity within the island.

East of western Puerto Rico the location of earthquake focal depths defines a southward inclined seismic zone of increasing focal depths which is continuous with the Lesser Antilles Subduction Zone (Schell and Tarr, 1979; Sykes et al., 1982). The inclined seismic zone terminates below western Puerto Rico in an area of limited seismic activity and no deep earthquakes (McCann and Sykes, 1984; Ascencio, 1980). In eastern Hispaniola focal depth studies define two zones of underthrusting located near the north and east coasts, and the Cordillera Central. The Hispaniola underthrusting zones trend northwest as opposed to the Puerto Rico - Virgin Island "subduction zone" which trends east-west (McCann and Sykes, 1984, Mann et al., 1984).

The exact nature of interplate motion along the boundary is controversial. The controversy stems from two different models of the relative

motion between the North American and Caribbean Plates. Minster and Jordan (1978) suggest an eastward, 2cm/yr relative motion between the plates. The 2cm/yr rate is supported by the same rate of spreading at the Cayman Ridge for the past 2.4 million years (MacDonald and Holcombe, 1978). A relative motion N70E at 4cm/yr was postulated by Sykes et al. (1982). An essential difference in applying the two models is the nature of interplate motion at the Puerto Rico Trench. If relative motion is eastward, the trench is a left lateral strike slip feature with a component of extension. However, if relative motion is N70E, then the trench would be a zone of oblique convergence. The fact that the N70E relative motion requires some convergence across the Cayman Trough weakens this model as the Cayman Trough is an extensional feature (Mann et al., 1983). The study of crustal deformation around the Caribbean Plate supports the model of eastward relative motion and a strike slip boundary at the Puerto Rico Trench (Mann and Burke, 1984). Figures in Schell and Tarr (1979) describe large scale normal faulting in the Puerto Rico Trench supporting extension rather than convergence in the trench. Seismic studies by Stein et al. (1982, 1983) of the Lesser Antilles Subduction Zone support the slower 2cm/yr rate of relative motion.

D. Plate Motion in the Puerto Rico Trench and the Seismic Vulnerability of San Juan

McCann and Sykes (1984) published a seismic potential map which suggests a high potential for an 8-8.25 (R) earthquake in the Puerto Rico Trench north of San Juan. This prediction is based on the occurrence of a

VIII (M) earthquake in 1787 which caused damage over much of the north and west coasts of Puerto Rico (Cambell, 1977) and the Sykes et al. (1982) tectonic model. Although Cambell (1972) suggested the location for the VIII (M) 1787 earthquake lie in the Mona Passage or eastern Hispaniola, McCann and Sykes (1984) estimated a location in the Puerto Rico Trench in the seismic gap area north of Puerto Rico (Murphy and McCann, 1979). They further suggest the earthquake was produced by interplate slip along a thrust fault during oblique convergence and attained a magnitude of 8-8.25 (R).

There are several reasons to question the predicted magnitude, location and recurrence interval of the 1787 earthquake. First, because the data source for the 1787 earthquake is based on historical description the true location and magnitude are uncertain. Second, focal mechanism solutions which suggest interplate thrust faulting are located in northwest trending seismic zones and structural highs such as the Main Ridge of the Puerto Rico Trench, eastern Hispaniola and the western margin of the Puerto Rico Trench, and the Cordillera Central of the Dominican Republic. Structures with northwest orientation in left lateral strike slip zones are under secondary compression and thus produce intraplate thrust faults. Secondary intraplate thrust zones are commonly very active seismically, which may explain most of the seismic activity in the area around the Puerto Rico Trench. Therefore, there is little evidence for intraplate thrust faulting in the Puerto Rico Trench. Third, relative plate motion may be half the rate assumed in the McCann and Sykes (1984) prediction.

A reduction in plate motion could substantially increase the recurrence interval of major earthquakes. Fourth, flat areas of the Puerto Rico Trench to the east and west of the Main Ridge show little seismic activity of any magnitude (McCann and Sykes, 1984; Murphy and McCann, 1979). and are considered seismic gap areas. These gaps could be areas dominated by aseismic slip. Low rates of relative motion and subduction of old oceanic crust may increase the amount of aseismic slip (McCann and Sykes, 1984). Both low rates of relative motion and sinking or subduction of old ocean lithosphere characterize the Puerto Rico Trench in these seismic gaps.

The point of the previous discussion is that even if the 1787 earthquake was located in the seismic gap north of San Juan and attained a magnitude of 8-8.25 (R), its recurrence interval may be much greater than the predicted 200 years. Therefore planning and designing based on a 200 year recurring 8-8.25 (R) earthquake may be too conservative and not practical. New seismic potential models should be produced based on eastward relative motion between the plates and lower rates of 2cm/yr. Changing these factors may decrease the magnitude and increase the recurrence interval of the largest predicted earthquakes to effect San Juan. An earthquake of lower magnitude may be a more practical design earthquake for the San Juan area. In conclusion the conservative seismic potential model of McCann and Sykes (1984) should be considered a preliminary estimate. More models should be researched before choosing a design earthquake for earthquake planning in the San Juan area.

References

- Alonso-Harris, R., Krieg, E.A. and Meyerhoff, A.A., 1983, Post-Early Pliocene age of the Puerto Rico Trench. Abstracts: 10th Caribbean Geological Conference, Cartagena, Colombia.
- Ascencio, E., 1980, Western Puerto Rico Seismicity. U.S. Geological Survey, open file report #80-192.
- Bouysse, P., Andreieff, P. and Westercamp, D., 1980, Evolution of the Lesser Antilles island arc, new data from submarine geology. Transactions of the 9th Caribbean Geological Conference, Santo Domingo, D.R.
- Bowin, C., 1976, Caribbean Gravity Field and Plate Tectonics. Special Paper 169, The Geological Society of America, pp. 79.
- Bracey, D.R. and Vogt, P.R., 1970, Plate tectonics in the Hispaniola area. Geological Society of America Bulletin, v. 81, p. 2855-2860.
- Bunce, E.T., Phillips, J.D. and Chase, R.L., 1974, Geophysical study of Antilles Outer Ridge, Puerto Rico Trench, and northeast margin of Caribbean Sea. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 58: 106-123.
- Burke, K., Grippi, J. and Sengor, A.M., 1980, Neogene structures in Jamaican and the tectonic style of the northern Caribbean plate boundary zone. Journal of Geology, v. 88, p. 375-386.
- Burke, K., Fox, P.J. and Sengor, A.M., 1978, Bouyant ocean floor and the evolution of the Caribbean. Journal of Geophysical Research, v. 83, p. 3949-3954.

- Case, J.E. and Holcombe, T.L., 1980, Geologic Tectonic map of the Caribbean region. U.S. Geological Survey Misc. Investigation Series, Map I-1100.
- Cambell, J.R., 1972, Earthquake History of Puerto Rico - Catalog of Felt Earthquakes 1508-1971, Amendment #17 P.S.R.A. Aquirre Nuclear Power Plant - Puerto Rico Water Resources Authority, p. 2.50, 30 - 137
- Case, J.E., 1975, Geophysical Studies in the Caribbean Sea. In: A.E.M. Navin and F.G. Stehli, Ocean Basin and Margins, 3, The Caribbean and Gulf of Mexico Plenum, New York, p. 107-180.
- Fox, P.J. and Heezen, B., 1975, Geology of the Caribbean Crust. In: A.E.M. Nairn and F.G. Stehli (editors), Ocean Basins and Margins 3, The Caribbean and Gulf of Mexico, Plenum, New York, N.Y., p. 421-464.
- Ladd, J.W., Shih, T.-C. and Tsai, C.J., 1981, Cenozoic tectonics of central Hispaniola and adjacent Caribbean Sea. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 65, p. 466-489.
- Ladd, J.W. and Watkins, J.S., 1978, Active margin structures within the north slope of the Muertos Trench. Geologie en Mijnbouw, v. 57, #2, p. 255-260.
- Ladd, J.W., 1976, Relative motion of South America with respect to North America and Caribbean Tectonics. Geological Society of America Bulletin, v. 87, p. 969-976.
- MacDonald, K.C. and Holcombe, T.L., 1978, Inversion of magnetic anomalies and sea floor spreading in the Cayman Trough. Earth and Planetary Science Letters, 40, p. 407-414.

- Mann, P. and Burke, K., 1984, Neotectonics of the Caribbean. Reviews of Geophysics and Space Physics, v. 22, #4, p. 309-362.
- Mann, P., Burke, K. and Matumoto, T., 1983, Neotectonics of Hispaniola: plate motion, sedimentation and seismicity at a restraining bend. Earth and Planetary Sciences Letters, v. 70, p. 311-324.
- Marlow, M.S., Garrison, L.E., Martin, R.G., Trumbull, J.V.A. and Cooper, A.K., 1974, Tectonic transition zone in the northeastern Caribbean Journal Res. U.S. Geological Survey, v. 2, p. 289-302.
- Mattson, P.H., 1979, Subduction, bouyant braking, flipping and strike-slip faulting in the northern Caribbean. Journal of Geology, v. 87, p. 293-304.
- Molnar, P. and Sykes, L., 1969, Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity. Geological Socieity of America Bulletin, v. 80, p. 1639-1684.
- Murphy, A.J. and McCann, W.R., 1979, Preliminary Results from a new Seismic Network in the Northeastern Caribbean. Bulletin of the Seismological Society of America, v. 69, #5, p. 1497-1513.
- Nemac, M.C., 1980, A two phase model for the tectonic evolution of the Caribbean. Transactions: 9th Caribbean Geological Conference, Santo Domingo, p. 23-34.
- Perfit, M.R., Heezen, B.C., Rawson, M., and Donnelly, T.W., 1980, Chemistry, origin and tectonic significance of metamorphic rocks from the Puerto Rico Trench. Marine Geology, v. 34, p. 124-156.

- Pindell, J. and Dewey, J.F., 1982, Permo-Triassic Reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico/Caribbean Region. *Tectonics*, v. 1, #2, p. 179-211.
- Schell, B.A. and Tarr, A.C., 1978, Plate tectonics of the Northeastern Caribbean Sea Region. In: H.J. MacGillavry and D.J. Beets (eds.): The 8th Caribbean Geological Conference (Willemstad, 1977). *Geol. Mijnbouw*, 57, p. 319-324.
- Stein, S., Engelin, J.E., Wiens, D.A., Speed, R.C. and Fujita, K., 1983, Slow subduction of old lithosphere in the Lesser Antilles. *Tectonophysics*, v. 99, p. 139-148.
- Stein, S. Engelin, J.F., Wiens, D.A., Speed, R.C. and Fujita, K., 1982, Subduction seismicity and tectonics in the Lesser Antilles arc. *Journal of Geophysical Research*, v. 87, #10, p. 8642-8664.
- Sykes, L.R., McCann, W.R. and Kafka, A.L., 1982, Motion of the Caribbean Plate during the last 7 million years and implications for earlier Cenozoic movements. *Journal of Geophysical Research*, v. 87, #B13, p. 10,656-10,676.
- Uchupi, E., Milliman, J.D., Luyendyk, B.P. Bowin, C.O. and Emery, K.O., 1971, Structure and Origin of the southeastern Bahamas. *American Association of Petroleum Geologist*, v. 55, p. 687-704.
- Vogt, P.R., Lowrie, A., Bracey, D.R. and Hey, R.N., 1976, Subduction of aseismic oceanic ridges. Effect on shape, seismicity and other characteristics of consuming plate boundaries. *Special Paper of Geological Society of America*, v. 172, p. 1-59.

Plate Tectonics in the Vicinity of Puerto Rico -
Implication for the Seismic Vulnerability of S.J.
page 11

Walper, J.L., 1980, Geologic Evolution of the Greater Antilles. Transactions: 9th Caribbean Geological Conference, Santo Domingo, v. 1, p. 13-17.

COMPARACION DEL ESTUDIO DE VULNERABILIDAD
SISMICA DE SAN JUAN CON LOS ESTUDIOS DE
SELECCION DE LOS NIVELES DE FUERZA PARA
DISEÑO SISMORESISTENTE DE PUERTO RICO

by

Samuel I. Díaz Santiago, Ph.D.
Presidente, Comisión de Terremotos, CIAPR

INTRODUCCION

Una vez se define el cuadro tectónico de una región, se identifican, sísmicamente hablando, sus zonas activas y potencialmente activas, se establece el historial sísmico a tono con las zonas anteriormente mencionadas y se evalúan las características de atenuación de movimientos de la zona, es posible hacer una estimación de los niveles de movimiento anticipados y las características principales de los mismos. Dependiendo del propósito del estudio y del grado de detalle necesario es posible que las características geológicas de la región o área de estudio sean evaluadas para determinar de que forma podrían afectar los niveles de movimiento y sus características principales.

En estudios tendientes a determinar criterios de diseño sísmoresistente no es lo usual el que se realice un estudio detallado de la geología regional, excepción hecha de casos como el de México donde se han identificado zonas que cambian drásticamente los patrones de movimiento normalmente anticipados. El potencial de amplificación de los movimientos a consecuencia de los suelos se toma en consideración mediante la inclusión de un factor dentro de la fórmula que determina el cortante basal de diseño.

La selección de los niveles de fuerza para el diseño sísmoresistente de estructuras en una región se basa en dos criterios básicos, primero, el que la estructura de-

berá resistir los eventos que produzcan intensidades menores y más frecuentes sin que la misma sufra daños permanentes y, segundo, que de ocurrir el evento de mayor intensidad probable durante su vida útil, la estructura deberá resistir el mismo sin colapsarse, aún cuando sufra daños permanentes de consideración. En países en desarrollo, la aplicación de estos principios en la selección de los niveles de diseño sismoresistente se dificulta debido a las limitaciones en el dinero disponible para inversión en la construcción de estructuras. Si las fuerzas seleccionadas resultan ser excesivamente altas con relación al riesgo real, la inversión adicional a corto plazo sobrepasará significativamente los beneficios de una reducción en los costos de reparación de daños a largo plazo. Por el contrario, si se escogen niveles de fuerza demasiados bajos, sucedería lo inverso. Por lo tanto, es necesario que el nivel de fuerzas seleccionado establezca un balance entre la inversión inicial y los costos de reparación a largo plazo.

Un estudio de vulnerabilidad sísmica, como el realizado por el doctor Molinelly (1), partiendo de la misma información que los estudios para la implementación de un código sismoresistente, procede a estudiar detalladamente la geología de la localidad estudiada, determina los riesgos geológicos potenciales y, a partir de estos, estima el daño probable en las diferentes zonas.

Aún cuando ambos estudios tienen diferencias de enfoque, existen tangencias considerables en lo que respecta a la información básica que permite establecer la in-

tensidad de los movimientos en roca o terrenos competentes. Es por tal motivo que es conveniente analizar críticamente esta data para asegurar que, independientemente de los propósitos ulteriores, los niveles de estos movimientos sean similares.

SISMICIDAD Y TECTONISMO

La localización de los epicentros de los terremotos que afectaron la Isla antes del terremoto de 1918 no es confiable. La información de la actividad sísmica antes de esta fecha se conoce por el relato de los hechos como aparecen en algunos archivos históricos.

Los dos terremotos de importancia que han afectado a Puerto Rico en tiempos históricos son el de Islas Vírgenes de 1867 y el de Puerto Rico de 1918. Un tercer evento, acontecido en 1787, ha ganado prominencia recientemente, a raíz de estudios realizados por McCann (2) con respecto al tectonismo y sismicidad regional. Dicho evento ha sido localizado por McCann en la zona de la Trinchera de Puerto Rico y estimado como de magnitud 8-8.25 Richter, de acuerdo con las características tectónicas de la región y del daño informado en registros históricos. La magnitud informada de este evento debe ser objeto de un escrutinio minucioso, antes de ser aceptada como buena, pues existe evidencia al efecto de que ciertas estructuras históricas del Viejo San Juan no fueron afectadas significativamente por el mismo.

El terremoto del 18 de noviembre de 1867 esta asociado con la falla de Anegada al este de la Isla, y se le ha asignado una magnitud de 7.5 en la escala de Richter (3).

Sin embargo, es bueno aclarar que un estimado de magnitud basado en datos sobre intensidad puede llevar a conclusiones erróneas. Reid y Taber(4), basados en el centroide de las curvas isosísmicas de intensidad, localizan el epicentro de este terremoto cerca del límite norte de la trinchera de Anegada, entre St. Thomas y St. Croix. Este terremoto fue sentido fuertemente en toda la Isla. Causó graves daños a iglesias en el este de la Isla, el colapso de chimeneas en Ponce y daños a iglesias y a la Fortaleza en San Juan.

El terremoto del 11 de octubre de 1918 fue registrado por instrumentos, y el epicentro fue localizado en el Canal de La Mona, en la latitud 18.5°N , longitud 67.3°O . La magnitud fue determinada, a base de las lecturas instrumentales, en 7.5 de la escala de Richter. Este evento es considerado como el mas severo que ha afectado la isla en el pasado conocido. Se sintió fuertemente en toda la Isla, en especial en el área oeste, causando la muerte a unas 114 personas y daños estimados en \$4 millones (dólares de 1918). Se originó un tsunami.

Los terremotos que han ocurrido en el área de Puerto Rico desde el terremoto de 1918 al presente han sido registrados en la Isla y existen sismogramas de todos ellos. Entre los más importantes eventos registrados están el terremoto de 1943, con sus terremotos secundarios, y el de 1946, con sus terremotos secundarios. Estos terremotos de magnitud de 7.8 y 8.1, respectivamente, fueron localizados en las coordenadas siguientes: 1943, latitud 19.25°N , longitud 67.5°O y 1946, latitud 19.25°N y longitud 69.0°O . El terremoto secundario del terremoto de 1946 ocurrió 4 días

más tarde en la latitud 19.5°N y longitud 69.5°O , y registró una magnitud de 7.6 en la escala de Richter. Estos eventos afectaron severamente a la Republica Dominicana. Sin embargo, en Puerto Rico aunque fueron sentidos no causaron daños de consideración.

La historia sísmica de Puerto Rico indica que las tres fuentes de actividad sísmica están localizadas en el pasaje de La Mona (oeste), la trinchera de Puerto Rico (norte), cerca de la cordillera submarina principal y la trinchera de Anegada (este) y la probabilidad es que estas localizaciones continuarán activas en el futuro sísmico de la Isla.

La actividad sísmica de un área depende de las características de las formaciones geológicas del área y para determinar la recurrencia de los terremotos es necesario identificar el mecanismo del terremoto que indudablemente está relacionado con las características del área. En el caso de Puerto Rico, se conoce que la Isla está localizada al sur de la trinchera de Puerto Rico que forma parte del borde norte de la placa tectónica del Caribe.

De acuerdo con McCann, el cañon de la Mona y la cordillera submarina principal constituyendos condiciones tectónicamente anómalas que sirven de concentradores de esfuerzos, dando origen a terremotos de magnitud superior a $M=7$ con cierta frecuencia. La zona de la Trinchera, entre estos dos extremos, ha estado mucho menos activa en el pasado conocido, pero es probable que haya estado almacenando energía durante este periodo y que sea capaz de producir terremotos de magnitud 8-8.25, si se delimita su largo potencial de rompimiento entre las dos irregularidades

anteriormente mencionadas. Eventos de esta magnitud podrían ocurrir de acuerdo con McCann, con una recurrencia de no menos de 200 años. Esta hipótesis se basa nuevamente en que el evento 1787 haya tenido una magnitud de 8-8.25, algo que necesita mayor corroboración.

Aún cuando el tiempo de recurrencia de los terremotos va a depender de las características elásticas de la roca que compone la masa terrestre en las 430 millas de espesor cercanos a la superficie de la tierra y de la irregularidad de la superficie de contacto a ambos lados de las fallas activas, una determinación de este tipo está necesariamente limitada al estudio del historial sísmico conocido. La Figura 4 nos ofrece una determinación hecha por Der Kiureghian y Ang (5) para San Juan.

Otra característica importante a considerarse en el sentido de la sismicidad de un área y, específicamente, en el tema de los reglamentos de diseño y construcción es la atenuación de las aceleraciones producidas por las ondas sísmicas. La Figura 5 demuestra la atenuación que produjo el terremoto de 1918, según el estudio que hicieron en Puerto Rico en el 1919 los señores Reid y Taber, Sobre este tema se han investigado varios terremotos en distintas partes del planeta. En contraste con el caso de California, en Puerto Rico la atenuación de los movimientos sísmicos es más lenta. En ese sentido se puede decir que se asemeja más al caso del este de los Estados Unidos, donde los terremotos se sienten a mayor distancia.

INTENSIDAD DE LOS MOVIMIENTOS ANTICIPADOS

Tomando como base el historial sísmico de la Isla y las condiciones tectónicas de la región, Housner (6) realizó un estudio tendiente a establecer requisitos de diseño sismoresistente para Puerto Rico, compatibles éstos con el riesgo anticipado. Identificó una zona marina de aproximadamente 24,000 millas cuadradas (Figura 6), a la cual le asignó una sismicidad comparativa con la mayor actividad en el estado de California, E.U.A. Es importante notar que dentro de esta zona se incluye un área directamente al norte de la Isla. La inclusión de dicha área no se puede fundamentar en el historial sísmico conocido (figura 1). Sin embargo, según explica Housner, al representar esta región el borde entre dos placas tectónicas es esta condición suficiente para considerar la misma como una de gran potencial sísmico futuro.

En la zona marina anteriormente identificada, Housner estima que se puede esperar que ocurran dos eventos de magnitud iguales de mayores a 7.5 en la escala Richter cada 100 años. A juzgar por el historial anterior, eventos de esta magnitud podrían ocurrir a distancias tan cercanas como 25 millas al oeste, 40 millas al norte y 50 millas al este de la Isla (Figura 6).

En vista de que en la Isla no se han registrado instrumentalmente movimientos sísmicos destructivos, Housner optó por presumir que las características de los mismos serán similares a las de California. Usó como argumento el que los movimientos sísmicos registrados durante el terremoto de Managua, Nigaragua resultaron ser parecidos a los registrados en California bajo

condiciones análogas. Utilizando este criterio es posible seleccionar un evento de magnitud similar a la del terremoto anticipado en la región bajo estudio y cuyos movimientos hayan sido registrados instrumentalmente a distancias parecidas a las que se espera podría ocurrir el mismo. Se estudian los diferentes registros para determinar particularidades tales como aceleración máxima, las frecuencias predominantes y su duración. Aquellos registros que reflejen condiciones especiales se utilizan posteriormente para establecer espectros de la respuesta, a partir de los cuales es posible definir los niveles de fuerza a utilizarse en la reglamentación.

Housner identificó el terremoto de Tehachapi, California, ($M=7.7$) acontecido el 21 de julio de 1952, como el que mejor refleja las condiciones anticipadas para Puerto Rico. Dos de los registros de este sismo presentan características especiales, las cuales deben de ser tomadas en consideración al establecer las fuerzas de diseño. Uno de éstos es el registro de Taft, tomado a una distancia de 25 millas del epicentro del terremoto, el cual es representativo del tipo de movimientos anticipados para un evento que se centre a distancias cercanas de las zonas urbanas al oeste, norte y este de la Isla. El acelerógrama del componente S69E para el registro de Taft se ilustra en la Figura 7.

El segundo registro de interés es el que conoce como el del Hollywood Storage Basement. Este registro se tomó a 65 millas de distancia del origen. Sus movimientos son representativos de los que ocurrirían cuando el sismo se origina a distancias más lejanas. La Figura 7 ilustra el componente sur de dicho registro.

Los dos tipos de medición poseen particularidades que ameritan ser discutidas. El registro de Taft refleja un nivel de aceleración máxima de 0.18 g. contra 0.05 g. en el caso del Hollywood Storage Basement, o sea, una razón de aproximadamente 4 a 1. Sin embargo, debido a la predominancia de las frecuencias bajas en el registro de Hollywood su efecto en estructuras altas será más significativo, reduciendo esta razón de intensidad a sólo de 2 a 1. En adición, según se puede observar en la Figura 7, la duración de los movimientos en el caso de Hollywood es mucho mayor que en el de Taft. Por lo tanto, si una estructura entra en el régimen inelástico bajo el efecto de movimientos similares a los de Hollywood, la mayor duración de los movimientos se habrá de traducir en mayor daño. Para Puerto Rico, Housner ha recomendado la utilización de 1.5 veces los movimientos registrados en el Hollywood Storage Basement como representativos de los movimientos causados por un evento lejano. Dicho incremento se justifica debido a que la atenuación de movimientos de Puerto Rico es menor que en California.

El evento lejano, o sea, 1.5 x Hollywood Storage Basement, representa el tipo de movimientos con mayor probabilidad de ocurrir durante la vida útil de las estructuras. Las fuerzas de diseño a seleccionarse deberán ser lo suficientemente altas para garantizar que bajo el efecto de este evento frecuente, las deformaciones máximas producto de incursiones inelásticas, o sea, la ductilidad requerida, se pueda mantener a un nivel bajo. Para un nivel de ductibilidad bajo, los daños estructurales se reducen a un mínimo, lo cual es muy deseable pues evita la inversión en reparaciones frecuentes como resultado de eventos de este tipo.

Las probabilidades de ocurrencia del evento cercano, el registro de Taft, son mucho menores. Para esta condición extrema y poco probable es aconsejable, desde el punto de vista económico, el que se permita la movilización de un nivel de ductibilidad alto en las estructuras, aún cuando este enfoque implique el que ocurran daños considerables. Lo importante en estos casos es evitar el colapso de la estructura. De esta forma se puede lograr un mejor balance entre la inversión inicial atribuible al diseño sismoresistente y los costos de reparación a largo plazo.

Resulta interesante comparar los valores de aceleración máximos del terreno, propuestos por Housner para Puerto Rico, contra los que resultarían si se utiliza la fórmula propuesta por Donovan (7).

$$a = 1080e^{0.5M} (\Delta + 25)^{-1.32}$$

donde:

A es la aceleración máxima del terreno, en cm/sec^2

M es la magnitud del terremoto

Δ es la distancia desde el terremoto al punto de interés, en kms. Esta fórmula proyectó un valor idéntico al de una lectura tomada a 54 millas de distancia durante un sismo de $M = 4.9$, ocurrido en 1975, al norte de Puerto Rico (8). En la Figura 8 se puede observar cómo los valores propuestos por Housner son muy semejantes a los pronósticos de la fórmula de Donovan para un evento de $M = 7.7$ y las distancias propuestas.

Si se utiliza la fórmula arriba indicada para determinar el nivel de aceleración máxima esperado en San Juan, de postularse un

evento de magnitud 7.7 en la pared sur de la Trinchera de Puerto Rico, a unas 40 millas al norte de San Juan, se obtiene un valor de 0.14 g., como se ilustra en la Figura 9. Resulta conveniente comparar este resultado con el obtenido por otros estudios realizados para la Ciudad Capital, los cuales se ilustran en la Figura 9. Aún cuando los valores obtenidos en otros estudios tienden a estar un poco por encima de lo que arroja la fórmula, la variabilidad no es muy grande. Es interesante mencionar que en el estudio de Der Kiureguian y Ang al evaluarse la data histórica disponible para San Juan, arroja ésta intensidades Mercalli Modificada de entre VII y VIII, las cuales traducen en aceleraciones máximas del terreno de entre 0.07 g. a 0.15 g. para un período de recurrencia de 90 años. Además, hay que reconocer que Housner ha propuesto la utilización de un evento cercano con aceleración máxima de 0.18 g. para toda la Isla, lo cual concuerda muy bien con los valores máximos propuestos por los diferentes estudios para el área metropolitana de San Juan.

En su estudio de vulnerabilidad para el área de San Juan, Molinelly ha tomado en consideración data de historial sísmico y un cuadro tectónico esencialmente igual al descrito anteriormente, como base para su estudio. En base a su evaluación de la data histórica, Molinelly ha determinado que una intensidad Mercalli Modificada de VIII es representativa de lo que se debe esperar una vez cada 100 años. Si se utiliza la misma fórmula de Gutenberg & Richter que usaron Der Kiureguian y Ang, a saber,

$$a = 10 \left(\frac{I}{3} \right) - 0.5 \quad \text{cm/sec}^2$$

Esta intensidad correspondería a una aceleración de 0.15 g. , la cual compara favorablemente con los otros valores discutidos anteriormente para el área metropolitana de San Juan. Es importante mencionar que Molinelly utiliza intensidad Mercally Modificada, en lugar de aceleración máxima del terreno, como medida de la severidad de los movimientos anticipados, porque la metodología que se utiliza en su estudio para hacer un estimado de los daños para diferentes tipos de construcción está basada en intensidad MM.

La dificultad que presenta la utilización de escalas como la MM para establecer daños y, más aún, niveles de fuerza es que introducen un grado de subjetividad considerable. Basta comparar los rangos de aceleración máxima del terreno asociados con un grado de VIII en la escala MM utilizando la fórmula de Gutenberg y Richter para ver que existe un alto grado de variabilidad (entre 0.15 y 0.32 g.). Más impactante aún es comparar estos valores con los que pronostica Newmann (9), a saber, entre 0.30 y 0.60 g. Es por tal motivo que, siempre que sea posible, es preferible utilizar criterios de atenuación basados en la aceleración del terreno. En ese sentido, la fórmula de Donovan, que pronosticó exactamente un registro de aceleración para el área de Puerto Rico presenta una mejor alternativa, aún cuando será necesario seguir corroborando su efectividad en pronosticar los niveles de movimientos de eventos futuros.

En cuanto a la amplificación de los movimientos como consecuencia de la presencia de terrenos débiles y comprensibles debe mencionarse que existen métodos analíticos para estimar el nivel de amplificación a partir de los movimientos en roca y de las

características particulares del terreno. Un estudio de este tipo fue realizado por el Dr. Rafael Jiménez, et. al. (10) para el Valle del Río Grande de Arecibo, el cual alcanza una profundidad cerca de 300 pies de material compresible. Esta condición es representativa de la peor situación anticipada para el caso de Puerto Rico. En este caso se encontró que la amplificación máxima de los movimientos fue de un 40 por ciento, bajo los movimientos de 1.5 Hollywood Storage Basement para una capa de 300 pies de profundidad. Aún cuando es posible que de haberse hecho una determinación de amplificación para una capa de un espesor menor, que reflejara un período predominante cercano al segundo, se encontrará una amplificación un tanto mayor, se puede concluir que el rango de amplificación máximo debe estar cercano a 1.5. Es precisamente este el valor máximo que alcanza el factor de suelos, S , en la fórmula de cortante basal propuesta para el Código nuevo.

Al considerar el efecto del terreno en la amplificación de los movimientos Molinelly le ha asignado un aumento de un grado en la escala MM para los terrenos más débiles existentes en el área Metropolitana. Usando nuevamente la fórmula de Gutenberg & Richter, este valor se traduciría en una aceleración de 0.32g., o sea, una amplificación de 100% en cuanto aceleración se refiere. Este valor se hace más significativo si se reconoce que cuando un evento mayor se centra a distancias cercanas del área de estudio el contenido de frecuencias altas es predominante mientras que los depósitos débiles tienen frecuencias fundamentales bajas, por lo que la situación no es muy favorable a que se produzcan amplificaciones significativas.

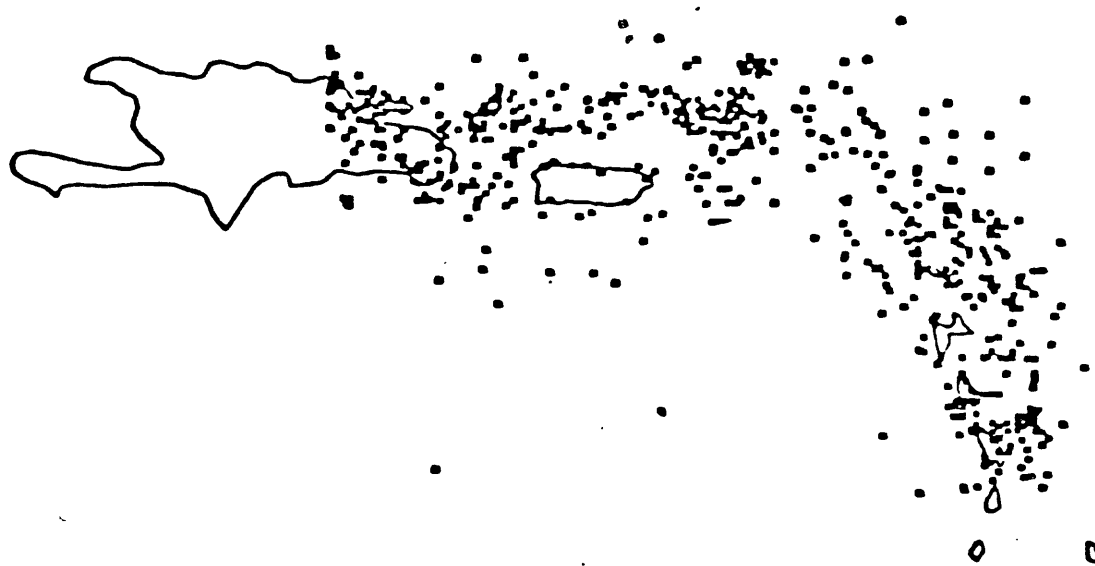
ESTIMADOS DE DAÑOS

Las determinaciones de los estimados de daños por tipos de construcción en el estudio de Molinelly se basa en un trabajo de Sauter y Shah (11). Sauter y Shah han asociado el porciento de daño de un tipo específico de construcción con la intensidad MM. Resultaría interesante identificar la relación usada por ellos para arribar a los niveles de aceleración que habrán de sentir los diferentes tipos de construcción para los diferentes niveles de intensidad MM, pues es este valor en cierta medida el que refleja el nivel de daños a sentirse por la estructura. Como se ha señalado anteriormente, la intensidad de los movimientos, medida en MM, está sujeta a mucha variación y esto puede crear variaciones significativas en el nivel de daños.

Otro punto que es necesario señalar es que el nivel de daños, como promedio, que habrá de sostener un cierto tipo de construcción en Puerto Rico va a depender de lo adecuado del Código vigente, de la calidad del diseño, de la calidad de la construcción y de la inspección que se le dé a la construcción. Es por tal motivo que gráficos como el propuesto por Sauter y Shah, aún cuando resultan convenientes para aplicar por su relativa simplicidad, deben ser atemperados a la condición local. Puede que de una evaluación de este tipo resulte que los gráficos habrán de reflejar mayor o menor daño que el que se refleja en el gráfico usado. Lo importante es que reflejará mejor la condición de Puerto Rico.

BIBLIOGRAFIA

1. Molinelly, J., "Earthquake Vulnerability Study for the Metropolitan Area of San Juan", P.R. Department of Natural Resources, 1985.
2. McCann, W., "On the Earthquake Hazard of Puerto Rico and the Virgin Islands", Workshop on Geologic Hazards in Puerto Rico, US. Geological Survey, 1984
3. Richter, C.F., "Elementary Seismology", W.H. Freeman and Co., 1958.
4. Reid, H.F., Taber, S., "The Porto Rico Earthquakes of October, November 1918 "Seismological Society of America, Bulletin 9, 1919.
5. Der Kiureghian, A., Ang, A. H-F., "A Line Source Model for Seismic Risk Analysis" GRANT GK-36378, National Science Foundation, 1975.
6. Housner, G.W., "Report on Earthquake Requirements for the Building Code of Puerto Rico", Junta de Planificación, 1973.
7. Donovan, N.C., "Earthquake Hazards for Buildings", in Building Practices for Disaster Mitigation, Ed. R. Wright, S. Kramer, C. Culver, Building Science Series 46, U. S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, February 1973.
8. Capacete, J.L. "The CIAA Accelerograph Network a Public Service to the People of Puerto Rico", Revista del CIAA, Volumen XXVI, Núm. 3, 1976.
9. Newman, F., "Earthquake Intensity and Related Ground Motion", Washington University Press, 1954.
10. Marrero, A., López, R., Jiménez, R., "Amplification Study of the Río Grande of Arecibo Alluvial Deposits", 1983.
11. Sauter, F., Shah, H.C., "Estudio de Seguro contra Terremoto". A report prepared for Instituto Nacional de Seguros, 1978.



**TOTAL EVENTOS SISMICOS
1850 — 1977**

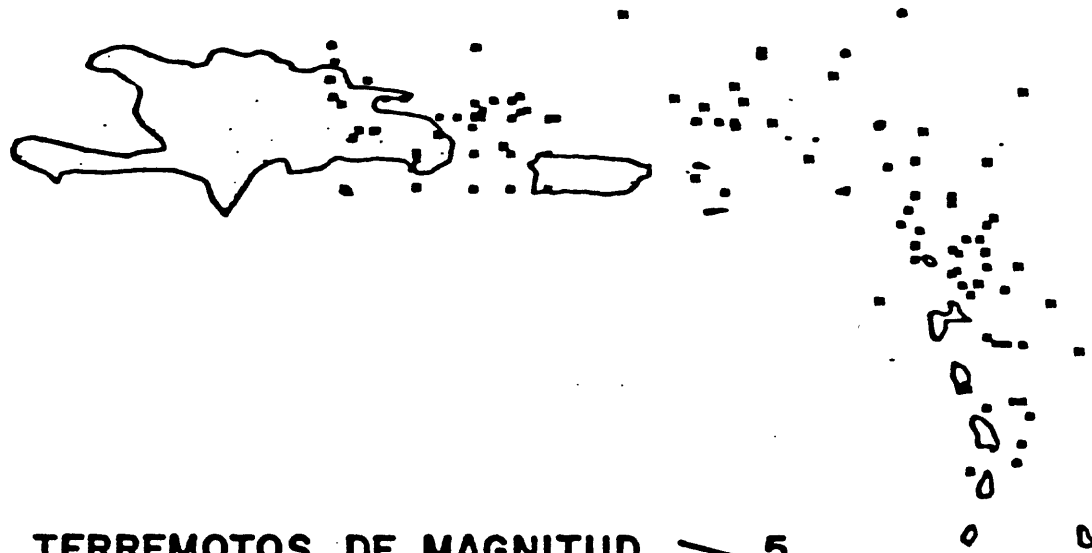
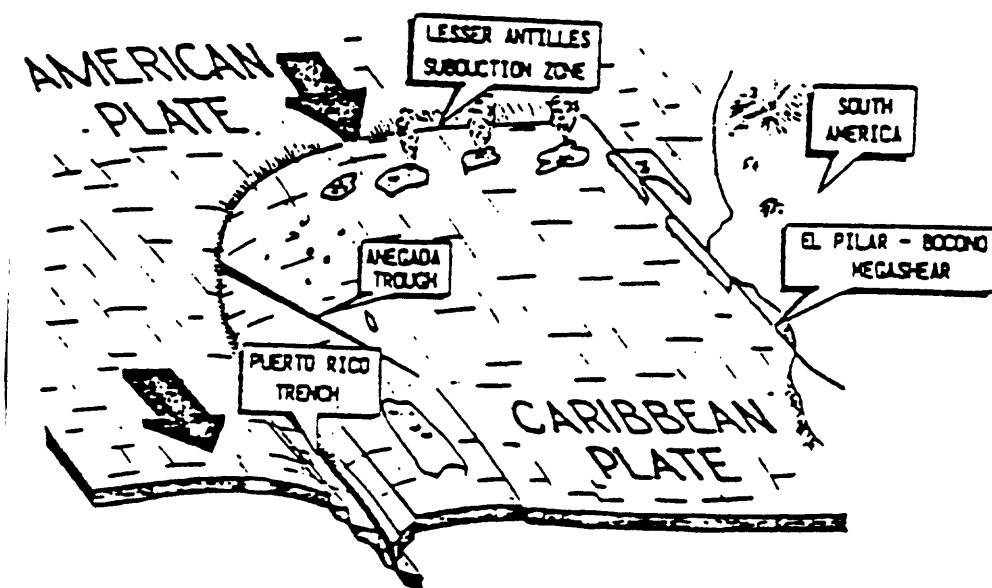
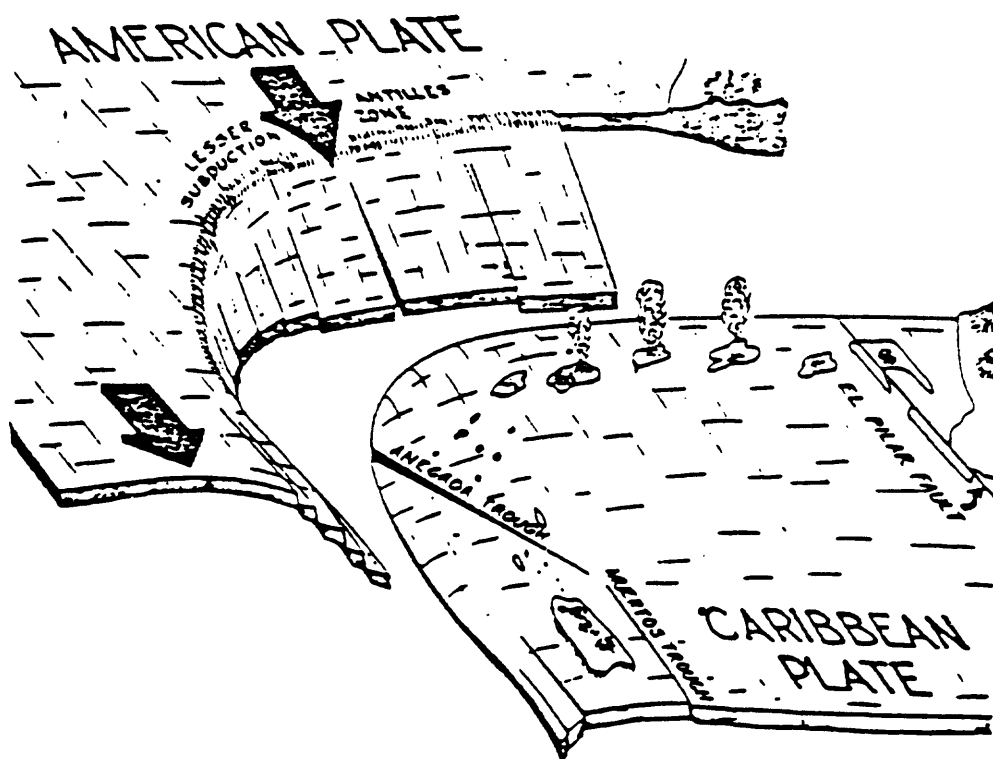


FIGURA 1-- TERREMOTOS DE MAGNITUD > 5

*La Figura 2 que no se pueden obtener.



A. View is toward the southeast with American and Caribbean plates intact.



B. Plates pulled apart to allow visualization of subsurface configuration.

Figura 3

Boundary configuration of the North-American and Caribbean plates

From Schell and Tarr 1978

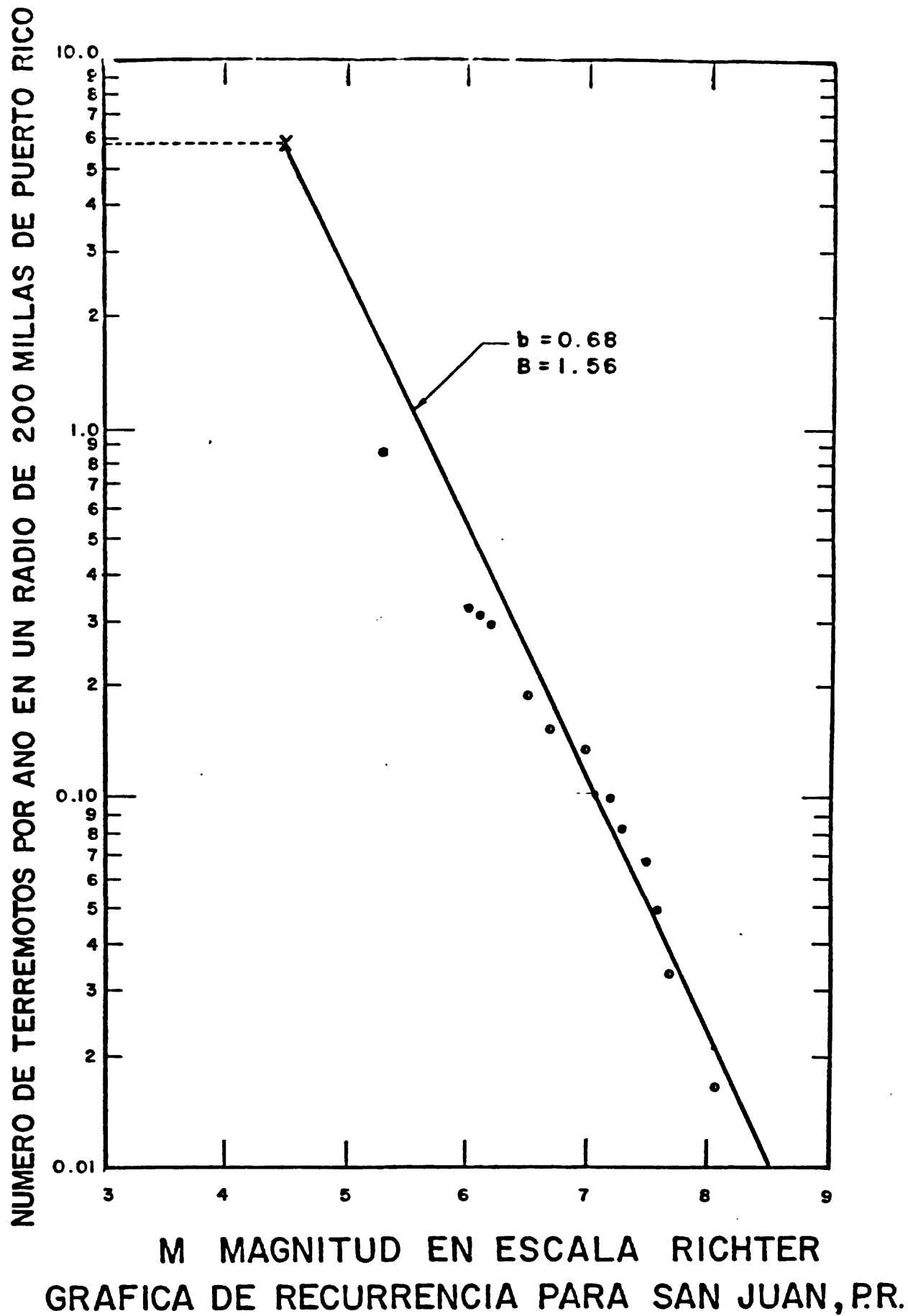
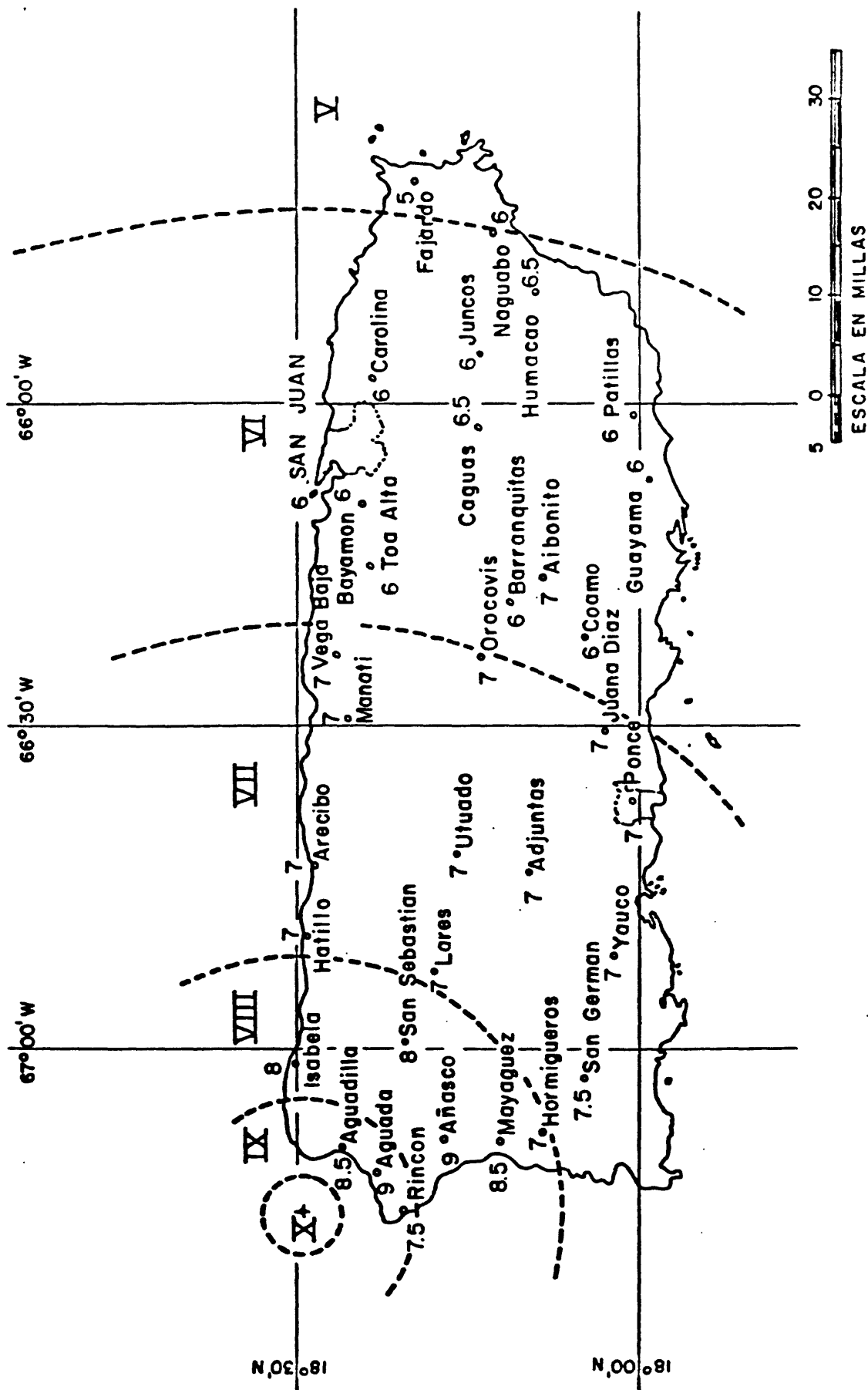


FIGURA 4

Segun Kiureghian



MAPA ISOSISMICO
 TERREMOTO DEL 11 DE OCTUBRE DE 1918
 (ESCALA ROSSI - FOREL)
 Segun Reid y Taber

FIGURA 5

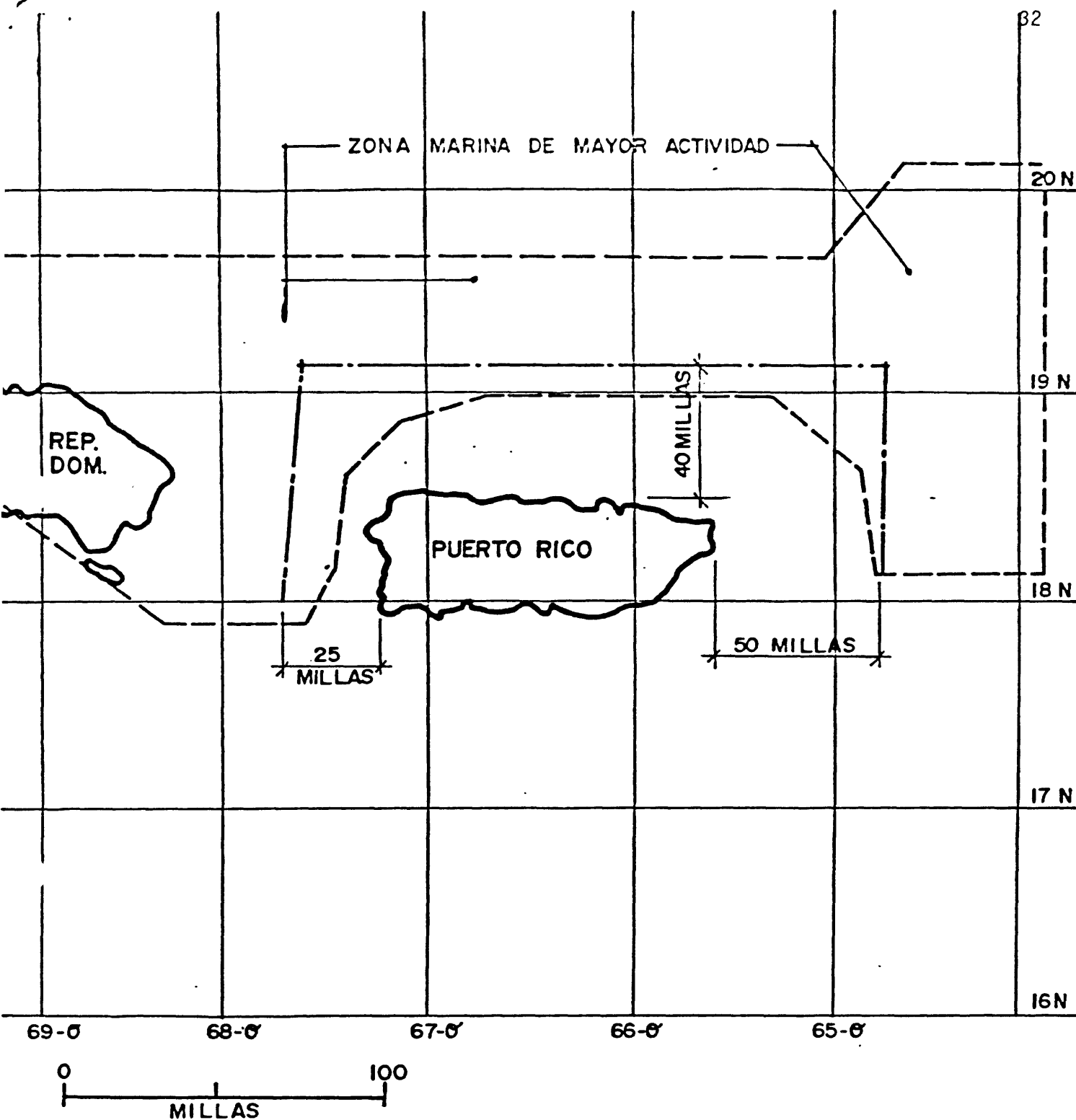
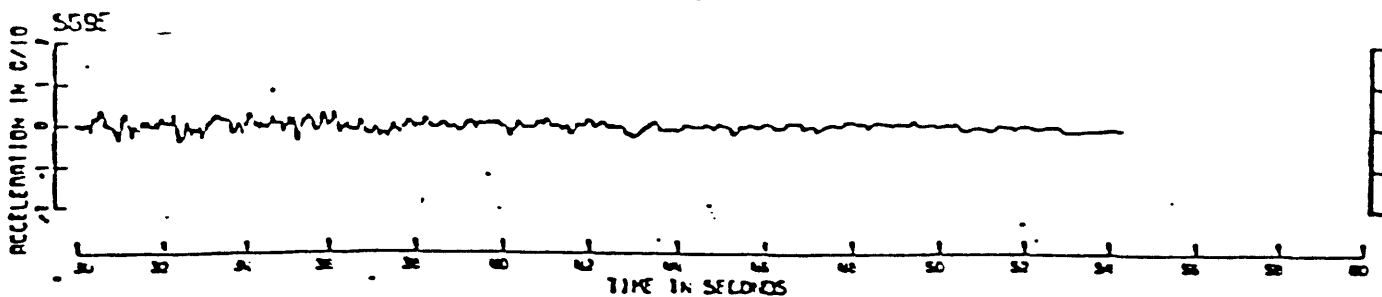
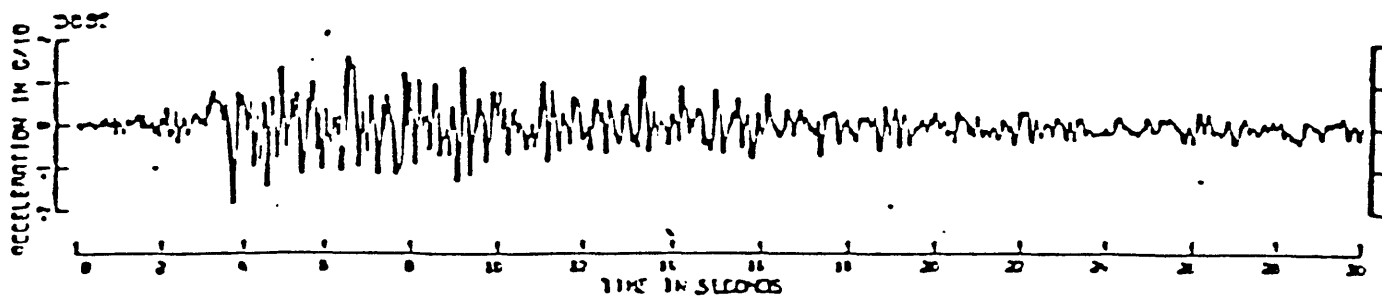
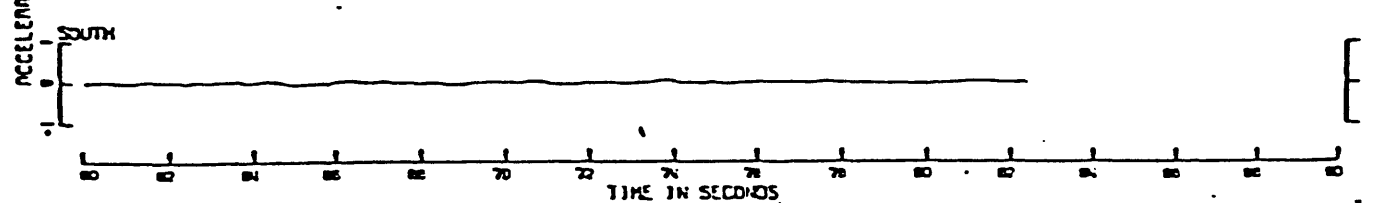
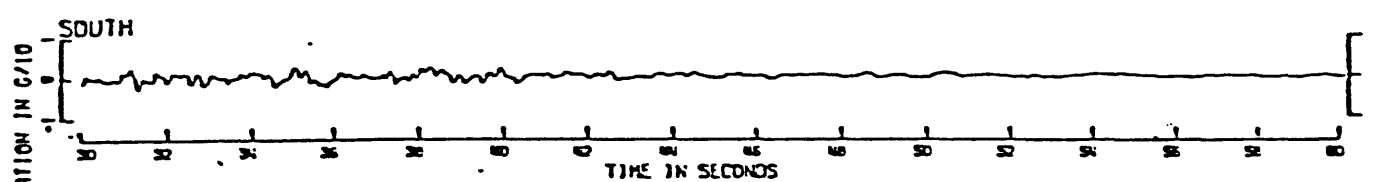
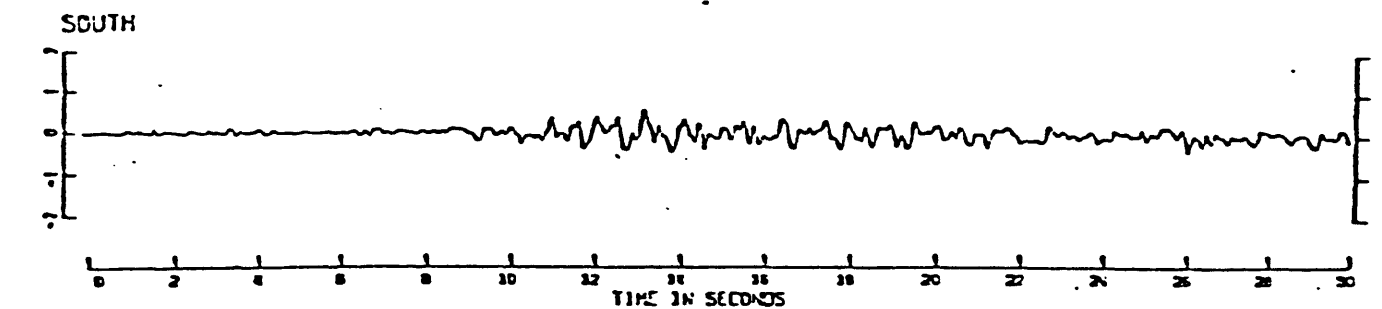


FIGURA 6 - ZONA MARINA DE ACTIVIDAD SISMICA



REGISTRO TAFT, COMPONENTE S69°E



REGISTRO HOLLYWOOD STORAGE BASEMENT, COMPONENTE SUR

FIGURA 7 - REGISTRO TAFT Y HOLLYWOOD
STORAGE BASEMENT

ACELERACION EN ROCA, G

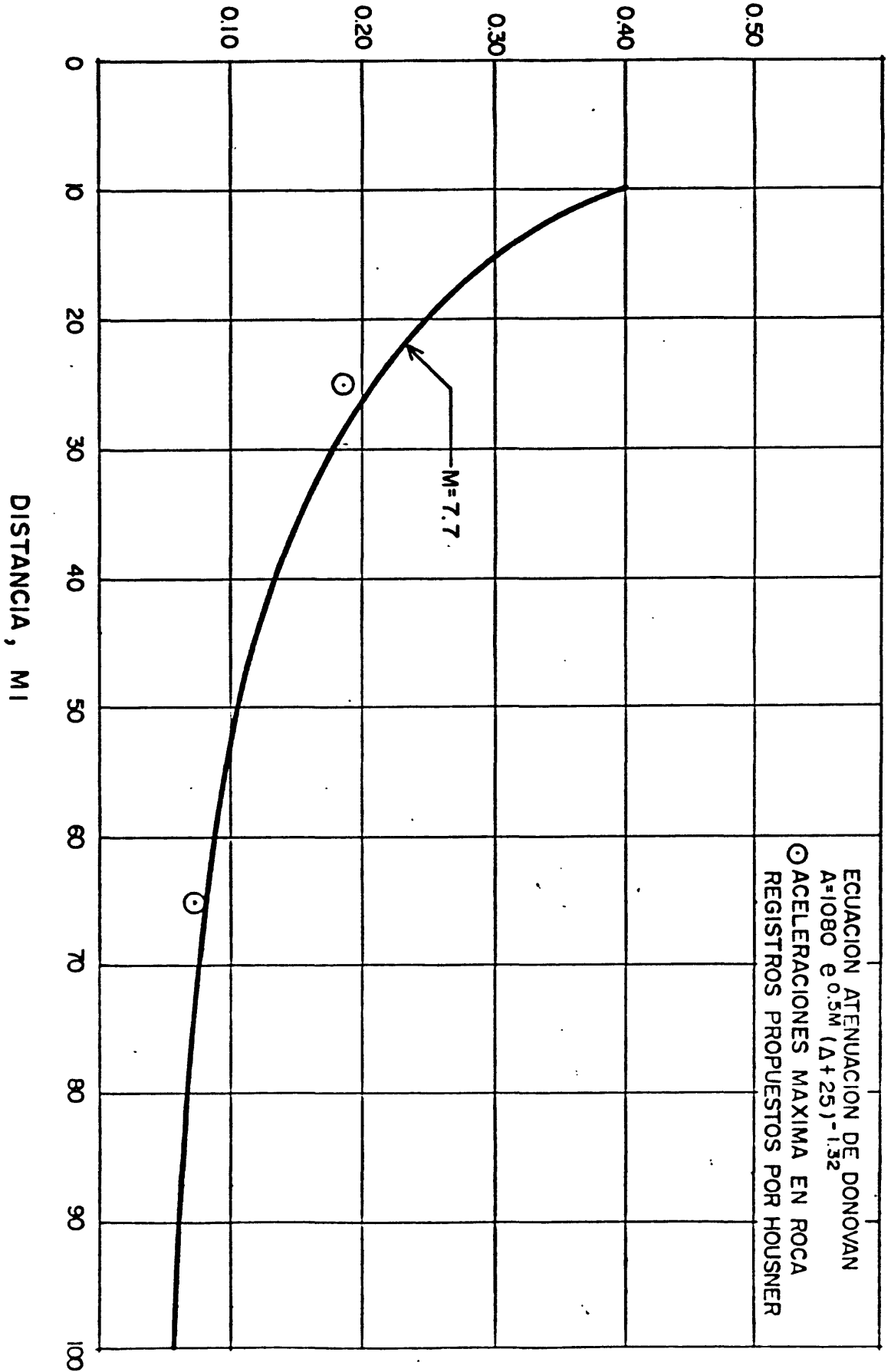
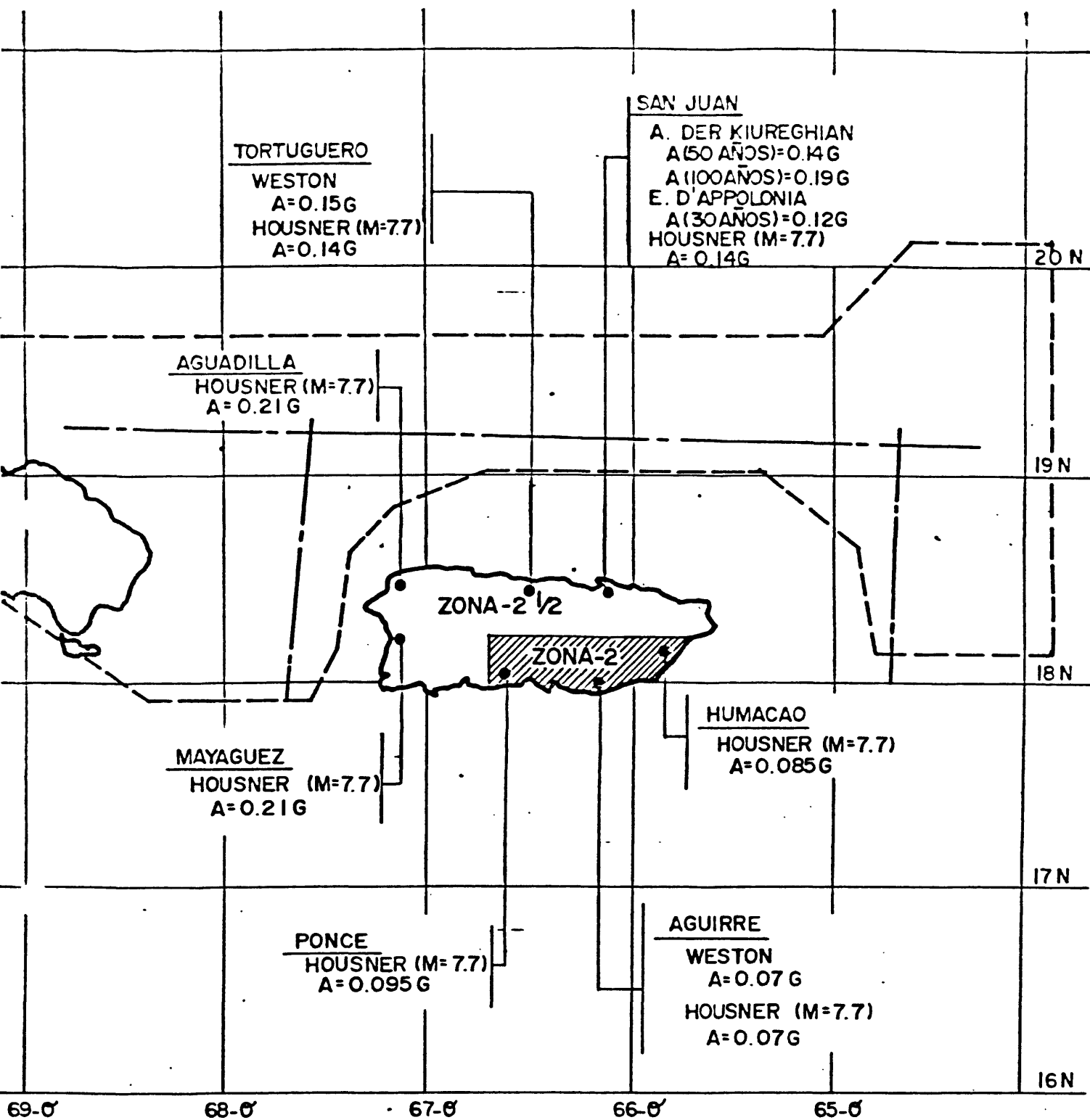


FIGURA 8 - ACCELERACIONES EN ROCA, HOUSNER VS. DONOVAN



NOTA: CLASIFICACION DE ZONAS CORRESPONDE
CON LAS ZONAS DEL UBC - 1979

FIGURA 9 - ACELERACIONES EN ROCA, VARIOS ESTUDIOS

LICUACION DE ARENAS
(LIQUEFACTION OF SANDS)

Pedro Jiménez-Quñones, Ph.D.*
Profesor Ad-Honorem
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Puerto Rico

R E S U M E N

Dado el interés que se ha demostrado por los ingenieros en los pasados meses, por los daños ocasionados por el proceso de licuación en arenas durante un terremoto y con el propósito de presentar conceptos fundamentales para el entendimiento del fenómeno de licuación es que presentamos este artículo.

La agitación que produce un terremoto puede ocasionar una pérdida de resistencia en suelos saturados no cohesivos la cual se conoce por el fenómeno de licuación.

El fenómeno de licuación ha sido observado en Anchorage, Alaska en Niigata, Japón y Méjico durante los terremotos de Alaska y Japón en 1964 y Méjico en 1985.

En este trabajo se presentan conceptos básicos de licuación de arenas y perfiles de suelo del área metropolitana de San Juan con el fin de alertar contra las especulaciones que se hacen en Puerto Rico a diario de que todos los suelos se pueden licuar y que todos los cerros (montes) se van a deslizar cuando ocurran terremotos, o períodos intensos y prolongados de lluvia.

INTRODUCCION

Estoy muy agradecido a mi colega, Dr. Rafael Jiménez, profesor del Departamento de Ingeniería Civil del Recinto Universitario de Mayaguez por su invitación a participar en este foro sobre la Vulnerabilidad Sísmica de San Juan.

Aplaudimos esta iniciativa del profesor Rafael Jiménez de organizar este foro luego de lo ocurrido en Méjico y de los últimos acontecimientos ocurridos en Puerto Rico el pasado 6 de octubre.

No es difícil encontrar el entusiasmo e interés observado por compañeros ingenieros civiles, geólogos y compañeros de otras profesiones cuando ocurre un desastre como el de Méjico para luego aplicar las enseñanzas aprendidas a Puerto Rico en casos de desastres similares.

Los movimientos del terreno que se generan cuando ocurre un terremoto pueden ocasionar una pérdida de la resistencia o rigidez de los suelos saturados, no cohesivos, la cual resulta en asentamientos, y fallas de estructuras, deslizamientos de taludes en corte y terraplenes, fallas de represas de tierra y otros daños en general. El mecanismo o proceso que conlleva la pérdida en resistencia o rigidez del suelo se llama licuación la cual está asociado primordialmente, pero no exclusivamente, con los suelos saturados no-cohesivos (arenas).

El fenómeno de licuación de suelos ha sido observado en casi todos los terremotos grandes y por lo general ha ocasionado muchos daños. Las destrucciones ocurridas como consecuencia del proceso de licuación durante el terremoto desastroso de 1964 en Niigata, Japón, atrajo la atención de ingenieros en muchas partes del mundo. (Slides 1,2,3,4,5,6-11)

Desde mediados de la década de 1960 programas de investigaciones han sido dirigidos a predecir el proceso de licuación en suelos durante un terremoto. Especialmente en los Estados Unidos y Japón se han obtenido progresos impresionantes (1) en reconocer los peligros de licuación, (2) entender adecuadamente el fenómeno de licuación, (3) analizar y evaluar el potencial para la licuación de una localidad y (4) desarrollar la tecnología adecuada para mitigar los peligros de los terremotos. Sin embargo, existen problemas, concernientes a licuación que están aún sin resolver, particularmente, en los casos de estructuras críticas como son las plantas nucleares.

FUNDAMENTOS DE LICUACION

Los conocimientos de licuación y sus efectos o daños han provenido de tres áreas a saber: (1) observaciones realizadas durante y después de ocurrir un terremoto, (2) resultados obtenidos de experimentos realizados en el laboratorio con muestras remoldeadas de suelo y de modelos de estructuras (fundaciones y represas) y (3) análisis teóricos.

En el campo la manifestación más contundente que observamos del proceso de licuación es la ocurrencia de volcanes donde la arena bulle (boils), indicando que la sacudida producida por el terremoto ha generado presiones hidrostáticas en exceso dentro del suelo saturado. (Slide 6) El suelo saturado es un sistema de compuesto de dos fases a saber: (1) partículas sólidas y (2) agua. El agua es quien coge la presión en exceso ocasionando esto que el agua haga un canal o busque un paso por donde salir y a la vez arrastre o lleve consigo partículas de suelo a la superficie del terreno. Durante algunos terremotos se ha podido medir con instrumentación presiones de poros en exceso a distintas profundidades. (Slides 12 y 13)

Los efectos de licuación lo podemos observar en diversas formas tales como: deslizamientos de taludes en corte y en represas de tierra, el asentamiento y vuelco de edificios y estribos de puentes, en desplazamientos horizontales y algunas veces el colapso total de muros de retención. También se han podido observar, traslación lateral de masas de suelo, asentamientos grandes del terreno e inundaciones, daños a vías de ferrocarriles, carreteras, tuberías, etc.

Estudios de campo han confirmado ampliamente que los suelos no cohesivos, como son las arenas, son los más susceptibles al proceso de licuación. Igualmente se han encontrado depósitos geológicos recientes que también son muy susceptibles. También podemos afirmar que depósitos de suelos que se han licuado durante un terremoto han vuelto a licuarse durante terremotos subsiguientes.

Para entender el concepto de licuación debemos aclarar los conceptos fundamentales de esfuerzos geostáticos, en el elemento A localizado a una profundidad Z (figura 1). De la figura 1 tenemos que: (Slide 14)

$$\text{esfuerzo total, } P = Z \gamma \text{ sat.}$$

$$\text{presión de poros, } U_w = Z \gamma_w$$

$$\text{esfuerzo efectivo, } p = Z \gamma^1$$

La resistencia de la arena es debida a fricción interna entre partículas, solamente. Para la arena saturada la resistencia se puede expresar como:

$$S = (P - U_w) \tan \phi$$

donde:

S = resistencia

= ángulo de fricción interna, (se obtiene de un ensayo de corte directo o triaxial)

P = esfuerzo total

U_w = esfuerzo o presión de poros

En la naturaleza podemos encontrar muchos casos de esfuerzos o presión de poros, los cuales se deben a: (1) nivel freático y sus fluctuaciones, (Slide 15) (2) flujo de (Slide 16) agua durante una excavación, (3) cambio de volumen, (4) tensión capilar. Las figuras 2 y 3 muestran los casos 1 y 2.

En la figura 4 (Slide 17) presentamos el mismo perfil de arena indicado en la figura 1. Hemos colocado un piezómetro a una profundidad, Z, con el propósito de medir la presión de poros durante y después del terremoto. Digamos que la presión de poros máxima es igual a $+ U$, que no es otra cosa que el producto de la lectura en el piezómetro y el peso específico del agua. Por lo tanto el esfuerzo efectivo (intergranular) antes del terremoto, Z' , se ha reducido por la cantidad de U , o sea que la resistencia de la arena a la profundidad Z, es igual a:

$$S = (Z\gamma' - h_w) \tan \phi$$

Debemos reconocer que las presiones de poros generadas durante un terremoto varían con la intensidad del terremoto y con el tiempo de duración. Dependiendo de la permeabilidad de la arena se disiparán las presiones de poros generadas. La disipación de las presiones de poros varía con el tiempo (Figuras 5 y 6). De la Figura 6 se puede ver que el valor máximo de presión (Slide 12 y 13) de poros ocurre a la profundidad mayor que resulta ser 14 metros.

Valores representativos del ángulo de fricción interna para arenas de acuerdo a Terzaghi y Peck (1974) están indicados en la Tabla 1 (Slide 18). Comunicación personal del Dr. Carlos Rodríguez indica valores más bajos (-18°) para arenas calcareas lo cual es lógico de esperar.

La figura 7 indica los resultados de un ensayo triaxial no drenado de arena suelta saturada durante el cual la presión axial oscila entre $p_c + p$ y $p_c - p$. En este caso p_c es igual a la presión de consolidación, 1 kg por cm. cuadrado. Después de un número de ciclos de aplicación de la carga p , el valor de U_w alcanza el valor de la presión efectiva de consolidación de 1.0 kg por cm. cuadrado que existía antes de que la carga cíclica comenzará, con la cual la muestra de arena pierde su resistencia y rigidez correspondiendo al estado de licuación. Para una arena densa los valores de la presión de porós se incrementan en forma similar excepto que los ciclos para producir el estado de licuación se aumenta grandemente (14).

LICUACION DE SUELOS EN SAN JUAN

En el estudio preparado por el Dr. José Molinelli (10) para el Departamento de Recursos Naturales, datos específicos y claros de pruebas de campo que demuestren enfáticamente la magnitud y cantidad de suelos que se licuarán de ocurrir un terremoto grande en San Juan, no los encontramos. La experiencia nos demuestra que sí hay algunos bolsillos de arenas sueltas en algunos perfiles de suelo obtenidos de los resultados de la prueba de penetración normal (ASTM-D1586). Algunos perfiles de calas para el área metropolitana de San Juan, tomados de nuestros archivos, claramente indican nuestra posición (Slides 20-28).

Las investigaciones realizadas desde el 1960 (4) claramente indican que aparte de la densidad (Slide 29) relativa existen otros factores tales como estructura, edad de las muestras al momento de la prueba, grado de sobre consolidación y la aplicación de esfuerzos cortantes repetitivos de poca magnitud durante el tiempo transcurrido entre la preparación de la muestra

y la prueba de rotura que tienden a aumentar la resistencia a la licuación y que los mismos factores van a estar presentes en el campo en la prueba de resistencia a penetración normal.

En la Primera Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos celebrada en 1936 en Cambridge, Massachussetts, Terzaghi apuntó lo siguiente (15).

"No honest business man and no self-respecting scientist can be expected to put forth a new scheme or a new theory as a working proposition unless it is sustained by at least fairly adequate evidence".

En mecánica de suelos e ingeniería de fundaciones y más aún en la ingeniería de terremotos ninguna evidencia puede considerarse razonablemente adecuada hasta tanto que se haya acumulado suficiente experiencia de campo para los suelos y geología de un área como la de San Juan. Especular es fácil, pero predecir a base de datos y experiencia cuesta tiempo dinero y sacrificios.

MEDIDAS PARA MITIGAR LA LICUACION

Cuando el subsuelo en una localidad no tiene la resistencia requerida contra el fenómeno de licuación existen dos alternativas para solucionar el problema: (1) abandonar el sitio, (2) aplicar métodos para mitigar el problema de licuación.

Por lo tanto es importante que el método de evaluar el potencial de licuación sea confiable y el método de mitigar la licuación sea adecuado y efectivo.

Para asegurar la seguridad y funcionamiento de proyectos de ingeniería en áreas de posible licuación existen cuatro soluciones de mitigación (3).

1. Soluciones no estructurales - incluye relocalizar o abandonar la estructura, aceptar el riesgo manteniendo el uso, pero alertando las partes afectadas.
2. Mejoramiento del suelo en sitio - técnicas de remoción y reemplazo de material indeseable, densificación del suelo en sitio y mejoramiento del subsuelo por medio de morteros, estabilización química, vibroflotación y otros métodos que sean adecuados. La técnica a usarse desde el punto de vista técnico y económico depende de la distribución de tamaños de partículas del suelo a recibir el tratamiento.
3. Soluciones estructurales - uso de pilotes de punta, el uso de sistemas estructurales que sean menos susceptibles a los daños y el uso de bermas en represas.
4. Soluciones con drenajes - pozos de alivio, sistemas de bombeo, columnas de piedra (stone columns), drenes y controles del agua subterránea.

Las medidas más usadas son el mejoramiento del suelo en sitio y el control y disipación de las presiones de poros.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la experiencia observada, los movimientos del terreno que se generan cuando ocurre un terremoto pueden ocasionar una pérdida de la resistencia o rigidez de los suelos saturados, primordialmente granulares, la cual en muchos casos resulta en asentamiento y fallas de estructuras, deslizamientos de taludes en corte y terraplenes, fallas de represas y otros daños. El mecanismo o proceso que conlleva la pérdida en resistencia o rigidez del suelo se llama licuación.

En Puerto Rico, la vulnerabilidad sísmica y la susceptibilidad de los suelos granulares al proceso de licuación debe ser estudiada y analizada con gran responsabilidad y sentido profesional.

Existe una gran cantidad de información y resultados de estudios de resistencia a penetración normal en las distintas oficinas geotécnicas y agencias del gobierno, la cual se podría utilizar en estudios preliminares de vulnerabilidad sísmica.

De conseguirse establecer en Puerto Rico un centro de investigaciones sísmicas, recomendamos altamente que se establezca una red de instrumentación a distintas profundidades en áreas específicas localizadas en los valles costeros con el propósito de medir aceleración, presiones de poros, asentamientos y otros parámetros necesarios para los análisis correspondientes.

R E F E R E N C I A S

1. Cajigas, J.L., 1985, "Terremotos: ¿Qué debemos saber?, Tecnomundo, Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico, Año 6 Núm. 7, Octubre.
2. Casagrande, Arthur, 1975, "Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands-A Critical Review, Quinto Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Buenos Aires, Argentina, pp. 80-133.
3. Committee on Earthquake Engineering, 1985, "Liquefaction of Soils During Earthquakes".
4. Corchado Vargas, F., 1965, "San Juan Bay Hydraulic Fill Study Reclamation of Hostos Farm Cataño, P.R.", pp. 1-7.
5. Deere, D.U., and Capacete, J.L., 1953, "Report on Subsurface Investigation at United States Naval Station San Juan, Puerto Rico", pp. 1-48.
6. Deere, D.U., 1955, "Engineering of the Pleistocene and Recent Sediments of the San Juan Bay Area, Puerto Rico", pp. 1-107.
7. Jiménez Quiñones, P., 1968, "Subsoil Stabilization, Buenos Aires I Project PR-12 Santurce, P.R., pp. 1-23.
8. Jiménez Quiñones, P., 1985, Informalci3n sin publicar, archivos personales, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Puerto Rico.
9. Lockwood, Kessler and Barlett, Inc., 1963, "Proposal to Develop a Reclamation Plan for the Navy Property, Carolina Area, pp. 1-17.
10. Molinelli, J.M., 1985, "Earthquake Vulnerability Study for the Metropolitan Area of San Juan, Puerto Rico, A Study Prepared for the Department of Natural Resources.
11. Peck, R.B., 1979, "Liquefaction Potential: Science Versus Practice", Vol. 105 No. GT3, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 105 No. GT3, Marcho, pp. 393-398.
12. Seed, H.B., 1967, "Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 93 No. SM3, May.
13. Seed, H.B., 1976, "Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground Ground During Earthquakes", ASCE Annual Convention and Exposition Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering, September 1976, Philadelphia, P.A.
14. Seed, H.B., Idriss, I.M., and Arango I., 1983, "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109 No. 3, pp. 458-482, March.

15. Terzaghi, K. y Peck, P.B., 1974, "Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica", ART. 17, pp. 105-110, 2da. Edición, Librería El Ateneo, Buenos Aires.
16. Terzaghi, K. Von, 1936, "Relation Between Soil Mechanics and Foundation Engineering", Presidential Address, Proceedings First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harvard University, Cambridge, Mass., pp. 13-18.
17. Youd, T.L., and Perkins, D.M., 1978, "Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104 No. GT4, pp. 433-446.

San Juan Metropolitan Area Liquefaction Potential Map

Alejandro E. Soto

Department of Geology - RUM

The San Juan Metropolitan Area Liquefaction Potential Map (LP map) shows areas of different liquefaction potential due to ground shaking from nearby earthquakes. The map was compiled on the basis of criteria used in preparing liquefaction potential maps for urban areas elsewhere (Youd & Perkins, 1978, Youd and others, 1978, Roth & Kavazanjian, 1984). The study was funded by the U.S. Geological Survey and will be published at some future date. The purpose of this note is to comment on the similarities and differences between this map and the liquefaction potential zoning of the Generalized Earthquake Induced Geologic Hazards Map for the San Juan Metropolitan Area (GH map) published by the Department of Natural Resources.

Two criteria were used to compile the LP map:

1. The type, age, and distribution of different sedimentary soil units.
This data was obtained from published quadrangle geologic maps and photointerpretation of 1936 aerial photos.
2. The correlation between liquefaction susceptibility and relative density. Estimates of soil relative density were made on the basis of Standard Penetration Resistance (SPR) test data from 1715 drillholes made in the area. Drillhole data was provided by a number of geotechnical exploration firms and government agencies. The relative density-SPR blow count-liquefaction susceptibility relation was derived following the procedure described by Seed & Idriss (1971).

One significant difference between the LP and GH maps has to do with the map scales. The former is at a 1:20,000 scale whereas the later is at a 1:40,000 scale. This allows for more precise delineation of zone boundaries in

the LP map.

Better definition of liquefaction potential zones in the LP map was also obtained from the greater body of data used. The GH Map appears to have been prepared mainly on the basis of information contained in the quadrangle geologic maps. As noted above, this information was combined with photointerpretation and subsurface data in drawing the LP map. The aerial photography was invaluable in determining the origin, age, and distribution of the different soil units. SPR test results provided a physical measure of liquefaction susceptibility in these units.

Because liquefaction susceptibility is ultimately a function of geology there is general agreement between the two maps. Both maps show broad zones of high potential along much of the coastline, in the Río Grande de Loiza and Río Grande de Bayamón floodplains, in the swamps between the Río Grande de Loiza and Laguna Torrecilla, and in the Isla Verde airport area. There are, however, differences. Most notable are the low or moderate potential assigned the filled lands south of Laguna la Torrecilla and the Isla Verde airport, along Caño Martín Peña extending to the old Naval Reservation at Isla Grande, north and south of J.F. Kennedy Avenue, and south of Cataño. These areas are assigned high potential in the GH map. This also occurs along the floodplains of the Río Piedras, Río Hondo, Quebrada Margarita (S.J.), and Quebrada Santa Catalina (Bayamón), and in the Cucharillas-Las Vegas-Puente Blanco and Sabana Seca sectors of the Bayamón quadrangle. Thus, although general agreement exists between the two maps the proportion of high potential ground is greater in the GH map than in LP Map. Furthermore, because of the greater detail allowed by the larger map scale and the larger data base used in compiling it, the different zones are delineated

more accurately in the LP map.

References

- Roth, R.A., and Kavazanjian, E.; 1984; Liquefaction Susceptibility Mapping for San Francisco, California; Bull. Assoc. Eng. Geol., Vol. 21, No. 4; p. 459-478.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M., 1971; Evaluating Soil Liquefaction Potential; Journ. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 97, No. SM9; p. 1249-1273.
- Youd, T.L., and Perkins, D.M., 1978; Mapping Liquefaction Induced Ground Failure Potential; Journ. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 104, No. 6T4; p. 433-446.
- Youd, T.L., Tinsley, J.C., Perkins, D.M., Kings, E.J., and Preston, R.F., 1978; Liquefaction Potential Map of San Fernando Valley, California; Proc. 2nd. Internat. Conf. Microzonation; San Francisco, Cal.; Nov. 1978; p. 267-278.

Las Implicaciones del Estudio de Vulnerabilidad Sísmica
del Área Metropolitana de San Juan en la Planificación de
dicha Metrópolis

By

Dr. Hermenegildo Ortiz Quiñones

Agradezco muy de veras la oportunidad que me han dado los organizadores de este foro, especialmente el Dr. Rafael Jimenez, para discutir con ustedes algunas reflexiones sobre el importante estudio preparado por el Dr. José A. Molinelli sobre la Vulnerabilidad Sísmica del Área Metropolitana de San Juan. Para mí siempre es un honor y un placer regresar a mi Alma Mater a compartir con mis colegas y amigos.

Básicamente, el Gobierno de Puerto Rico ha utilizado el Reglamento de Edificación como el mecanismo casi único para prevenir y mitigar los efectos de los terremotos. Reconociendo la realidad ecológica, geológica y geográfica de Puerto Rico en el 1954 se enmendó el Reglamento de Edificación de la Junta de Planificación a los fines de incorporar unas disposiciones de fuerzas laterales antisísmicas. Estas enmiendas iban dirigidas a garantizar mediante el diseño apropiado que estructuras a construirse en Puerto Rico no se colapsasen de ocurrir un terremoto de cierta magnitud.

En los últimos años, debido a que Puerto Rico ha sido cambiado a una zona de mayor peligrosidad sísmica y a los fines de incorporar nuevos conocimientos sobre los fenómenos sísmicos, esfuerzos conjuntos de la Administración de Reglamentos y Permisos y el Colegio de Ingenieros y Agrimensores de

Puerto Rico han logrado la preparación de nuevas enmiendas al Reglamento de Edificación. Recientemente, estas enmiendas fueron discutidas en vistas públicas convocadas a esos efectos.

Los Reglamentos de Edificación, sin embargo, como mecanismos únicos de prevención y mitigación de terremotos tienen sus límites.

En primer lugar, todo reglamento es prospectivo. Es decir, lo único que puede afectar son las estructuras o edificios a construirse una vez aprobado el Reglamento o sus enmiendas. Nada puede hacerse en ese sentido con las estructuras existentes.

Segundo, el Reglamento de Edificación entiende con uno sólo de los efectos que puede ocasionar un terremoto, las vibraciones. Además de hacer vibrar las estructuras, los sismos producen maremotos, deslizamientos y licuación. Estos últimos efectos no son considerados por el Reglamento de Edificación de la Junta de Planificación. Es bueno señalar en estos momentos que en uno de los terremotos más devastadores de Puerto Rico, el de 1918, los daños más graves y el mayor número de muertes que ocurrieron en ciertos sectores de la costa oeste, incluyendo a Mayaguez y Aguadilla, se debieron particularmente a los efectos resultantes del maremoto que se produjo y a los derrumbes de estructuras inducidas por la licuación de los terrenos donde estaban enclavadas.

Tercero, las medidas de diseño anti-sísmicas que se encuentran en el Reglamento de Edificación de Puerto Rico no incluyen el diseño de la infraestructura, tales como agua, alcantarillados, energía eléctrica, túneles, canales y

estructuras similares. Mucha de esta infraestructura es crítica para el funcionamiento de las áreas urbanas.

Es menester incorporar otros instrumentos de política pública que en adición al Reglamento de Edificación nos permita tomar medidas de acción para prevenir y mitigar los efectos de terremotos de gran magnitud que puedan ocurrir en Puerto Rico. En otras ocasiones se han sugerido varios de estos instrumentos. Entre ellos nos parece importante mencionar los siguientes:

1. La zonificación sísmica o la zonificación de los terrenos de acuerdo al riesgo sísmico que éstos comporten. Dependiendo del riesgo, se deberá entonces reglamentar el tipo de actividad y uso que se puede ubicar en los mismos. De la misma forma se deberán establecer los parámetros a utilizarse en el diseño y construcción de las estructuras a ubicarse en las zonas de alto riesgo sísmico.

2. Declaraciones de Impacto Sísmico no significativo. Proyectos de construcción que se pretendan construir en suelos de alta peligrosidad sísmica deberán someter una declaración de impacto sísmico no significativo antes de que se les pueda otorgar los permisos de construcción correspondientes.

3. Rehabilitación de Estructuras Críticas. En los últimos años se han construido en Puerto Rico indiscriminadamente edificios y estructuras con funciones críticas, tales como hospitales, escuelas, industrias, aeropuertos así como redes de infraestructuras, en terrenos de alta peligrosidad sísmica los cuales pueden sufrir daños irreparables o tener efectos paralizantes a la sociedad de ocurrir un sismo de alta magnitud.

Es importante identificar estos edificios y estructuras así como analizar la deseabilidad y viabilidad de rehabilitarlos, reemplazarlos o construir facilidades alternas y redundantes en lugares donde el riesgo es menor en caso de ocurrir un terremoto.

Consciente de la necesidad de éstos y otros instrumentos de política pública es que considero el estudio preparado por el Dr. José Molinelli y auspiciado por el Departamento de Recursos Naturales uno muy positivo como primer paso para la formulación de una zonificación sísmica para el Area Metropolitana de San Juan y otros centros de población de Puerto Rico. Para la formulación de esta zonificación sísmica, dos elementos del estudio de Vulnerabilidad Sísmica son bien importantes. Estos son los siguientes:

1. La distribución en el espacio de los eventos geológicos a considerarse y la intensidad con que ocurrirán;

2. El riesgo o los daños esperados para la gente, propiedad, facilidades públicas y actividades humanas que están ubicadas o se llevan a cabo en los distintos lugares del Area Metropolitana de San Juan.

El primer elemento se logra muy bien en el estudio del Dr. Molinelli, excepto por los terrenos que pudieran afectarse de ocurrir maremotos. El estudio establece unas zonas geográficas donde se asocia el evento geológico con la condición y características de los suelos. Para cada una de estas zonas se establece un nivel de vulnerabilidad. Estos niveles de vulnerabilidad dan la impresión que varían únicamente con las características de los suelos y no con la distancia y

dirección de estas zonas al epicentro del terremoto.

El segundo elemento o los daños a esperarse en las distintas zonas, espero pueda mejorarse en estudios posteriores. En primer lugar, el estudio considera únicamente daños a edificios. Estimados de posibles pérdidas de vida no se consideran así como daños a facilidades de infraestructura.

En segundo lugar, no están claras las premisas sobre cuales son los factores que deben considerarse al estimar daños. Los niveles de daños a estructuras no sólo van a ser función de la condición de los suelos sino también de la localización, número, tipo, edad, diseño, uso, material de construcción de las estructuras o edificios, entre otros factores. El no considerar estos factores al estimar los daños a las estructuras es quizás una de las limitaciones más importantes del estudio del Dr. Molinelli.

La planificación tiene que estar basada en el conocimiento. Es importante que creemos los mecanismos para aumentar los conocimientos sobre sismos y sus consecuencias a los fines de que podamos adoptar una política pública inteligente, razonable y económica que nos permita anticipar, evitar y mitigar los daños que puedan producir sismos de alta magnitud. Debemos prepararnos para evitar que eventos naturales se conviertan en desastres humanos. Cada día me reafirmo en que un paso en esta dirección es la creación de un Instituto de Investigaciones Sísmicas. Claro está, este Instituto debe tener su sede en este Recinto Universitario de Mayaguez.

Muchas Gracias.

PLANES DE MITIGACION Y DE CONTINGENCIA
PARA TERREMOTO

El daño que causan los terremotos afectan todos los elementos de la sociedad y del gobierno. Los fenómenos naturales como terremotos, huracanes e inundaciones, no pueden evitarse, pero sí podemos prepararnos para lograr que los daños económicos y la pérdida de vidas sean mínimas.

Se requiere la movilización y coordinación de todo el gobierno y la ciudadanía para distribuir y usar eficientemente los recursos que sean necesarios después de un evento de terremoto. Debe hacerse un plan formal de contingencia escrito que se desarrolle con la participación de oficiales de gobierno, entidades voluntarias y el sector privado, para lograr la coordinación necesaria.

Los terremotos no han podido predecirse con precisión, sin embargo, el desarrollo de la sismología en la última década, ha llevado a la convicción de que los temblores de tierra puedan ser predecidos. Aunque la investigación en este aspecto es relativamente nueva, se han logrado resultados prometedores. Sin embargo, en estos momentos no existe un mecanismo mediante el cual se pueda predecir con exactitud cuándo va a ocurrir un temblor, por lo que en regiones sísmicamente activas como en Puerto Rico, es mejor prepararse para tal eventualidad.

Para poder preparar un Plan de Contingencia para terremoto, hay que comenzar con la identificación de las áreas o zonas vulnerables y hacer una evaluación de los riesgos envueltos. En este momento, el Departamento de Recursos Naturales se encuentra en esta etapa del proceso de planificación.

Nuestra Agencia en coordinación con la Agencia Estatal de la Defensa Civil y la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, ha desarrollado unos esfuerzos encaminados a establecer y tratar de cuantificar los peligros potenciales de un terremoto sobre nuestra isla.

El Estudio que se ha presentado en esta actividad ha identificado las áreas vulnerables en el Area Metropolitana de San Juan. Ubicadas en estas zonas están importantes instalaciones tales como: La Planta Termoeléctrica de Bahía de Puerto Nuevo, Líneas de Transmisión Eléctrica, Subestaciones de Energía Eléctrica, Planta de Tratamiento de Agua, Agencias del Gobierno, Estaciones de Bombeo, Troncales de Acueductos, Puertos, Edificios Multipisos, Aeropuertos e importantes carreteras que unen la capital con el resto de la isla.

Hemos estudiado el impacto económico del evento de terremoto seleccionado y se ha encontrado que el mismo sería devastador. En estos momentos nos proponemos hacer estudios de vulnerabilidad en otras áreas metropolitanas y pueblos de nuestra isla.

La próxima fase en el Programa de Terremoto del DPN es identificar las residencias, estructuras críticas y población que podrían ser

afectadas. Basado en los hallazgos de estos estudios, podremos diseñar las medidas de mitigación y estrategias que utilizaremos para prepararnos para un terremoto. Desde luego, que la primera consideración serían aquellas medidas mediante las cuales podremos salvar el mayor número de vidas. Igualmente, como estrategias utilizaremos el mejor uso de terrenos y trataremos de lograr una zonificación especial con la Junta de Planificación para que no se ubiquen en las áreas más vulnerables, servicios esenciales, como hospitales, escuelas, etc.

Además de los daños materiales, un terremoto genera también consecuencias sociales de importancia, que a su vez pueden provocar en la comunidad un mayor impacto que el propio terremoto.

Al respecto son claves las diferencias que existen entre los momentos inmediatamente subsiguientes al impacto (estado de emergencia), y la etapa posterior, en la que se recupera el equilibrio y se inicia la solución de los problemas.

El desastre provoca un elevado sentido comunitario, de apoyo y con alta moral, esto es un incremento del papel del ciudadano. El desastre democratiza la vida social porque afecta indiscriminadamente a individuos, grupos y organizaciones de varias clases. Por ello hay un relajamiento en las divisiones sociales tradicionales (el jefe trabaja codo con codo con el empleado, el rico ayuda al pobre).

Ante la emergencia la mayoría de las organizaciones sociales sacan a relucir su funcionamiento y capacidad. Como pocas situaciones, las crisis revelan la manera en que las instituciones están estructuradas, mantienen su estabilidad, cambian y cumplen sus funciones. Es entonces inevitable que la población examine su comportamiento y descubra sus aciertos o fallas.

Por otra parte las instituciones se ven obligadas a establecer relaciones unas con otras; relaciones que en tiempos normales no se darían (las organizaciones de emergencia entran en contacto estrecho con instituciones de atención al público como los medios de comunicación).

Tarde o temprano es necesario que se vuelva a la normalidad y haya control de la situación.

Surgen consecuencias de importancia. Por una parte las personas examinan el comportamiento que hayan tenido las figuras de autoridad (quién lo hizo y quién no). Además, se es muy puntilloso y más exigente de lo normal con aquellos que están forzados a "hacer algo".

Como nunca, las autoridades tienen que demostrar sus capacidades (después de todo, una función principal de los gobiernos es la seguridad y defensa de la población): su rapidez para actuar, el modo en que se restablece el control, la credibilidad que se tenga, la facultad para planear aún en circunstancias adversas, la solidez en las decisiones y qué tanto se formulan en interés del bienestar colectivo.

Son bastante limitadas las opciones realistas del cambio de uso de la tierra, después de un terremoto. El aumento de la seguridad de la población (que es una de las preocupaciones principales del momento), puede lograrse más fácilmente mediante el mejoramiento en el diseño de estructuras y construcción, que a través del cambio del uso de la tierra.

El proceso de reubicación de afectados es sumamente complejo y no puede ser aceptado automáticamente como una medida positiva.

Como podemos ver, el problema de mitigación de riesgos naturales, es uno sumamente complejo y en el cual intervienen aspectos sociales, técnicos y económicos. Desde luego, que la ciudadanía espera del gobierno que resuelva los problemas. La comunidad está dispuesta a ayudar, pero para que ellos puedan ayudar, tenemos que estar preparados todos para un terremoto.

Un Programa de Orientación a la ciudadanía es sumamente importante. Las familias, agencias del gobierno, escuelas y la industria debemos prepararnos para un evento como este.

El Departamento de Recursos Naturales está realizando los estudios necesarios para poder asesorar a la Agencia de la Defensa Civil para que se puedan desarrollar los Planes de Contingencia. Es obvio, entonces, que necesitamos:

1. Inventariar las estructuras y facilidades pública en las áreas vulnerables y evaluar su potencial de riesgo y proceder con la rehabilitación de las mismas.
2. Desarrollar un Programa Educativo Intensivo para alertar a la ciudadanía sobre la posibilidad de un terremoto.

Este Programa que ya hemos comenzado, incluirá información básica sobre: "Qué hacer durante un terremoto", medidas de seguridad para sobrevivir y mecanismos para mitigar las pérdidas. Este Plan Educativo será masivo y comenzará en las escuelas, y debe incluir simulacros y entrenamiento sobre técnicas de rescate, etc.

3. Es importante también, el enmendar el Código de Construcción. De hecho, recientemente el Reglamento de Edificación fue llevado a Vistas Públicas por la Administración de Reglamentos y Permisos, para enmendar el mismo. Las enmiendas recogen las recomendaciones para diseño sísmico que desarrolló la Comisión de Terremotos del Colegio de Ingenieros de Puerto Rico.
4. Debemos activar un Equipo Interagencial Multidisciplinario, para discutir e integrar la información disponible, los estudios realizados y los hallazgos resultantes, para poder preparar el Plan de Contingencia para Terremotos. Este Foro es un paso adelante en esa coordinación que tanto necesitamos.

CONCLUSIONES

Los trabajos presentados en esta conferencia nos llevan a las siguientes conclusiones:

1. Los modelos propuestos para explicar los movimientos tectónicos en la zona norte de Puerto Rico necesitan evaluarse cuidadosamente, ya que predicen resultados contradictorios. Las predicciones obtenidas de un modelo en particular no deben implementarse drásticamente hasta que no se dilucide la controversia. Este hecho merece la atención de las personas o agencias que están incorporando estos estudios de tal forma que se le de el debido estudio a la evaluación tectónica.
2. Existe un consenso en el panel de que el nivel de daños expresados en términos de la escala modificada Mercalli es de carácter subjetivo y como tal debe de tratarse con mucho cuidado. Una alternativa reside en expresar los niveles de daños en aceleraciones, o en otro parámetro adecuado.
3. Las aceleraciones en la roca para el área de San Juan deben de oscilar entre un 15 a un 20% de la aceleración de gravedad, siendo el primer estimado de 15% un valor razonable para el caso de estructuras con un período de recurrencia del orden de 100 años.
4. El Departamento de Recursos Naturales debe establecer un comité que evalúe los documentos de carácter sensitivo de tal forma que la información se transmita en una forma cautelosa y ponderada.
5. En aquellas áreas que se han identificado como vulnerables a los movimientos sísmicos se deben validar los resultados realizando pruebas que confirmen las proyecciones del estudio de vulnerabilidad sísmica.

6. Las proyecciones de daños presentados en el estudio de vulnerabilidad sísmica del área de San Juan deben calibrarse con otros métodos disponibles en la literatura, ya que la metodología utilizada esta basada en la escala modificada Mercalli y en tipos de construcción ajenos a la construcción normalmente usada en Puerto Rico.
7. Los mapas de zonificación sísmica son necesarios para las consideraciones de planificación y para las declaraciones de impacto sísmico de las estructuras sísmicas. El Departamento de Recursos Naturales y la Junta de Planificación deben iniciar las gestiones necesarias para preparar estos mapas a la mayor brevedad posible.
8. El Centro de Investigaciones Sísmicas debe establecerse a la mayor brevedad posible para continuar realizando investigaciones aplicadas dirigidas a mitigar el impacto de las actividades sísmicas.

FORUM ON PUERTO RICO VULNERABILITY STUDY

RAFAEL JIMENEZ-PEREZ, Ph.D.

ASSOCIATE PROFESSOR

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

UNIVERSITY OF PUERTO RICO

MAYAGUEZ, PUERTO RICO, 00708

INTRODUCTION:

A forum on the vulnerability study of the San Juan Metropolitan Area (SJMA), prepared for the Department of Natural Resources by Dr. Jose Molinelli, was conducted at the Department of Civil Engineering on December 4, 1985. The forum objectives were to present the primary conclusions of the SJMA study, to present the preliminary conclusions obtained on a liquefaction study for San Juan conducted at the Department of Geology of the University of Puerto Rico, to calibrate the SJMA study in the selection of the critical earthquake event, recurrence interval and selection of seismic parameters, to evaluate the estimate for geologic hazards presented in the SJMA study, and to identify future studies required to determine the seismic risk of San Juan.

Presentations were made at the forum by geologists, geotechnical engineers, structural engineers, and planners on the key issues to be discussed. The presentations made by the speakers of the forum were compiled in the memoirs and are available upon request. This paper presents only a brief summary of the issues raised and of the conclusions reached during the forum.

VULNERABILITY STUDY OF SAN JUAN METROPOLITAN AREA:

The vulnerability study of the San Juan Metropolitan Area was performed to assess the areas most susceptible to ground shaking, liquefaction, soil amplification, and mass movements. These geologic hazards are activated by seismic activity and are responsible for the major damages induced in the physical inventory and infrastructure of the affected community. The major objective of the SJMA study was to map the areas most susceptible to these hazards, and to estimate the extent of damage expected from the fragility curves proposed elsewhere.

Major conclusions reached in this study are that the most vulnerable areas to ground shaking are the artificial fills placed over swamp deposits and the alluvial deposits found in flood plains. Facilities most affected by the ground shaking are thermo electric plants, transmission lines and electric substations, water treatment plants and pumping stations, dock and airport terminals, and vital expressways and bridges.

Major areas susceptible to liquefaction were also found in the alluvial deposits of flood plains, and in the loose saturated sands found near the coastal area. In this zones, the facilities most affected are office and apartment buildings, airport facilities, highways, and water and electric lines.

Areas susceptible to mass movements were found in the southern portion of San Juan where the landslide potential varies with antecedent moisture conditions of the soil. A high soil amplification potential was also determined for the soft and deep alluvial deposits found in the major rivers of the area.

CRITICAL ISSUES OF VULNERABILITY STUDY

The vulnerability study was based on the assumption that the critical event for the metropolitan area of San Juan was a Magnitude 8 to 8.25 earthquake with an epicenter at 120 km north of San Juan. The damage level induced by this earthquake in San Juan was assumed to have a Modified Mercalli intensity of VIII. The event selected is similar to that experienced by the 1787 earthquake that occurred north of San Juan.

The use of the Modified Mercalli scale implies a subjective assessment of the seismic parameters that can lead to excessive estimates for ground accelerations, velocities, or displacements. The selection of the 1787 event implies the use of the maximum credible event versus the most probable event and will have a recurrence period that is much larger than that normally considered. In addition, other zones that are more active can cause earthquakes with Magnitude 7 to 7.5 with lower recurrence intervals than the selected earthquake.

The vulnerability of zones susceptible to soil amplification was evaluated by increasing the damage level to an intensity of MM IX. This procedure implied that the ground acceleration for deep

and soft alluvial deposits will be 100 % greater than that experienced in the rock mass. Liquefaction criteria was also debated as the study considered only the deposit characteristics, water table depth, and damage level to determine the vulnerability of the zones considered. The landslide potential criteria was also based on the MM intensity level expected at the area.

The damage estimates induced by the ground shaking was determined from the fragility curves developed for construction methods and structural systems not commonly used in Puerto Rico. Additional work was recommended in this area to pursue other time effective procedures to determine damage potential to structures that can be adequately calibrated in Puerto Rico.

CONCLUDING REMARKS

The tectonic models available to predict the seismic potential of the nearby faults need to be evaluated cautiously due to contradictory predictions on the relative movements calculated.

Hence, the predictions from a given model should not be drastically implemented by government agencies until the issue is resolved.

Expected rock accelerations in San Juan should range from 15 to 20 percent of the acceleration of gravity, for recurrence intervals of 100 years. Soil amplification factors for deep and soft alluvial deposits should range from 40 to 50 percent of the acceleration experienced at the rock mass.

Liquefaction and landslide potential of various zones should

be assessed using the soil properties obtained from boring logs and adequate testing programs, in conjunction with the corresponding seismic parameters expected at the site considered. It is recommended that in those areas where a high vulnerability has been identified, tests should be conducted to verify the projections of the vulnerability study.

It is strongly recommended that the damage estimates obtained with the fragility curves be checked against other methods such as the Rapid Seismic Analysis procedure for the construction methods and structural systems used in Puerto Rico, before they are incorporated into the planning process. The analytical results obtained from these procedures should also be calibrated against experimental results of typical structural systems.

Seismic zoning maps and declarations of seismic impact are planning instruments that should be implemented as soon as possible to avoid new construction in highly susceptible areas.

These comments should provide insight into the forum concerns and discussions. Positive action is required to implement these measures in order that the impact of a destructive earthquake, on our economic and social structure, can be controlled effectively.

LANDSLIDE HAZARDS OF PUERTO RICO

by

Randall W. Jibson

U.S. Geological Survey

Reston, VA 22092

INTRODUCTION

Mountainous terrain and tropical climate combine to make Puerto Rico one of the most landslide-prone areas in the United States. Many types of landslides are common in Puerto Rico, and they occur in every geographic and geologic setting. Landslides form readily under normal conditions, but when a significant triggering event, such as a major rainstorm or an earthquake, occurs, numerous landslides form that block roads, destroy homes and other man-made structures, and kill and injure people.

TYPES OF LANDSLIDES COMMON TO PUERTO RICO

All major types of landslides affect Puerto Rico. By far the most abundant types (classification after Varnes, 1978) are debris flows and debris slides, rapid downslope movement of disrupted surficial rock and soil. These landslides are particularly hazardous because they form with little or no warning and can move very rapidly down steep slopes. Structures at the base of such slopes are inundated or destroyed by the impact of the rapidly moving mixture of soil, rock, and water.

Block slides and slumps--deep-seated masses of bedrock and overlying soil that move downslope either as intact blocks or as a collection of slightly

disrupted blocks--are less common than debris slides and debris flows but can have catastrophic effects. Such was the case during the October 1985, storm, when the Mameyes district of Ponce was destroyed by a block slide that killed at least 129 people, the greatest loss of life from a single landslide in U.S. history (Jibson, 1986). These types of landslides can disrupt large areas of the ground surface and thus lead to destruction of overlying structures and burial of structures downslope.

Earth flows are also common in Puerto Rico. These normally are slow moving masses of moderately disrupted earth that can move down even very gentle slopes. This movement commonly causes sufficient deformation of the ground surface to damage or destroy overlying structures or roads.

Rock falls--rapid movement by free fall, bounding, and rolling of bedrock detached from steep slopes--are common on very steep natural slopes and especially on the numerous steep road cuts on the island. These landslides can be very damaging if they impact structures or passing automobiles. Recent major storms have triggered numerous rock falls of different sizes that closed roads and temporarily isolated parts of the island.

GEOLOGIC SETTINGS OF DIFFERENT LANDSLIDES

The central, mountainous part of Puerto Rico is primarily igneous and metamorphic rock that weathers rapidly to form a deep soil mantle. When saturated, slopes covered by this material can produce slumps, debris slides, and debris flows ranging from a few feet to many hundreds of feet long. The storms of May 1985, triggered thousands of debris slides and debris flows in west-central Puerto Rico, which choked streams, blocked roads, and destroyed homes and other structures. Hurricanes Frederick and David in 1978-79 produced extreme rainfalls around El Yunque that triggered several debris

slides as much as 2500 ft long and 75 ft deep on steep slopes composed of deeply weathered intrusive igneous rock.

Flanking the mountainous interior of Puerto Rico is a belt of sedimentary rocks, primarily limestones, siltstones, and claystones. These sedimentary rocks give rise to rock falls from steep cliffs and road cuts; large slumps and block slides, such as at Mameyes; and debris slides and debris flows. During the storm of October 5-8, 1985, debris slides and debris flows were very abundant and destroyed several homes and buildings between Penuelas and Coamo along the south coast of the Puerto Rico (Jibson, 1986). These landslides generally began as failures of thin colluvial soil mats on steep slopes; the failed material scoured deep channels as it moved downslope in preexisting gullies or depressions. Debris slides and debris flows formed on both limestone and mudstone slopes underlain by a wide range of geologic structures.

Rock falls from steep limestone slopes have repeatedly blocked major and minor roads, and in 1981 two automobile passengers were killed by a limestone rock fall near Penuelas (Anthony Santos, pers. commun., 1985). Limestone rock falls were also observed to have triggered debris flows on steep colluvial slopes below near-vertical bedrock faces. At one site, large limestone boulders fell from a bedrock face and impacted the head of the colluvial slope, which either (1) disrupted the saturated colluvium enough to cause it to flow downslope, or (2) rapidly increased the pore-water pressure in the colluvium and caused it to mobilize.

Large, retrogressive block slides are present where thick limestone formations are underlain by clay in north-central Puerto Rico (Monroe, 1964). These generally slow-moving landslides occur where deep river valleys expose the underlying clay beds that act as slip surfaces.

Claystones in the sedimentary belt also give rise to earth flows. The area around San Sebastian is particularly susceptible to earth flows that form in the clayey members of the Tertiary San Sebastian Formation. These earth flows commonly form on gentle slopes and create a subdued, hummocky topography. Several houses and roads have been severely damaged or destroyed by these landslides.

The coastal plain surrounding Puerto Rico is composed of young sediments deposited along beaches and rivers. Though these areas are rather flat, landsliding along river banks chokes rivers channels and leads to increased erosion, which endangers homes built on the coastal plain.

MITIGATING LANDSLIDE HAZARD AND RISK

The following examples show that many landslide hazards in Puerto Rico are exacerbated by man's activities:

1. Steep road cuts in weak materials result in slope failures and consequent road closures. Thousands of road cuts throughout the entire island appear only marginally stable and have produced slides that have temporarily closed roads. A major earthquake or rainstorm will likely trigger widespread road-cut failures and thus isolate large parts of the island. This will seriously hamper emergency response efforts.

2. Injudicious route selection of major roads has reactivated several large landslides that were clearly shown on existing geologic maps and has initiated movement on new landslides. This has jeopardized major construction projects, which, if ever completed, will require huge maintainance costs.

3. Home construction on unstable or marginally stable slopes has resulted in the destruction of houses and loss of lives. High concentrations of homes having cesspools or dumping household sewage directly on the ground

has destabilized slopes and led to landsliding. Many homes are constructed so poorly that even slight ground movements cause serious damage or destruction.

4. Lack of surface drainage systems for municipal streets and housing projects has resulted in rainfall runoff patterns that erode and destabilize slopes.

Mitigation of landslide hazards can be very expensive, but many of the hazards can be eliminated or avoided by the application of relatively simple measures:

1. In designing roadcuts, use more conservative criteria that consider both seismic and heavy-rainfall conditions. This can be accomplished at a relatively small additional cost for new construction; regrading of existing cuts along critical road systems will be significantly more expensive.

2. Use existing geologic and engineering geologic information in the routing of new roads and highways to avoid landslides and other geologic hazards. Where no such information exists, conduct engineering geologic studies to select routes that will minimize risk from geologic factors.

3. Enact and strictly enforce both building and site codes that (a) prohibit building or require remedial grading at hazardous sites, (b) require adequate domestic sewage disposal systems, and (c) require enough structural integrity to prevent collapse in the event of incremental ground movement. For existing houses, teaching residents to empty domestic sewage at some distance, rather than immediately beneath or downslope from the house as is commonly the case, could decrease the number of damaging shallow landslides.

4. Install municipal storm drains where possible. In lieu of storm drains, small, inexpensive deflecting structures can be constructed to channel runoff away from homes and slopes susceptible to landslides or serious erosion.

Although many of these measures are quite costly, some can be implemented at relatively small cost and could result in significant reduction of some types of landslide hazards. Addressing landslide hazard mitigation in a more comprehensive way will require detailed studies to characterize landsliding in different areas more precisely and thus allow quantification of the factors controlling that landsliding.

REFERENCES

- Jibson, R. W., 1986, Evaluation of landslide hazards resulting from the 5-8 October 1985, storm in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 86-26, 40 p.
- Monroe, W. H., 1964, Large retrogressive landslides in north-central Puerto Rico, in Geological Survey Research 1964: U.S. Geological Survey Professional Paper 501-B, p. 123-125.
- Varnes, D. J., 1978, Slope movement types and processes, chap. 2 of Schuster, R. L., and Krizek, R. S., eds., Landslides: Analysis and Control: U.S. National Academy of Sciences, Transportation Research Board Special Report 176, p. 11-33.

ENGINEERING GEOLOGIC EXPLORATION AT THE EXISTING MAMEYES WARD
(WESTERN, NORTHERN AND EASTERN AREAS ADJACENT TO
THE LANDSLIDE)

BY

Carlos Rodriguez-Molina
Caribbean Soil Testing CO.
San Juan, Puerto Rico

A structural geologic exploration within and adjacent to the existing Barrio Mameyes landslide indicates that areas lying beyond the western, northern, and eastern margins of the landslide have been categorized as having a "High" or "Low" potential for further landsliding.

The geological conditions observed within these adjacent areas (which extend some 400 to 500 ft. West, North and East of the Mameyes Slide) are consistently similar to those in the already developed landslide. Precipitation similar to that occurring during the October 6-8, 1985 period could initiate localized movements or landslides throughout these sectors.

Previous data in the form of geologic and preliminary geotechnical reports, most of which were made by local and Federal government agencies, were analyzed prior to the commencement of this exploration. A detailed structural geology reconnaissance was performed within the landslide and throughout adjacent areas in order to measure bedrock discontinuities such as bedding planes and joint systems

attitude. Measurements were made along the landslide's scarp, along the access road outcrop, at the water tank outcrop, and at accessible outcrops within and adjacent to the slide. Also, the areas local lithologic characteristics were evaluated.

The Geology of Barrio Mameyes has been previously mapped as part of the Ponce Geologic Quadrangle, prepared by Richard D. Krushensky and Watson H. Monroe for the U.S. Geological Survey in 1975 (U.S.G.S. Miscellaneous Investigation Series Map I-863). The site is underlain by a calcareous member of the Juana Diaz Formation. The Juana Diaz consists of a pale yellowish white to pale white "lenticular calcareous sandstone overlain by chalk and chalky limestone" (Krushensky, R.D., Monroe, W.H., 1975).

Structurally, bedding plane attitudes obtained generally have a northwest strike with dips towards the southwest (strike ranges from N 50 to 80 W, dip ranges from 13 to 29 SW). At least three (3) joint sets have been recorded within the landslide and throughout the adjacent areas. These joint sets are for the most part consistent throughout the area investigated, except for small variations in strike orientations. Two of these joint sets control the upper, curved portion of the main scarp (one of such joint sets has a N 60 E, 76 SE attitude, while the other has a N 50 to 60 W, 70 SW). These sets are spaced from one to three feet consistently throughout the area.

At least fifty (50) additional joint attitudes were obtained. These, invariable had very steep dip angles (most

of them near vertical). However, they were not consistent (or repetitive) throughout the investigated area. Some of the joint surfaces still contained slickenside striations, a direct result of the landslide.

The intersection of the above mentioned joint sets with the limestone's bedding planes makes the outcropping Juana Diaz a very fractured bedrock. The latter explains the fact that part of the landslide's debris consisted of fasceted, mostly rectangular bedrock boulders, the result of the disintegration along pre-existing joint planes of relatively large bedrock slabs.

Several thin (4 to 5 inches thick), light to medium brown, calcareous clayey silt beds were observed interlayered within the sandstone beds at several locations. These thin beds are suspected by many authors to have played a significant role in the landslide's development by acting as failure surfaces. This, however, has to be quantitatively analyzed by geotechnical explorations.

It has been theorized that the landslide is controlled both by the joint sets and by the bedding planes (joint sets control the near vertical scarps, while the slip surface seems to be controlled by a bedding plane). The presence of the thin clayey silt layers suggests that the slip surface may have actually developed along one or more of these layers. Again, geotechnical and geological explorations will determine the conditions under which the slip surface developed. However, after analyzing the morphology of the landslide and by measuring attitudes in displaced bedrock

slabs (the slabs only revealed moderate strike variations whereas dips remained fairly constant), the landslide's slip surface apparently did develop along a bedding plane contact.

The near vertical walls exposed as the main scarp after the landslide are showing definite signs of instability in the form of rock toppling and wedge failures governed by intersecting steep joints and bedding planes.

A house located near the scarp, on the west-central portion of the landslide has recently developed an open crack which passes under the southern portion of the structure. This open crack has had approximately one (1) ft. of horizontal displacement and is located about 65 ft. from and parallel to the original scarp. The crack corresponds to a joint fracture with a northeast strike and a near vertical dip. Also several recently developed arcuate scarps were observed off the eastern limb of the landslide.

The above mentioned instability characteristics are definite signs that the areas immediately adjacent to and surrounding the landslide scarp are presently unstable. The undersigned accidentally prompted several relatively small rock wedges to slide or topple upon slight pressure against the scarp faces at the time of this investigation.

Based on slope face direction, bedding and joint attitudes, local lithology, and in the proximity to the existing landslide scarp, the areas adjacent to the Barrio Mameyes landslide were categorized as having a high or low potential for further landsliding. South to southwest facing slopes steeper than 13 to 15 degrees are considered to have

a high potential for further landsliding similar to the already developed Mameyes landslide. On the other hand, slopes facing east and southeast are considered as slopes having a low potential for further landsliding.

The latter statement is stricly based on structural geologic considerations. Detailed geotechnical and engineering geological explorations will better delineate subsurface conditions, geometric landslide mechanisms, and the possible sequence of events the led to the landslide.

INFORME PRELIMINAR COMISION DE ESTUDIO
TERREMOTO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985
CIUDAD DE MEXICO, REPUBLICA DE MEXICO
by

Ruth Carreras, Samuel Diaz, Rafael Jimenez, Jose Molinelli
Hermenegildo Ortiz, Carlos Rodriquez, Miguel Santiago

Introducción:

El 17 de octubre de 1985 salió de Puerto Rico hacia México una comisión compuesta por la Ingeniera Ruth Dalila Carreras, el doctor Samuel Diaz, el doctor Rafael Jiménez, el doctor José Molinelli, el doctor Hermenegildo Ortiz, el doctor Carlos Rodríguez y el doctor Miguel Santiago, quien la organizó y coordinó sus actividades. Se unieron a la comisión el estudiante graduado de ingeniería civil, José A. Martínez Cruzado y el ingeniero Juan A. Tarasa de la empresa Puerto Rican Cement. La comisión es representativa del Departamento de Recursos Naturales, La Administración de Reglamentos y Permisos, el Recinto Universitario de Mayagüez y el Recinto Universitario Río Piedras, siendo la mayoría de ellos miembros del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico.* El objetivo del viaje fue analizar y estudiar sobre el terreno, los efectos causados a las estructuras y en la comunidad por el sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985 en Ciudad México.

*Agradecemos al Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico el haber cubierto los gastos de dos miembros colegiados; al Departamento de Recursos Naturales los gastos de una ingeniera, a la Administración de Reglamentos y Permisos los gastos de un ingeniero y al Recinto Universitario de Río Piedras los gastos de dos profesores. Los demás componentes de la comisión se sufragaron sus gastos.

El interés científico incluye los aspectos geológicos, geomórficos, geotécnicos, estructurales, sociales y de planificación envueltos en un desastre causado por un terremoto. Hasta donde lo permitan los datos obtenidos, es de gran importancia proyectar a Puerto Rico los efectos de un evento similar al ocurrido el 19 de septiembre de 1985 en México.

La primera fase del estudio realizado consistió de entrevistas con distinguidos profesionales de la Universidad Nacional Autónoma de México. El señor Rector, doctor Jorge Carpizo McGregor* nos coordinó y promovió el reunirnos en el Instituto de Geofísica con su director el doctor Ismael Herrera y sus colegas los doctores Alejandro Navas, Lautaro Ponce y Gerardo Suárez. Después de un amplio cambio de impresiones pasamos al Instituto de Geología donde fuimos recibidos por su director el doctor José Guerrero García. Tuvimos la oportunidad de participar en una magnífica presentación de los doctores Fernando Ortega y Zolean de Cserna. Conocimos en detalles la geología de la Ciudad de México. El material gráfico utilizado cubrió ampliamente la zona epicentral en Zihuatanejo, Ixtapa, Playa Azul y Lázaro Cárdenas después de ocurrido el sismo.

*Gracias a la gentileza y gestiones personales del Honorable
Cónsul General de México en Puerto Rico, Don Carlos Darío
Ojeda M.

Luego fuimos recibidos en el Instituto de Ingeniería por su director el doctor Jorge Prince. Aquí pudimos participar de una amplia conferencia sobre los daños causados en Ciudad México por el sismo.

Se nos suplió copia de los informes preliminares de evaluación de daños realizados por el Instituto de Ingeniería.

El doctor Manuel Mendoza, geotécnico del Instituto de Ingeniería, nos ofreció una amena conferencia sobre el comportamiento de los suelos en Ciudad México durante el sismo.

El doctor Roberto Melli tuvo a bien ofrecernos una amplia conferencia sobre el comportamiento estructural de los edificios durante el terremoto. Recalcó que la mayor parte de los daños es observable entre los edificios de cinco a quince pisos de altura. Los edificios mayores de quince pisos y menores de cinco pisos de altura sufrieron poco o ningún daño.

La Comisión se dio a la tarea de enriquecer los conocimientos adquiridos llendo sobre el terreno a examinar la zona devastada por el terremoto en la Ciudad de México y en la zona epicentral de Zihuatanejo, Ixtapa, Playa Azul y Lázaro Cárdenas en la costa del pacífico de la República de México. Las condiciones geológicas, geotécnicas, estructurales y sociales que se observaron fueron levantadas en fotografías que transmiten, en el silencio de sus expresiones, el conocimiento y los errores de los que contribuyeron a formar la estructura social que evolucionó sobre un suelo y en unos edificios que resistieron y otros que no resistieron las fuerzas del terremoto del 19 de septiembre de 1985.

El terremoto de México nos brindó muchas lecciones en su mayoría repetitivas de otros eventos anteriores. Puerto Rico tiene mucho que aprender. Necesita poner en práctica las experiencias de otros antes de que ofrezcamos a la humanidad el espectáculo de un pueblo alojado en casetas en los parques públicos.

Prefacio:

El contenido de este informe es el producto del esfuerzo de cada miembro de la comisión por transmitir a la comunidad científica y al pueblo en general las experiencias vividas durante un viaje de estudio a Ciudad México entre los días 17 al 22 de octubre de 1985. El mismo se divide en cinco capítulos a saber:

Consideraciones de Planificación

Consideraciones Geológicas

Consideraciones Geotécnicas

Consideraciones Estructurales

Consideraciones Sociales

Cada capítulo fue escrito por el especialista en el campo del tema que formó parte de la comisión. El contenido de los mismos es preliminar y necesitará revisión ulterior para publicación futura.

En el Capítulo I, el doctor Hermenegildo Ortiz describe las características del sismo y sus efectos en Ciudad México. En adición analiza las medidas de acción tomadas por el Gobierno Mexicano a corto y largo alcance para lograr la rehabilitación de la zona devastada por el terremoto y prevenir daños futuros.

En el Capítulo II, el doctor José Molinelli analiza las condiciones topográficas, geológicas y geomórficas del área afectada por el terremoto en la República de México. Al comparar las condiciones geológicas de Puerto Rico a las de Ciudad México no encuentra paralelo entre ellos; sin embargo advierte que, aunque en menor escala, en Puerto Rico hay

segmentos importantes urbanos sobre suelos aluviales que pueden sufrir daños significativos en un terremoto de gran magnitud.

En el Capítulo III, el doctor Carlos Rodríguez resume la naturaleza geotécnica del suelo en Ciudad México. Relaciona el comportamiento de las estructuras durante el sismo en las diferentes zonas de la ciudad a la naturaleza del suelo donde ubican. También establece relación entre el método o sistema de fundaciones y el estado final de las estructuras.

En el Capítulo IV, el doctor Rafael Jiménez y el doctor Samuel Díaz hacen una minuciosa evaluación del comportamiento de los diferentes sistemas estructurales observados en los edificios que se derrumbaron y los que aún permanecen sin daños o sufrieron poco daño. Las causas de los daños severos son enumerados y discutidos ampliamente. El efecto que causaría un sismo similar en las estructuras de la Zona Metropolitana de San Juan es comparado con los daños que ocurrieron en la zona epicentral del evento en la costa del Pacífico de la República de México.

En el Capítulo V, la ingeniera Ruth Dalila Carreras compila los eventos de impacto social que describen los efectos que tuvo el sismo en la Ciudad de México. Realza la importancia que tiene el hacer planes para mitigar daños y angustias durante y después de un terremoto.

Al final se hacen recomendaciones de tipo general en ánimo de crear conciencia a todos los niveles de que estamos a tiempo para mejorar nuestras condiciones de supervivencia ante un terremoto destructor.

CONSIDERACIONES DE PLANIFICACION

Hermenegildo Ortiz Quiñones, PhD

Escuela Graduada de Planificación, UPR, Río Piedras

Características del Sismo y sus Efectos

Tanto en términos cualitativos como cuantitativos los efectos del terremoto que estremeció a Ciudad México el pasado 19 de septiembre fueron devastadores. Aunque oficialmente se informa que no ha sido posible precisar el número total de personas que murieron, informes no-oficiales estiman que el terremoto causó la muerte de más de 6 mil personas. Se estima también que han desaparecido más de 2 mil personas y que los heridos así como los damnificados sobrepasan las 30 mil personas.

Los daños materiales a Ciudad México se limitaron a una pequeña proporción de la metrópolis o no más de 60 kms. cuadrados de un área total de aproximadamente 1000 kms. cuadrados de extensión y una población estimada en 16 millones de personas. La zona afectada, sin embargo, es el corazón administrativo de México, el espacio de mayor densidad poblacional en todo el país y donde se llevan a cabo las más diversas e importantes actividades económicas, gubernamentales, administrativas, sociales y culturales.

El terremoto precipitó daños de consideración a más de 3,000 edificios; una gran proporción de estos tenían entre 5 y 15 pisos, incluyendo oficinas gubernamentales,

oficinas, viviendas multifamiliares, hoteles, hospitales, teatros y escuelas. Se observó que algunos de los edificios que se desplomaron o que sufrieron daños considerables se encontraban en esquinas. Se observó que en algunos de los edificios dañados, los pisos de arriba cayeron sobre los de abajo formándose un patrón que a falta de un nombre técnico se le puede llamar de "sandwiches". Por otro lado, se notaba un patrón de daños lineales a lo largo de algunas calles o avenidas. De la misma forma, era evidente que muchos de los edificios afectados eran de dependencias gubernamentales. Se estima que del total de edificios dañados, 125 ubicaban oficinas gubernamentales. Se estima también que más de 450 escuelas sufrieron daños considerables, 137 de ellas quedaron totalmente destruídas o inservibles.

A un mes del terremoto, nuestra visita reveló que grandes sectores de la inmensa ciudad de México están funcionando como si nada hubiera sucedido. No hay escasez de comida, el vandalismo ha sido casi inexistente y no ha habido brotes serios de epidemias o de enfermedades contagiosas. Algunos de los edificios severamente dañados ya han sido demolidos y los escombros removidos. El Metro no sufrió daños y el tránsito vehicular fluye casi normalmente, excepto por pequeños tramos en algunas calles donde se están demoliendo edificios.

Por otro lado, se pudieron observar también situaciones donde no han podido superarse algunos problemas de

carácter social. Entre estos, podemos mencionar los siguientes:

1. Parte del sistema escolar continuaba paralizado. Ciento cincuenta mil alumnos no habían podido asistir a clases durante un mes.
2. Algunos servicios públicos estaban trabajando en forma irregular. Algunos sectores no tenían agua potable por fracturas en las tuberías de distribución y válvulas descompuestas en los registros de agua.
3. El problema del déficit de la vivienda en Ciudad México se ha agudizado. Numerosas familias (se estima unas 35 mil) están viviendo en albergues y campamentos en áreas verdes o parques dentro de la ciudad. A estas familias se les está proveyendo de alimentos, vestidos y atención médica.
4. El desempleo ha aumentado, al tener que cerrarse, aunque sea temporalmente, hoteles, oficinas, teatros, negocios e industrias.
5. Los sistemas de comunicación de la ciudad con el exterior no están totalmente restablecidos.
6. Las necesidades de vivienda de los damnificados que pertenecen a los estratos de ingresos medios escapan soluciones rápidas y fáciles.
7. Algunas agencias gubernamentales están en entredicho, especialmente aquellas a cargo de proveer

viviendas para familias de bajos ingresos y los responsables de supervisar la construcción de edificios y estructuras.

8. La capacidad de los hospitales se ha disminuído en más de 5,000 camas.
9. La planta hotelera ha sufrido cuantitativamente y muchas facilidades están en proceso de reparación. Cinco hoteles fueron totalmente destruídos y cuatro más sufrieron daños severos.
10. El decreto de expropiación ha generado bastante incertidumbre en un sector de la población.

No hay dudas de que los efectos del fenómeno telúrico que estremeció a México el 19 de septiembre han planteado nuevos retos y, además, agravan los problemas que la sociedad mexicana estaba enfrentando. Por otro lado, han permitido que el pueblo mexicano haya podido mostrar sus enormes cualidades y valores.

Medidas de Acción Después de un Desastre

Luego de un desastre, es necesario tomar una serie de acciones que es posible clasificar de la siguiente forma:

1. Medidas de Emergencia
2. Medidas de Rehabilitación
3. Medidas de Reconstrucción
4. Medidas de Prevención

Muchas de las medidas que ha tomado el gobierno

mexicano hasta la fecha de nuestra visita caen en las dos primeras categorías. No obstante, ya se había comenzado a pensar sobre la fase de reconstrucción y cómo hacerla de manera tal que se pudiera prevenir y mitigar los daños que futuros terremotos pudieran ocasionar.

Gran parte de las medidas de emergencia que se tomaron a raíz del terremoto fueron dirigidas a darle apoyo a la población afectada. Entre estas medidas se destacan las siguientes:

1. Labores de rescate y salvamento de personas
2. Atención de heridos y cuidado de enfermos
3. Distribución de medicamentos
4. Orientación en cuanto al manejo de cadáveres
5. Abasto de productos básicos
6. Suministro de agua potable en pipas, bolsas plásticas y botellas
7. Vacunación necesaria y prevención de enfermedades
8. Seguridad y vigilancia
9. Alojamiento en albergues y campamentos
10. Suministro de alimentos, ropas y enseres

Aunque no directamente dirigido a los damnificados o personas afectadas por el sismo, es posible añadir en este renglón el Comité nombrado por el Presidente Miguel de la Madrid Hurtado para Supervisar los Donativos internos y externos. La función principal de este Comité es vigilar el manejo honesto y transparente de la ayuda a los damnificados.

Otras medidas que tomó el gobierno mexicano han ido dirigidas a la prevención de riesgos en los inmuebles dañados. En esta categoría se incluyen las demoliciones de edificios, retiro y remoción de escombros, recolección de basura, fumigación, desocupación de los edificios peligrosamente dañados e investigaciones preliminares de daños.

Otras medidas han ido dirigidas a la rehabilitación y restablecimiento de servicios urbanos. Entre estas medidas se encuentran las siguientes:

1. Restablecimiento inmediato de la energía eléctrica y alumbrado
2. Restablecimiento del servicio de agua potable
3. Restablecimiento de la viabilidad y el tránsito fluído
4. Restablecimiento de las comunicaciones
5. Restablecimiento de la planta escolar y los hospitales

El gobierno mexicano también ha tomado otras medidas dirigidas a sentar las bases para llevar a cabo el proceso de reconstrucción. Entre éstas, vale la pena destacar las que está tomando la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Como un primer paso, la Secretaría va a formar un organismo interno para la regeneración y restructuración de la zona afectada con amplia participación popular. Este organismo llevará a cabo importantes funciones; a saber: preparar normas y reglamentos dirigidos a guiar las

transacciones de inmuebles así como los usos del terreno y construcción dentro de la zona a regenerarse o a reestructurarse.

Antes de la preparación de estas normas y reglamentos, el organismo de regeneración deberá buscar una explicación científica del desastre ocurrido en Ciudad México. En base a estos hallazgos, preparará un esquema territorial para toda la metrópolis y un plan parcial para la zona afectada.

En base a estos planes se tomarán medidas de acción más concretas dirigidas a lo siguiente:

1. Adquisición de inmuebles
2. Regulación del suelo
3. Ejecución de obras de infraestructura, equipamiento y vivienda
4. Mantenimiento de la planta física.

Por otro lado, el Distrito Federal ha tomado o está por tomar una serie de acciones, antes de participar y colaborar con otras entidades a nivel nacional en la preparación y adopción de los planes de reestructuración. Entre estas acciones se encuentran las siguientes:

1. Ha congelado la reconstrucción de estructuras en solares donde estaban ubicados edificios que tuvieron que derrumbarse o van a ser demolidos en un futuro cercano como resultado del sismo. Estos espacios, una vez removidos los escombros, se están convirtiendo temporeraamente en lo que ha venido a llamarse jardines instantáneos.

2. Están realizando los estudios que van a determinar la necesidad de modificar el Reglamento de Edificaciones existentes. Algunos expertos opinan que los reglamentos deben ser más exigentes, otros opinan lo contrario.

3. Están discutiendo la deseabilidad de llevar a cabo revisiones periódicas de las edificaciones de uso público y multifamiliares para evitar que la falta de detección oportuna de daños estructurales pueda traer en el futuro consecuencias funestas.

4. Están discutiendo medidas que tiendan a evitar el fenómeno de la especulación en las transacciones de inmuebles.

5. En las etapas de construcción, recomendar el establecimiento de un organismo intermedio entre el gobierno y el constructor para que inspeccione las obras construyéndose y vele porque se construyan de acuerdo a los planos apropiados.

6. Inspeccionar periódicamente si los edificios se están utilizando para el uso para los cuales fueron diseñados y construídos.

7. Descentralizar dentro de la metrópolis algunas actividades claves como los centros de salud y centros de comunicaciones.

8. Preparar un plan de prevención y de orientación a la ciudadanía sobre qué hacer cuando ocurre un terremoto.

Se estima que un 80 por ciento de las personas que mueren lo hacen después que ocurre el terremoto. Existen discrepancias sobre si la autoridad a cargo de las medidas de emergencia, una vez ocurre un terremoto, debe ser civil o militar.

9. Los planes futuros de prevención deberán especificar las ubicaciones en áreas de menor peligrosidad sísmica de las redes de comunicaciones, abastecimiento y de campamentos a utilizarse durante el período de emergencia.

10. Dado los conocimientos sísmicos que se han adquirido, examinar la posibilidad de construir rompeondas sísmicas.

11. Examinar la deseabilidad de inmediatamente después de un sismo de alta magnitud, cortar los sistemas de energía eléctrica, gas y agua.

12. Examinar la posibilidad de ejercer en los períodos inmediatamente después de un desastre un control estricto de las vías de comunicación y transportación.

El Distrito Federal ha expedido un decreto para expropiar más de 5,000 estructuras y sus solares. Estas propiedades se encuentran en la zona afectada dentro del Distrito Federal. Las mismas se limitarán a estructuras residenciales, cuyos dueños no residan en ellas. Es decir, se trata de viviendas alquiladas. Muchas de ellas, tenían sus rentas congeladas desde años después de la Segunda Guerra

Mundial. Las expropiaciones buscan una serie de objetivos; a saber: prevenir especulaciones; asegurar que las viviendas puedan mejorarse; facilitar la agrupación de predios para lograr una planificación de la zona afectada más integral; y proveer viviendas a los damnificados.

Los planes más importantes de reconstrucción del gobierno mexicano están todavía en gestación en las mesas de dibujo. El gobierno mexicano está pensando en reconstruir en grande. De acuerdo al Presidente de la Madrid Hurtado, "reconstruir no significa simplemente reponer lo que había, sino en muchos casos renovar, cambiar las pautas de nuestro crecimiento y de nuestro estilo de vida". En este sentido, la reconstrucción incluye no sólo la regeneración de las partes afectadas por el sismo del 19 de septiembre, sino también la descentralización de la Ciudad México y a la misma vez lograr un desarrollo equilibrado y armónico de todo el territorio mexicano.

CONSIDERACIONES GEOLOGICAS

José Molinelli Freytes, Ph.D.

Programa de Mantenimiento Ambiental

Facultad de Ciencias Naturales, UPR, Río Piedras

Marco Tectónico

La porción occidental de México es parte del Cinturón de Fuego del Océano Pacífico. Este se caracteriza por una gran sismicidad que ocurre asociada a los márgenes de las placas litosféricas que se mueven lateralmente sobre un substrato blando (astenosfera) que se cree es accionado por corrientes de convección en el manto terrestre.

La alta sismicidad que se registra en la región occidental de México es principalmente el producto de procesos asociados a márgenes convergentes. Específicamente la subducción de la placa de Cocos bajo la placa de Norteamérica donde está ubicado México ocurre a razón de 6.4 centímetros al año. Cuando las rocas son deformadas por fuerzas tectónicas, su elasticidad les permite acumular gran cantidad de energía. Esta energía es liberada súbitamente a lo largo de un plano de falla cuando las fuerzas deformantes exceden la resistencia de las rocas produciendo un terremoto.

Específicamente el 19 y 20 de septiembre de 1985 dos terremotos de magnitud Richter 8.1 y 7.5 impactaron la porción occidental y central de México el primero tuvo epicentro a unos 400 km. al suroeste de la Ciudad de México

cerca de Playa Azul en el Estado de Michoacan y el segundo a unos 100 km. al sureste del epicentro primario.

Los terremotos ocurrieron en la Brecha de Michoacan, zona de quietud sísmica donde no habían ocurrido sismos mayores desde principios del siglo pasado. Estas zonas o brechas sísmicas son indicativas de un alto potencial sísmico especialmente cuando están localizadas en un área de subducción activa ya que señala a una acumulación progresiva de energía que podría ser liberada repentinamente en el futuro.

Luego del terremoto del 19 de septiembre se produjeron una serie de temblores de menor magnitud. La mayor de las réplicas ocurrió el 20 de octubre. Se puede considerar que los eventos sísmicos subsiguientes han roto probablemente la totalidad de la brecha sísmica de Michoacan. Esto reduce significativamente las probabilidades de que un evento de magnitud similar ocurra nuevamente en la misma área. Sin embargo, debe tenerse claro que el ajuste hecho por la placa de Cocos en la brecha de Michoacan puede aumentar las probabilidades de sismos en las zonas que colindan con la brecha de Michoacan.

Peligros Geológicos

Los peligros geológicos inducidos por terremotos más importantes son la vibración del terreno, movimientos de masas, (derrumbes, flujos, deslizamientos, etc.), licuación, maremotos y rupturas del terreno. A excepción de este último todos estos fenómenos ocurrieron durante el sismo de México.

La vibración del terreno (ground shaking) fue el peligro geológico inducido por terremoto más dañino durante los sismos de México. Los mapas de isosistas revelan una distribución asimétrica de forma elíptica con eje nordeste-suroeste en cuanto a su representación planimétrica. Dos condiciones son evidentes: una disminución de los daños, función de la distancia epicentral, seguida por un súbito incremento en la intensidad del sismo en la ciudad de México. La primera condición es más representativa del marco tectónico de Puerto Rico mientras que la segunda representa un caso especial de amplificación de ondas sísmicas.

En la región epicentral, las poblaciones de Lázaro Cárdenas y Playa Azul sufrieron intensidades entre VIII y IX, Zihuatanejo e Ixtapa de VII y Acapulco y Manzanillo de VI. Sin embargo, ciudades del interior ubicadas en terrenos pobremente consolidados, como ciudad Guzmán en el estado de Jalisco sufrieron intensidades de VIII. El Distrito Federal experimentó intensidades que varían entre VI y IX en el centro de la ciudad. Los efectos que tuvo el sismo sobre ciudad de México sorprendieron a muchos expertos dado que la distancia epicentral fue de unos cuatrocientos kilómetros. Esta distancia es lo suficientemente grande como para haber atenuado considerablemente el sismo.

Son varios los factores que combinados ayudan a explicar la severidad del sismo. En primer lugar la irradiación de la energía desde la fuente sísmica se

produjo con efectos direccionales, con rumbo hacia la ciudad de México donde se enfocó la misma. De gran importancia es el fenómeno de amplificación de ondas sísmicas en el subsuelo de la ciudad. La naturaleza de la amplificación está determinada entre otros factores por el espesor de la capa sedimentaria que en la ciudad de México en la zona blanda alcanza hasta un kilómetro. Estos materiales sedimentarios llegan a tener un contenido de agua de hasta 300%. Estos consisten de capas alternadas, interestratificadas con arcillas de propiedades tixotrópicas, limos, arenas, abanicos aluviales, lavas basálticas y material piroplástico principalmente de naturaleza tobácea. También la configuración topográfica rocosa bajo la capa sedimentaria no consolidada puede reflejar, refractar, concentrar o dispersar las ondas sísmicas en la cuenca sedimentaria de la ciudad de México.

Estos factores entre otros, modifican la naturaleza de las ondas sísmicas al cambiar el contenido de frecuencia y amplitud de las vibraciones del terreno. La amplificación de ondas sísmicas a períodos que coincidan con el período natural de vibración de la estructura ayudan a explicar la distribución del daño que en la ciudad de México se concentró en los edificios de altura fluctuante entre cinco y quince pisos. Como regla general se observó que las edificaciones ubicadas sobre materiales geológicos de edad Cuaternaria especialmente del Holoceno fueron los más afectados por el sismo.

No se observó licuación ni movimientos de masas en la ciudad de México. Los daños que éstos pudieron haber producido en la ciudad de México son totalmente insignificantes cuando los comparamos con los causados por la amplificación sísmica. La ausencia de movimientos de masas significativos es fundamentalmente debido a que la zona de mayor amplificación posee pendientes llanas mientras que las áreas caracterizadas por pendientes pronunciadas (Zona de Lomas) no sufrieron aceleraciones capaces de iniciar derumbes u otro movimiento de masas. Es probable que haya ocurrido licuación de arena en el subsuelo, pero no se observó evidencia directa de esta sobre la superficie.

Las condiciones geológicas de Ciudad de México no tienen paralelo en Puerto Rico en cuanto a la magnitud de la amplificación sísmica. No obstante porciones significativas de las principales zonas urbanas de Puerto Rico como San Juan, Ponce y Mayaguez están ubicadas sobre aluviones y rellenos que alcanzan decenas de metros de espesor. En estos materiales geológicos la duración e intensidad del sismo es generalmente mayor.

En cuanto a peligros geológicos en la zona más próxima al epicentro se encontró que igual que en la ciudad de México los daños principales son producto de la vibración del terreno. Esta causó un daño a un 25% de las estructuras en Lázaro Cárdenas y afectó entre 10 y 12 edificios en Ixtapa.

Un terremoto de esta magnitud puede producir en los

primeros 200 kilómetros radiales del epicentro todo tipo de movimientos de masas, sin embargo, observación aérea y de campo muestra que los movimientos de masas en esta zona costera del Pacífico no fueron significativos. Se supo solamente del desprendimiento de una ladera durante el primer sismo en la carretera de Zihuatanejo a Acapulco. Sólo se observaron pequeños derrumbes (5mc.) en los taludes de las carreteras que muy bien pueden ser producto de las lluvias. Un factor importante que puede explicar el reducido número de movimientos de masas en la zona epicentral lo es la ausencia de saturación excesiva del terreno previo al sismo. No obstante se necesitan hacer muchas más observaciones en Sistema Montañoso Meridional específicamente en la Sierra Madre del Sur donde las pendientes son más escarpadas antes de llegar a una conclusión final.

Se observó directamente el fenómeno de licuación en el valle aluvial del Río Balsas, tanto en porciones del cauce como en el llano inundable. En lugares donde las arenas estaban confinadas se generaron presiones intersticiales que fueron capaces de agrietar lozas de hormigón de más de 4 centímetros de espesor. En Lázaro Cárdenas como en otras zonas próximas a los ríos y costas se reportó la formación de grietas en el terreno y volcanes de lodo y arena. Estas observaciones se hicieron en un área que está a una distancia epicentral similar a la que podríamos esperar en Puerto Rico con relación a las fallas activas localizadas en

la Trinchera de Puerto Rico, Cañón de la Mona, Fosa de Anegada y Fosa de Muertos. Esto indica y confirma nuevamente que el peligro de licuación de arenas en Puerto Rico durante un gran terremoto es real.

Se reportó un maremoto durante el sismo principal, pero éste no excedió los 2 metros de elevación según fue registrado por los mareógrafos del Instituto Geofísico de la UNAM. Este no produjo daño significativo alguno.

CONSIDERACIONES GEOTECNICAS

Carlos E. Rodríguez, Ph.D.

Departamento de Ingeniería Civil, U.P.R., Mayaguez

A. Subsuelo de la Ciudad de México

Geológicamente, el subsuelo de la Ciudad de México se formó debido al azolve del cauce de un río que fue obstruido por depósitos volcánicos. Este proceso geológico provocó la formación de un lago cuyo fondo fue rellenado por los depósitos aluviales del río. Se estima que el espesor de estos depósitos tiene una profundidad que varía entre 350 a 400 metros, aunque es posible que alcance más de 600 metros. Esta profundidad, sin embargo, no ha sido verificada por barrenos en el sitio. El barreno más profundo realizado tiene una profundidad de 650 metros aproximadamente sin llegar a alcanzar el manto rocoso.

La mayor profundidad alcanzada para soportar cargas de estructuras en la superficie del terreno es de aproximadamente 70 metros. Las características generales del subsuelo de la ciudad en este rango de profundidades son las siguientes:

1. Una capa superior de cerca de 33 metros de depósitos lacustres de arcillas orgánicas, limos y lentes de arena. La consistencia de estos depósitos es blanda y las arcillas son altamente plásticas. El contenido de humedad de estos suelos es, en

general, mayor de 250%, lo cual es un indicio de la gran cantidad de agua incorporada en este suelo. El suelo es altamente compresible de un grado alto de sensibilidad que lo hace susceptible al remoldeo.

En algunos sectores de la ciudad se encuentran rellenos artificiales de limos y arcillas que alcanzan una profundidad de hasta 12 metros. Estos sectores se localizan en la parte antigua o colonial de la ciudad.

La capa superior es responsable de los asentamientos grandes observados en la superficie debido a su alta compresibilidad.

2. Una capa dura compuesta de arena limosa con espesor de 3 a 5 metros. La resistencia a la penetración de esta capa es alta con valores de penetración estándar mayores de 50 golpes por pie. En algunos sectores, sin embargo, esta capa no ha sido encontrada en barrenos de 45 metros de profundidad.

Este dato de campo ha sido tomado durante el barrenado efectuado en las cercanías de un edificio averiado por el sismo.

La mayoría de las estructuras pesadas son apoyadas en esta capa a través de pilotes de punta.

3. Una capa inferior formada de arcilla limosa altamente plástica con valores de contenido de humedad

de aproximadamente 200%. Esta capa tiene una consistencia mayor que la capa arcillosa superior y alcanza una profundidad de cerca de 50 metros, con un espesor promedio de 14 metros. En algunos sectores, la capa inferior contiene lentes delgados de arcilla suave.

4. Depósitos profundos compuestos de arenas y limos con bajos contenidos de arcilla y grava. Estos depósitos son subyacidos por suelos arenosos mezclados con depósitos de toba volcánica provenientes de erupciones volcánicas posteriores a la formación del lago de la ciudad. Supuestamente, el manto rocoso subyace a una profundidad de más de 350 metros.

En base a la proporción de los diferentes tipos de suelos encontrados, la ciudad ha sido dividida en tres zonas: a) zona de lago, b) zona de transición y c) zona de lomas.

La zona de lago consiste del perfil de suelos descrito anteriormente. Esta zona presenta los problemas de asentamientos considerables debido a la alta compresibilidad de la capa arcillosa superior. La mayor parte de las estructuras (livianas y pesadas) se encuentran localizadas en esta zona, la cual se extiende al norte, centro y sureste de la ciudad.

La zona de transición presenta una reducción rápida en el espesor de la capa arcillosa superior. La zona

contiene mayor cantidad de limos, arenas y gravas y se extiende en una franja al oeste y sur de la ciudad. La zona de transición presenta en algunas ocasiones problemas de asentamientos diferenciales considerables en las estructuras debido a la rápida reducción de la capa arcillosa compresible.

La zona de lomas consiste de depósitos de lava volcánica localizados al suroeste, sur y sureste de la ciudad. Muchas estructuras, incluyendo la Ciudad Universitaria, han sido construídas en esta zona.

B. Fundaciones

Los tipos de fundaciones más comunes en la ciudad consisten de fundaciones llanas para estructuras livianas y fundaciones profundas, a base de pilotes, para estructuras pesadas.

Los pilotes comúnmente usados son: 1) pilotes de punta apoyados en la primera capa dura arenosa, 2) pilotes de fricción hincados en la capa arcillosa superior.

Los edificios coloniales de la ciudad están apoyados sobre fundaciones llanas y por ello han sido sometidos a grandes asentamientos.

Los edificios sobre pilotes de punta tienden a emerger de la superficie debido al asentamiento del subsuelo que los rodea. Por otro lado, muchos de los edificios sobre pilotes de fricción tienden a asentarse ligeramente más que el suelo circundante. Este asentamiento ha sido redu-

cido en algunos edificios a través del uso de cajones de cimentación que compensan parte de la carga transmitida por la estructura. Sin embargo, existe la tendencia a desarrollarse asentamientos diferenciales, en ocasiones considerables, en edificios apoyados sobre pilotes de fricción.

C. Observaciones del Sitio

La mayor parte de las estructuras observadas dañadas y colapsadas durante los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985 se encuentran localizadas en la zona de lago de la ciudad. La mayor parte de estos colapsos se debieron a fallas estructurales. En muchas de estas estructuras las fundaciones permanecieron aparentemente sin daño alguno. Sin embargo, se pudieron observar varios edificios de 5 a 12 pisos que se asentaron considerablemente durante el evento sísmico, y otros que, aunque no manifestaron asentamiento, sus aceras circundantes sufrieron daños considerables de agrietamiento y asentamiento. Estos últimos edificios están apoyados en pilotes de punta.

Tres edificios que se asentaron considerablemente pudieron observarse con detalle. Uno de ellos se asentó de 4 a 5 pies por debajo de la acera circundante. Otro se asentó de 3 a 4 pies y el tercero menos de 1 pie. Los dos últimos edificios aparentemente están apoyados sobre pilotes de fricción y muestran evidencia de asentamientos diferenciales previos a los mismos. Más aún, los asenta-

mientos debido al sismo en estos edificios se desarrollaron en mayor medida en los sectores de mayor asentamiento por consolidación previa. A consecuencia de esto, los edificios se inclinaron considerablemente.

El tercer edificio se asentó 4 a 5 pies en el frente y muy poco en su parte posterior. La estructura aparentemente no sufrió mucho daño estructural y se inclinó como cuerpo rígido. Durante nuestra visita se estaba efectuando un barreno en un costado del edificio. El barreno había alcanzado 45 metros de profundidad sin encontrar la primera capa dura arenosa. Se estima que este edificio está apoyado sobre pilotes de fricción o pilotes de punta que no alcanzaron la capa dura.

Los tres edificios anteriores causaron daños considerables sobre las estructuras vecinas debido a su inclinación.

Una posible causa de la pérdida de soporte lateral de los pilotes de fricción en estos edificios es el remoldeo de la arcilla circundante provocado por el efecto cíclico del sismo. Como se mencionó anteriormente, la arcilla de la capa superior es muy sensible al remoldeo llegando a perder considerablemente su consistencia al ser sometida a este proceso. (Se reduce a un 10% de su valor inicial, aproximadamente.) Más aún, la inclinación de los edificios debido a consolidación previa provocó condiciones favorables para incrementar el vuelco de los edificios y, por ende, su inclinación considerable durante el sismo.

El fallo de las aceras circundantes a edificios sobre pilotes de punta es consistente en varios casos. Estas fallas se debieron a la pérdida del suelo inmediatamente debajo de las aceras. Esta pérdida puede originarse posiblemente debido a tubificación del material por rotura de tuberías de agua, a cambios de volumen del suelo subyacente, o a fallos de las estructuras subterráneas utilizadas para drenaje etc., que generalmente son fabricadas de mampostería. Desafortunadamente, pocos detalles pudieron observarse para esclarecer la causa de la pérdida del material subyacente. En dos sitios, la acera fue agrietada al ser comprimida por los edificios durante su movimiento.

En varios sectores se pudieron observar grietas de hasta dos pulgadas de ancho en el pavimento de las calles. Muchas de estas grietas coincidían consistentemente con la presencia de las facilidades subterráneas localizadas en el sitio, mas sin embargo, no se pudo encontrar en el terreno la posible relación de esta coincidencia, más investigación detallada se requiere para aclarar este aspecto.

En algunas calles con pavimento rígido, las losas de concreto se alzaron de una a dos pulgadas debido a las oscilaciones del terreno. Lo mismo ocurrió en algunas calles en donde rieles soterrados fueron alzados, doblados y algunos partidos. En otras calles, las losas del pavimento experimentaron un agrietamiento fino. Consistente-

mente, las esquinas de las aceras eran las que presentaban más daño de agrietamiento, levantamiento y asentamiento.

En conclusión, la mayoría de las fallas observadas fueron estructurales y de acuerdo a las fallas observadas ocasionadas por las fundaciones, las estructuras apoyadas sobre pilotes de punta aparentemente se comportaron mejor que aquellas soportadas por pilotes de fricción. Un factor importante en este comportamiento es la alta compresibilidad y la sensibilidad al remoldeo de la arcilla de la capa superior de la ciudad. Aparentemente, la capacidad de sustentación de la capa dura resultó ser alta para evitar el hundimiento de los pilotes de punta.

D. Características Sísmicas del Subsuelo

En base a lo observado, se pudo apreciar que la mayoría de las estructuras afectadas por el sismo se encontraban localizadas en la zona de lago de la ciudad. Las estructuras desplantadas en la zona de transición y especialmente aquellas en la zona de lomas (zona volcánica) no sufrieron daño aparente al ser sometidas al efecto de los sismos.

Mucho de este comportamiento está relacionado, entre otras cosas, al comportamiento sísmico de los suelos de estas zonas.

Es conocido que suelos blandos con las características del subsuelo de la zona de lago amplifican las ondas sísmicas y la magnitud de esta amplificación depende mucho del

espesor de los estratos blandos. El período natural de vibración de los suelos blandos de la ciudad ha sido estimado, en base a mediciones de campo, en el orden de 2.15 a 2.5 segundos, mientras que el del subsuelo de la zona de lomas es mucho menor. Además, el tiempo de duración del movimiento sísmico es también amplificado debido al menor amortiguamiento proporcionado por los suelos blandos de la zona de lago. Las aceleraciones máximas del terreno medidas durante el sismo fueron de aproximadamente 0.01g a 0.04g en roca y de 0.20g en la zona de lago en donde se observaron períodos naturales de vibración de ? segundos. Sin embargo, en el lago Texcoco al noreste de la ciudad, la aceleración medida fue de 0.14g para períodos de 3 a 4 segundos. De acuerdo a información obtenida, el sismo del 19 de septiembre tuvo una duración aproximada de 1 minuto en la zona de lomas y de 3 minutos en la zona de lago. Estas características sísmicas son producto de las condiciones un tanto particulares del subsuelo de la ciudad.

E. Observaciones en la Zona de Zihuatanejo

La zona de Zihuatanejo, Ixtapa, Playa Azul y Lázaro Cárdenas se encuentra localizada en la costa oeste de México frente al área identificada como el epicentro de los sismos ocurridos en septiembre. La distancia menor al epicentro se localiza en la vecindad de la población Lázaro Cárdenas a unos 40 kms.

Lo que se pudo observar, desde el punto de vista geotécnico, fue mínimo ya que la mayor parte del área se encuentra desplantada sobre roca mayormente granítica. En esta zona, sin embargo, existen varios ríos fluyendo hacia el Océano Pacífico. El cauce de estos ríos consiste de depósitos aluviales de gravas y arenas con pocos finos. Estos depósitos aluviales alcanzan la zona de inundación de estos ríos, la cual es relativamente pequeña y poco habitada, salvo la zona cubierta por el Río Balsas, uno de los más caudalosos del país.

Las estructuras observadas en esta zona de Zihuatanejo - Lázaro Cárdenas consisten principalmente de puentes, edificios pequeños, hoteles y una presa. Desde el punto de vista de fundaciones, el daño ocasionado por los sismos fue mínimo. Aunque las secciones de los puentes se desplazaron y rotaron vertical y horizontalmente, sólo se pudo observar el fallo de un puente. Los pocos colapsos de edificios en el área estuvieron asociados a problemas estructurales más que a problemas de fundaciones. Al mismo tiempo, no se apreciaron fallas de deslizamientos de masas rocosas activados por los sismos. Sin embargo, residentes del área indicaron que se produjo un deslizamiento al sur del área visitada ocurrido días después de los sismos principales.

En Zihuatanejo se observó agrietamiento fino de la roca. En Playa Azul se desarrollaron fisuras en el suelo.

Aunque no pudimos observarlas, se reportaron en esta área grietas de hasta 1.5 pies en el terreno.

En el área de Lázaro Cárdenas, un puente sobre el Río Balsas resultó seriamente averiado. El acceso del puente sufrió serios daños de agrietamiento longitudinal y asentamiento que indicaban fallo de las fundaciones del terraplén del acceso. Las grietas llegaban a alcanzar 2 a 3 pies de ancho y 3 a 4 pies de profundidad. No se encontró evidencia de deslizamiento de la masa del terraplén. El terraplén de la carretera, el acceso y el estribo del puente se encuentran sobre depósitos aluviales de gravas y arenas con poco limo.

En las vecindades del puente y aguas abajo se pudo observar evidencia de desarrollo de licuación del material granular de los bordes del río, lo cual es indicativo de las presiones de poro que se desarrollaron durante el sismo, así como también, del estado de densidad suelta del material. Lo más interesante de esta evidencia fue que se pudo observar también bolos de grava hasta de 2 pulgadas de diámetro que fueron arrastrados durante la licuación. En algunos sitios se observaron pequeños domos de acera fina con limo y productos también de la licuación.

La pilastra del puente cercana a los sitios con evidencia de licuación rotó y aparentemente por fallas en el subsuelo. En base a esto, se estima que el agrietamiento y asentamiento observados en el acceso del puente se debie-

ron al colapso del subsuelo por causas relacionadas con presiones de poro y licuación, provocadas por el sismo.

Cerca de este sitio y también sobre el Río Balsas, la cortina de la presa Morelos (La Villita) sufrió leves daños. En la cresta del talud aguas abajo se desarrolló un pequeño deslizamiento de cerca de 200 pies de largo en la dirección del eje de la cortina y de 15 pies en la dirección transversal. La cresta se hundió cerca de 8 pulgadas. Más información es requerida para estimar la amplificación de la aceleración ocurrida en la cresta de la cortina para determinar las condiciones del deslizamiento.

Finalmente, y tomando en cuenta lo cerca que esta zona se encuentra del epicentro, los daños ocurridos resultaron ser mínimos. Esto conduce a la consideración de la importancia que tienen las condiciones del subsuelo de la Ciudad de México en la generación de los daños causados por los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985. También, lo importante que ha resultado el contar con un programa de instrumentación que permita medir los parámetros necesarios para la evaluación más adecuada de los sismos y sus resultados.

CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES

por:

Rafael Jiménez, Ph.D.

Departamento de Ingeniería Civil, U.P.R., Mayaguez

Samuel Diaz, Ph.D.

Administración de Reglamentos y Permisos

I. INTRODUCCION

En esta sección se resumen los daños observados mediante una inspección visual realizada a varios edificios localizados en distintas zonas de la Ciudad de México, así como en la vecindad del poblado de Playa Azul localizado en la costa oeste del país. Los edificios examinados detalladamente en la Ciudad de México están localizados en el sector Tlatelolco y la colonia Roma, en la porción central de la ciudad. Otras áreas en la Ciudad de México que se observaron superficialmente fueron los sectores de la colonia Doctores, el Centro Médico, Piño Suárez, y Morelas. Las áreas de Tlatelolco y Roma fueron seleccionadas para una inspección detallada luego de un reconocimiento preliminar, ya que se encontró que eran representativas del daño estructural inducido por el terremoto y su réplica principal.

En la región oeste del país se recorrió la zona comprendida entre Zihuatanejo y Playa Azul, esta última localizada en la vecindad de la desembocadura del Río Balsas. El poblado de Playa Azul está localizado aproximadamente a 40 kms. del epicentro del sismo del 19 de septiembre mientras que la ciudad de Zihuatanejo está localizada aproximadamente a 100 kms. del epicentro. De la inspección de los daños estructurales en estas dos zonas se puede inferir en primer lugar el comportamiento de las estructuras a distancias epicentrales similares a las pronosticadas en la zona metropolitana de San Juan de Puerto Rico, así como el efecto amplificador de los depósitos de suelo profundos de baja consistencia. A continuación se detallan las observaciones realizadas en cada región:

II. Zona de Ciudad México

Los mayores estragos inducidos por los terremotos del 19 y 20 de septiembre de 1985 se concentraron en aquellas áreas donde ocurren depósitos profundos

de suelos blandos. (Vea Figura A) Un resumen de las estructuras mas afectadas indica que del inventario total de edificios, aquellos más afectados son los de 6 a 15 plantas, según se indica parcialmente en la siguiente tabla:

<u>Número de pisos</u>	<u>Porciento de estructuras afectadas</u>
hasta 2	2.
3 a 5	3.
6 a 8	16.
9 a 12	23.
mayor de 12	22.

TABLA A: Porciento de estructuras afectadas

El alto porcentaje de edificios localizado en los depósitos profundos afectados por los sismos puede explicarse en base a los registros obtenidos en varias localizaciones de Ciudad México y reportadas en las referencias 1 a 3. Los registros obtenidos en suelo firme de la UNAM indicaron aceleraciones máximas de 34 cm/seg^2 mientras que registros obtenidos en la Central de Abastos y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, sobre los depósitos altamente compresibles de la Ciudad, indican aceleraciones máximas de 95 cm/seg^2 y de 168 cm/seg^2 respectivamente. La relación de aceleraciones para las distintas localizaciones se resume en la siguiente tabla:

*La Figura A que no se pueden obtener.

<u>Localización</u>	<u>Aceleración (cm/seg²)</u>		
	NS	EW	V
Jardin Inst. de Ingeniería, UNAM	28	34	21
Central de Abastos (Frigorífico)	81	95	27
Sect. Comunicaciones y Transportes	98	168	36

TABLA B: Resumen de aceleraciones para distintos registros en Ciudad México

Más aún, los espectros de aceleración desarrollados para los registros de la Central de Abastos y la Secretaría de Comunicación y Transporte mostrados en las Figuras B y C respectivamente, indican respuestas máximas entre los periodos de 2 a 3.5 segundos. Por lo tanto, edificios de 10 a 15 pisos con periodos fundamentales en el régimen inelástico del orden de 2 o más y localizados en los suelos altamente compresibles de la ciudad capital, estuvieron sometidos a aceleraciones espectrales que varían entre 100 cm/seg², para el componente EW de la Central de Abastos, hasta 1000 cm/seg² para el componente EW de la Secretaría de Comunicación y Transportes, para un coeficiente de amortiguamiento de 5%. Estas respuestas espectrales son inducidas en los depósitos blandos por características particulares del sismo del 19 de septiembre y de los depósitos tales como la larga duración registrada y su comportamiento prácticamente armónico a niveles altos y sostenidos de aceleración.

Los parámetros principales de este sismo indican que aquellas estructuras con periodos elásticos fundamentales en el orden de 1 seg fueron sometidos a sollicitaciones dinámicas que aumentaron con la degradación de la rigidez

* La Figuras B and C que no se pueden obtener.

estructural (y, por ende, su aumento en período fundamental) y a los extensos requerimientos de ductilidad necesarios para disipar la energía perturbadora a consecuencia de la larga duración de los movimientos fuertes.

Estas conclusiones se pueden obtener de los espectros ilustrados en las figuras D y E. En la figura D se compara el espectro de respuesta estimado para el suelo competente o firme durante el terremoto del 19 de septiembre, utilizando el criterio de Newmark-Hall de la referencia 5, con el espectro elástico de diseño especificado por el Reglamento de Construcción para el Distrito Federal de Ciudad México, para suelo tipo I. Comparando ambas curvas vemos que el espectro del terremoto estaba esencialmente dentro de los límites del espectro elástico propuesto por el Reglamento de Construcción.

Este no es el caso sin embargo, cuando el espectro obtenido para la Secretaría de Comunicaciones para 5% de amortiguamiento se compara con el espectro elástico especificado para la Zona III (suelos compresibles del Código Mexicano). Según se observa en la figura E, debido a la concentración de energía en la vecindad del período de 2 segundos el espectro de respuesta alcanza unos valores extremos y considerablemente mayores que los valores establecidos en el espectro elástico de diseño estipulado por el Código para esta Zona III. La condición peor ocurre para el período de 2 segundos, donde valores espectrales de 100% de aceleración de gravedad son obtenidos, aproximadamente cuatro veces mayores que los valores de diseño del espectro elástico del Código. Los requerimientos de ductilidad traslacional inicial requeridos por este espectro para edificios de pórticos y de muros de cargas de diferente período, se indican bajo el eje horizontal de la figura. Los espectros de diseño elastoplástico establecidos en el Código para edificios de muros de carga o de pórticos también se ilustran en dicha figura.

Es de interés evaluar el comportamiento cualitativo anticipado para estructuras de diferente altura sometidas a los movimientos registrados en la Secretaría de Comunicaciones. Considerando en primer término un pórtico de hormigón armado con un período fundamental de vibración de 0.5 segundos (representativo de un pórtico de aproximadamente cinco pisos de altura) y presumiendo que dicha estructura haya sido diseñada de acuerdo con los requisitos de ductilidad del Código Mexicano es de esperarse que la misma sea sometida a incursiones inelásticas durante los primeros ciclos del terremoto. La acción inelástica reduce la rigidez estructural del edificio, causando un aumento en el período fundamental de la estructura a un valor de aproximadamente 1 segundo, utilizando los criterios presentados por Sozen en la referencia 6. Además aumentaría el valor del amortiguamiento por sobre el 10% del amortiguamiento crítico, utilizando el criterio anterior. Debido a que la estructura permanecería en la región inicial del espectro, los requisitos de ductilidad, aunque mayores que lo normalmente aceptados, podrían ser tolerados por un buen número de estructuras adecuadamente diseñadas. El mismo argumento sería aplicable en el caso de estructuras de menos altura.

Cuando el período fundamental aumenta por sobre los 0.5 segundos, la reducción en rigidez de la estructura resultante a consecuencia de la acción inelástica causaría que el período fundamental de la estructura se mueva dentro de las zonas del espectro donde se producen aumentos considerables en los valores de fuerzas. El aumento en el amortiguamiento asociado con la acción inelástica no es suficiente para contrarrestar este aumento significativo en la respuesta causado por la migración del período. A consecuencia de este fenómeno se imponen requisitos extremos de ductilidad traslacional a la estructura, capaces de causar daños severos o el colapso de las mismas. El comportamiento descrito es válido para estructuras de pórticos con un

periodo fundamental elástico de aproximadamente 0.6 a 1.2 segundos, correspondiente a estructuras de pórticos del orden de 6 a 15 pisos de altura. Estructuras con periodos fundamentales elásticos mayores de 1.2 segundos estarían sujetas a aumentos en los periodos por sobre los 3 segundos, luego de las primeras incursiones inelásticas, por lo tanto moviéndose fuera de la región crítica del espectro. Estos resultados son de extrema importancia, ya que los reportes de daños causados por el terremoto del 19 de septiembre de 1985 en edificios de entre 6 y 15 pisos de altura.

La tabla C resume los resultados de un censo realizado por la Universidad Nacional Autónoma de México (Ref. 4) donde se evaluaron las estructuras que colapsaron o tuvieron daños extraordinarios en la zona mostrada en la Figura A, de acuerdo con el sistema estructural utilizado.

<u>Sistema Estructural</u>	<u>Colapso</u>	<u>Daños extraordinarios</u>
	% población	% población
Pórticos Hormigón	59	42
Pórticos Acero	5	2
Pórticos Hormigón con losas planas	28	41
Mampostería	7	6
Otros	1	9

TABLA C: Resumen de Daños a Sistemas Estructurales

De esta información se deduce que el sistema estructural que mas daños experimentó en esta zona fueron los pórticos de hormigón con sistema de pisos compuestos por losas y vigas, seguidos por pórticos de hormigón con sistemas de pisos compuestos por losas planas. Para los edificios con pórticos de hormigón que colapsaron, más del 50% de la población examinada tenía entre

6 a 15 plantas mientras que para aquellos que sufrieron daños extraordinarios, más del 75% estaban en el mismo rango de altura.

El daño sufrido en pórticos de acero es pequeño especialmente por que el material estructural primordialmente utilizado en la ciudad de México es el hormigón. Sin embargo, debemos observar que de las nueve estructuras de acero colapsadas 4 eran menores de 5 plantas y que las dos pertenecientes al Complejo Torres de Pino Suárez, eran mayores de 15 plantas. La única estructura de acero que sufrió daños extraordinarios tenía entre 11 a 15 plantas y los daños fueron causados primordialmente por deformaciones permanentes en la dirección larga del edificio, inducidas por las considerables excursiones inelásticas.

El porciento de estructuras de mampostería colapsadas o severamente dañadas por el sismo es pequeño comparado con el sistema estructural de pórticos de hormigón, ocurriendo más del 80% de los daños en edificios menores de 5 plantas. Debido al bajo período de vibración asociado con este tipo de estructuras debemos concluir que los daños causados por el sismo en estructuras de este tipo se deben a efectos asociados con las técnicas constructivas utilizadas.

Debemos observar que los muros de corte de hormigón armado no son utilizados comúnmente en Ciudad México, pues son altamente penalizados por el Reglamento de Construcción. Por lo tanto, las observaciones hechas en la zona afectada no permiten determinar conclusivamente si el comportamiento de este sistema estructural fue estadísticamente adecuado o no.

Los daños estructurales severos observados en los edificios examinados fueron causados por la combinación de uno o más de los siguientes factores:

- a. Torsión en los planos horizontales causados por plantas estructuralmente asimétricas y/o cambios bruscos de rigidez en la dirección

vertical de las líneas de elementos estructurales. Estas asimetrías y/o cambios bruscos en rigidez con altura eran frecuentemente el producto de paredes de mampostería que rellenaban los pórticos.

- b. Insuficiencia de ductilidad en los elementos estructurales principales.
- c. Conexiones deficientes entre los elementos estructurales existentes y de las ampliaciones sucesivas.
- d. Choques entre edificios adyacentes por desplazamientos dinámicos fuera de fase.
- e. Fallas no dúctiles, tales como el efecto de columnas cortas.
- f. Sistemas estructurales de piso excesivamente pesados y rígidos.

Los daños asociados con la respuesta torsional se manifiestan en aquellas estructuras con una gran cantidad de muros de mampostería distribuidos asimétricamente y utilizados como paredes no estructurales. Se observaron daños extraordinarios y colapsos de estructuras localizadas en esquinas, ya que las paredes laterales usualmente sólidas y formadas por pórticos rellenos con mampostería en una o dos de las colindancias de los solares crean grandes excentricidades entre el centro de masa y el centro de rigidez del edificio. Inclusive, en edificios con arreglos simétricos, donde los pórticos de hormigón se rellenaron con mampostería, se observaron fallas asociadas a la respuesta torsional, inducidas por fallas prematuras en la mampostería de relleno de algunos de los pórticos.

Debemos observar además que el uso de los muros de mampostería como elementos divisorios en pisos superiores al primer nivel indujeron fallos extraordinarios en las columnas del primer nivel al no poder estas resistir las fuerzas asociadas con las rigideces de los niveles superiores. La disipación de energía que se le impone a estas columnas es mayor que la energía disponible en las incursiones inelásticas de las mismas. En la literatura

sismoresistente a esta condición se le conoce como "soft story" y su debilidad radica en que la mayoría de la energía inelástica se disipa en un solo nivel. Cabe mencionar que fallos del tipo "soft story" se observaron en ciertas estructuras en niveles superiores al primero. En estos casos las estructuras debieron observar un comportamiento inicial similar a muros de corte, formadas por pórticos rellenos por mampostería, hasta que un fallo súbito de las paredes de un piso dado motivó que este actuara como un "soft story".

Las estructuras examinadas mostraban colapsos o daños extraordinarios inducidos primordialmente por el colapso de las columnas. Los sistemas de piso no mostraban daños significativos al desplomarse sobre las columnas. Las columnas examinadas tienen aros colocados de 9 a 12 pulgadas entre sí con las varillas longitudinales concentradas predominantemente en las esquinas de las columnas. Cabe mencionar que muchas de estas columnas son de dimensiones considerables. El espaciamiento holgado de los aros de las columnas, la concentración de las varillas longitudinales y la ausencia de confinamiento en el área de la columna lejos de las esquinas no permitieron el confinamiento adecuado del hormigón de las columnas durante los múltiples ciclos de sollicitaciones sísmicas inelásticas sufridos por las estructuras. El hormigón agrietado en el centro de la columna se desprende de la misma y el refuerzo pierde su estabilidad longitudinal, colapsándose la columna. Las observaciones indican que las provisiones de diseño empleadas en las estructuras colapsadas no garantizan el concepto de la columna fuerte y viga débil. Debemos anotar además que debido a las cargas gravitatorias impuestas por los sistemas estructurales de piso la ductilidad de la columna se reduce significativamente una vez la carga axial excede la carga axial balanceada, provocando las fallas de flexo-compresión observadas en las mismas.

En múltiples edificios se observaron fallas en uno o más niveles de los pisos superiores, causados por el desplome de las columnas. Estas fallas en los últimos pisos del edificio, donde tanto los esfuerzos sísmicos como gravitatorios son mínimos, señalan un comportamiento deficiente de las columnas y/o sus conexiones generado por técnicas inadecuadas de detalle para ductilidad. Debemos sospechar en estas circunstancias que una porción de los pisos superiores colapsados fueron construidos sin haberse considerado adecuadamente el comportamiento dinámico de la estructura. Otra posibilidad es que hayan sido adiciones a edificios ya existentes.

Los choques entre edificios adyacentes, desplazándose estos lateralmente fuera de fase causaron daños localizados en múltiples estructuras. Este comportamiento indeseable puede haber sido inducido por los efectos de los modos superiores de vibración o por cambios bruscos de las rigideces entre pisos. El mismo puede ser eliminado proveyéndole una separación mínima entre los mismos, la cual sea función de su altura y la cual tome en consideración las deformaciones inelásticas anticipadas. Las deformaciones inelásticas son a su vez función del sistema estructural.

El efecto de las columnas cortas se manifiesta primordialmente en aquellas estructuras de pórticos donde una porción de la altura de la columna se confina con paredes de mampostería, generando una columna corta usualmente entre el próximo nivel de la estructura y la pared. Durante las excitaciones de un sismo, la columna corta es sometida a su resistencia última flexional, induciéndose unos esfuerzos de cortante altos dada su reducida altura. La columna falla en cortante tan pronto los esfuerzos aplicados exceden su capacidad. Observaciones de este fenómeno en estructuras de pórticos en hormigón usados en la construcción de escuelas muestra que la falla es catastrófica al colapsarse los pisos superiores sobre los niveles inferiores, un comporta-

miento totalmente contrario al comportamiento dúctil que se logra en una columna de largo normal debidamente confinada.

Todas las fallas catastróficas examinadas indican que el colapso del piso no ocurre primordialmente porque el sistema estructural del mismo hubiese fallado sino porque las columnas perdieron su capacidad de carga en flexocompresión. Este tipo de falla indica que los sistemas estructurales de piso usados son extremadamente rígidos y resistentes y no garantizan la formación de articulaciones plásticas en las vigas. Dichos sistemas, debido a su alto peso unitario, generan fuerzas inerciales considerables en los elementos principales de la estructura, que de no evaluarse adecuadamente pueden desencadenar en un colapso parcial o total del edificio.

Las causas de los daños observados en la zona de Ciudad México se han manifestado en terremotos anteriores ocurridos tanto en México como en otros países. La experiencia nuevamente indica que la no consideración de los principios básicos de la ingeniería antisísmica redundó en desgracias significativas para la sociedad.

III. Zona de Zihuatanejo a Playa Azul

En esta zona del Pacífico, los terremotos no generaron amplificaciones severas como las registradas en Ciudad México. La energía liberada por el sismo se propagó a toda la región recorrida causando estragos en varias estructuras y en los puentes.

Los daños observados en las estructuras fueron causados primordialmente por los primeros dos factores enumerados para Ciudad México, a saber, torsión en los planos horizontales y deficiencias en ductilidad de los elementos estructurales. Se encontró evidencia de edificios colapsados por desplome de las columnas sometidas a cargas biaxiales en exceso de su capacidad y

sin tener estas el debido confinamiento para el hormigón. Se registraron además grietas diagonales significativas en edificios de seis pisos de altura donde se utilizaban paredes de mampostería como sistema estructural. No se observaron, sin embargo, daños significativos en edificios menores de tres plantas donde el sistema estructural empleado era de paredes de mampostería. En esta región no podemos establecer inferencias sobre el espectro de aceleraciones, ya que los registros del sismo aún no han sido analizados detalladamente por los investigadores. Por lo tanto, no es posible estimar las aceleraciones máximas inducidas por el sismo y el período de vibración más afectado por el mismo. Si anticipamos un comportamiento característico de registros cercanos al área de ruptura sospechamos, sin embargo, que las incursiones en el régimen inelástico deben haber sido mucho menores que las sentidas en Ciudad México, lo cual ayudaría a explicar las diferencias en daños observadas entre esta área y ciudad México.

Debemos observar sin embargo, que en esta zona, contrario a Ciudad México, el sismo afectó significativamente las alineaciones horizontales y verticales de los puentes en la zona reconocida y causó daños extraordinarios en el puente Lazaro Cardenas. Todos los puentes observados de secciones de hormigón pretensados exceptuando al Lazaro Cardenas, estaban abiertos al tráfico aunque algunos de ellos mostraban desplazamientos relativos horizontales, tanto longitudinales como transversales, y desplazamientos relativos verticales, respectivamente de, 2-1/2, 2 y 1-1/2 pulgadas. Estos desplazamientos fueron causados por movimientos relativos de las pilastras que soportaban las vigas pretensadas al excitarse su base por el sismo. El puente Lazaro Cardenas, también en hormigón pretensado sufrió daños considerables en las pilastras al agrietarse y desprenderse el hormigón de las mismas. Las pilastras centrales del puente de 6 tramos de 35 mts. de longitud cada uno, quedo permanente-

mente defleccionado hacia el oeste por los efectos del sismo. La superficie de rodaje fue sometida a rotaciones significativas causando fallas en compresión entre las parapetos laterales del puente y los pasamanos de acero sobre los mismos. El terreno alrededor de las pilastras de los extremos se asentó aproximadamente 12 pulgadas y causó el colapso del revestimiento del talud así como rotaciones en las pilastras. Los daños observados en dicha estructura son considerables y la reparación de la misma requiere detalladas evaluaciones técnicas y económicas.

IV. Comentarios Finales

Los daños sufridos por la Ciudad de México fueron inducidos primordialmente por la alta amplificación generada por los depósitos blandos y profundos de la ciudad. El periodo constante de aproximadamente 2 segundos, así como el alto número de ciclos sostenidos de aceleraciones altas afectaron adversamente las estructuras de periodos fundamentales de vibración cerca de 2 segundos. Por el otro lado, los daños sufridos en la región del Pacífico entre Zihuatanejo y Playa Azul fueron inducidos primordialmente por las aceleraciones del sismo inducidos por ondas de alta frecuencia afectando mayormente aquellas estructuras de periodos de vibración fundamentales bajos que no pudieron resistir las solcitaciones sísmicas generadas.

En la zona metropolitana de San Juan, Puerto Rico, los efectos de un sismo como el registrado el 19 de septiembre de 1985 en México centrado en la pared sur de la trinchera de Puerto Rico, a unas 30 ó 40 millas de la costa, serían parecidos a los experimentados en la zona del Pacífico comprendida entre Zihuatanejo y Lazaro Cardenas. Si por el contrario el evento se localizará a mayor distancia la intensidad de los movimientos sería menor, pero la duración de los movimientos sería mayor. Para el primero de los

casos se deben implementar medidas de mitigación de daños necesarias para evitar que se afecten seriamente las facilidades vitales de infraestructura (estructuras tradicionalmente rígidas) y se debe iniciar el proceso de rehabilitación de las mismas, necesario para proveerle la seguridad estructural requerida para el sismo. Para el segundo de los casos los daños se podrían concentrar en estructuras multipisos si la intensidad y duración de los movimientos obliga a estas estructuras a entrar en el regimen inelástico. La propuesta revisada del Reglamento de Edificación, en sus aspectos sismoresistentes, ha contemplado esta posible condición. Cabe mencionar que aunque anticipamos amplificaciones de movimientos en ciertas zonas de depósitos de débil consistencia las ordenes de magnitud de las mismas deberán ser mucho menores que los registrados en ciudad México. Por tal motivo debemos implementar inmediatamente los requisitos de diseño asísmico propuestos, los cuales se han postulado conforme a las realidades de Puerto Rico lo antes posible.

REFERENCIAS

1. Prince, J., et.al, "Acelerogramas en Ciudad Universitaria del Sismo del 19 de septiembre de 1985", Insituto de Ingenieria, UNAM, Informe IPS-10A, Septiembre 20, 1985.
2. Mena, E., et.al., "Acelerograma en el Centro de SCOP de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes del Sismo del 19 de septiembre de 1985", Instituto de Ingenieria, Informe IPS-10B, Septiembre 21, 1985.
3. Quaas, R., et.al., "Los dos acelerogramas del sismo de septiembre 19 de 1985 obtenidas en la Central de Abastos en México, D.F.", Informe IPS-10C, Septiembre 23, 1985.
4. Meli, R., Resendiz, D., "El Temblor del 19 de septiembre de 1985 y sus efectos en las construcciones de la Ciudad de México", Informe Preliminar del Instituto de Ingenieria de Universidad Nacional Autónoma de México, Septiembre 30, 1985.
5. Newmark, N.M., Hall, W.J., "Procedures and Criteria for Earthquake Resistant Design", Building Practices for Disaster Mitigation, Building Science Series 46, National Bureau of Standards, February 1973, pp 209-237.
6. Sozen, M.A., "The Substitute Structure Method", Revista del Colegio de Ingenieros, Arquitectos y Agrimensores de Puerto Rico, 1977.

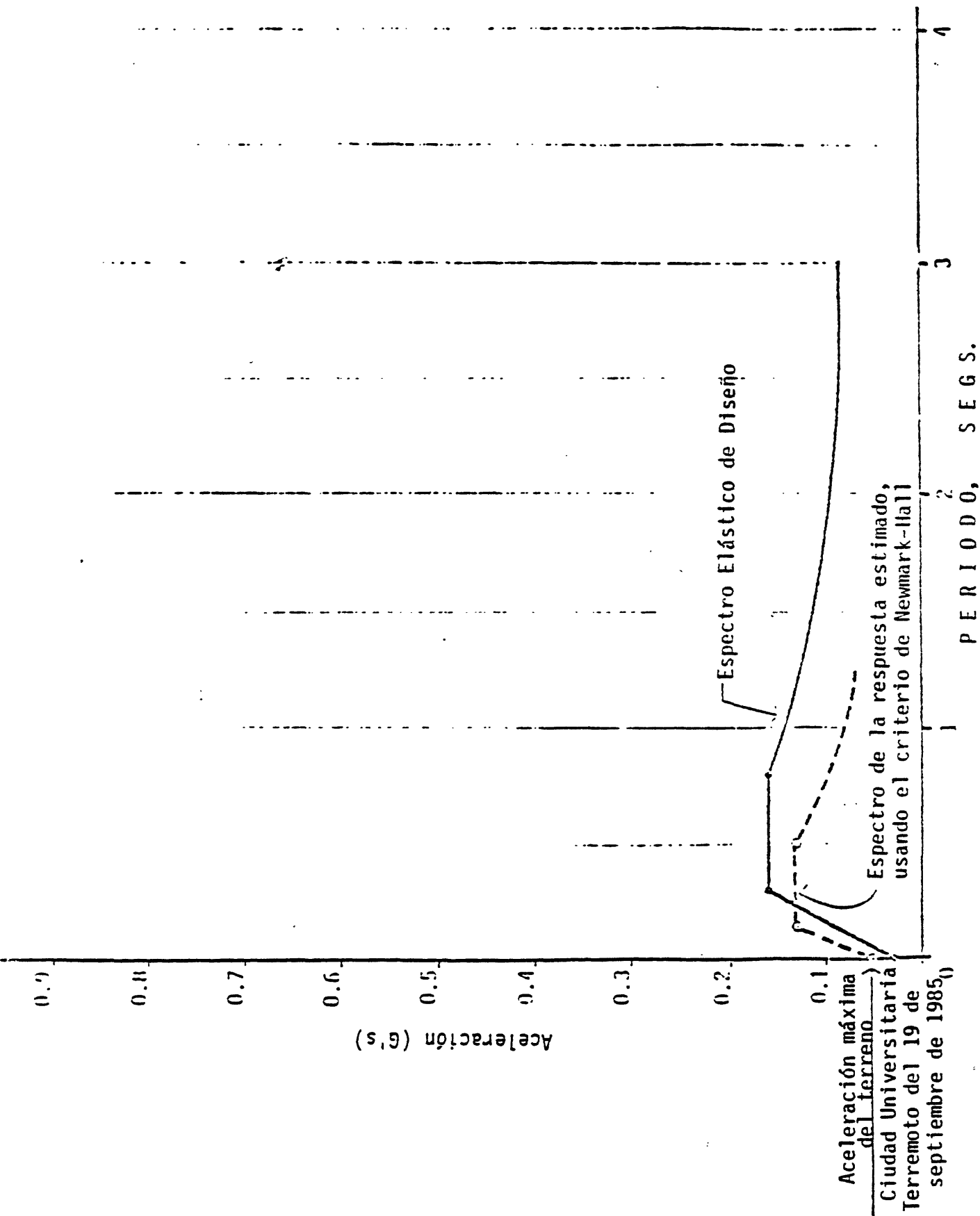


Figura D - Comparación entre el espectro de la respuesta del terremoto del 19 de septiembre de 1985 (5% de amortiguamiento) y el espectro de diseño, Zona I, Ciudad México

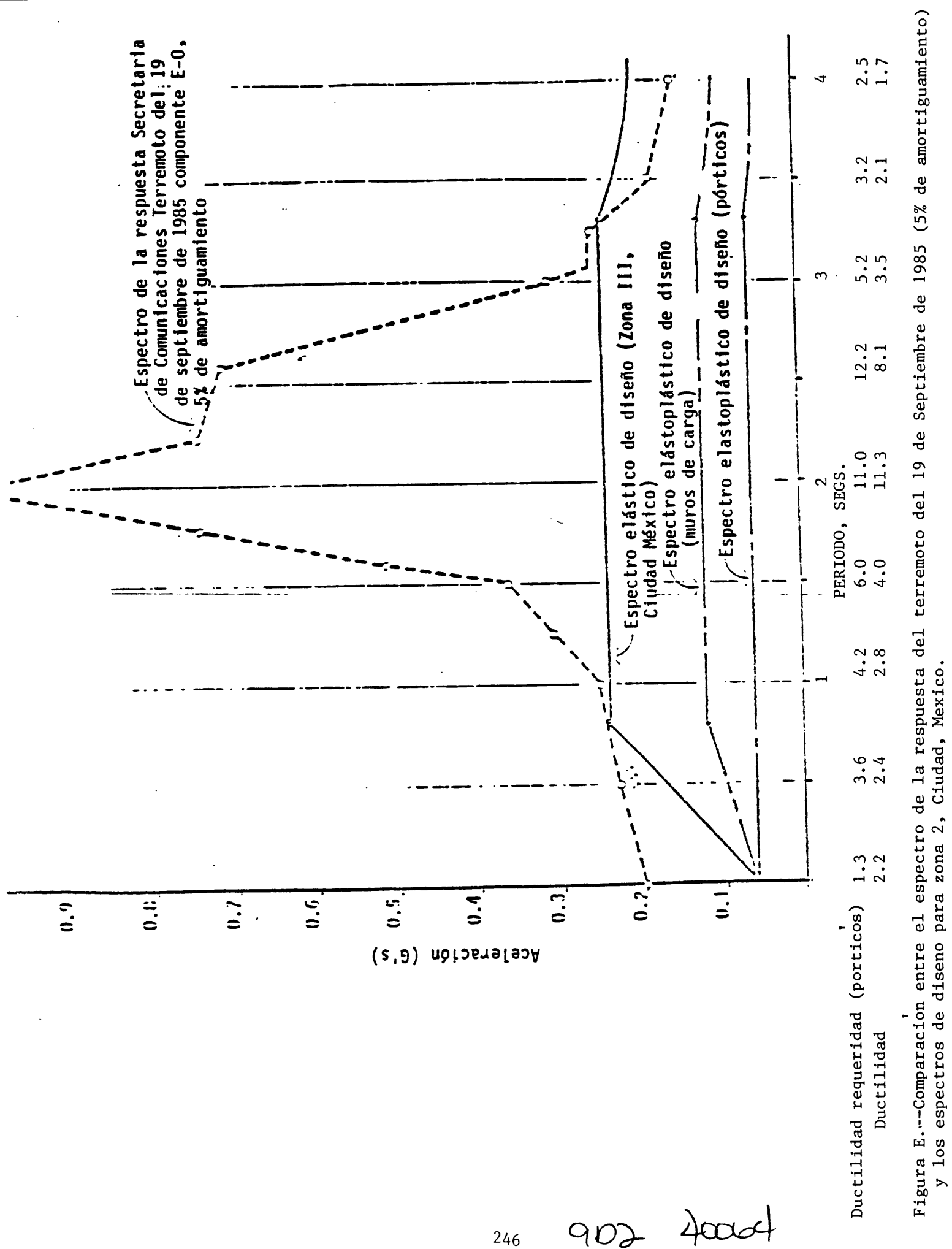


Figura E.---Comparación entre el espectro de la respuesta del terremoto del 19 de Septiembre de 1985 (5% de amortiguamiento) y los espectros de diseño para zona 2, Ciudad, México.

902 40064

CONSIDERACIONES SOCIALES

RUTH DALILA CARRERAS, P.E.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES

El terremoto ocurrido en septiembre de 1985 nos hace reflexionar y preocuparnos sobre cuan preparados estamos en Puerto Rico para afrontar una situación similar.

En nuestra visita a México hemos podido ver de cerca el problema de miles de damnificados de todos los niveles sociales que piden al Gobierno que actúe rápida y eficientemente. Pero, ¿cómo puede el gobierno mexicano, que de por sí se encuentra en una situación económica difícil, reconstruir a México con la rapidez que le piden sus ciudadanos?

Al momento de ocurrir el gran sismo de septiembre no había en el Distrito Federal, ni en la ciudad, ni en el país de México, un Plan de Contingencia para bregar con una situación de emergencia como la del terremoto. A pesar de que tanto el gobierno, como los científicos de la Universidad Autónoma de México estaban conscientes de la vulnerabilidad de México no se habían adoptado medidas para mitigar y evitar el desastre. Tampoco había un programa de divulgación pública o de orientación en las escuelas sobre qué hacer en caso de un terremoto. El Distrito Federal estaba preparando un borrador de un Plan llamado Sistema Integral de Protección y Reconstrucción, pero el sismo llegó antes que este Sistema

fuese adoptado y conocido. Solamente cuenta el gobierno con la Secretaría de Defensa Nacional - organismo militar con un Plan General de Emergencias llamado Plan DN-3. No obstante, este Plan se circunscribe a vigilancia y control de entrada y salida a la zona de desastre. Al momento del sismo la ciudadanía no sabía qué hacer para protegerse. Si a eso añadimos que en Ciudad México el sismo duró aproximadamente cinco minutos y que muchos de los edificios son altos, veremos porqué sobrevino el desastre causando miles de muertos y heridos. Es importante señalar que a las 7:19 AM, hora en que ocurrió el terremoto, la mayoría de las escuelas y oficinas estaban vacías ya que era temprano. Si hubiese sido en horas laborales entonces hubiese ocurrido una catástrofe.

Como ya indicamos, en Ciudad México no había planes para terremoto y aunque existen grupos de vecinos organizados por manzana los mismos no estaban preparados para la emergencia. Es bueno señalar que la falta de preparación es lo que hace que un riesgo natural que no se puede predecir, se convierta en un desastre, ya que se pierden muchas vidas.

Al concluir el temblor, que fue sumamente fuerte y que algunos ciudadanos alegan que sintieron gran temor porque nunca habían sentido o visto algo tan grande hasta el extremo de considerar que "se estaba acabando el mundo", el pueblo, desesperado, salió a las calles. Hubo muchos problemas, la gente quería ayudar, pero no sabían qué hacer. No obstante, hubo una respuesta muy buena, muy espontánea del pueblo,

especialmente de la juventud. Muchas personas fueron rescatadas, pero otras no fueron rescatados a tiempo quizás por la ausencia de un plan u organización definida para actuar ágil y eficientemente.

Cabe señalar que entre los edificios más afectados se encuentran una gran cantidad de escuelas, edificios públicos y viviendas.

Los funcionarios gubernamentales y profesores de la Universidad Autónoma de México lamentaron no haber estado preparados para el terremoto. Quizás es que como dijo un profesor, "en México todos los días tiembla y estamos tan acostumbrados que no pensamos que había que prepararse para un terremoto de la magnitud de éste".

La angustia dio valor a la ciudadanía y sobreponiéndose al dolor y al susto ante la posibilidad de más temblores, comenzaron a organizarse brigadas para auxiliar a los atrapados, así como asistencia a los heridos y a los cientos de miles que habían quedado sin hogar.

Víveres, ropa y medicamentos comenzaron a llegar lo mismo a los sitios afectados como a recintos oficiales donde comenzaron a organizarse albergues y centros de asistencia.

Miles de mexicanos se daban a la tarea de auxiliar a socorristas, policías y bomberos en la tarea de rescatar a los atrapados en los derrumbes.

Debido a la falta de previsión, la capacidad de los cuerpos de rescate pronto fue rebasada por la realidad de los

hechos. En todos los sitios se carecía de equipo especializado y las excavaciones se hacían, prácticamente, con las uñas. Eran cientos de miles de ciudadanos de todas las edades y condiciones sociales los que trataban de ayudar.

Al paso de las horas del 19 de septiembre, la zona de desastre crecía, no solamente por los derrumbes que por todas partes seguían registrándose, sino por el huir de millones de personas que abandonaban sus hogares ante el temor de que se vinieran abajo.

Al mediodía, la zona más afectada había sido acordonada y se había puesto en marcha, por órdenes del Presidente de la República, el Plan de Emergencia DN-3.

En esas primeras horas, no se conocía la magnitud de la tragedia y en unas declaraciones a la prensa, cuando hacía su primer recorrido por los sitios más afectados, Miguel de la Madrid manifestó: "estamos preparados para atender esta situación y no necesitamos recurrir a la ayuda externa. México tiene los suficientes recursos y unidos, pueblo y gobierno, saldremos adelante. Agradecemos las buenas intenciones, pero somos suficientes".

La ciudad se paralizó. No había vida comercial ni oficial, ya que en zonas donde el temblor no provocó daños, los ciudadanos concentraban su empeño y esfuerzos en informarse de lo que había ocurrido a sus allegados en otras zonas o bien se integraban al gigantesco cuerpo de voluntarios cuyo concurso resultó valiosísimo para cerrar las zonas devas-

tadas, trasladar heridos, remover ruinas en busca de seres humanos y poner un poco de orden en el maremagnum de vehículos.

Por la tarde ya se tenía un panorama más o menos completo de los daños y las informaciones resultaban alarmantes.

En el Distrito Federal reinó intensa actividad el viernes 20, ya que las tareas de rescate de atrapados en los derrumbes se habían dificultado y prolongado por la carencia de recursos y experiencia para atender este tipo de emergencias.

El desastre había rebasado desde el jueves por la noche la capacidad de México y en el extranjero se comenzaron a organizar brigadas de rescate que a temprana hora del viernes iniciaron su arribo al aeropuerto, con personal y equipo especializado, así como perros amaestrados para localizar personas vivas en este tipo de siniestros, a cuya habilidad se debe que cientos de personas hayan sido localizadas bajo las ruinas y rescatadas.

La situación, por la tarde del viernes 20 era dolorosa, pero parecía bajo control. Entonces, a las 7:38 PM se produjo un segundo temblor, de 7.5 grados en la escala Richter, el cual provocó no solamente pánico, sino graves daños, porque muchos edificios que habían resultado dañados el día anterior terminaron por venirse abajo, se cayeron muchos otros que aparentemente habían resistido, pero cuyas estructuras estaban dañadas aunque no se podría apreciar a

simple vista como ocurrió en otros casos y la zona de desastre creció hacia el sur.

Los efectos y daños de estos sismos son difíciles de precisar en este momento, tanto en lo económico como en el aspecto social. No obstante, tanto el gobierno central como el gobierno del Distrito Federal han tomado medidas de emergencia para controlar la construcción y reconstrucción de estructuras en las áreas afectadas. Estas medidas son:

1. Adoptar código de construcción de emergencia.
2. Ley de expropiación - expropiar lotes o solares en vecindades afectadas que no eran utilizados como vivienda por sus dueños sino que están alquilados a familias de escasos recursos.
3. Descentralización - mover agencias gubernamentales y sus empleados a otros estados y ciudades de México.
4. No permitir en las áreas afectadas edificios de más de cuatro niveles o pisos.
5. No permitir que se continúe el crecimiento o desarrollo urbano en ciudad de México.
6. En el Distrito Federal se ha suspendido toda obra y se le está exigiendo a los proyectos que estaban en construcción que cumplan con el Código de Construcción de emergencia.
7. Las escuelas se van a reconstruir con los fondos provenientes del Fondo de Ayuda Internacional a México que se instauró recientemente.

8. Propiciar la salida de las industrias del área más afectada.

9. Descentralizar el Sistema de Comunicaciones, ya que en este sismo el país se quedó sin comunicación con el exterior.

10. Establecer responsabilidad en la construcción con inspecciones para verificar que se construya adecuadamente.

11. Reglamento de Ocupación para que el edificio sea usado conforme fue diseñado.

12. Programa de Concientización Social incluyendo Planes de Rescate y Salvamento. Esto estaría a cargo de una Comisión Civil con ciudadanos organizados en todos los sectores de la capital. Este plan deberá incluir red de comunicaciones, red de abastecimientos y red de albergues.

RECOMENDACIONES:

El conocimiento sobre el terreno de los efectos causados por un terremoto en las estructuras y en la vida comunitaria nos obliga a reaccionar para mitigar, reducir y si posible eliminar los riesgos a la propiedad, la vida y al disloque social. Trasladamos mentalmente un evento desastroso y lo ubicamos en nuestro medio ambiente para concebir el alcance e impacto del mismo. Tomamos en cuenta los parámetros que son iguales o similares y añadimos los factores reductores o amplificadores para llegar a conclusiones y hacer recomendaciones prácticas y realizables.

Si queremos sobrevivir como sociedad y como pueblo, tenemos que tomar medidas colectivas de supervivencia a corto y largo plazo. Sin ánimo de ser únicas hacemos las siguientes recomendaciones:

1. Mantener una estricta observación de los códigos relacionados con los desarrollos y construcciones de estructuras tanto en la zona urbana como en la zona rural especialmente en lo relativo a diseño sísmico.

2. Requerir provisiones especiales para el diseño y construcción de estructuras para usos públicos tales como escuelas, hospitales y oficinas gubernamentales de tal forma que puedan resistir un terremoto.

3. Ser rigurosos en la consideración para aprobación de ampliaciones mediante la adición de pisos o la construcción de nuevas estructuras aledañas.

4. Evitar que se utilicen los reglamentos de certificación de proyectos para enmendar planos aprobados y mucho menos después de iniciado el proceso de construcción.

5. Evaluar la capacidad para resistir terremotos de las estructuras existentes especialmente las de uso público.

6. No permitir los desarrollos multifamiliares en áreas de suelos susceptibles a licuar, a menos que los mismos sean tratados propiamente.

7. Mantener controles efectivos sobre la inspección de proyectos de construcción especialmente los de uso público y los multifamiliares de todo tipo.

8. Evaluar los sistemas de fundaciones usados en zonas conocidas o identificables como de alto riesgo geológico.

9. Zonificar las áreas urbanas de acuerdo a la naturaleza de los suelos y de su potencial de capacidad ante un terremoto, especialmente los suelos aluviales y las arenas licuables.

10. Identificar las zonas escarpadas susceptibles a deslizamientos durante un terremoto.

11. Preparar declaración de impacto sísmico en zonas de alto riesgo.

12. Instrumentar las estructuras en diferentes áreas urbanas de Puerto Rico para ganar conocimiento de cualquier evento sísmico que ocurra.

13. Crear un organismo responsable de preparar y poner en ejecución planes de acción en casos de ocurrir desastres.

14. Mantener al día todos los planes para cada situación

de desastre mediante la divulgación y el ensayo de los mismos (simulacros) entre diferentes comunidades.

15. Reducir el potencial de riesgo de fuego como resultado de averías en los sistemas de energía eléctrica.

16. Crear un cuerpo de especialistas permanente para investigar y analizar todo tipo de daño causado por un terremoto.

17. Desarrollar en la Universidad de Puerto Rico un centro de estudios geofísicos, aunque modesto pero con un sismólogo a tiempo completo.

EL TERREMOTO MEXICANO, DEL 19 SEPTIEMBRE DE 1985

by

Richard Krimm
Federal Emergency Management Agency
Washington, D.C.

Aprendemos de las desgracias ajena.

Cada terremoto es como un laboratorio que nos puede enseñar como mitigar y reducir los riesgos, la vulnerabilidad, y las consecuencias de los sismos, para proteger la vida y bienes de la comunidad.

El terremoto tragico que ocurrió en Ciudad México fue el primero que ocurrió en una ciudad moderna altamente urbana.

Yo conozco Ciudad México. Es una ciudad linda con una población grande y que sige creciendo. Se estima que hay diez y ocho millones de personas que viven en Ciudad México. Tiene los mismos problemas que otras ciudades tienen, como Nueva York y Los Angeles: la contaminación del aire, demasiado tráfico y una alta concentración de habitantes.

A causa de los terremotos que ocurrieron antes, Ciudad México habia promulgado un buen codigo de construcción, y el gobierno de México promulgó un plan de emergencia y rehabilitación en casos de desastres naturales. Este plan fue utilizado en desastres naturales con éxito.

Pero el desastre que los sismos del diez y nueve y veinte de septiembre de mil novecientos ochenta y cinco causaron en Ciudad México fue un desastre de gran magnitud.

El gobierno de México ha estimado que diez mil personas murieron, doscientos sesenta y cinco edificios se desplomaron, setecientos setenta y cinco edificios no tuvieron arreglo, y siete mil edificios sufrieron daños menores.

El daño causado por el terremoto se ha estimado que le costara al gobierno de México cuatro billones de dolares.

Este terremoto de Ciudad México será el terremoto estudiado y analizado más que cual quier otro en la historia del mundo.

Los resultados de estas investigaciones nos ayudarán a preparar y reducir los riesgos de otros terremotos por medio de educación; elaboración de planes y procedimientos de atención y rehabilitación; y prevención y mitigación de daños, especialmente en el diseño de edificios resistente a terremotos. Tambien, tenemos que aprender mucho sobre la búsqueda y el rescate de victimas en desastres urbanos; los servicios medicos y de emergencia; y la reconstrucción inicial.

The National Science Foundation (la Fundación Nacional de Ciencia) se esta gastando cuatro millones de dolares para estudiar lo que se ha aprendido del desastre en Ciudad México. Los resultados de estas investigaciones estarán disponible aproximadamente en dos años.

Sin embargo, hay algunas lecciones obvias que podemos aprender ahora.

1. Es necesario educar a la población que vive en las zonas de riesgos sísmicos sobre que puedan hacer antes, durante, y después de un terremoto. Es especialmente importante enseñarle a los niños. Cuando estuve en Ciudad México en diciembre, ví una escuela que fue destrozado durante el terremoto, y sin embargo, los pupitres de los estudiantes no sufrieron daño. Así que si los niños se hubiesen refugiado debajo de los pupitres, muchos pudieran haber sobrevivido. FEMA ha preparado una *Guía para el Desarrollo en las Escuelas de un Programa de Seguridad Contra los Terremotos*. También, distribuiremos un folleto titulado *Preparación Contra los Terremotos en Casa y en el Vecindario*. Ambas publicaciones pueden ayudar a los ciudadanos de las zonas a prepararse contra los terremotos.
2. Los planes para la construcción de nuevos edificios en las zonas de terremotos tienen que ser diseñados teniendo en cuenta la mecánica de los suelos y otras condiciones del emplazamiento. Recientemente, FEMA publicó la edición de 1985 de *El Programa de Reducción de Riesgos de Terremoto: Las Recomendaciones para el Desarrollo de Regulaciones Sísmicos en Nuevos Edificios*. Estas disposiciones se pondrán al día en milnovecientos ochenta y ocho, y la investigación del terremoto que ocurrió en Ciudad México será una parte de las revisiones de milnovecientos ochenta y ocho.

3. Los edificios existentes se tienen que examinar para comprobar si su construcción esta de acuerdo con los requisitos sísmicos. Muchos edificios en Ciudad México fueron construido para el uso residencial o de oficina, pero después se convirtieron para uso industrial. El peso de la maquinaria aumento la carga en los pisos de los edificios los cuales no estaban diseñados para soportarla. Además, otros edificios estuvieron dañados por el terremoto de milnovecientos cincuenta y siete y no se habian reparado correctamente.
4. Los problemas de búsqueda y rescate urbano fue una característica notable del terremoto de Ciudad México. Este es un tema que merece investigación detallada. Todas las ciudades tienen que desarrollar planos que se traten con búsqueda y rescate de personas que se encuentran atrapadas en un edificio desplomado. Las primeras veinte y cuatro horas son críticas. Después de veinte y cuatro horas, pocos sobreviven. Es necesario que una ciudad tenga una agencia encargada de llevar a cabo el plan para la operación de búsqueda y rescate. Esta agencia tendra que comprar equipo apropiado, preparar empleados y voluntarios en las técnicas corrientes de búsqueda y rescate, y tener disponible los servicios de arquitectos e ingenieros que pueden aconsejar como entrar en un edificio derrumbado.

Se tendra que hacer nuevas investigaciones para determinar cual es el mejor equipo a usar en la búsqueda y rescate. "Teams" de perros, mineros y otros especialistas se tendran que emplear. Se ha recomendado la preparación de various equipos internacionales entrenados en la búsqueda y rescate urbana para que pueden responder en menos de seis horas a las zonas que son vulnerable a terremotos y que tienen una gran población urbana.

5. Es necesario tener un plan que responda a una emergencia. Debe haber una agencia responsable de ponerlo en vigor. Las agencias deben estar concientes de sus responsabilidades. Este plan se debe practicar a una vez al año.
6. Un plan de rescate y rehabilitación se tiene que desarrollar antes del terremoto para que la ciudad pueda continuar su vida. Esto incluye una evaluación de los edificios para determinar cuales se deben demoler y cuales se van a reparar. Removimiento de los restos es un gran problema. En Ciudad México, se emplearan de nuevo materiales de construcción y se hicieron parques en el lugar que ocuparon edificios destruido.

Hay muchas otras lecciones que aprender del terremoto que ocurrió en Ciudad México. El gobierno de México manejo el terremoto catastrofico muy bien, pero se dieron cuenta

que tenían que mejorar su plan para los desastres. En marzo, presentaron un sistema nacional de protección civil.

Aprendemos del proyecto mexicano que tenemos que mejorar nuestros planos en el caso de desastres naturales antes del próximo terremoto grande. Toma tiempo para desarrollar un buen plan. Pero hace muchos años Cervantes escribió "No se gana Zamora en una hora."

Toma tiempo para mitigar las consecuencias de los terremotos, salvaguardar las vidas y bienes de nuestros ciudadanos, sin embargo, la satisfacción es grande y es nuestra obligación.

Muchas gracias.

EARTHQUAKE RESPONSE OF STRUCTURES

Samuel I. Diaz Hernandez
Structural Consultant
Río Piedras, Puerto Rico

The extent of damage exhibited by a considerable number of structures located at specific sections of Mexico City has been closely related to the unusual intensity and frequency characteristics of the rocks motions arriving at the City and to the filtering effect produced by the deeply seated, compressible soils present under the affected sites.

The Mexico earthquake of September 19, 1985 originated at a thrust fault existing at the boundary of the Cocos and the North America tectonic plates, in the vicinity of the City of Lazaro Cardenas in the Pacific Coast of Mexico. The magnitude of this earthquake has been estimated to be between 7.8 and 8.1; its epicenter some 250 miles from Mexico City. Earthquakes of this magnitude are not uncommon in Mexico, having experienced some 37 earthquakes of 7 plus Richter magnitude in the period of 1900 to 1979. The severe seismic activity is generally associated with the plate boundaries located in the Pacific Coast of Mexico. This implies that earthquake waves usually travel considerable distances to reach Mexico City. As the waves move away from their origin, the characteristics of the ground motions change from high intensity and high frequency motions, characteristic of the near field, to low intensity and low frequency motions, characteristic of the far field.

The ground motions measured at the Ciudad Universitaria are representative of the rock or competent soil motions that reached Mexico City during this earthquake. One salient feature of these motions is their relatively high intensity, which was close to 5% G, when the direction of maximum motions is considered. This value is some 60% higher than the expected ground motions in competent soil or rock, based on previous experience in Mexico City, as reflected in the seismic requirements of the Federal District Building Code for Zone I. The City of Mexico is divided into 3 zones; Zone I represents the hard, competent soils, Zone III the deep compressible soil deposits and Zone II is a transition zone between the two.

Another important aspect of the rock or competent soil motions was the considerably long duration of the intense portion, which lasted more than 60 seconds. Another relevant characteristic, of interest to the discussion which follows, was the predominant period of the intense motions, which was close to 2 seconds.

Earthquake motions rising from the bottom rock through the deep, compressible deposits were subjected to a filtering effect which is considered to be a function of the depth of the compressible deposits, the compressive soil characteristics and the base rock geometry. When the above factors combined to produce a fundamental period of the soil deposit similar to the fundamental period of the incoming rock motions, i.e., 2 seconds, a significantly amplified motion was experienced at the soil surface. Furthermore, the amplified motion, as expected, had a predominant period close to 2 seconds. Maximum ground motions close to 0.20 G were measured at the ground surface at the Secretaria de Comunicaciones building (these motions are considered representative of motions experienced in zones of high damage), i.e., some 400 percent higher than the base rock estimated maximum motions. But the most critical feature of these motions, as will be seen later, is that due to their frequency content, most of the destructive energy of the earthquake was concentrated in a narrow band of frequencies (or periods).

Figure 1 compares an estimated response spectrum for rock or competent soil, for the subject earthquake using the criteria of Newmark-Hall (1), with the elastic design spectrum stipulated by the Mexican Federal District Building Code for this type of soil. It was not possible at the time of the visit to Mexico to obtain a response spectrum representative of this condition, thus it was resorted to the Newmark-Hall approach. Based on the comparison of the two curves, the response spectrum for this condition seems to have been within the bounds of the Code spectrum for this Zone I.

This was not the case, however, when the response spectrum obtained at the Secretaria de Comunicaciones for 5 percent damping was compared with the elastic response spectrum stipulated for Zone III (compressible soil deposits) of the Mexican Code. As may be seen in figure 2, due to energy concentration in the vicinity of 2 seconds, the response spectrum reaches extreme values, considerably higher than the elastic design spectrum established in the Code. The worst condition is reached at periods of 2 seconds, where the value of 1.0 G obtained is about 4 times higher than the elastic design spectrum value of the Code. The translational ductility requirements (Q) for frames and shear walls of different periods, under this response spectrum, are shown at the bottom of the figure. The elastoplastic design spectra established in the Code for shear walls and frames are also shown.

It is of interest to evaluate the expected qualitative behavior of structures of different heights subjected to the Secretaria de Comunicaciones recorded motions. Consider first a reinforced concrete structure with an initial fundamental period of 0.5 seconds (this is representative of a frame structure of approximately 5 stories in height). Assuming that the structure has been designed according to the ductility requirements of the Mexican Code it would soon be stressed into the inelastic range. The inelastic action would reduce its structural stiffness, causing an increase in the fundamental period to a value of about 1 second using a criteria proposed by Sozen(2). It would also increase the damping to over 10 percent of critical, using the same criteria. Since the structure would still remain in the initial plateau of the spectrum, the ductility requirements, even though higher than normally accepted, could, in many cases, be tolerated by adequately designed structures. The same argument would be valid for smaller structures.

When the initial fundamental period is increased, above 0.5 seconds, the structural softening resulting from inelastic action would cause the structure to move into the zone of considerable increase in the values of the response spectrum. The increase in damping is not sufficient to counteract this effect. As a result of the above, extremely high ductility requirements are imposed on the structure, capable of causing severe damage or collapse. The above behavior is valid for frame structures having an initial fundamental period ranging between 0.6 to 1.2 seconds. This is approximately equivalent to frame structures in the range 6 to 15 stories. Structures with a higher initial fundamental period would soften significantly after the initial inelastic jerks and would increase their fundamental period to over 3 seconds, thereby moving away from the critical region of the spectrum. The above results are of importance since reports of damage for the September 19, 1985 earthquake identify the range of 6 to 15 stories in height as that producing the highest percentage of severely damaged or collapsed buildings.

REFERENCES

- 1) Newmark, N.M., Hall, W.J., "Procedures and Criteria for Earthquake Resistant Design", Building Practices for Disaster Mitigation, Building Science Series 46, National Bureau of Standards, Feb. 1973, pp 209-237.
- 2) Sozen, M.A., "The Substitute Structure Method", Revista del Colegio de Ingenieros, Arquitectos y Agrimensores de Puerto Rico, 1977.

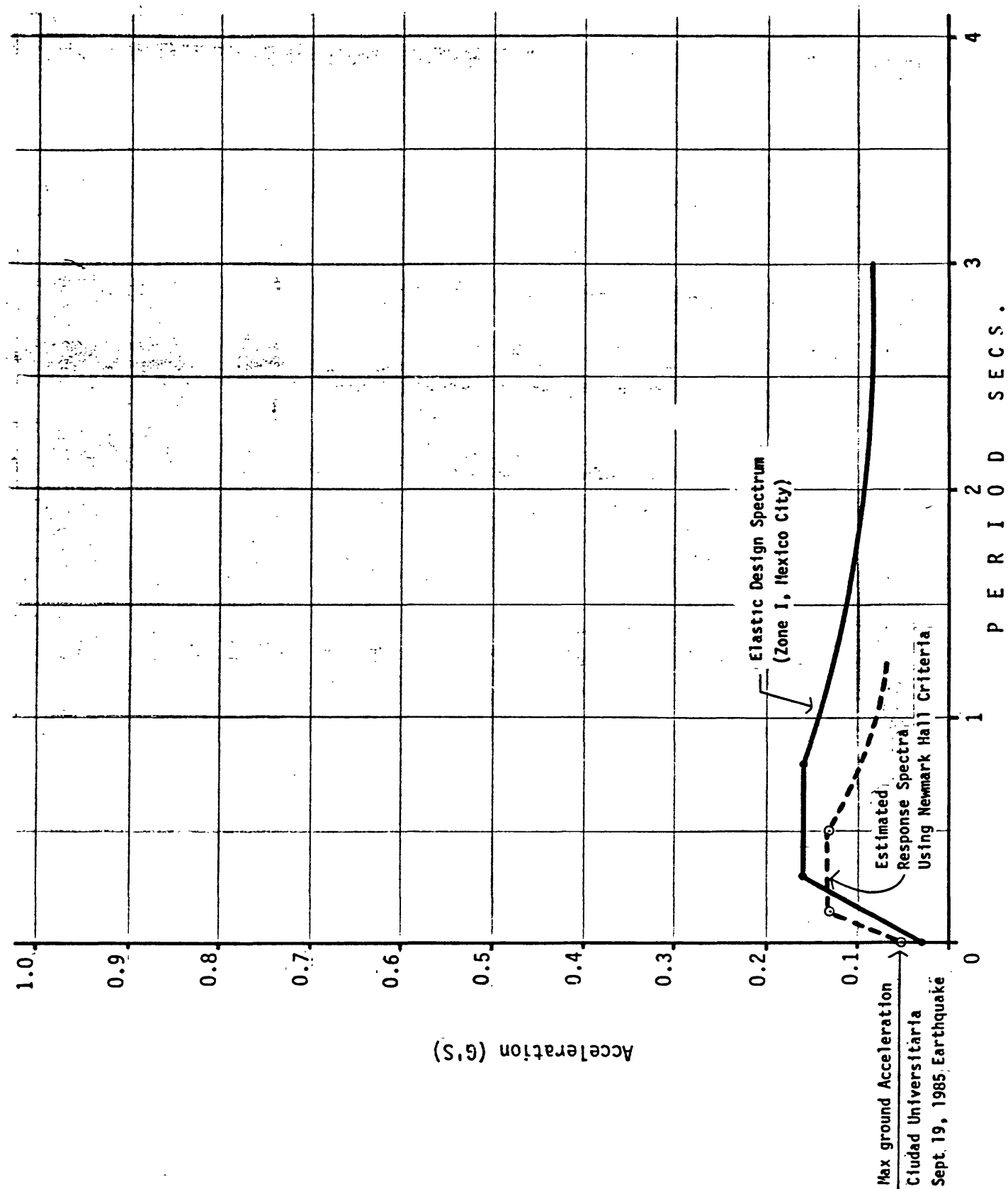
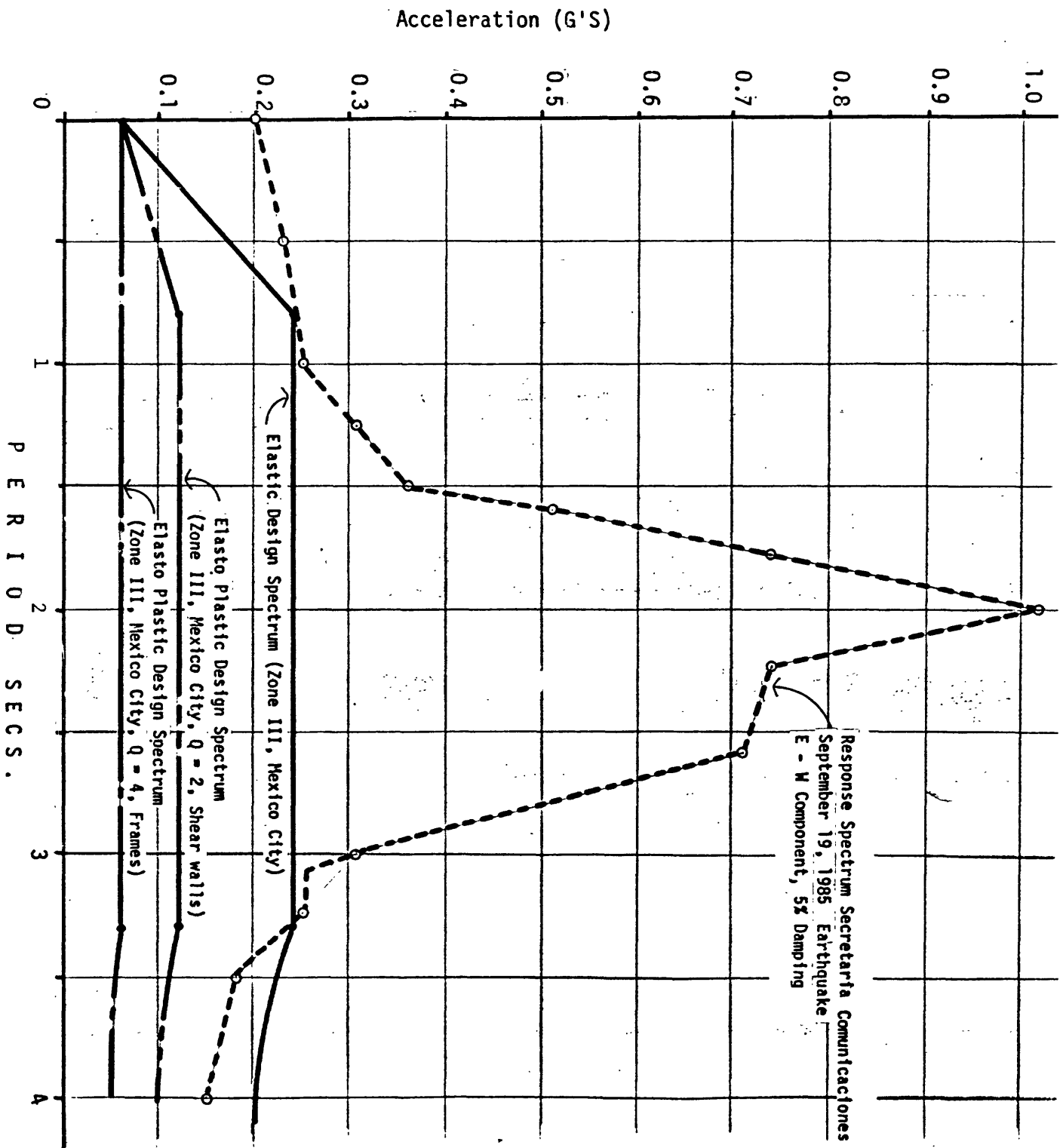


Figure 1 - Comparison of Response Spectrum of September 19, 1985 Earthquake (5% Damping) and the Design Spectrum for Zone.I, Mexico City

REQD "Q" (FRAMES)
REQD "Q" (SHEAR WALL)

3.3 3.6 4.2 6.0 17.0 12.2 5.2 3.2 2.5
2.2 2.4 2.8 4.0 11.3 8.1 3.5 2.1 1.7

Figure 2 - Comparison of Response Spectrum of September 19, 1985 Earthquake (5% Damping) and the Design Spectra for Zone III Mexico City.



ALTERNATIVAS A CAUSAS DE FALLAS ESTRUCTURALES

José A. Martínez Cruzado
Recinto Universitario de Mayaguez
Mayaguez, Puerto Rico

Por suerte las condiciones que coincidieron en el terremoto de México del 19 de septiembre de 1985 no tienen posibilidades de coincidir en nuestra isla, porque definitivamente las condiciones del subsuelo bajo Ciudad México son bien particulares y no se asemejan a las condiciones del subsuelo de Puerto Rico. Además el tipo de construcción que se lleva a cabo en México difiere mucho del realizado aquí ya que afortunadamente el código de hormigón utilizado en Puerto Rico esta mejor adaptado a la realidad de los sismos.

Ahora veremos como distintos tipos de fallas estructurales experimentadas en Ciudad México pudieron haber sido evitadas o al menos minimizadas;

1) Fallas ocasionadas por la asimetría de las estructuras.

Esta situación ocurre principalmente en estructuras situadas en las esquinas de las manzanas. Debido a que el dueño de la estructura prefiere colocar muros de corte en los lados que no dan a la calle y por otro lado colocar columnas en los lados que si dan a la calle, esto genera una gran excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez de la estructura, provocando un momento que produce torsión a

la estructura, el cual causará daños detrimentales a las columnas. Para minimizar este efecto es preciso sustituir algunas columnas por muros de corte y/o reducirle la rigidez a los muros de corte que no dan a la calle. Véase figura #1.

2) Fallas por cambios drásticos en rigidez.

Dos ejemplos de este tipo de falla son los siguientes;

A) Estructuras con columnas en el primer piso y muros de corte del segundo en adelante se hallan destinados a fallar al tener las columnas que transferir un enorme cortante del suelo al muro. Muros de corte deben sustituir algunas columnas para aliviarlas del cortante generado. Véase figura #2a.

B) Estructuras de pórticos de hormigón rellenos con mampostería son sumamente rígidos, sin embargo al desprenderse una pared de mampostería se pierde instantaneamente gran parte de la rigidez del piso en cuestión convirtiéndose éste en lo que se conoce como un "soft story". La inercia que en esos momentos la estructura posee provocará al menos daños significativos al piso. Una alternativa sería el de colocar muros de corte en vez de paredes de mampostería. Un muro de corte resiste mucho mas que una de mampostería. Por otro lado, en el Recinto Universitario de Mayaguez se esta llevando a cabo una investigación a cargo de los doctores Leandro Rodríguez y Rafael Jiménez en la cual pórticos rellenos son reforzados de distintas maneras y luego se le aplica carga lateral. Con esto se determinará qué refuerzo es mas efectivo para los pórticos rellenos. Véase figura #2b.

3) Fallas por martilleo de estructuras adyacentes.

Estructuras adyacentes con desplazamientos laterales fuera de fase chocan entre si causando daños no tan severos pero si innecesarios a ambas estructuras. La solución para esto está en reglamentar la separación mínima entre estructuras tomando en cuenta el desplazamiento lateral máximo que cada estructura soportará sin colapsarse. El Reglamento de Edificación de Puerto Rico no tiene ninguna disposición al respecto. Véase figura #3.

4) Fallas ocasionadas por columnas cortas.

Este tipo de falla ocurre porque a veces las columnas son diseñadas sin arriostramiento lateral y luego se colocan paredes de mampostería a media altura. Esta situación genera un cortante adicional en la columna a la altura de la pared, lo cual requiere mayor refuerzo. Una mejor planificación sería suficiente para evitar tal problema. El diseñador debe tener conocimiento previo de las paredes de mampostería que se han de construir y su altura, cualquier alteración posterior debe ser consultada con el diseñador. Véase figura #4.

5) Desprendimiento de las columnas del sistema de piso.

Estos desprendimientos fueron ocasionados por;

A) Un sistema de pisos sumamente pesado y rígido. La construcción mexicana no sigue la línea de pensamiento del ACI-83 de columna fuerte - viga débil, sino la inversa.

B) Pobre agarre entre las varillas y el hormigón. Era común encontrar columnas con tres tipos de varillas

diferentes.

C) Pobre largo de desarrollo de las varillas.
(Especulado)

6) Fallas por pobre confinamiento en las columnas.

En el edificio "Corona" había columnas de 14" x 18" con aros #3 y separación de 10" en la parte inferior de la columna. En el Hotel Regis columnas de 18" x 24" (estimado) poseían aros lisos de (1/4)" con un espaciado de 14" y varilla longitudinal #6. El ACI-83 requiere en la parte inferior y superior de la columna aros #3 con un espaciado máximo de 4", y en el centro de 16 veces el diámetro de la varilla longitudinal o 48 veces el diámetro de la varilla transversal, lo cual requeriría un espaciado en el centro de la columna del Hotel Regis no mayor de 12". Véase figura #5.

Aún considerando que el subsuelo de Ciudad México no puede alterarse, muchas desgracias pudieron haber sido evitadas con una mejor planificación, diseño y construcción de estructuras, sobre lo cual en Puerto Rico estamos en términos generales mejor preparados, aunque podríamos estar mucho mejor.

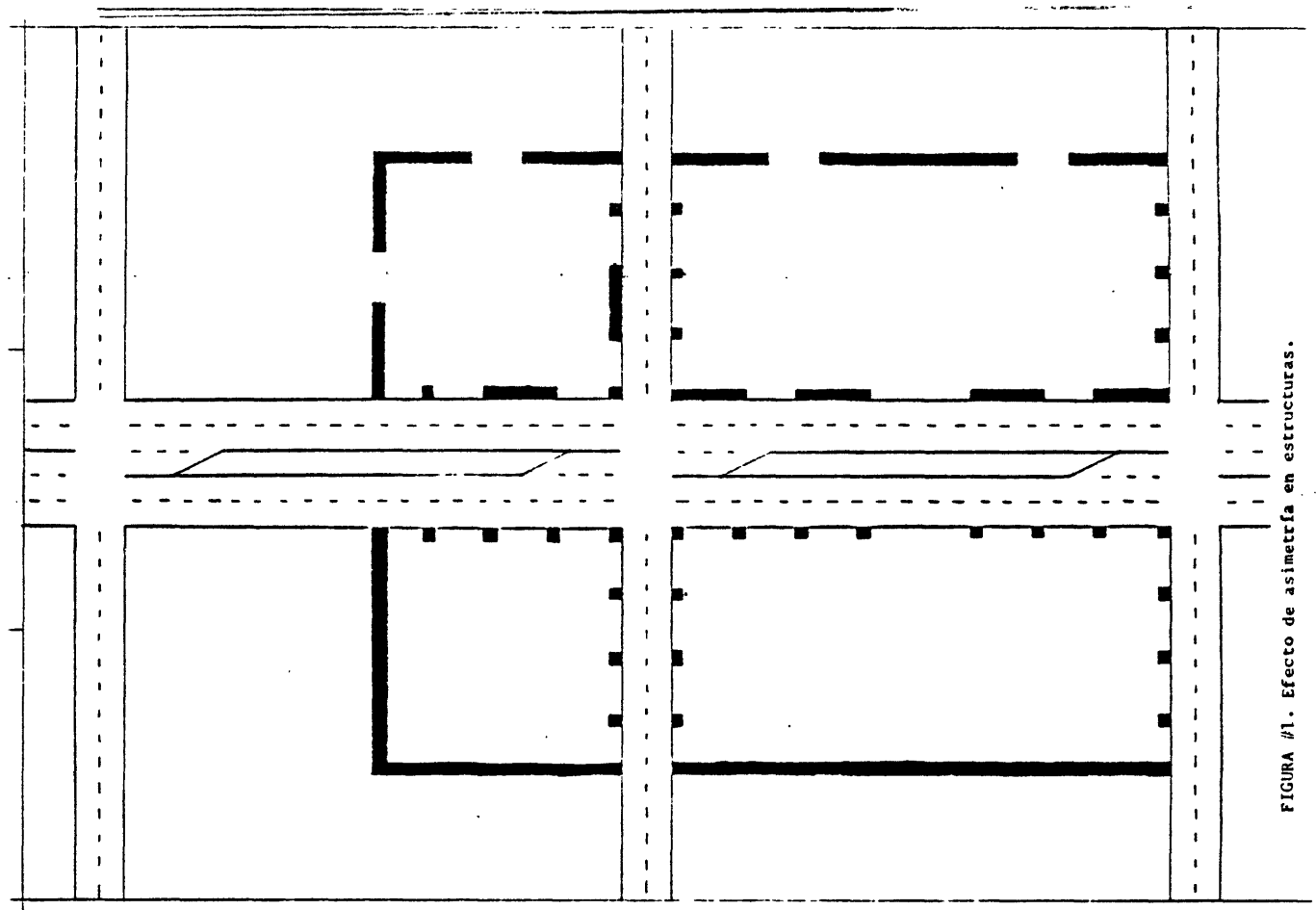


FIGURA #1. Efecto de asimetría en estructuras.

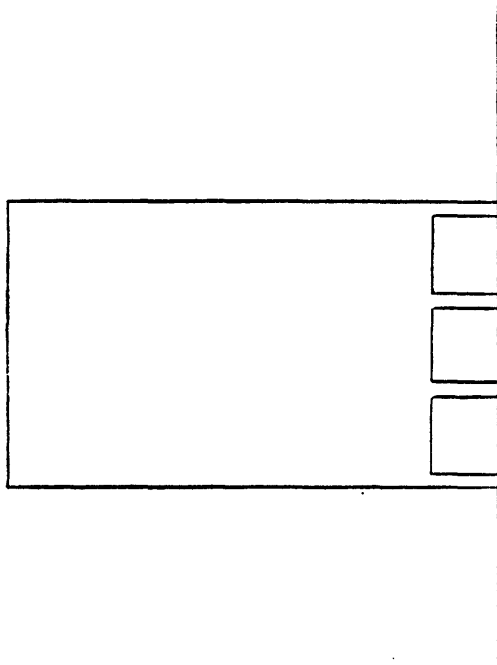
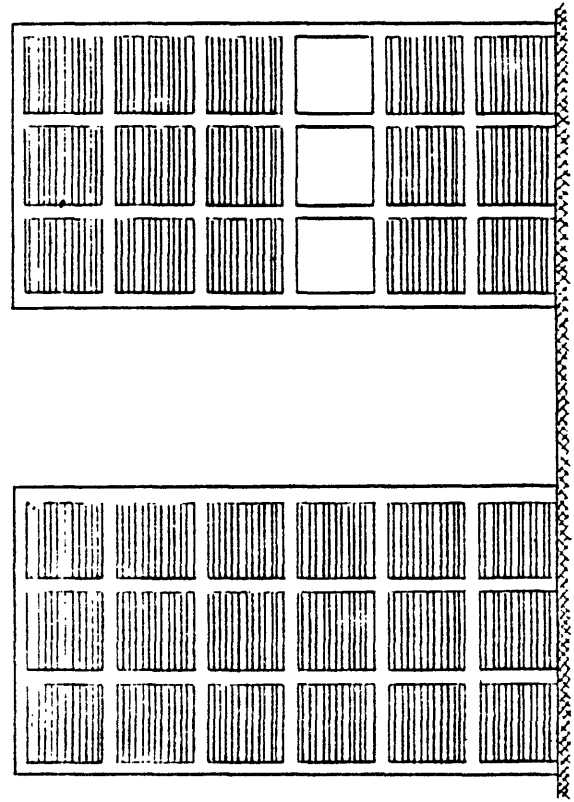


FIGURA #2. Efectos de cambios drásticos en rigidez.
A) Primer piso como "soft story".



B) Piso Intermedio como "soft story".

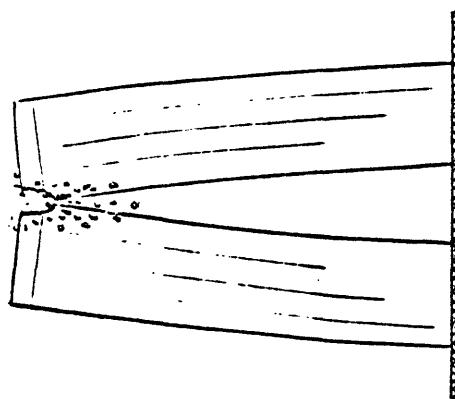
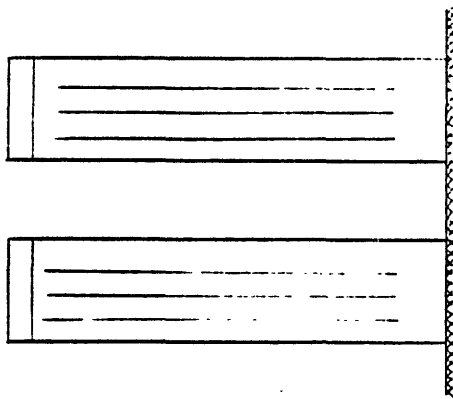


FIGURA #3. Efecto del martilleo de estructuras adyacentes.

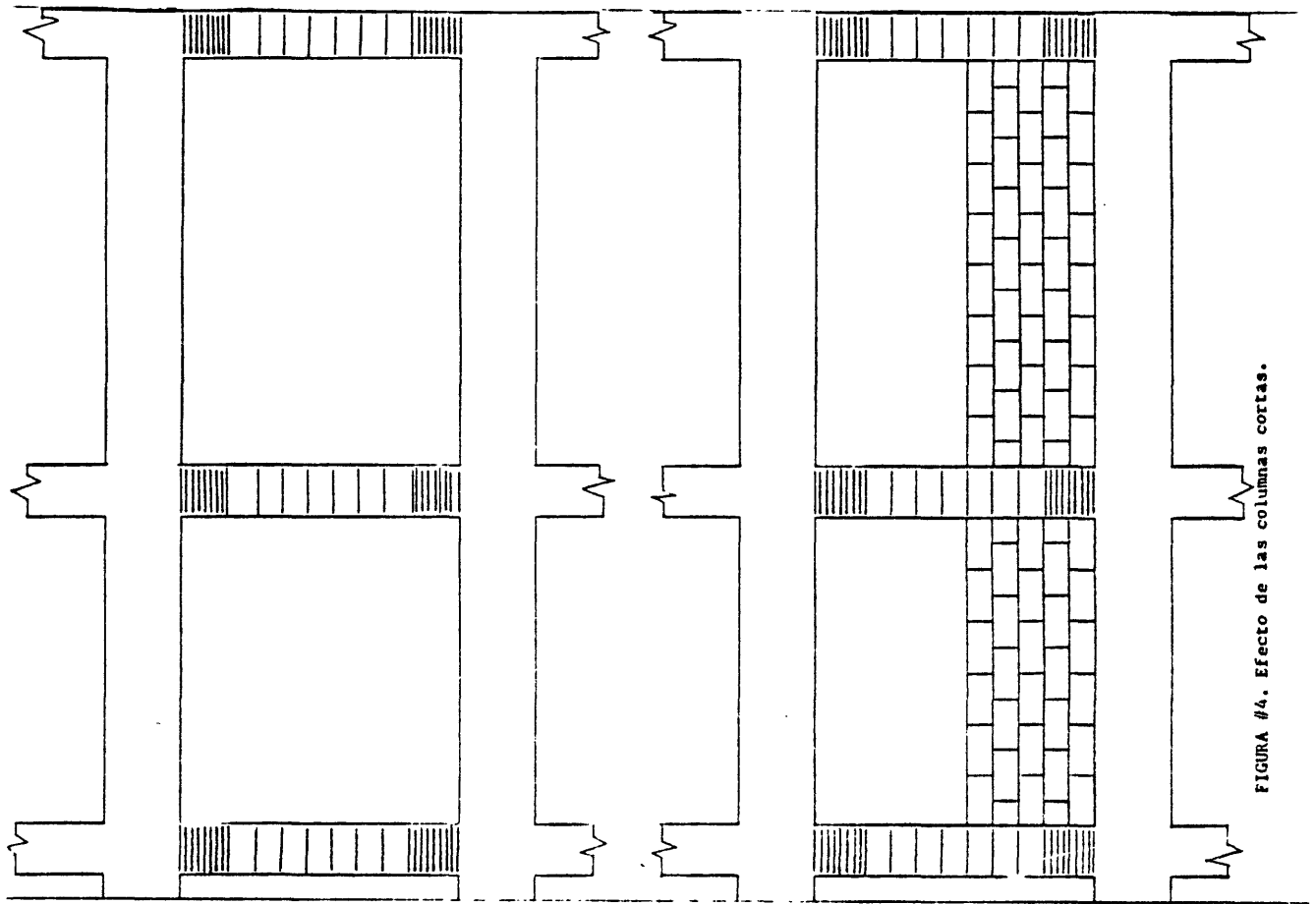


FIGURA #4. Efecto de las columnas cortas.

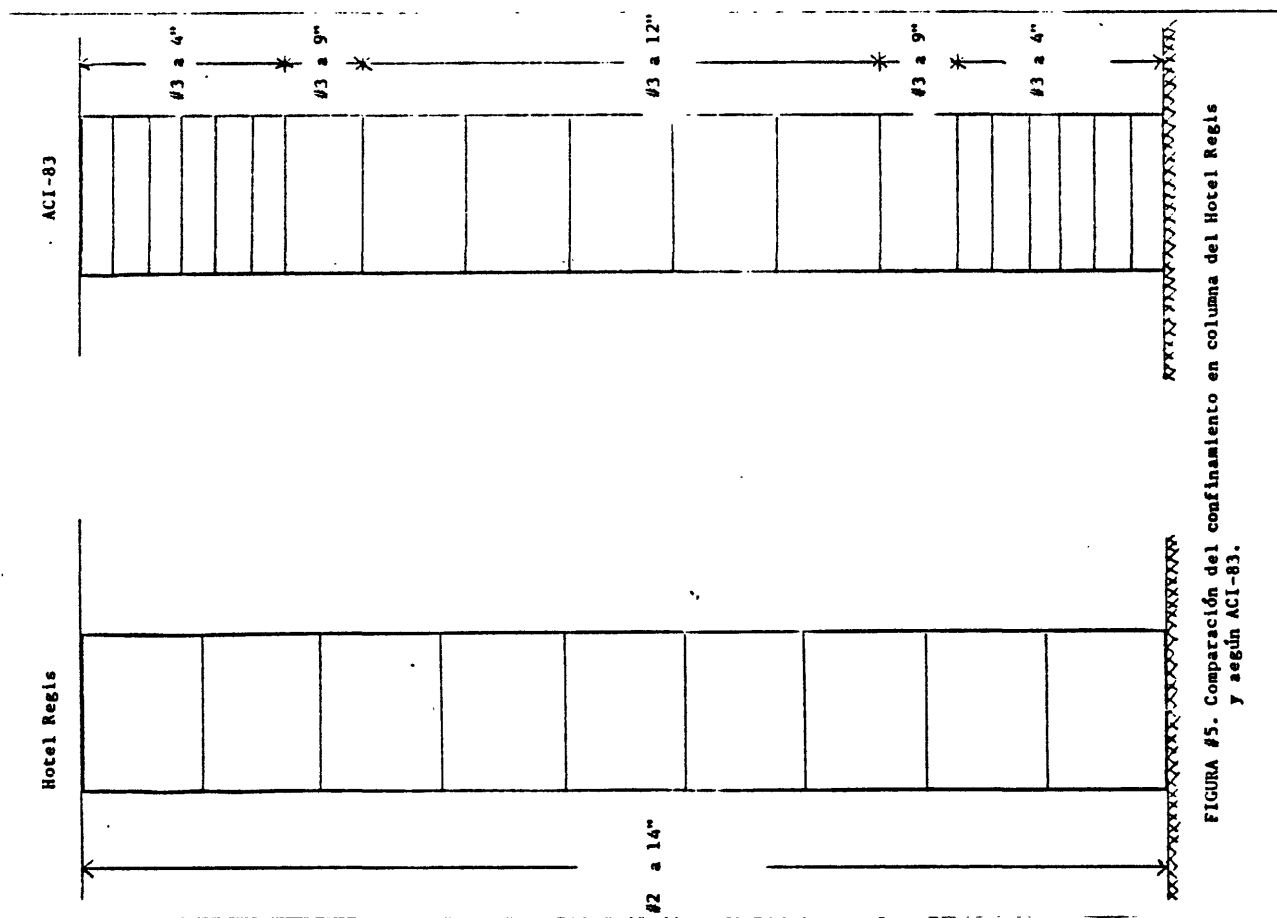


FIGURA #5. Comparación del confinamiento en columna del Hotel Regis y según ACI-83.

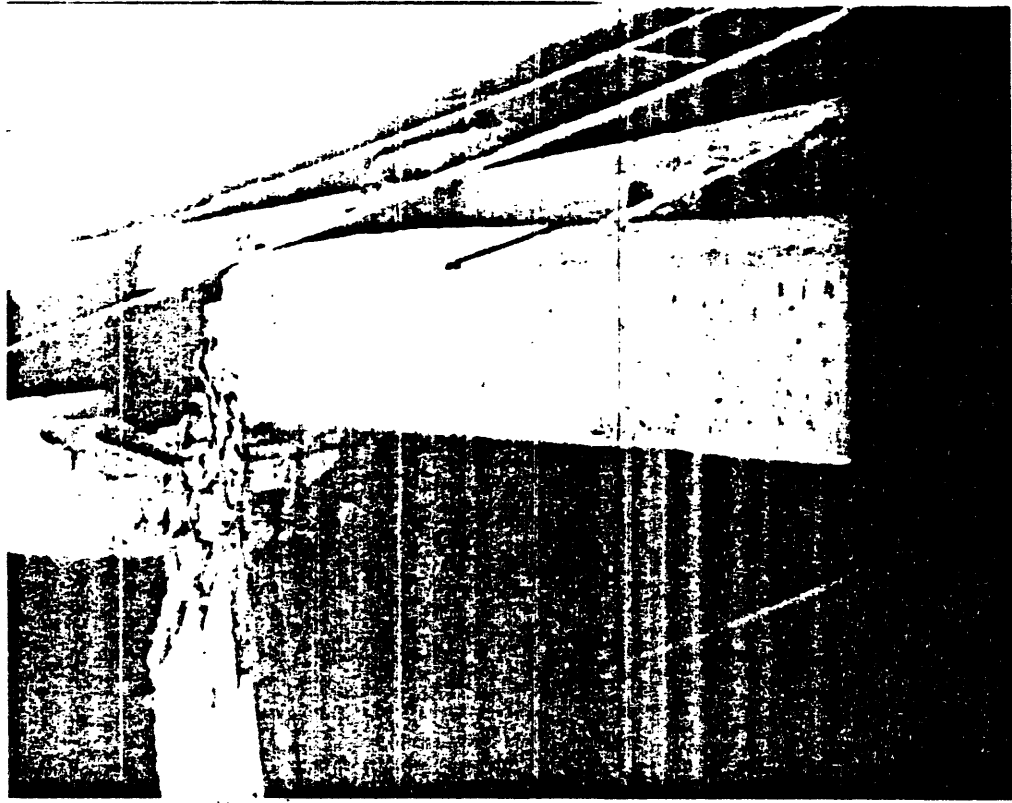


FIGURA #6. Desprendimiento de columna del sistema de piso.

9A4 40004

GROUND SHAKING HAZARD AND VULNERABILITY OF STRUCTURES

RAFAEL JIMENEZ-PEREZ, Ph.D.

ASSOCIATE PROFESSOR

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

UNIVERSITY OF PUERTO RICO

MAYAGUEZ, PUERTO RICO, 00708

INTRODUCTION:

The energy released during an earthquake, accumulated from the relative movements experienced at the plate boundaries, is propagated through the rock and soil mass by various waves that induce a vibratory motion at the ground surface. The motion experienced at a given point at the surface, usually described in terms of its displacement, velocity or acceleration, activate the inertial properties of the structures and are essential to predict the response of the building to the expected earthquake. The damage experienced by the structure is a function of its capacity to deform in the inelastic range as a mean to dissipate the energy induced by the ground motions. Thus, the assessment of the impact of a given earthquake requires a knowledge of both the ground intensity motions expected at the zone considered, as well as the capacity to experience significant lateral deformations of the structural systems most commonly used.

The following sections of this summary express the author's ideas as to what activities must be definitively pursued by the

government agencies in Puerto Rico to estimate the impact of a strong earthquake that can lead to the implementation of effective loss reduction measures.

GROUND SHAKING HAZARD:

Various attempts have been made to determine the ground shaking hazard expected in various areas of Puerto Rico from a strong earthquake without having obtained a consensus on the pertinent parameters. The inability of these studies to reach conclusive information can be attributed partially to the lack of a complete historic data base from where statistical information can be used to calibrate appropriate probabilistic models. These models are needed to determine the seismic risk and the significant ground motion parameters expected in a strong earthquake to establish mitigation and contingency plans. The problem is aggravated by the lack of adequate instrumentation to monitor the seismic activity of the tectonic features nearby the island and by the inability to analyze the data compiled by the Puerto Rico Micro Seismic Network to determine the location, distribution, and attenuation relations observed for the recorded activity.

The resources must be obtained and channeled to complete the historic data base for earthquake activity and documented damages from the historic archives available in Puerto Rico and elsewhere. This program should be followed by probabilistic analysis of the completed data base to determine the seismic risk distribution for

Puerto Rico. Once the estimates of expected ground motion parameters are developed, the vulnerability studies of the major metropolitan areas should be conducted to assess the estimated damages to the physical inventory and the associated economic losses. Suggested procedures to estimate the damages to existing buildings will be discussed in the next section on vulnerability of structures.

At this point we must recognize that there is no government agency capable of facing this task by itself, specially with the scant economic and personnel resources assigned to earthquake mitigation. The logical unit to develop such a research and development program will be a Center for Seismic Research that is associated with the Department of Geology and Civil Engineering of the University of Puerto Rico. This unit will be responsible for grouping the required professionals, and of the acquisition and installation of the equipment necessary, to determine the seismic risk of Puerto Rico. An adequate budget should be provided by the government for the operation of the center basic needs, but it should be observed that the center can also obtain research funds from external sources.

VULNERABILITY OF STRUCTURES:

The vulnerability of the structures constructed in a given zone is required to determine the extent and magnitude of the damages induced by the expected earthquake. This analysis can also serve as an indirect measure of the safety threat imposed by the seismic event so that an estimate of the required resources for emergency and treatment facilities can be outlined. In Puerto Rico, only the Vulnerability Study for the Metropolitan Area of San Juan, prepared by Dr. Jose Molinelli for the Department of Natural Resources has attempted to predict the extent of damages induced by an assumed earthquake of Magnitude 8 located 120 km north of San Juan. In this study, the estimates of damages were obtained from fragility curves expressed as a function of the expected Modified Mercalli intensity. This first attempt, however, does not consider the typical construction methods used in Puerto Rico, and it is recommended that the methodology be substantially revised prior to the implementation of the study conclusions.

An attractive alternative to estimate the vulnerability of structures to a given earthquake is the Rapid Seismic Analysis procedure where the damage to a given structure is assessed from the relations between the site spectral acceleration and the structure's capacity for the adequate period and damping values. Damage is assumed to occur in a given building once the structure exceeds its yield strength and reaches 100 % when the structure

reaches its ultimate strength. If the earthquake demands exceeds the structure yield strength, then a damage estimate can be proportionally established with this procedure. The procedure can be applied to typical construction methods and structural system used in Puerto Rico to determine the expected damage induced by a given seismic event. Based on the spatial distribution of the physical inventory obtained for a given zone, the total damage experienced at a given site can then be calculated.

The analytical estimates of damage can be correlated with strength tests of ultimate load capacities of typical construction systems in Puerto Rico. The criteria developed with this procedure can then be employed in the areas where the seismic vulnerability is to be evaluated once the distribution of structural systems is known.

CONCLUDING REMARKS:

The contingency and mitigations plans required to manage the impact of a destructive earthquake can not be adequately developed and implemented unless the ground shaking parameters induced by the earthquake are known, and the vulnerability of the existing structures is assessed. Various ideas have been proposed in this summary to obtain the necessary information on ground shaking hazards and vulnerability of structures. A definitive and concerted effort is required from the government to allocate the

funds and resources required to achieve the outlined objectives. Otherwise, the impact of a significant earthquake will be devastating to the economic and social structure of Puerto Rico.

SITE AMPLIFICATION--AN IMPORTANT CONSIDERATION IN THE
VULNERABILITY ANALYSES FOR PUERTO RICO

by

Walter W. Hays
U.S. Geological Survey
Reston, Virginia

ABSTRACT

When analyzing the patterns of damage in an earthquake, physical parameters of the total earthquake-site-structure system are correlated with the damage. Soil-structure interaction, the cause of damage in many earthquakes, involves the frequency-dependent response of both the soil-rock column and the structure. The response of the soil-rock column (called site amplification) is controversial because soil has strain-dependent properties that affect the way the soil column filters the input body and surface seismic waves, modifying the amplitude and phase spectra and the duration of the surface ground motion.

INTRODUCTION

The 19 September 1985 Mexico earthquake reminded earthquake engineers that two frequency-dependent phenomena, site response and structural response, are very important considerations in earthquake-resistant design. The Mexico earthquake reemphasized these facts:

1. The damage to a structure at a site in an earthquake is complexly related to the dynamic frequency-dependent properties of the earthquake source, wave propagation path, and the soil-rock column underlying the structure (Fig. 1). The physical parameters of the total earthquake-site-structure system that contribute most to the potential for damage are those parameters which cause the soil-rock column and the structure to vibrate with the same period (1).
2. The ground motion recorded in an earthquake at a free-field location is the best dynamic representation of how the ground moved--its time histories of acceleration, velocity, and displacement, spectral composition, level of dynamic strain, and duration of shaking. Physical parameters of the source, propagation path, and soil-rock column contribute distinctive frequency-dependent signatures to the ground motion. For example: a) source--increasing the magnitude increases the amplitudes at all periods, enhancing the long periods most, b) propagation path--the path acts like a low-pass filter, attenuating the amplitude of the short periods more rapidly than those of the long periods, and c) site--the soil-rock column acts like a filter, increasing the amplitudes of the surface ground motion in a narrow period band (2,3).

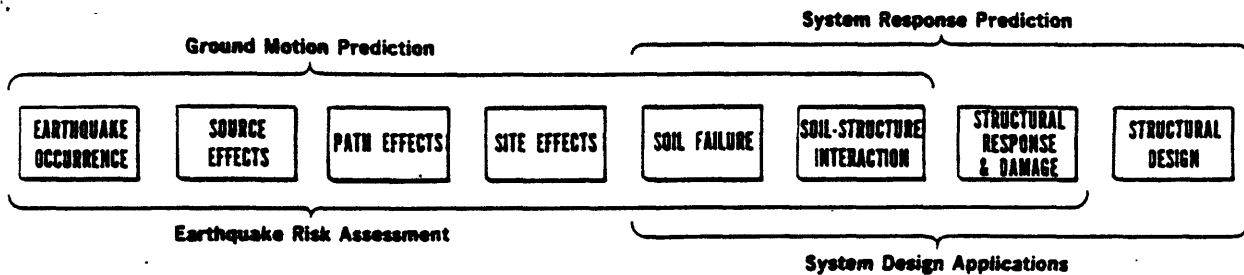


Figure 1.--Schematic illustration of the earthquake-site-structure system.

The amplitude, spectral composition, and duration of the ground motion at a free-field location are directly related to physical parameters of the source, propagation path, and the soil-rock column underlying the site.

3. The level of dynamic shear strain and its effects on soil properties are the most controversial aspects of site response. The level of strain induced in the soil column by the ground motion increases as the magnitude increases and decreases as the distance from the center of energy release increases.
4. The response of the soil-rock column depends strongly on the strain-dependent properties of the soil. Depending on the level of dynamic shear strain and the contrast in physical properties of the soil and rock, the soil acts either as an energy transmitter or an energy dissipator. As an energy transmitter, the soil column acts like a filter, modifying the amplitude and phase spectra of the incident body and surface seismic waves (3) and increasing the duration of shaking (4). As an energy dissipator, the soil column damps the earthquake ground motion, transmitting part of the vibrational energy of both the soil column and the structure back into the earth and permitting: vertical movement, rocking, and side-to-side movement of the structure on its base (5).
5. Site amplification, the frequency-and strain-dependent response of the soil-rock column to body and surface seismic waves, increases the surface ground motion in a narrow period band that is related to the thickness, physical properties, and geometry of the soil column. The site transfer function (Fig. 2) is a way to categorize the dominant spectral response in terms of the period band where it occurs: a) short period (0.05 - 0.5 second, b) intermediate period (0.5-3.3 seconds), and c) long period (3.3 - 10 seconds). The dominant spectral response for a site underlain by soil has been as much as 1,000 percent greater than the response for a site underlain by rock; whereas, the level of peak acceleration has been only as much as 250 percent greater (6,7), and in some cases less.
6. The site transfer function depends on many physical parameters, including: level of dynamic shear strain, shear wave velocity, density, material damping, thickness, water content, surface and subsurface geometry of the soil-rock column, and the types of seismic waves that excite the soil-rock column--their wave lengths and direction of vibration.
7. The response of the structure can also be increased or decreased, depending on the type of structure, its natural period of vibration, the lateral and vertical dimensions and physical properties of the soil-rock

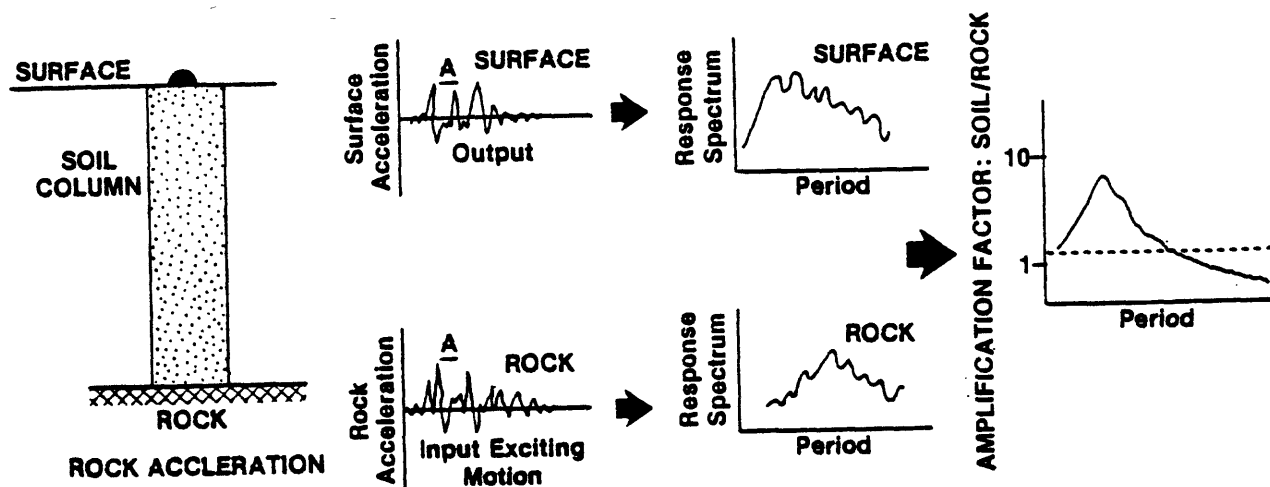


Figure 2.--Schematic illustration showing how a site transfer function is derived. Transfer functions can also be derived for two adjacent soil-rock columns, the procedure used for cited in this paper.

column, and the wave lengths and properties of the incident seismic waves. The worst case is when the fundamental natural period of vibration of the structure is the same as that of the soil-rock column, creating a condition of resonance (Fig. 3).

SITE AND BUILDING PERIODS

Evaluation of what will happen in an earthquake would be easier if the following "ideal" conditions existed:

- No soil columns. If bedrock were the propagation paths of the body and surface seismic waves, controversy associated with the strain-and frequency-dependent properties of soil columns would be minimized.
- One building type. If buildings of only one type existed (for example, identical 10-story buildings), then the potential for soil-structure interaction would be greatly restricted.

These "ideal" conditions do not exist; therefore, earthquake-resistant design must take into account the conditions that cause site amplification of ground motion and damaging soil-structure interaction. This means that the wide range of soil columns, the types of buildings, and the physical conditions that cause their responses to occur at the same period must be identified.

A soil column, like a building or structure (see Fig. 3), has a natural period of vibration. The characteristic period of vibration T_s of a soil column is given by the relation

$$T_s = \frac{4H}{V_s} \quad (1)$$

where H is the thickness of the soil column and V_s is the shear wave velocity measured at low levels of strain. Soils, depending on their physical

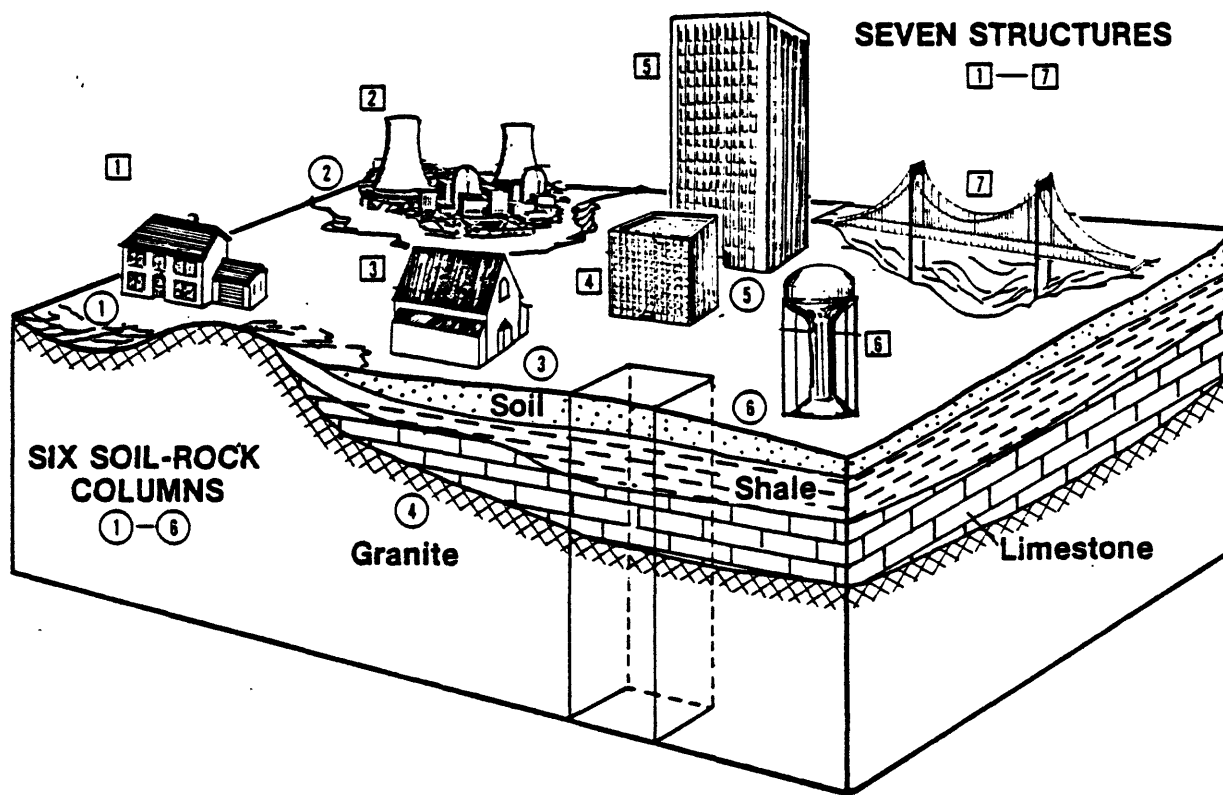


Figure 3.--Schematic illustration showing six soil-rock columns and seven structures. Each soil column has a natural period of vibration (T_s), and each structure has a natural period of vibration (T_b). When T_s and T_b are equal, the potential for severe damage exists.

properties, typically have shear-wave velocities ranging from 50 m/sec to 600 m/sec; whereas, rock-like material and rock have shear wave velocities of 765 m/sec or greater.

Soil columns exhibit properties that are strain-dependent. Laboratory tests (8) have shown that as the level of dynamic shear strain increases the material damping increases and the modulus of shear decreases. The result is that T_s increases as the level of shear strain increases. The basic relation is given by

$$T_s = \frac{4H}{RV_s} \quad (2)$$

where R is an empirical factor (6) having the following values: a) 0.9 for a magnitude 6 earthquake producing a peak effective acceleration of 0.1 g, b) 0.8 for a magnitude 6 earthquake producing a peak effective acceleration of 0.2 g, c) 67 for a magnitude 7 earthquake producing a peak effective acceleration of 0.3-0.4 g.

The fundamental natural period of vibration T_b of a building is given approximately by the relation

$$T_b = \frac{N}{10} \quad (3)$$

where N is the number of stories. However, the actual natural period of a building can be shorter or longer, depending on the engineering design to make

the building stiffer or more flexible. Observations from postearthquake investigations have shown that T_b lengthens as the thresholds of various states of damage are reached. In an earthquake, the "worst" case for damage, is when the value of T_s coincides with T_b .

TECHNICAL CONSIDERATIONS IN THE EVALUATION OF SITE AMPLIFICATION

Evaluation of site amplification requires careful consideration of each of the topics discussed below. Limitations on space allow only a few of the pertinent references to be cited.

1. Level of dynamic shear strain and the dynamic physical properties of the soil column--Careful judgment must be used when assessing the level of dynamic shear strain and its effects on the physical properties of the soil column. One of the sources of controversy comes from the fact that laboratory measurements have demonstrated that soils have shear moduli and damping characteristics that depend on the level of strain, suggesting that, under certain conditions, nonlinearities and inelasticities in the soil will attenuate rather than amplify the peak amplitudes of surface ground motions observed at sites underlain by soil. However, empirical ground-motion data representing the high levels of strain produced in the laboratory have not been duplicated by actual strong motion records in past earthquakes. For example, the greatest value of peak ground velocity recorded in the 1971 San Fernando and 1979 Imperial Valley earthquakes is 110 cm/sec. Using the empirical rule that

$$\text{Strain} = \frac{\text{peak velocity recorded at the site}}{\text{shear wave velocity of the soil column at the site}} \quad (4)$$

the conclusion is that the greatest level of strain induced in soil columns by past earthquakes has been only about 0.5 percent.

Some researchers (for example, 9, 10) have shown that site response is essentially linear up to strain levels of about 0.5 percent for some soil-rock columns and that the epicentral distance to the strain level of 0.5 percent is only a few km (about 1 mi) if the shear wave velocity of the soil column is assumed to be 200 m/sec.

Selection of the dynamic properties of the soil is especially complicated below depths of 30 m (100 ft). For the deeper zone, the average shear wave velocity (V_s) can be estimated fairly accurately from values of the compressional wave velocity (V_p) determined from seismic reflection or refraction surveys or from measurements in boreholes, using a value of 0.4 to 0.45 for Poisson's ratio.

2. Thickness of the soil column--Two different points of view have been used to select the thickness of the soil column. One view (6) considers that the soil column can be terminated without appreciable error when material having a shear wave velocity of about 765 m/sec is reached. The other view (11) considers that the soil column can be terminated without appreciable error only when bedrock having a compressional wave velocity of at least 3,600 m/sec (12,000 ft/sec) is reached. In the first case, surface motions are assumed to be affected mainly by a short soil column,

frequently about 30 m (100 ft) thick; whereas, in the second case, rock motions are assumed to be affected by a much thicker soil column.

3. Near field--Analyses of near-field (that is, locations within 15 km (9 mi) of the source) strong-ground-motion data have been made by a number of investigators (for example, 6, 12, 14). For the near field, these analyses indicate that:
 - Separation of the frequency-dependent effects of the source from the effects of the soil-rock column is very difficult, because the source effects tend to dominate the path and site effects. The directivity of the source appears to cause most of the large variability in the values of peak ground accelerations, peak ground velocity, peak ground displacement, and spectral velocity. (13).
 - A "killer pulse" (14), a pulse of approximately 1 second duration that typically does not have the greatest amplitude but which has the greatest kinetic energy, is generated in some cases in the near field as a consequence of the "fling" of the fault. Breakout and stopping phases related to the fault rupture can also be present in the near-field ground motion.
4. Rock Motions--Specification of the ground motions developed in rock by the earthquake source is one of the most difficult task in the analysis of site amplification. The characteristics of surface ground motion depend on the details of the geology of the propagation path, which are usually imprecise. Therefore, analytical calculations must be augmented with a suite of strong motion records acquired in past earthquakes. The ideal data are those for sites underlain by rock located at about the same distance from the zone of energy release and having identical geology for the propagation path as the site being evaluated (2).
5. Aftershock ground motion data--Broadband records of the aftershock sequence of past earthquakes can be used, but the strengths and weaknesses of the analysis procedure must be carefully considered. The strength is that aftershock records have the signature of the travel path and the soil-rock column, only the source parameters differ. The weakness is that the levels of dynamic shear strain developed in an aftershock may cause possible overestimation of the amplification factor and underestimation of the dominant period of site response (15).
6. Angle of incidence--Analysts typically assume vertical incidence of the body waves at the base of the soil column. This assumption, if violated, does not introduce significant error (3).
7. Variability in the mean site transfer function--Several investigators (for example, 2, 3) have shown that the site transfer function in the intermediate-and far-fields is fairly repeatable. The degree of repeatability of the site transfer function for the near field and for conditions of strain exceeding 0.5 percent is unknown.

EMPIRICAL DATA ON SITE AMPLIFICATION

Worldwide

Scientists and engineers throughout the world have recognized and documented site amplification phenomena since the 1800's (7, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21). Four classic examples are described below in terms of the spectral response relative to rock and the period band of dominant response:

1. The 1967 Caracas, Venezuela earthquake--Soil-structure interaction occurred in Caracas, 56 km (35 mi) from the epicenter of this moderate (magnitude 6.4) earthquake. Tall buildings (14 stories and greater) sited on soil columns of at least 160 m (520 ft) thickness were damaged severely. The dominant response occurred in the intermediate period band, centered around 1.2-1.6 seconds (20).
2. The 1970, Gediz, Turkey, earthquake--Soil-structure interaction caused the collapse of a 1-story garage and paint workshop (a part of the Tofias automobile factory) located 225 km (135 mi) from the epicenter of this large (magnitude 7.0) earthquake. The cause was the similarity of the predominant periods of: a) the bedrock motions, b) the response of the 120-135 m (390-440 ft) column of alluvium, and c) the response of the building, all of which occurred in the intermediate period band centered around 1.2 seconds (21).
3. The 1976 Friuli, Italy, earthquake--Site amplification of a factor of 4 occurred in the short-to-intermediate period band (0.2-0.7 seconds) for a site underlain by 15 m (50 ft) column of alluvium located 25 km (15 mi) from the epicenter. The input rock accelerations ranged from 0.1 g to 0.53 g (19).
4. The 1985 Mexico earthquake--This great (magnitude 8.1) earthquake produced two surprises: a) the low value of peak acceleration (0.18 g) in the epicentral region, and b) the high (0.18 g) value of peak acceleration in certain parts of Mexico City located 400 km (250 mi) from the epicenter. Soil-structure interaction caused extensive damage to 5-20 story buildings sited in the lake bed zone of Mexico City (22). The largest ground motions in Mexico City occurred at sites underlain by a 50-meter-thick column of soft lake bed deposits having a shear wave velocity of about 100 m/sec. The dominant site response occurred at 2-seconds, an amplification of about a factor of 5 relative to the level of ground motion observed at nearby sites underlain by stiffer, rock-like material.

United States

Since the 1960's, many investigators have studied site amplification phenomena in various parts of the United States. Results obtained in each area are summarized below with representative references:

1. San Francisco Bay region--The most significant contributors to knowledge of site amplitude were: the 1906 San Francisco earthquake, a) the 1957 Daly City earthquake, and b) the extensive program of geologic and engineering seismology data acquisition conducted by the U.S. Geological Survey in the 1970's. The most significant results included:

- Inferences in 1908 that the soil-rock column underlying a structure can have a significant effect on the surface ground motions and the damage patterns (23).
 - Strong ground motion data from the 1957 Daly City earthquake that provided a basis for concluding that the amplitude and spectral composition of the ground motions varied as a direct function of the propagation path and the physical properties of the soil-rock column (16).
 - Verifying that each geologic unit in the San Francisco Bay region has a characteristic and predictable response to low-strain seismic excitation (24, 25).
 - Demonstrating that San Francisco Bay mud exhibits the most spectacular site response, amplifying the short-period energy by a factor of 10 or more under conditions of low-strain ground shaking. Other soil-rock columns also caused amplification, mostly in the short- and-intermediate period bands (24, 25).
2. Los Angeles Region--The most significant contributors to knowledge of site amplification were: a) the 1971 San Fernando earthquake which produced 241 3-component strong motion accelerograms for buildings and free-field locations within 75 km (45 mi) of the epicenter of a magnitude 6.4 earthquake, b) the extensive program to monitor the aftershocks of the San Fernando earthquake at more than 100 locations, and c) the comprehensive program of data acquisition conducted by the U.S. Geological Survey in the 1970's and 1980's. Important results included:
- Similar site transfer functions derived from ground motion data recorded from the mainshock, selected aftershocks, and nuclear explosions even though the levels of rock accelerations and strain varied markedly (10, 18).
 - Amplification of short-period seismic energy along the boundary of the San Fernando valley, a zone of damage (Hays, 1977), and in Glendale (26).
 - Amplification of the long period surface waves by the thick alluvium in the Los Angeles basin (27).
 - Amplification of the ground motion by some topographic highs (28).
 - Amplification occurring at soil sites in the Long Beach and Los Angeles areas (18). The short-, intermediate-, and long-period bands were enhanced by factors ranging from 2 to 5.
3. Nevada--The Ground Motion and Structural Response program of the U.S. Atomic Energy Commission, conducted in the 1960's and 1970's, was the main contributor to knowledge of site amplification. More than 3000 strong motion records were obtained at locations such as Tonopah, Las Vegas, and Beatty where the regional geology and the soil-rock columns were fairly well known. The most significant results included:

- Documentation of the similarities of the strong ground motion records of earthquake and nuclear explosions within a few hundred miles of the source (2,4).
 - Acquisition of site amplification data at locations having a wide range of soil-rock columns (3) experiencing levels of strain ranging from 0.001 to 0.5 percent (10).
 - Demonstration of classic short-period body-wave amplification in Tonopah where the soil amplification factor was 7 (3).
 - Demonstration of classic intermediate-to-long-period surface-wave amplification in Las Vegas where the soil amplification factor was 10 (29).
 - Demonstration of short-period site amplification as a function of depth at Beatty where the rock motion were reduced by a factor of 4 at periods equal to T_s (30).
4. Seattle, Washington--Innen and Hadley (31) modeled the strong ground motion of the 1965 Seattle earthquake using a ray tracing technique. Their results indicated that the thick, soft soil deposits of the Duwamish River caused short-to-intermediate period site amplification of a factor of about 5 in western Seattle, the area sustaining the greatest damage in 1965.
 5. Wasatch Front, area, Utah--The extensive program of data acquisition conducted by the U.S. Geological Survey in 1970's and 1980's provided the main knowledge of site amplification along the Wasatch front. Salt Lake City, Ogden, and Provo are adjacent to the 370-km-long (222 mi) Wasatch fault zone. These cities are founded on several soil deposits, ranging from coarse gravels and sands to fine grained silts and clays, deposited as lakes filled the Great Salt Lake basin in the Pleistocene epoch. Important results included:
 - For distances of about 30 km (18 mi) from the Wasatch fault zone in Salt Lake City, Ogden, and Provo, site amplification increases as distance from the fault increases. Site response of as much as a factor of 10 (relative to rock on the Wasatch front) occurs at sites in the center of the valleys underlain by a thick column of soft, water-saturated silts and clays. The dominant period of response occurs in the intermediate-period band, centered around 1 second. Site response is less--about a factor of 2 in the intermediate-period band for sites underlain by coarse gravels and sands close to the fault zone (9, 32).
 6. Eastern United States--The soil-rock columns in many parts of the Eastern United States (for example, Memphis, St. Louis, Boston) have physical properties that will cause site amplification in an earthquake. Further research is needed to quantify the potential for damage.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

On the basis of empirical data from past earthquakes, buildings located on soil deposits may be susceptible to damage from earthquake ground shaking if the soil-rock column has the physical properties required to amplify the ground motion. The damage to a building can be severe when the dominant periods of the site response and the building response coincide. Urban development should: a) identify locations having the potential for soil-structure interaction, and b) ensure that earthquake-resistant design criteria are adequate to withstand the forces that can be generated by this phenomenon. Evaluation of site amplification effects is an important part of the overall assessment of risk in an urban area. Although some uncertainty and controversy exist, a number of urban areas in the United States appear to have soil-rock columns that will amplify earthquake ground motions.

REFERENCES

- (1) Yamahara, H., 1970, The interrelation between frequency characteristics of ground motion and earthquake damage to structure: Soils and Foundations, v. 10, pp. 57-74.
- (2) Hays, W. W., 1980, Procedures for estimating earthquake ground motions: U.S. Geological Survey Professional Paper 1114, 77p.
- (3) Murphy, J. R., Weaver, N. L., and Davis, A. H., 1971, Amplification of seismic body waves by low-velocity layers: Seismological Society of America Bulletin, v. 61, pp. 109-146.
- (4) Hays, W. W., 1975, A note on the duration of earthquake and nuclear explosion ground motions: Seismological Society of America Bulletin, v. 65, pp. 875-844.
- (5) Wolf, J. P., 1985, Dynamic Soil-Structure Interaction, Prentice-Hall Publishing Company, Englewood Cliffs, New Jersey, 466 p.
- (6) Seed, H. B., 1975, Design provisions for assessing the effects of local geology and soil conditions on ground and building response during earthquakes, in New earthquake design provisions: Proceedings of seminar sponsored by Professional Development Committee of Structural Engineers Association of Northern California and San Francisco Section of America Society of Civil Engineers, pp. 38-63.
- (7) Seed, H. B., Murarka, R., Lysmer, John, and Idriss, I. M., 1976, Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes: Seismological Society of America Bulletin, v. 66, pp. 1323-1342.
- (8) Seed, H. B., and Idriss, I. M., 1969, Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes: Journal of Soil Mechanics Foundations Division of America Society of Civil Engineers, v. 95, pp. 1199-1218.
- (9) Hays, W. W., and King, K. W., 1982, Zoning of the earthquake ground-shaking hazard along the Wasatch fault zone, Utah: International Earthquake Microzonation Conference, 3rd, Proceedings, v. 3, pp. 1307-1317.

- (10) Hays, W. W., Rogers, A. M., and King, K. W., 1979, Empirical data about local ground response: Earthquake Engineering Research Institute, National Conference on Earthquake Engineering, 2nd, Proceedings, pp. 223-232.
- (11) Kobayaskhi, Hiroyoshi, and Nagahashi, Sumio, 1982, Response spectra on seismic bedrock during earthquakes: Engineering Seismology, Tokoyo Institute of Technology, pp. 22-27.
- (12) Idriss, I. M., 1978, Characteristics of earthquake ground motions: Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Proceedings of Specialty Conference, American Society of Civil Engineers, v. 3, pp. 1151-1267.
- (13) Singh, J. P., 1985, Earthquake ground motions: implications for designing structures and reconciling structural damage: Earthquake Spectra, v. 1, pp. 239-270.
- (14) Bertero, V. V., Mahin, S. A., and Herrera, R. A., 1978, Aseismic design implications of near-field San Fernando records: Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, v. 6, pp. 31-42.
- (15) Hays, W. W., 1977, Evaluation of the seismic response in the Sylmar-San Fernando area, California, from the 1971 San Fernando earthquake: American Society of Civil Engineers, Mechanics Division Specialty Conference on Dynamic Response of Structures, Los Angeles, Proceedings, pp. 502-511.
- (16) Idriss, I. M., and Seed, H. B., 1968, Analysis of ground motions during the 1957 San Francisco earthquake: Seismological Society of America Bulletin, v. 58, pp. 2013-2032.
- (17) Macurdo, J., 1824, Papers relating to the earthquake which occurred in India in 1819, Philadelphia Magazine, v. 63, pp. 105-177.
- (18) Rogers, A. M., Tinsley, J. C., and Borchardt, R. D., 1985, Predicting relative ground response, in Ziony, J. F., (Editor), Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region-an earth science perspective: U.S. Geological Survey Professional Paper 1360, pp. 221-248.
- (19) Savy, Jean, Bernreuter, Don, and Chen, J. C., 1986, Site effects: a generic method for modeling site effects in seismic hazard analyses, in Hays, W. W., (Editor), Proceedings of Conference XXXIV, U.S. Geological Survey Open-File Report 86-185, 35 p.
- (20) Seed, H. B., Whitman, R. V., Dezfulian, H., Dobry, R., and Idriss, I. M., 1972, Soil Conditions and building damage in the 1967 Caracas earthquake, Journal of the Soil Mechanics Foundations Division, America Society of Civil Engineers, v. 98, pp. 787-806.

- (21) Tezcan, S. S., Seed, H. B., Whitman, R. V., Serff, N., Christian, J. T., Durgunoglu, H. T., and Yegian, M., 1977, Resonant period effects in the Gediz, Turkey earthquake of 1970: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v. 5, pp. 157-179.
- (22) Rosenblueth, Emilio, 1986, The Mexican earthquake: a firsthand report: *Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, January, pp. 38-40.
- (23) Wood, H. O., 1908, Distribution of Apparent intensity in San Francisco, in *The California Earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission*, Carregie Institution of Washington, Washington, D.C., pp. 220-245.
- (24) Borcherdt, R. D., 1975, Studies of seismic zonation of the San Francisco Bay region: U.S. Geological Survey Professional Paper 941-A, 102 p.
- (25) Borcherdt, R. D., Joyner, W. D., Warrick, R. E., and Gibbs, J. F., 1975, Response of local geologic units to ground shaking, in Borcherdt, R. D., (Editor), *Studies for Seismic Zonation of the San Francisco Bay Region*: U.S. Geological Survey Professional Paper 941-A, pp. 52-67.
- (26) Murphy, J. R., Lynch, R. D., and O'Brien, L. J., 1971, Predicted San Fernando earthquake spectra: Environmental Research Corporation Report NVO-1163-TM30, to U.S. Atomic Energy Commission, 38 p.
- (27) Hanks, T. C., 1976, Observations and estimation of long period strong ground motion in the Los Angeles Basin: *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v. 4, pp. 473-488.
- (28) Boore, D. M., 1973, The effect of simple topography on seismic waves: implications for the accelerations recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 63, pp. 1603-1610.
- (29) Murphy, J. R., and Hewlett, R. A., 1975, Analysis of seismic response in the city of Las Vegas, Nevada: A preliminary microzonation: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 65, pp. 1575-1598.
- (30) Murphy, J. R., and West L. R., 1974, An analysis of surface and subsurface seismic measurements demonstrating the amplification effect of near-surface geology: Environmental Research Corporation Report NVO-1163-TM41 to U.S. Atomic Energy Commission 21, p.
- (31) Ihnen, S., and Hadley, D. M., 1984, Prediction of strong ground motion in the Puget Sound region: the 1965 Seattle earthquake: *Sierra Geophysics Report*, SGI-R-84-113 to U.S. Geological Survey, 38 p.
- (32) Hays, W. W., and King, K. W., 1984, Seismic microzoning along the Wasatch fault zone, Utah: *World Conference on Earthquake Engineering*, 8th, Proceedings, v. 1., pp. 1-12.

DUCTILITY VS. VULNERABILITY IN MAJOR EARTHQUAKES

by

Bernardo Deschapelles

Consultant Structural Engineer

A mechanical interpretation of Nature was developed by Newton by means of his celebrated equations based on the concepts of mass, force and acceleration. Later on, Lagrange reformulated the study of motion in terms of energy, giving an alternate solution to the same problem. Although both approaches lead to the same results, there is a difference in the meaning of the primary unknown.

Present Building Codes reduce vulnerability in seismic events specifying some floor horizontal forces which the structure must be able to resist. We must recognize that this approach is Newtonian rather than Lagrangian. A historical reason for this condition could be offered stating that resistance of structures to wind pressures received attention in all Building Codes before considerations related to seismic vulnerability. Accordingly, when scientific methodology was applied to the earthquake problem it was only natural to think of seismic effects in terms of lateral loads similar to the ones caused by the wind forces. In fact, forty years ago the writer heard a Cuban professor of structural design stating that if a building could resist a wind pressure of 20 psf it had enough strength to withstand earthquake motions in the vicinity of the mountain range known as Sierra Maestra!

More recently, it is usual to hear structural engineers say that wind action governs the design of a building because the Code wind forces are larger than those predicted for seismic events in accordance with the same Code. This association of ideas in relation with the wind and seismic effects on a building is quite unfortunate because the advantage of simplicity is more than offset by a misleading appreciation of what a structure really needs to withstand strong earthquake motions. Differences between hurricanes and seismic events should be stressed, specially in Puerto

Rico where both types of natural disasters may occur.

The wind pressures on a building facade develop forces that cause displacements which can be studied using simple theories of Statics and material elastic behavior. In seismic events the causality is exactly reversed because displacements are imposed upon the base of the structure and forces arise due to the accelerated motion of the building masses.

Moreover, forces developed by a hurricane can be predicted with reasonable accuracy and the values established by a Building Code can be regarded as a satisfactory representation of what really happens when such event occurs. However, an elasto-dynamic analysis of a structure subject to strong earthquake motions reveals inertia forces that are multiples of the seismic lateral loads specified by the Code. It is clear that such structure cannot resist the calculated elastic inertia forces if its design follows the Code. It can survive the event if and only if its materials do not behave elastically because the study of structural elasto-plastic behavior shows that the response of a structure in terms of acceleration is greatly reduced when it can undergo large inelastic deformations. Therefore, for strong seismic motions the forces specified in a Code are those corresponding to a structure in which ultimate strength has been reached in various parts and in which plastic deformations have been developed in such parts without a substantial decrease of the ultimate strength. In other words, in major earthquakes the structure must have shown its ductile capacity before the factored Code forces are in action. Present Codes are rather confusing in their approach to the seismic problem because the specified horizontal forces are supposedly service loads to which the designer must apply a certain factor in order to define the ultimate strength required. It is obvious that these forces represent a misleading caricature of reality if they are considered in the same context of the Code wind loads.

It is advisable, therefore, to think of building seismic vulner-

ability in terms of a Lagrangian approach. What a structure really needs is energy absorption capacity rather than lateral load resistance because motion rather than force is the nature of the excitation imposed on the building. Since energy is related to the product of force times displacement, we may certainly combine these two parameters in different ways but we must always end up with the same invariant that measures the energy input caused by the soil motion in the building foundations. We can use large forces requiring small displacements or reduced loads associated with large plastic deformations. The latter criterion is the one implicitly used in Code regulations. Therefore, the structural designer must pay equal attention to ultimate strength and to ductile behavior capability.

Ductility considerations are particularly important in the case of reinforced concrete, widely used in Puerto Rican construction, because this material is not ductile per se. When subject to uniaxial compression, concrete reaches its ultimate strength following a parabolic stress-strain relationship, that is, its modulus of elasticity continually decreases attaining a zero value at its maximum strength. This is not so important as what happens to this material when it cannot mobilize further strength and yet is forced to develop larger strains to accommodate plastic deformations in critical sections of the structure. It actually exhibits a negative modulus of elasticity which means that it tolerates further strains at the expense of strength reduction. Such condition jeopardizes the energy absorption capacity of the material. Fortunately, we may modify concrete behavior past its compressive strain at ultimate strength if we use confining reinforcement to restrain the lateral strains associated with the bulging of the material. In other words, we can produce a different material, confined reinforced concrete, improved in the sense that it has a higher capacity for development of large strains without a substantial decrease in maximum strength. Reinforced concrete buildings lacking confinement where is needed are extremely vulnerable to major earthquakes. Absence of adequate steel hoops is a

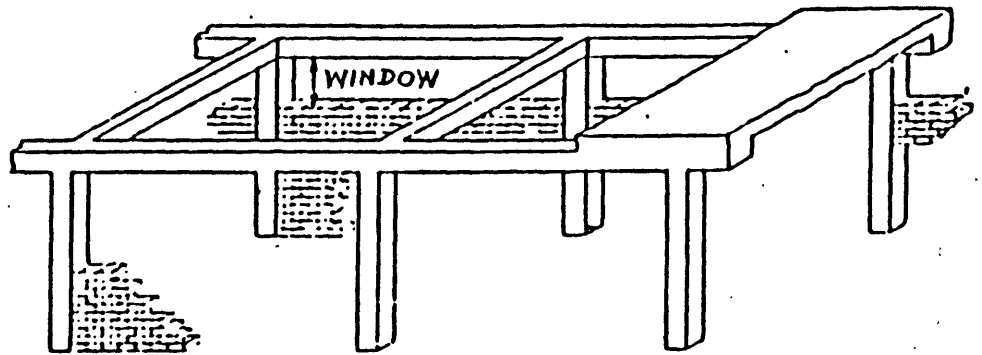
recurrent feature in the photographs of reinforced concrete columns failed during seismic events.

Unfortunately, it is not possible to develop ductile behavior when the concrete stresses are of shear rather than compressive nature. Accordingly, a shear failure must be considered as premature and must be avoided at all cost. When a major earthquake forces any reinforced concrete structural member to mobilize its maximum strength, this strength must be reasonably sustained in spite of the large strains related to what is called an incursion in plastic behavior. Since such incursion can exist in terms of bending moments but not in relation with shear forces, the web reinforcement of the element must be adequate to promote the formation of flexural plastic hinges prior to any shear failure of brittle nature. The application of this simple rule is often neglected, specially in the case of school buildings where the window sill is high and the supposedly non-structural block walls considerably reduce the span between the possible plastic hinges related to the column flexure induced by horizontal forces. Figure A illustrates how the presence of the block walls modifies the flexural pattern of the column. Ironically, a larger amount of column vertical reinforcement is actually detrimental in the problem under consideration because it tends to insure the premature shear failure.

Another type of failure hopelessly lacking ductility is the one associated with bond stresses. If rebars are not adequately anchored past the region where a plastic hinge is expected to occur, no guarantee exists that the reinforcement will reach its yield stress, let alone that it will develop large plastic strains to accommodate a substantial increase in curvature.

Once again, a given amount of input energy may be negotiated with large forces acting through small displacements or the other way around, with small forces related to large displacements. Code regulations are inclined to the latter possibility in a rather

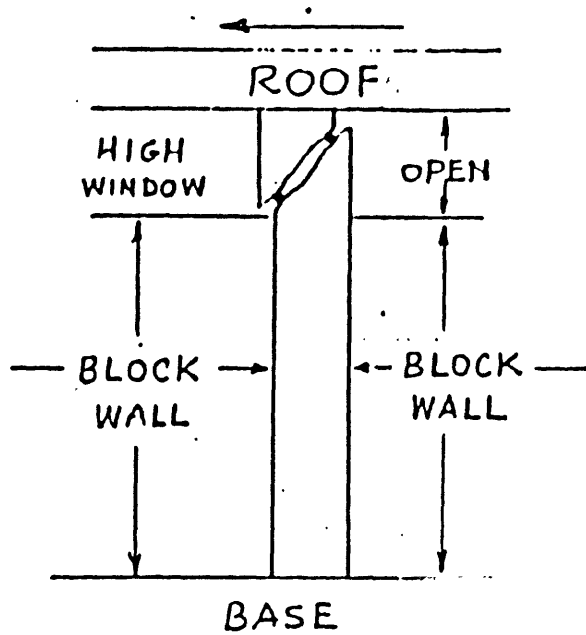
implicit way. Specifically, the present Puerto Rican Building Code does not include recommendations that insure a reduced seismic response compatible with a plastic behavior of the structure under the action of major earthquakes. Although a revised version has been proposed about two years ago it has not yet been implemented. This is a most unfortunate situation and we can only hope that future soil motions in Puerto Rico will not impose a large demand of ductility on its structures.



SCHOOL BUILDING

DIFFERENT COLUMN FAILURES

BRITTLE, BY SHEAR



DUCTILE, BY FLEXURE

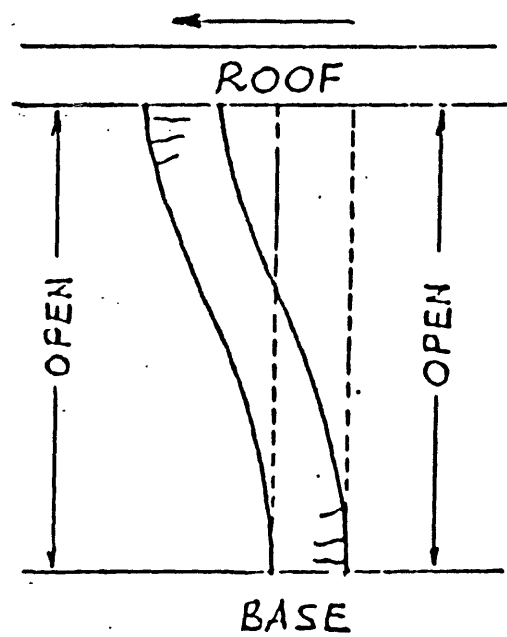


FIGURE A

ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA GEOLOGIA Y LA SISMOLOGIA PARA LA
MICROZONACION SISMICA EN ESPANA: UN EJEMPLO

por

Walter W. Hays
U.S. Geological Survey
Reston, Virginia 22092

LA PELIGROSIDAD SISMICA

Un terremoto es ocasionado por la liberación abrupta, repentina de la energía de deformación que se ha venido acumulando lentamente a lo largo de una falla, una superficie o una zona de fracturación en la corteza terrestre. Cuando se rompe o fractura una falla, las ondas sísmicas se propagan en todas direcciones desde la fuente (Figura 1). A medida que las ondas P, S, Love y Rayleigh inciden en la superficie de la tierra, hacen vibrar el terreno a frecuencias que oscilan entre unos 0,1 y 30 hertzios. También hacen vibrar a los edificios horizontal y lateralmente como consecuencia de la amplitud, la composición espectral y la duración del temblor de tierra. Si el edificio no está diseñado y construido de forma de que soporte las fuerzas dinámicas que acompañan a estas vibraciones, sufre daños. Las ondas de compresión (P) y transversales (S) ocasionan principalmente vibraciones de alta frecuencia (mayores de 1 hertzio) que son más eficaces que las ondas de baja frecuencia en hacer vibrar a los edificios bajos. Las ondas Rayleigh y Love ocasionan principalmente vibraciones de baja frecuencia (menos de 1 hertzio) que son más eficaces que las ondas de alta frecuencia en hacer vibrar a los edificios altos.

Para un diseño resistente a los terremotos se necesita evaluar los fenómenos primarios y secundarios que acompañan al seísmo a fin de definir las fuerzas

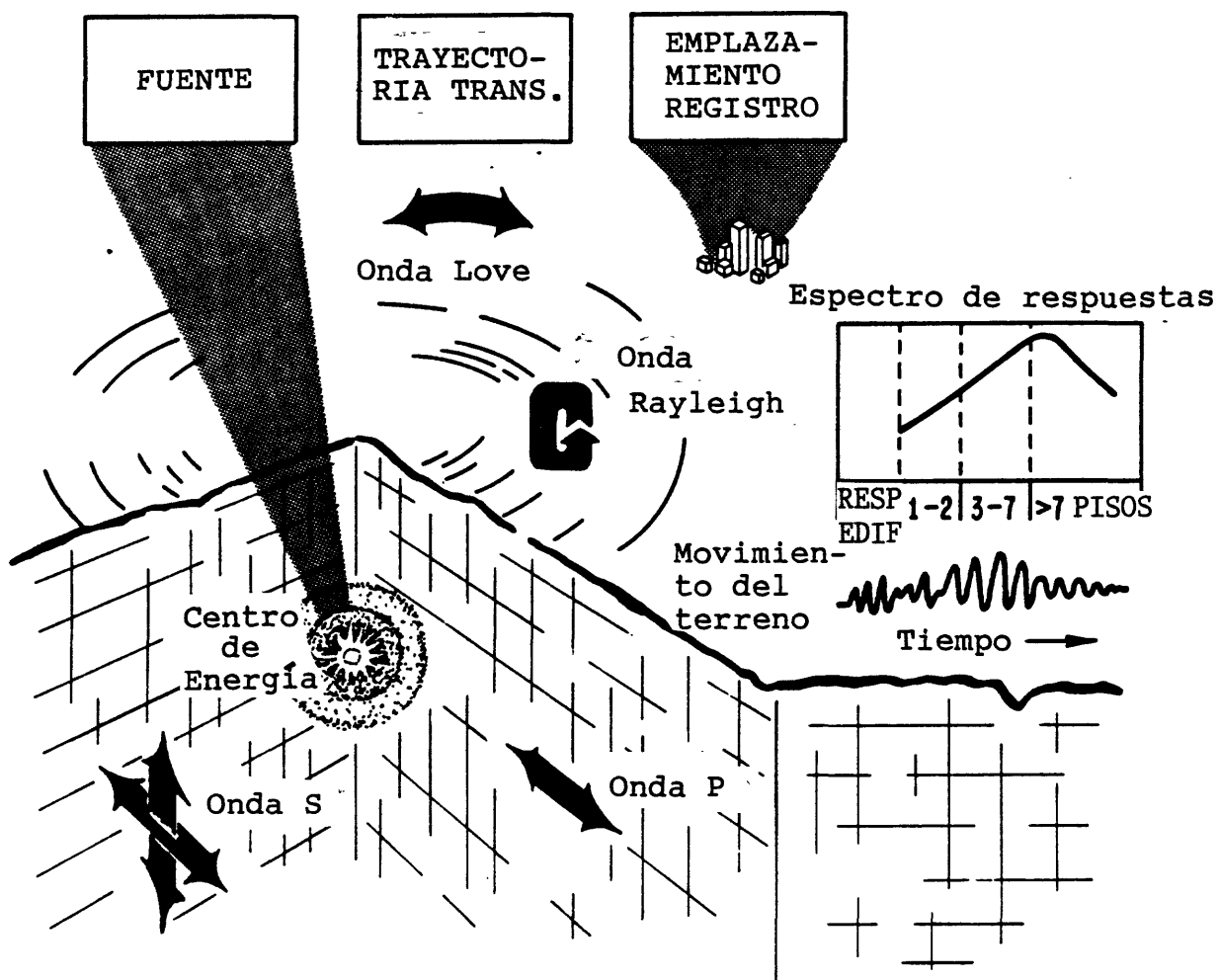


Figura 1.— Ilustración esquemática de las direcciones de vibración ocasionada por las ondas sísmicas a través de un cuerpo (PIS) y de superficie (Love y Rayleigh) generadas durante un terremoto. La evaluación de la peligrosidad de los temblores de tierra ocasionados por estas ondas requiere la consideración de los parámetros físicos de la fuente, la trayectoria de transmisión y el emplazamiento local de registro.

que ha de resistir un edificio. Estos fenómenos, llamados peligrosidad sísmica, son clasificados como temblores de tierra, ruptura por falla de superficie, cesión de tierra inducida por el terremoto (cesión por deslizamiento de terreno, licuefacción, compactación, cabeceo y cesión por sedimentación o asentamiento de los cimientos), deformación tectónica regional y (en algunas zonas costeras) tsunamis u olas ciclónicas. Cada uno de estos peligros puede ocasionar daños a los edificios e instalaciones, pérdidas económicas y pérdida de vida (Figura 2). Estos peligros también pueden desencadenar incendios e inundaciones. Los temblores secundarios o cola del terremoto pueden durar de meses a varios años, según la energía liberada en el temblor principal y pueden reactivar cualquiera o todos estos fenómenos físicos, ocasionando daños o pérdidas adicionales.

La evaluación de la peligrosidad sísmica para fines de diseño resistente a los terremotos es una labor compleja (Figura 3). Se necesita un grupo multidisciplinario de científicos e ingenieros para realizar un amplio abanico de análisis técnicos. Estos análisis se efectúan en tres escalas:

a) mundial (a una escala aproximada de 1:7.500.000 o mayor), b) regional (a una escala aproximada de 1:250.000 o mayor) y c) local (a una escala aproximada de 1:25.000 o menor). Los estudios mundiales proporcionan un "cuadro extenso" de las fuerzas tectónicas que entran en juego. Los estudios regionales proporcionan los parámetros físicos requeridos para definir el potencial sísmico de una región. Los estudios locales definen los parámetros físicos dominantes que controlan las características del peligro para lugares específicos. Todos estos estudios tratan de dar contestación a las siguientes preguntas técnicas:

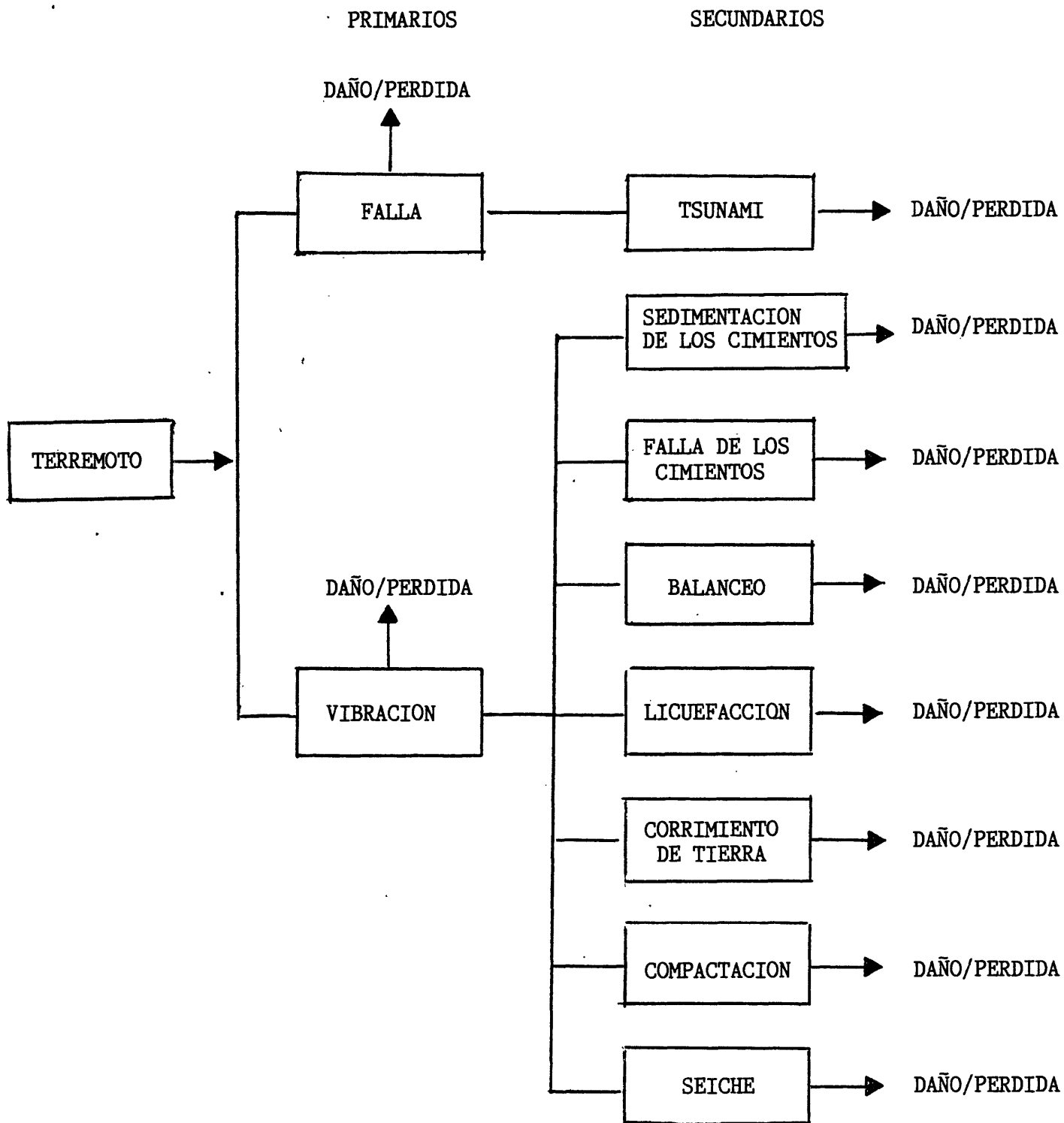


Figura 2.— Ilustración esquemática de los peligros primarios y secundarios ocasionados por un terremoto. Cada peligro puede conducir a daños y pérdidas. La meta de la ingeniería sísmica es mitigar el daño y pérdida ocasionados por estos peligros mediante un diseño pragmático, resistente a los terremotos.

MATRIZ DE PELIGROSIDAD SISMICA PARA UNA COMUNIDAD

CELDA URBANA

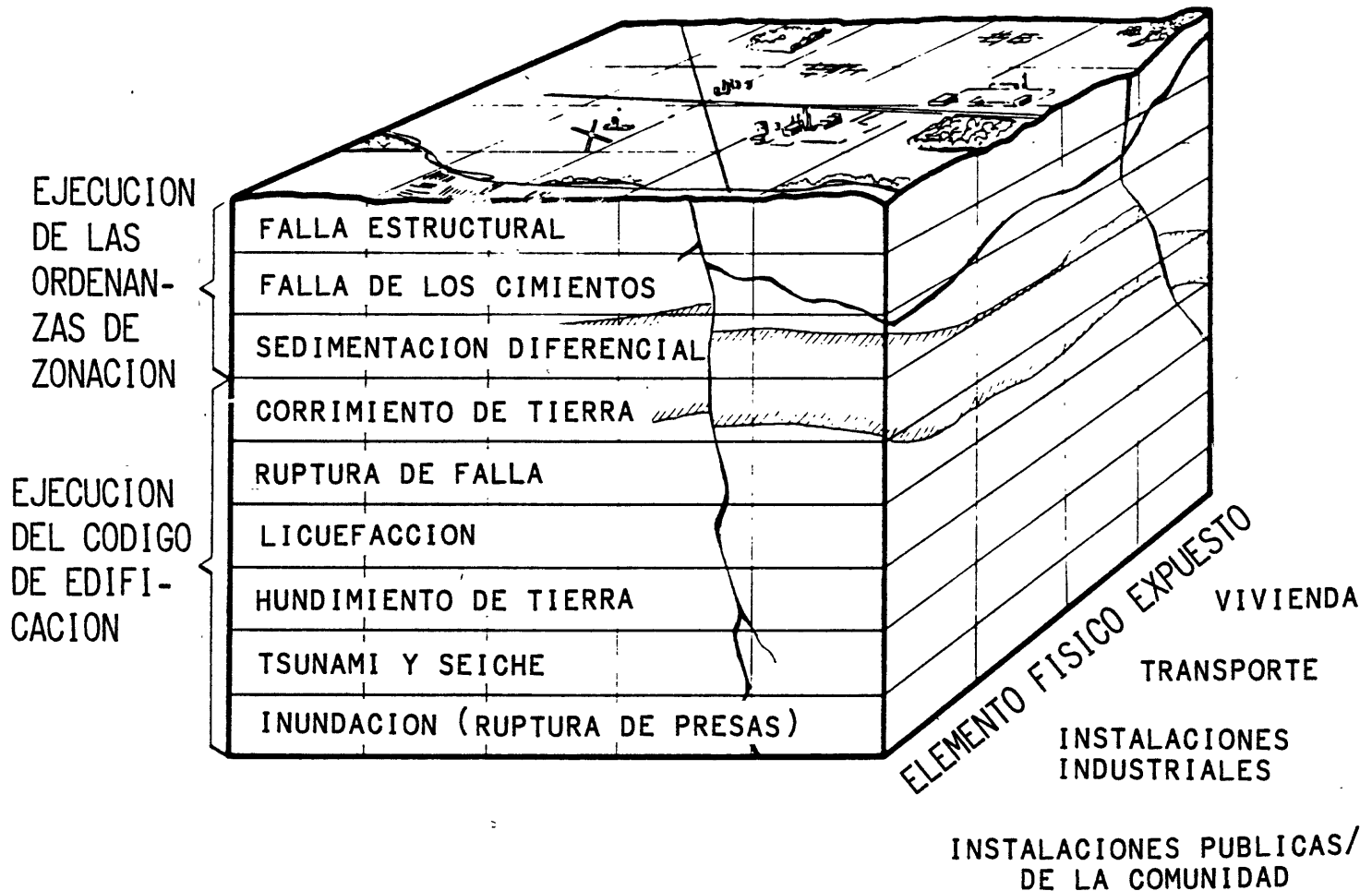


Figura 3.— Ilustración esquemática de una comunidad urbana con distintos problemas de diseño resistente a los terremotos. La evaluación de los peligros de los temblores de tierra, falla de tierra, falla de superficie y deformación tectónica de origen sísmico es una parte importante del proceso que requiere aportes del geólogo para poder especificar parámetros de diseño apropiados y resistentes a los terremotos.

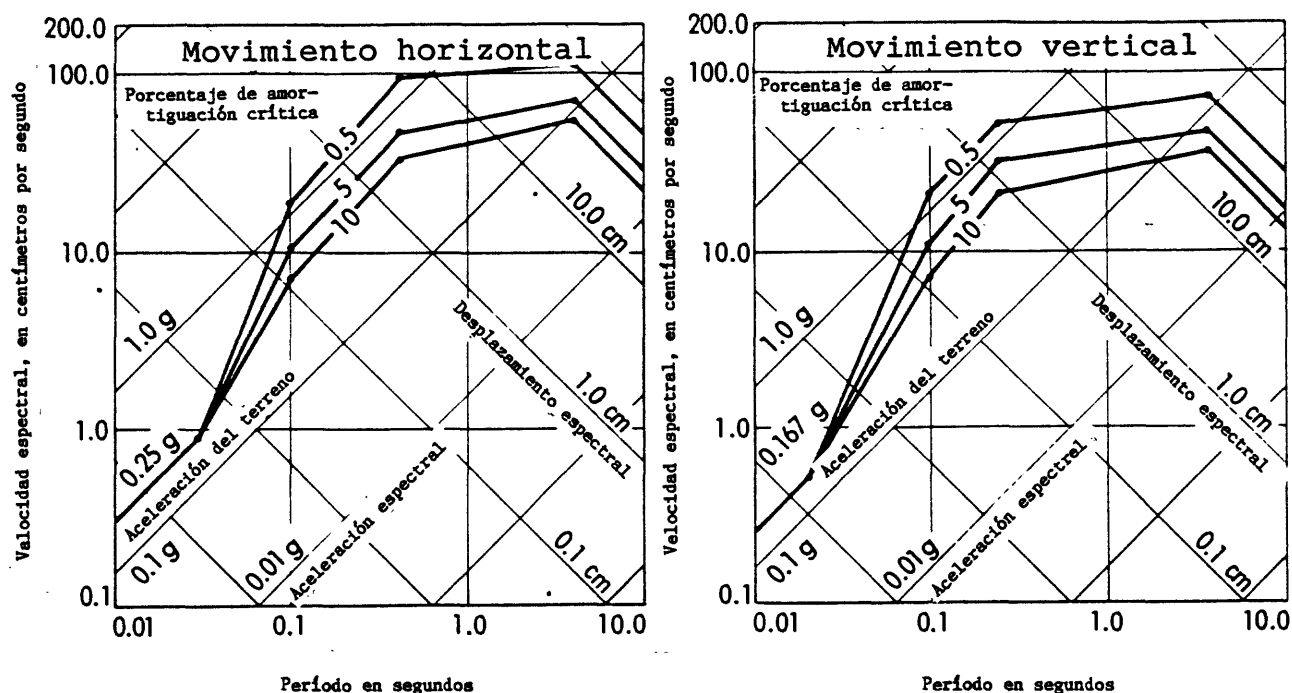
- ¿DONDE ocurren ahora los terremotos? ¿DONDE ocurrieron en el pasado?
- ¿POR QUE ocurren?
- ¿CON CUANTA FRECUENCIA ocurren terremotos de una cierta intensidad (magnitud)?
- ¿QUE MAGNITUD (gravedad) han tenido los efectos físicos en el pasado? ¿QUE MAGNITUD pueden tener en el futuro?
- ¿COMO varían los efectos físicos espacial y temporalmente?

Las respuestas a estas preguntas se utilizan para definir los parámetros de diseño sísmico (Figura 4). Aún cuando estas preguntas parecen simples, las respuestas requieren una investigación y enjuiciamiento técnico considerables.

MICROZONACION SISMICA

La microzonación sísmica, la división de una región en zonas geográficas que se prevé experimentarán la misma gravedad relativa de un peligro sísmico (por ejemplo, temblor de tierra, ruptura por falla de superficie, cesión de tierra inducida por el terremoto, deformación tectónica o inundación por tsunami) es una parte importante del proceso de evaluación de la peligrosidad sísmica. Los mapas de microzonación pueden utilizarse para planificar la

ESPECTROS DE DISEÑO



HISTORIA CRONOLOGICA DE DISEÑO

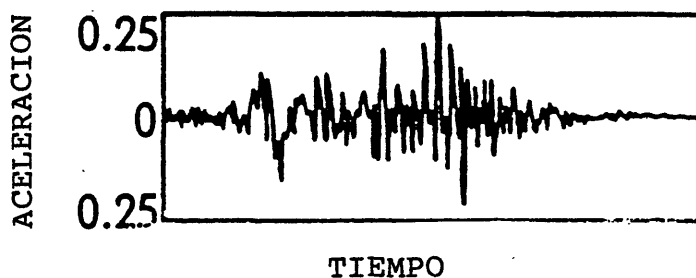


Figura 4.— Ilustración esquemática del espectro de respuesta del diseño y la historia cronológica utilizada en el diseño resistente a terremotos de instalaciones de importancia vital. En general, el ingeniero estructural requiere información acerca de la amplitud, composición espectral y duración del temblor de tierra. El geólogo proporciona información que permite especificar valores razonables de estos parámetros de diseño.

construcción y el desarrollo urbano y para guiar el diseño resistente a los terremotos de los edificios nuevos y reforzar los edificios e instalaciones existentes.

La microzonación sísmica es una tarea compleja que requiere las clases siguientes de estudios técnicos:

- 1) Evaluación de la peligrosidad sísmica a escala regional (una escala cartográfica de 1:100.000–1:250.000, aproximadamente). Esta parte de un estudio de microzonación establece los parámetros físicos de la región que se requieren para evaluar los peligros sísmicos de temblor de tierra, ruptura por falla de superficie, deformación tectónica e inundación por tsunami. Incluye las tareas técnicas siguientes:

Tarea 1: Compilación de un catálogo y mapa de sismicidad histórica.

Tarea 2: Realización de estudios neotectónicos (planimetría, datación absoluta y determinación de fosas) para ampliar la información sobre periodicidad derivada de datos sobre sismicidad histórica.

Tarea 3: Preparación de un mapa fotogeológico.

Tarea 4: Preparación de un mapa sismotectónico que indique la situación de fallas activas.

Tarea 5: Preparación de un mapa que indique las zonas sísmógenas, especificando la magnitud del terremoto máximo y la frecuencia de incidencia de terremotos en cada zona sísmógena.

Tarea 6: Especificación de las características del movimiento de tierra de campo cercano (amplitud máxima y composición espectral).

Tarea 7: Especificación de las leyes regionales para atenuación de ondas sísmicas, incluyendo su incertidumbre.

Tarea 8: Preparación de mapas probabilísticos de peligrosidad por temblores de tierra en términos de aceleración máxima de tierra, tiempos de exposición y probabilidad de no superación.

Tarea 9: Creación de bases de datos regionales (por ejemplo, fotografía aérea, hidrogeología, mapas de características distintivas y registros de perforaciones) y documentación de programas de ordenadores para análisis de los datos.

- 2) Evaluación de la peligrosidad sísmica a escala urbana (una escala cartográfica de 1:5.000-1:25.000, aproximadamente). Esta parte del estudio de microzonación integra los datos sismotectónicos y otros datos físicos obtenidos en el estudio regional (Parte I) con

los datos específicos para emplazamientos obtenidos en la zona urbana a fin de producir mapas de microzonación sísmica. Las tareas técnicas principales comprenden lo siguiente:

Tarea 10: Adquisición, síntesis e integración de los datos geológicos, geofísicos y geotécnicos nuevos y existentes para caracterizar el suelo y roca en la zona urbana en términos de sus propiedades físicas y la respuesta prevista con distintos niveles de temblor de tierra.

Tarea 11: Estimación de la funciones empíricas de transferencia del suelo en cada zona urbana con consideración de la amplitud, frecuencia, composición y nivel de aceleración máxima del terreno.

Tarea 12: Preparación de mapas probabilísticos de la peligrosidad de temblores de tierra para cada zona urbana en términos de los tiempos de exposición a la aceleración máxima del terreno y la probabilidad de no superación. Estos parámetros pueden correlacionarse con el código actual de edificación y los planes para el uso de la tierra.

Tarea 13: Especificación de los factores de amplificación dinámica para columnas de tierra que son típicas de cada zona urbana.

Tarea 14: Preparación de un mapa que presente el potencial de ruptura por falla de superficie en cada zona urbana.

Tarea 15: Preparación de un mapa que indique el potencial de licuefacción en cada zona urbana.

Tarea 16: Preparación de un mapa que indique el potencial de deslizamientos de terreno en cada zona urbana.

Tarea 17: Preparación de un mapa que indique los posibles efectos secundarios (por ejemplo, inundaciones) en cada zona urbana.

Tarea 18: Preparación de un mapa que presente, en forma resumida, todos los peligros sísmicos posibles en cada zona urbana.

Tarea 19: Evaluación de la distribución del daño en terremotos pasados.

- 3) Evaluación del uso de la tierra, códigos de edificación, prácticas de construcción y otras cuestiones afines—Esta parte de un estudio de microzonación utiliza análisis y síntesis de los datos físicos (Parte I) y los mapas de microzonación sísmica elaborados para una zona urbana (Parte 2) a fin de producir recomendaciones específicas. Entre las tareas figuran las siguientes:

Tarea 20: Evaluación del código actual de edificación, identificación de las opciones para modificación que incorporen las lecciones científicas y técnicas aprendidas en terremotos destructivos pasados.

1103 40064

Tarea 21: Evaluación de prácticas regionales y urbanas de uso de la tierra, identificando opciones para alternativas a prácticas actuales que pudieran reducir la peligrosidad.

Tarea 22: Evaluación de las prácticas de construcción de edificios nuevos, especificando opciones para alternativas a prácticas actuales que pudieran ser más eficaces para asegurar una alta calidad.

Tarea 23: Evaluación de las prácticas actuales para reparar y reforzar edificios existentes, indicando opciones para alternativas a prácticas actuales que pudieran ser más eficaces.

ZONACION DE LA PELIGROSIDAD DE TEMBLORES DE TIERRA

La zonación de la peligrosidad sísmica de temblores de tierra—la división de una región en zonas geográficas que tienen una gravedad o respuesta relativa análoga a los temblores de tierra—ha sido una meta en Estados Unidos y otros países del mundo por unos cincuenta años. Durante este intervalo, se han elaborado dos clases de mapas de peligrosidad de temblores de tierra. La primera clase resume la observación de terremotos pasados y adopta la hipótesis de que, salvo en lo que respecta a diferencias de escala, en terremotos futuros ocurrirán aproximadamente los mismos efectos. La segunda clase incorpora conceptos probabilísticos y efectúa una extrapolación de regiones que han tenido terremotos en el pasado y de regiones que tienen fuentes

sísmicas posibles. La confección de mapas de zonación a escala tanto regional como urbana requiere una investigación innovadora y buenos datos para resolver cierto número de cuestiones técnicas controvertidas. Se ha realizado progreso, pero queda mucho por hacer debido a que ningún mapa de zonación está totalmente libre de controversias.

Un buen mapa (o mapas) de peligrosidad por temblores de tierra presenta la variación espacial y la gravedad relativa de un parámetro físico tal como la aceleración o intensidad máximas. Dicho mapa divide una región en áreas o zonas geográficas, cada una de las cuales tiene una respuesta análoga en toda su extensión al temblor de tierra producido por un terremoto. Una vez se han definido los efectos posibles del temblor de tierra para todas las zonas de una región, puede formularse una política pública que contribuya a mitigar sus efectos mediante acciones apropiadas tales como: evitar determinadas zonas, planificar el uso de la tierra, adoptar diseños de ingeniería y distribuir las pérdidas mediante el seguro (Hays, 1981).

La construcción de un mapa de zonación de la peligrosidad de temblores de tierra entraña cierto número de problemas técnicos. La zonación a nivel tanto regional como local requiere la mejor información posible sobre: (1) sismicidad, (2) la naturaleza de la zona sismógena, (3) la atenuación de las ondas sísmicas y (4) la respuesta del terreno.

Historia de la zonación sísmica en los Estados Unidos—La confección de mapas de zonación de la peligrosidad por temblores de tierra ha proseguido lentamente, debido principalmente a que se ha necesitado una investigación con-

1103 40064

siderable para resolver la controversia acerca de las cuestiones técnicas asociadas con cada mapa. La zonación sísmica en Estados Unidos tiene una historia de unos 50 años. El primer mapa de zonación de la peligrosidad por temblores de tierra para Estados Unidos fue preparado por Ulrich en 1948. Con anterioridad al mapa de Ulrich, sólo se habían preparado unos cuantos mapas para varias ciudades y zonas geográficas. El mapa de Ulrich dividía a Estados Unidos contiguo en cuatro zonas numeradas de 0 a 3, con una zona 3 considerada como la de mayor posibilidad de experimentar daños. Ese mapa fue adoptado en 1949 por la Conferencia Internacional de Funcionarios de la Edificación para su inclusión en el Código Uniforme de Edificación, y a pesar de algunos problemas en relación con su interpretación, siguió apareciendo en ediciones del Código Uniforme de Edificación hasta 1970. La edición de 1970 del Código Uniforme de Edificación utilizó un mapa de zonación (Figura 5) formulado por Algermissen (1969) que tenía el mismo esquema de numeración (zona 0 a 3) que el mapa de Ulrich. El mapa de Algermissen se basaba principalmente en el valor máximo de intensidad Mercalli Modificada observado históricamente en cada zona, pero también incluía cierta generalización para tomar en cuenta fallas activas y la estructura geológica regional. La Conferencia Internacional de Funcionarios de Edificación no utilizó la información sobre frecuencia de incidencia sísmica que acompañaba al mapa de Algermissen; por tanto, las disposiciones sobre fuerzas laterales especificadas en California también fueron especificadas para algunas zonas de la región oriental de Estados Unidos, ocasionando controversia y resistencia a su puesta en práctica. Las ediciones de 1976 y 1979 del Código Uniforme de Edificación contenían una versión modificada del mapa de zonación de 1970. Determinadas porciones de la zona 3, situada principalmente en Cali-

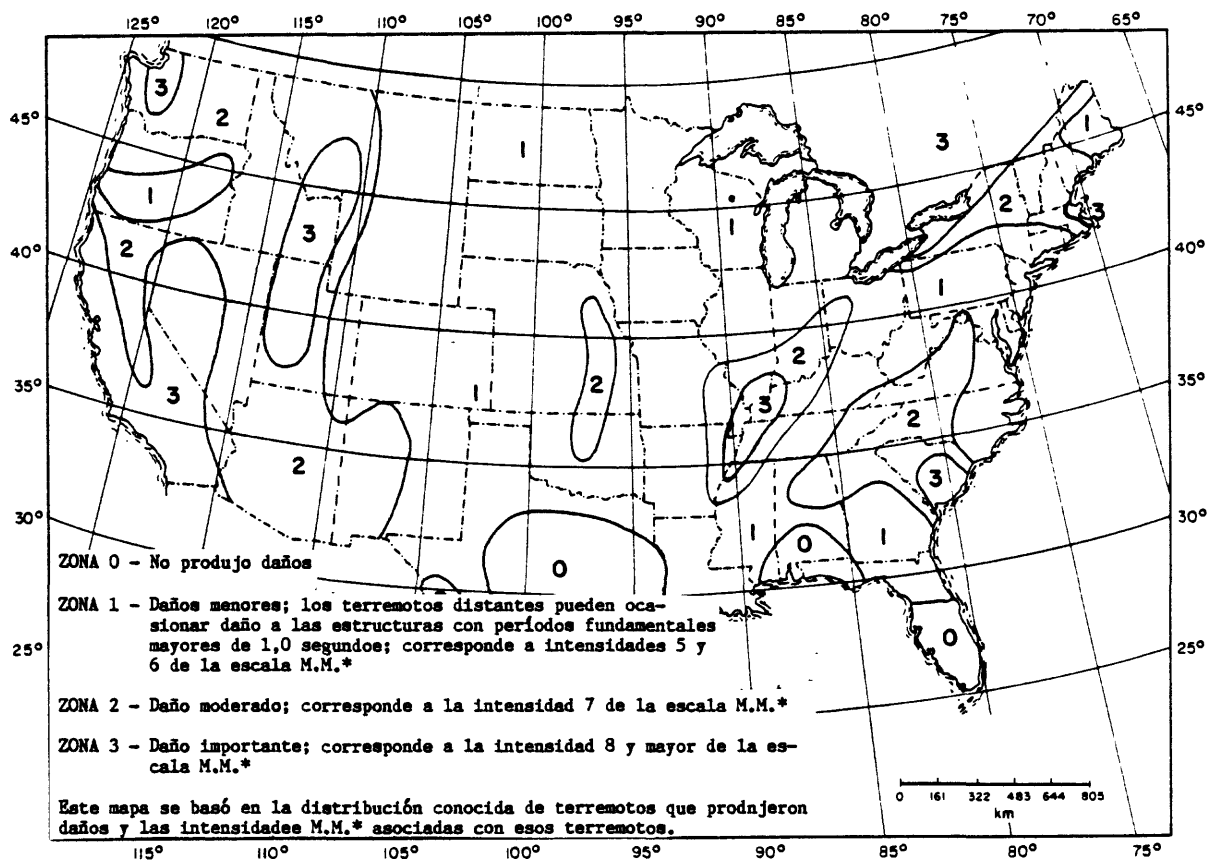


Figura 5.— Zonas de peligrosidad sísmica tomando como base datos históricos de la intensidad Mercalli Modificada y la distribución de los terremotos que han producido daños (Algermissen, 1969). Este mapa fue adoptado en la edición de 1970 del Código Uniforme de Edificación.

1103 40064

fornia, fueron cambiadas a una nueva zona 4 para indicar mayores posibilidades de daños debido a la mayor frecuencia de incidencia sísmica y a la mayor magnitud máxima de los terremotos en California.

En 1976, Algermissen y Perkins publicaron un mapa probabilístico de peligrosidad por temblores de tierra para Estados Unidos contiguo. La escala del mapa fue de 1:7.500.000 o unas 123 millas por pulgada. Al contrario de mapas anteriores que se habían basado en un trazado de los datos de intensidad Mercalli Modificada (u alguna otra escala de intensidad), su mapa (Figura 6) ilustraba la aceleración máxima en roca que se estimaba ocurriría con un 90 por ciento de probabilidad de no ser superada en un período de 50 años. Algermissen y Perkins advirtieron que los valores de la aceleración máxima pueden ser mayores en lugares que tienen sedimentos subyacentes débiles o saturados de agua en vez de roca. El término roca se definió como un material sólido expuesto a la superficie o el suelo subyacente y que tiene una velocidad de ondas transversales de al menos 765 m/s en deformaciones pequeñas (10 por ciento). El mapa de zonación por Algermissen y Perkins fue incluido en el informe de 1978 del proyecto ATC-3 por el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC). También figuraban en el informe dos nuevos mapas nacionales de peligrosidad por temblores de tierra, de aceleración máxima efectiva y de velocidad máxima efectiva. El mapa ATC-3 de aceleración máxima efectiva (Figura 5) es muy similar al mapa de aceleración máxima de Algermissen y Perkins, con la excepción de que los valores mayores de aceleración indicados en el mapa ATC-3 fueron 0,4 g en California, mientras que, el mapa Algermissen-Perkins presentaba valores de aceleración de hasta 0,8 g en California a lo largo de la zona de falla de San Andreas. El mapa de ATC-3 no ha sido

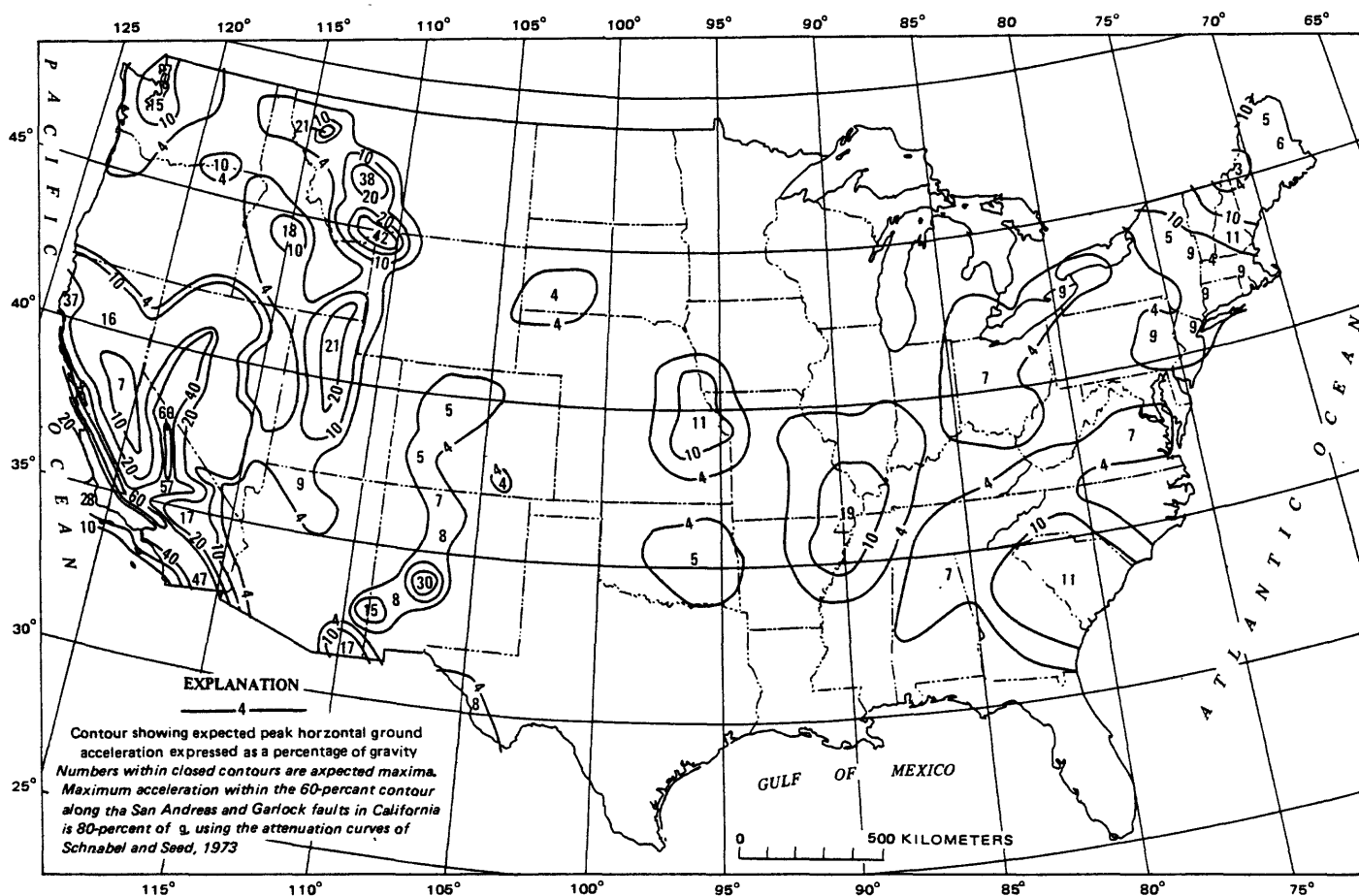


Figura 6.-- Mapa que presenta los niveles máximos de aceleración máxima de tierra horizontal en emplazamientos de roca en Estados Unidos en un período de 50 años (Algermissen y Perkins, 1976). Los valores de contorno de la aceleración tienen una probabilidad de 90 por ciento de no ser superados en un período de 50 años.

adoptado por la Conferencia Internacional de Funcionarios de Edificación. Sin embargo, el Consejo de Seguridad Sísmica de la Edificación está evaluando actualmente este mapa en diseños de ensayo-uso en la región oriental de los Estados Unidos.

Algermissen y sus colaboradores prepararon en 1982 nuevos mapas nacionales (a una escala de 1:7.500.000). Estos mapas incorporan los resultados de los recientes trabajos prácticos geológicos y perfeccionamientos en el análisis de datos efectuados desde el mapa de Algermissen y Perkins de 1976 y los mapas de ATC de 1978. Presentan los niveles máximos de aceleración y velocidad máximas del terreno en roca, con una probabilidad del 90 por ciento de no ser excedidos en tiempos de exposición de 10, 50 y 250 años.

PROBLEMAS DE INVESTIGACION EN LA ZONACION DE LA PELIGROSIDAD DE TEMBLORES DE TIERRA

La microzonación sísmica entraña cierto número de problemas complejos de investigación. Estos pueden clasificarse en cuatro zonas generales, en la que cada zona entraña una amplia gama de cuestiones técnicas. Las siguientes preguntas representativas, que generalmente no pueden contestarse con un simple sí o no, ilustran la controversia asociada con los mapas de peligrosidad de temblores de tierra a una escala tanto regional como urbana.

1) Sismicidad

- ¿Permitirá la incertidumbre inherente en el uso de catálogos de terremotos instrumentalmente registrados y detectados, que representan un corto intervalo de tiempo y una zona regional amplia, especificar con exactitud la frecuencia de incidencia de terremotos importantes a una escala local?
- ¿Puede determinarse con precisión el ciclo sísmico de sistemas de falla individuales y, en caso afirmativo, puede especificarse dónde se hallan en el ciclo?
- ¿Puede especificarse con exactitud el emplazamiento y magnitud del terremoto mayor que es posible físicamente en un sistema de falla dado o en una provincia sismotectónica? ¿Puede especificarse la frecuencia de este acontecimiento?
- ¿Pueden identificarse hiatos sísmicos y evaluarse con exactitud su potencial sísmico?
- ¿Pueden reconciliarse las discrepancias entre la evidencia geológica para la incidencia de importantes movimientos tectónicos en el pasado geológico y la evidencia proporcionada por patrones actuales e históricos de sismicidad en una región geográfica?

11C6 40064

2) La naturaleza de la zona sísmógena

- ¿Pueden definirse con exactitud las zonas sísmógenas sobre la base de la sismicidad histórica? ¿Sobre la base de la geología y las placas tectónicas? ¿Sobre la base de la sismicidad histórica generalizada por los datos geológicos y tectónicos? ¿Qué metodología es la más exacta?
- Al evaluar la peligrosidad sísmica por temblores de tierra para una región, ¿puede asignarse con precisión la magnitud al terremoto mayor que se prevé ocurra en un determinado período de tiempo en un sistema de falla o zona sísmógena en particular?
- ¿Pueden cuantificarse e incorporarse a mapas de zonación los efectos físicos de los parámetros de fuentes sísmicas, tales como el descenso en la tensión y el momento sísmico?

3) Atenuación de las ondas sísmicas

- ¿Pueden modelizarse los detalles complejos de la ruptura de falla sísmica (por ejemplo, las dimensiones de la ruptura, el tipo de falla: velocidad de desplazamiento de falla, transposición de falla) con precisión suficiente para proporcionar estimaciones exactas de las características de amplitud y frecuencia del movimiento de tierra cerca de la falla? ¿Lejos de la falla? ¿Se saturan los parámetros de movimiento de tierra máximos a grandes magnitudes?

1107 40004

4) Respuesta del terreno local

- ¿Hay una gama discreta de valores de movimientos de tierra y niveles máximos de deformación por deslizamiento dinámico de capas donde la respuesta del terreno (según definida por una función de transferencia del emplazamiento) es repetible y esencialmente lineal?
¿Hay una gama en la que dominan los efectos no lineales?
- ¿Pueden modelizarse con exactitud los efectos 2-D y 3-D de propiedades físicas selectas (por ejemplo, grosor, litología, geometría, contenido de agua, velocidad de las ondas transversales y densidad) que controlan la variación espacial, la duración y la amplitud y características espectrales de la respuesta del terreno en una región geográfica?
- ¿Puede modelizarse con exactitud la variación del movimiento de tierra con profundidad por debajo de la superficie?
- ¿Hay incertidumbre asociada con la constante de la función de transferencia de un emplazamiento? ¿Es ésta pequeña?

FUNCIONES DEL GEOLOGO Y EL SISMOLOGO

El geólogo y el sismólogo trabajan en cooperación con el ingeniero. Tienen la función importante de proporcionar información que pueda ser correlacionada con la amplitud, composición espectral y duración del temblor de tierra,

1106 40064

los tres factores más importantes que han de incorporarse en el diseño resistente a los terremotos de un edificio o instalación. El geólogo proporciona información sobre todas las tres escalas (mundial, regional y local), estudiando: 1) las placas tectónicas, 2) las fallas, 3) la paleosismicidad, 4) el potencial sísmico, 5) las zonas sísmógenas y 6) las características específicas al emplazamiento del suelo y la columna de roca subyacente al emplazamiento. Además de estas tareas, el sismólogo proporciona información sobre: 1) las fuerzas de atenuación de las ondas sísmicas y 2) los parámetros de diseño sísmico. Cada tarea se describirá en las secciones que aparecen a continuación:

Placas tectónicas—Cada año, se producen en el mundo varios millones de terremotos. La mayoría de estos terremotos ocurren a lo largo de los límites de una docena de placas o segmentos rígidos de la corteza terrestre de 80 km (50 millas) a 100 km (60 millas) de grosor y el manto superior que se desplazan lenta y continuamente sobre el interior de la tierra (Figura 7). Estas placas se encuentran en algunas zonas y se separan en otras, moviéndose con una velocidad de movimiento relativo entre las placas que oscila entre menos de 1 cm (fracción de una pulgada) y unos 10 cm (unas 5 pulgadas) por año. Aunque estas velocidades parecen bajas, pueden ascender a más de 50 km (30 millas) en sólo un millón de años, un intervalo corto geológicamente. A medida que se mueven estas placas, se acumula tensión. Con el tiempo, las fallas a lo largo de las márgenes de las placas o cerca de ellas se desplazan abruptamente y se produce un terremoto. Entonces, comienza de nuevo el ciclo sísmico.

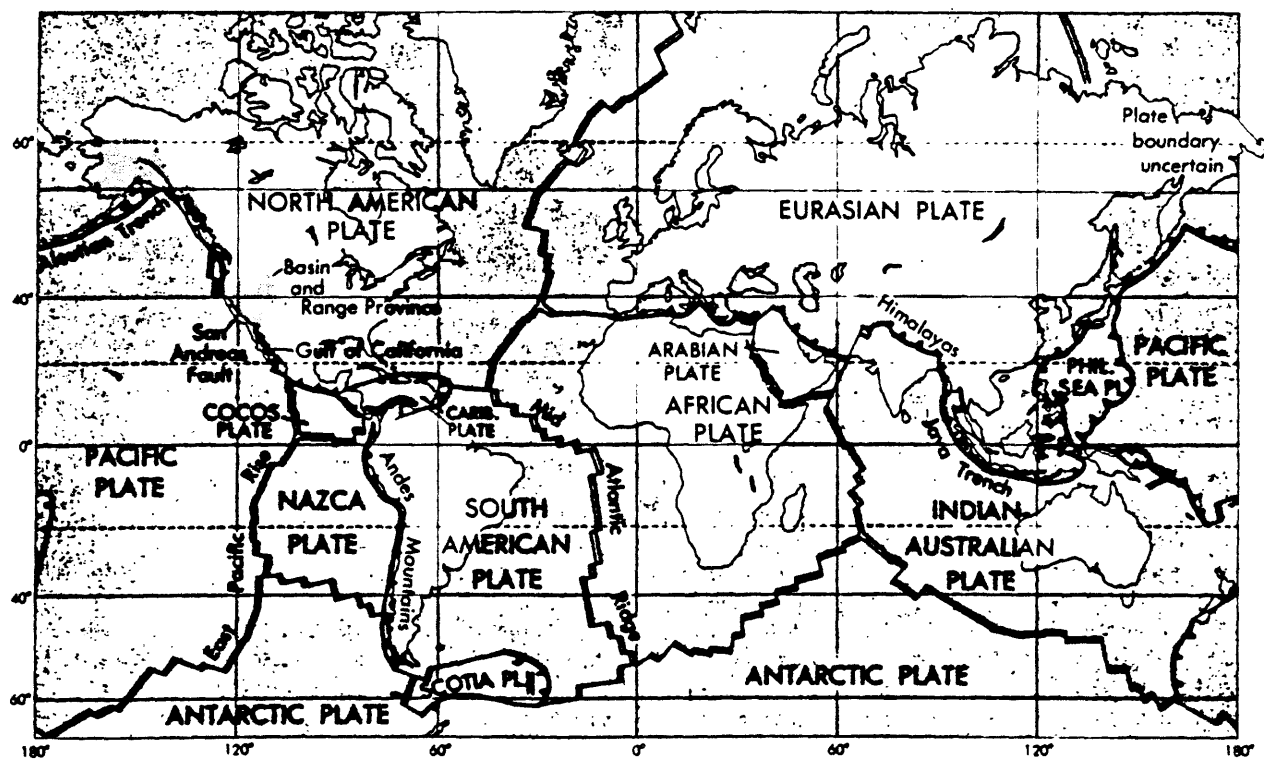


Figura 7.— Mapa que presenta las placas tectónicas principales del mundo. La actividad sísmica marca los límites de cada placa. La línea doble indica una zona de propagación de la que se alejan las placas. Las líneas serradas indican una zona en la que una placa se introduce por debajo de otra ("subducción"). Una línea única indica una falla de desplazamiento horizontal a lo largo de las cuales se deslizan las placas la una más allá de la otra (recopilado y adaptado de muchas fuentes; muy simplificado en zona compleja).

1136 40064

Estudio de las fallas—El estudio de las fallas es sumamente importante para comprender dónde son susceptibles de ocurrir terremotos, cuál será probablemente su intensidad, y con qué frecuencia puede esperarse que ocurran. La energía liberada durante los terremotos grandes hace que la falla se rompa a través de una fracción importante de su longitud. Los datos de observación de terremotos históricos en todo el mundo indican que incluso un terremoto moderado de la magnitud 6 requiere una longitud de ruptura de falla de 5-10 km (3-6 millas) y que los terremotos grandes, de una magnitud de 8 y mayor, pueden tener una longitud de ruptura de hasta 1.000 km (600 millas).

Los mayores desplazamientos de fallas horizontales y verticales observados en la superficie terrestre durante terremotos históricos son, respectivamente, 11,5 m (38 pies) durante el terremoto de Assam en 1897 y 9,9 m (33 pies) durante el terremoto de Mongolia en 1957 (Allen, 1984). Las observaciones geodéticas indican que han ocurrido en profundidad desplazamientos notablemente mayores.

Los geólogos en todo el mundo han identificado y estudiado muchas fallas que se extienden hasta la superficie del terreno. Los estudios de las fallas han producido las siguientes reglas generales:

- Casi todos los terremotos grandes han ocurrido en fallas ya existentes que habían tenido una historia anterior de desplazamientos sísmicos en el pasado geológico reciente, de ordinario, dentro de las últimas decenas de miles de años.
- Se requieren fallas largas para producir terremotos grandes.

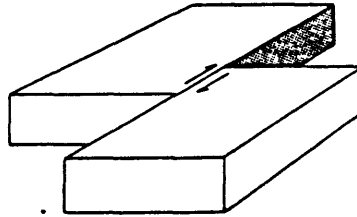
11A7 40064

- Las fallas largas se producen con el alargamiento y unión paulatinos de fallas pequeñas que se rompen en terremotos de pequeños a medios a través de un período de millones de años. Así pues, una falla larga, tal como la de San Andreas, no fue producida durante un solo terremoto en el pasado distante sino que, más bien, es el resultado de muchos terremotos más pequeños.
- Si puede determinarse la frecuencia de movimientos en una falla durante el pasado geológico reciente, pueden hacerse estimaciones confiables acerca de la probabilidad de ruptura de la falla en un terremoto futuro durante un intervalo de tiempo específico.

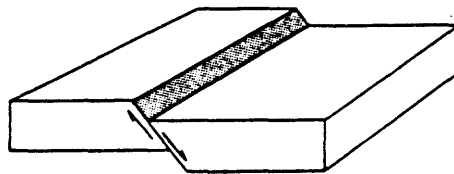
Las investigaciones de fallas en todo el mundo han demostrado que han ocurrido terremotos grandes en fallas de desplazamiento horizontal (por ejemplo, la falla de San Andreas) y fallas de corrimiento o inversas (por ejemplo, la zona de subducción por debajo de la región meridional de Chile). Estas dos clases de fallas y la falla normal (por ejemplo, la falla de Wasatch en Utah) se presentan esquemáticamente en la Figura 8. Las fallas de corrimiento, donde un bloque monta sobre otro bloque en un plano de falla ligeramente inclinado, son más difíciles de reconocer y evaluar en términos de su actividad que las fallas de desplazamiento horizontal o normales.

Un geólogo clasifica las fallas como "activas" o "inactivas", tomando como base el hecho de si han experimentado movimiento en un período de tiempo específico en las últimas decenas de miles de años. En la Figura 9 se ilustra este tipo de clasificación. Una falla muy activa, tal como la falla

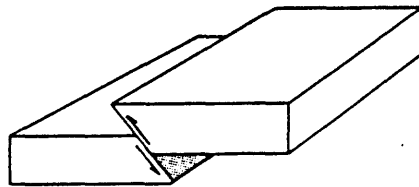
11A8 40064



FALLA DE DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL



FALLA DE DESPLAZAMIENTO NORMAL



FALLA DE DESPLAZAMIENTO INVERSO

Figura 8.— Ilustración esquemática de las fallas de desplazamiento horizontal, normal e inverso.

11B5 40064

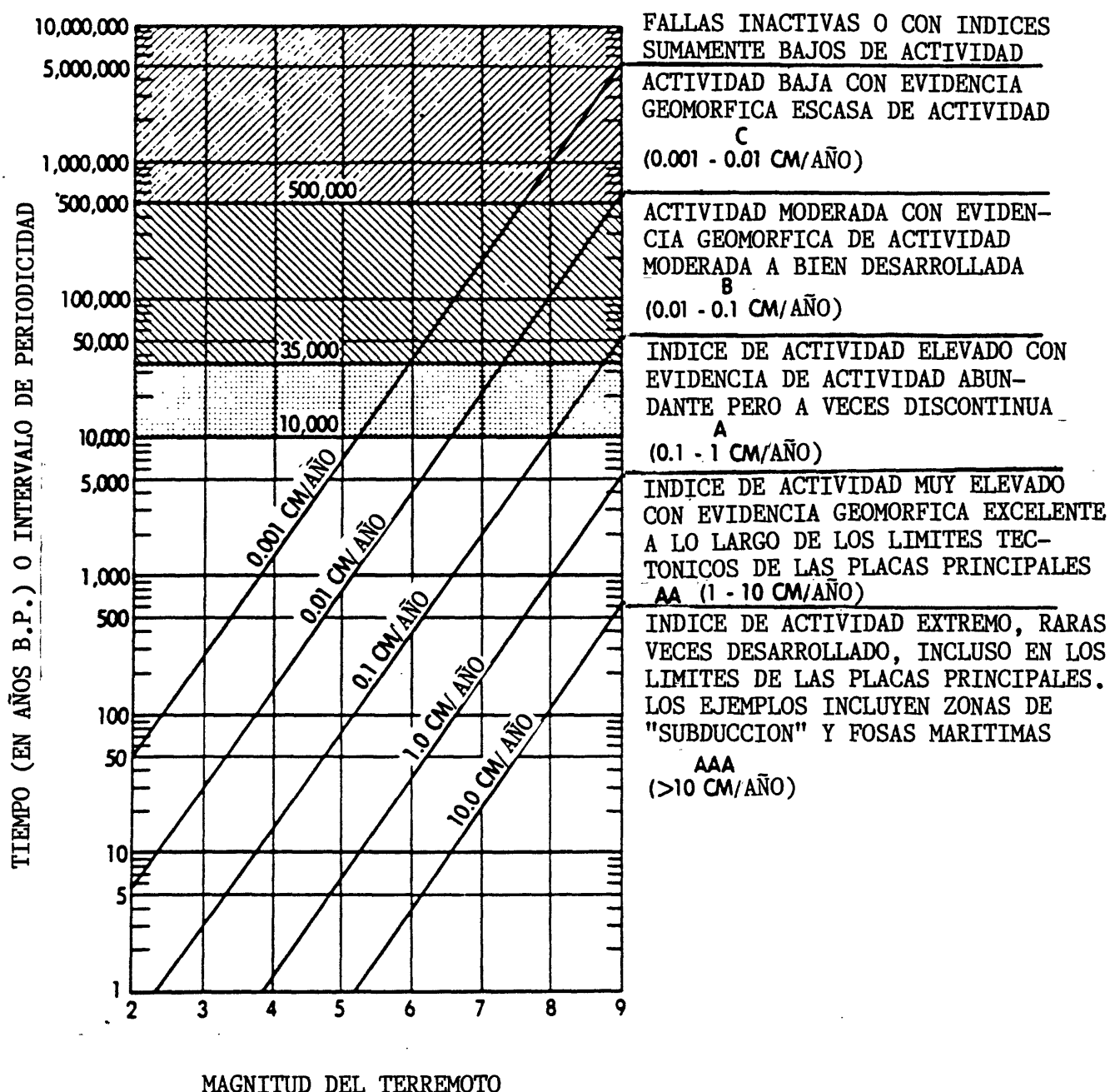


Figura 9.— Gráfica que presenta la magnitud sísmica, el índice de desplazamiento y la periodicidad de zonas de fallas activas en todo el mundo (de Slemmons, 1977).

1108 40064

de corrimiento que marca la zona de subducción en la región meridional de Chile, tiene posibilidades de producir un terremoto de gran intensidad, como promedio, una vez cada 100 años; mientras que otras fallas, tales como la falla Oued Fodda en la región septentrional de Argelia, tienen un intervalo de periodicidad o tiempo de repetición más largo (una vez cada 450 años) para generar un terremoto de gran intensidad como el terremoto de El Asnam en 1980 que tuvo una intensidad de 7,3. El índice de actividad de la falla incide en el nivel de peligrosidad; representa un importante reto para el geólogo determinarlo con precisión.

En algunos casos, la determinación del índice de actividad de una falla es muy difícil debido a que la falla no está expuesta en la superficie. Un ejemplo de este caso es el terremoto ocurrido en 1886 en Charleston, Carolina del Sur; la falla causante de este terremoto no ha sido todavía identificada inequívocamente (Hays y Gori, 1983). Las investigaciones geofísicas (por ejemplo, la reflexión sísmica) son muy importantes para identificar y evaluar la actividad de las fallas subterráneas, tanto en zonas costeras como tierra adentro.

Paleosismicidad—Recientemente, los geólogos han puesto a punto técnicas de campo para determinar las fechas de los terremotos prehistóricos en una determinada falla. Estas técnicas entrañan la determinación de fosas y la datación absoluta, de ordinario con el método de Carbono-14, de estratos subterráneos que datan de inmediatamente antes y después del terremoto histórico. Estas técnicas se denominan "paleosismicidad". El principio básico de la paleosismicidad es el siguiente:

- Los terremotos prehistóricos ocasionan deformación acumulativa en la superficie que se manifiesta en desplazamientos estratigráficos y topográficos. De ahí que una fosa que tenga una profundidad de sólo 5 m (16 pies) a lo largo de la falla de San Andreas puede presentar deformación debida a terremotos prehistóricos durante los últimos 2.000 años.

Las hipótesis fundamentales en la determinación de fosas son las siguientes:

- Evidencia de deformaciones notables en la corteza que pueden aislarse en lugares discretos de la superficie.
- Los movimientos de falla productores de terremotos duplican el patrón de deformación cerca de la superficie.
- Los materiales cerca de la superficie datables alrededor de una falla son conservados por períodos de tiempo más largos que los intervalos de periodicidad de movimientos de falla importantes.

Debido a que es probable que varios terremotos prehistóricos estén representados en una sola exposición en una fosa, las relaciones geológicas pueden ser muy complejas. La determinación óptima de la fecha del terremoto requiere la datación de los estratos más antiguos no rotos posteriores al terremoto y los estratos más recientes deformados previos al terremoto.

Se han formulado pruebas geológicas útiles para la paleosismicidad partiendo de la evidencia estratigráfica y geomórfica dentro de zonas de fallas activas

en la región oeste de los Estados Unidos (Sieh, 1978; Schwartz y Coppersmith, 1984). Estas relaciones proporcionan estimaciones de los desplazamientos y periodicidad de eventos paleosísmicos individuales. En el este de los Estados Unidos, los estudios de la paleosismicidad también están comenzando a producir resultados útiles. Se han reconocido en la región de Nuevo Madrid, Misuri, terremotos prehistóricos del Holoceno Posterior (10.000 años B.P.) sobre la base de la licuefacción asociada con dos terremotos prehistóricos ocurridos en los últimos 2.000 años (Russ, 1982). Recientemente, se han reconocido en Hollywood, Carolina del Sur, cuatro terremotos grandes que ocurrieron antes de 1886 en los últimos 7500 años, sobre la base de estudios de licuefacción (Obermeier, 1985).

Estudio del potencial sísmico—Una vez que se han identificado las características tectónicas, se determina su potencial para generar terremotos. Entre los procedimientos para evaluar el potencial sísmico figuran los siguientes:

- 1) Selección de las características físicas que permiten la diferenciación de las características tectónicas.
- 2) Comparación con otras características tectónicas que tienen características físicas especificadas.
- 3) Evaluación de la probabilidad de que una característica tectónica presente una determinada combinación de características favorables para la producción de terremotos.

1105 40064

En la Figura 10 se presenta una matriz que puede utilizarse para evaluar el potencial sísmico de una característica tectónica. Deberá utilizarse toda la información disponible para determinar por inferencia las características físicas con la mayor precisión posible. Se formulan clases de preguntas como las siguientes:

- ¿Ha estado asociada la sismicidad histórica con la característica tectónica?
- ¿Existe evidencia de deformación reciente en la corteza?
- ¿Es favorable la geometría de la característica tectónica en relación con la orientación del campo de esfuerzo?
- ¿Existen pruebas de reactivación de una característica tectónica a lo largo de zonas de debilidad preexistentes?
- ¿Existen pruebas de que la característica tectónica amplifique el esfuerzo local sobre el nivel ambiente debido a las complejidades estructurales?
- ¿Tiene la característica tectónica una fuerza reducida de corteza o presenta cambios espaciales o temporales en la fuerza de la corteza?

<div>Sismicidad asociada</div> <div>Geometría relative a esfuerzo/ sentido de desplazamiento</div> <div>Amplificación del esfuerzo local</div> <div>Fuerza reducida o cambio de fuerza</div> <div>Reactivación geológica</div> <div>Deformación reciente</div>			Terremotos de moderados a grandes				Terremotos pequeños solamente				Ninguna sismicidad			
			Favorable		Desfavorable		Favorable		Desfavorable		Favorable		Desfavorable	
			Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No
Sí	Sí	Sí												
		No												
	No	Sí												
		No												
Sí	Sí	Sí												
		No												
	No	Sí												
		No												

Figura 10.— Ejemplo de una matriz que contiene información básica utilizada para evaluar el potencial sísmico de una característica tectónica (del Electric Power Research Institute, 1984).

1195 40064

Los dos primeros factores, asociación de la característica tectónica con la sismicidad histórica y pruebas de deformación reciente de la corteza, son, de ordinario, los más diagnósticos para definir el potencial sísmico.

Estudio de las zonas sísmógenas - El geólogo y el sismólogo trabajan a menudo juntos para definir las zonas sísmógenas, una región que tiene esencialmente características especialmente homogéneas de índices de incidencia y magnitud máxima de terremotos. Para delinear las zonas sísmógenas hay que integrar los datos tectónicos y la sismicidad. En la Figura 11 se ilustran las clases de modelos básicos de zonas sísmógenas: 1) zona sísmógena lineal, 2) zona sísmógena regional, 3) colección de zonas sísmógenas lineales y 4) una colección de zonas sísmógenas lineales abarcada por una zona sísmógena regional. Pueden utilizarse los principios generales siguientes:

- Puede utilizarse un modelo de zona sísmógena lineal cuando los emplazamientos sísmicos están circunscritos a lo largo de una falla o zona de fallas identificada.
- Puede utilizarse una zona sísmógena regional cuando la sismicidad ocurre uniformemente a través de una región.
- Puede utilizarse un juego de zonas sísmógenas lineales para modelizar una zona grande de deformación cuando una ruptura sísmica tiene una orientación preferida, pero una incidencia fortuita.
- Puede utilizarse una colección de zonas sísmógenas lineales rodeada por un área de zonas sísmógenas cuando se supone que eventos grandes

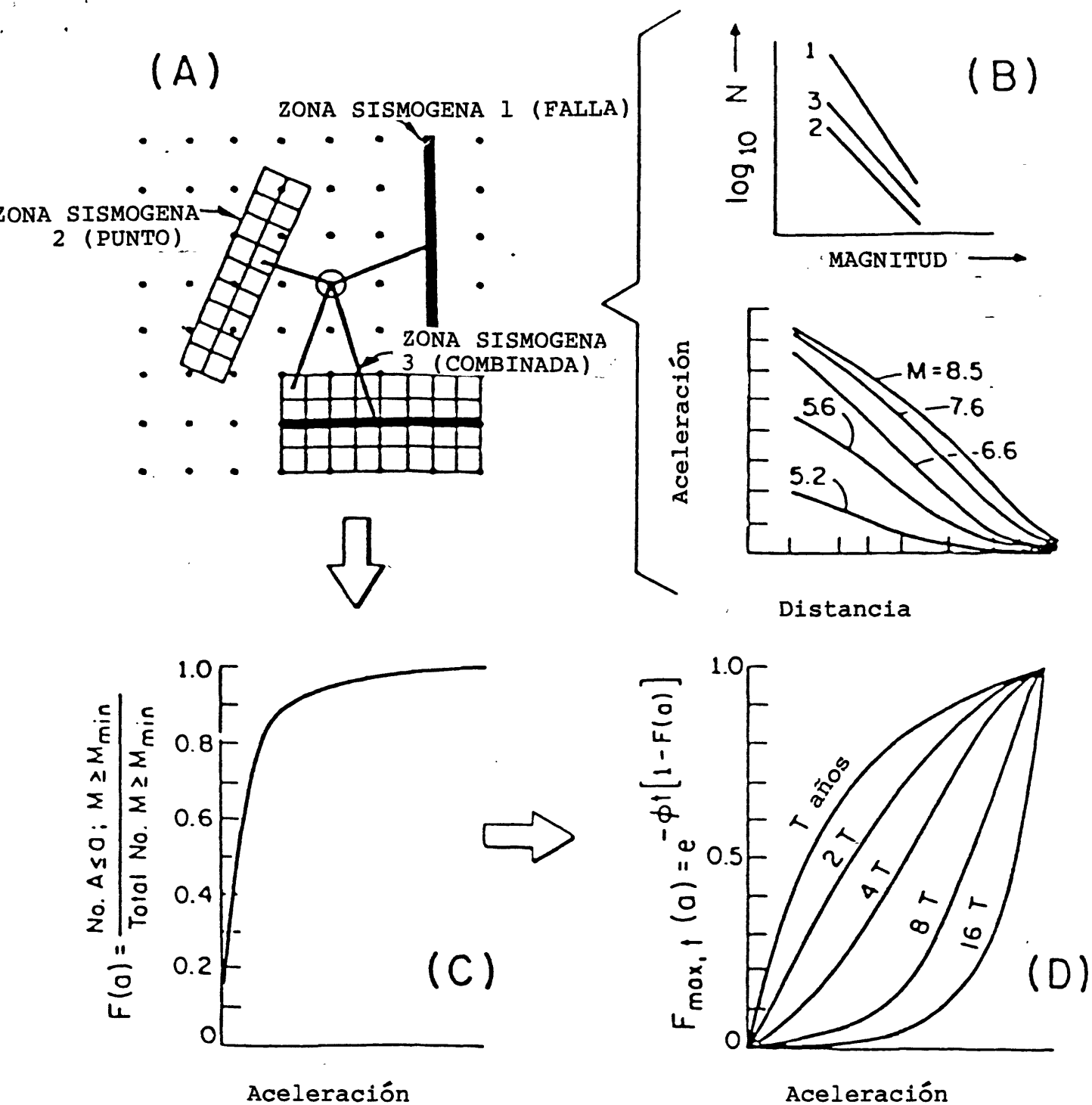


Figura 11.— Ilustración esquemática de clases de zonas sismógenas y la forma en que se modelizan en un análisis probabilístico.

sólo ocurrirán en las fallas activas identificadas y eventos menores fortuitamente dentro de la región que las contiene.

Estudio del suelo local y de la columna de roca—El geólogo trabaja a menudo con el geofísico o el ingeniero geotécnico para definir la profundidad y las propiedades físicas del suelo y de la columna de roca subyacente al lugar de construcción (Figura 12). Fuertes contrastes en la velocidad de las ondas transversales entre el suelo cerca de la superficie y la roca subyacente que constituye los 30–60 metros superiores (100–200 pies) pueden hacer que el movimiento de tierra aumente en una gama estrecha de frecuencias. La composición espectral de amplitud máxima, y la duración del temblor, pueden aumentar notablemente cuando el contraste de velocidad llega hasta un factor de 2 y el grosor de la columna del suelo tiene hasta 10–30 m (30–100 pies) (Figura 13). Los científicos e ingenieros están trabajando todavía para resolver las cuestiones técnicas relacionadas principalmente con el hecho de si la respuesta lineal del terreno ocurre a niveles elevados de temblores de tierra y/o deformación por deslizamiento (Hays, 1983).

La determinación de las propiedades físicas de los materiales cerca de la superficie también es importante para evaluar el potencial de licuefacción. En la Figura 14 se proporciona un diagrama de movimiento que puede utilizarse para efectuar una evaluación preliminar. Si las evaluaciones preliminares indican que son necesarias, se realizan evaluaciones geotécnicas y perforaciones adicionales.

11C1 40064

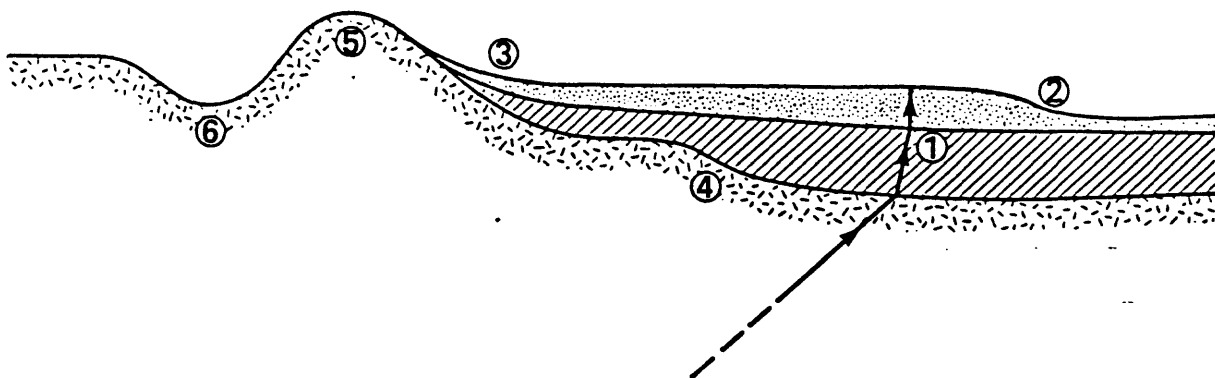


Figura 12.— Ilustración esquemática de los efectos de la columna de roca y tierra sobre el temblor de tierra. Cada uno de los seis emplazamientos tiene una historia cronológica y espectro de respuesta distintos debido a una distinta geometría, grosor y propiedades físicas de la columna de roca y tierra.

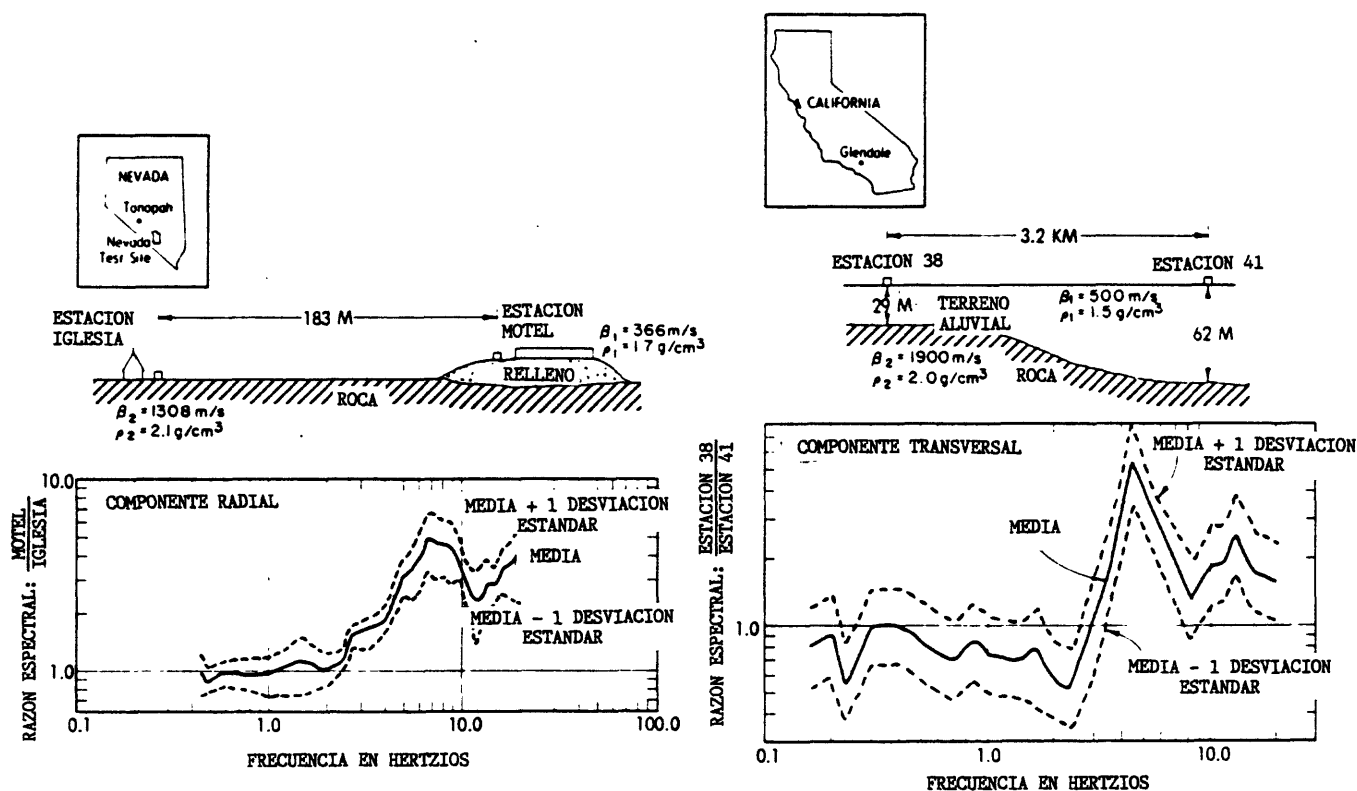


Figura 13.— Ejemplos de amplificación del emplazamiento ocasionada por variaciones en la columna de roca y tierra cerca de la superficie. Las variaciones en el grosor y la geometría de la tierra y la roca y las propiedades físicas (velocidad de las ondas transversales, densidad) pueden ocasionar amplificación del movimiento de tierra. La amplificación puede conducir al requisito de mayores parámetros para el movimiento de tierra nominal.

1104 40064

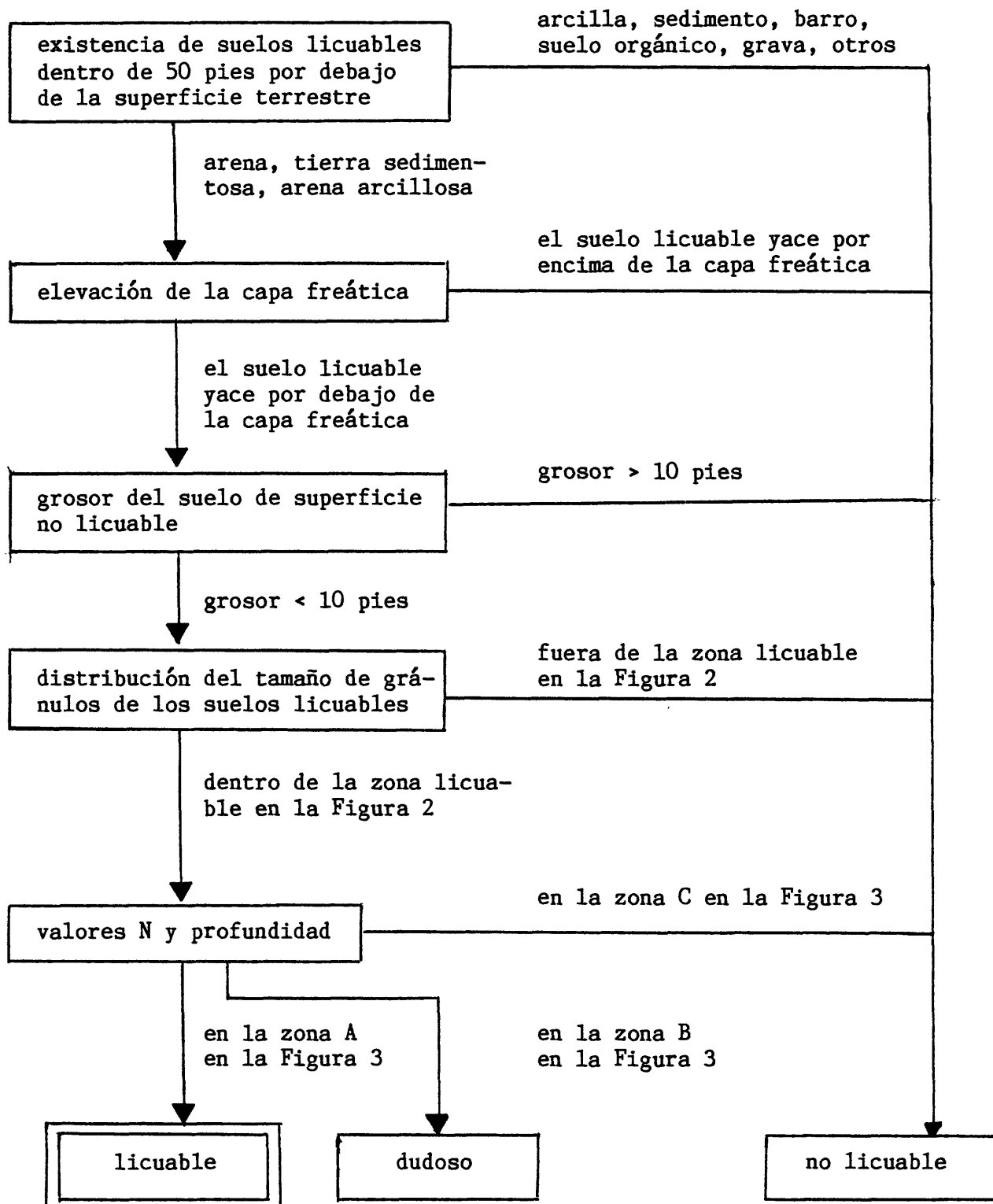


Figura 14.— Diagrama de movimiento que puede utilizarse al evaluar el potencial de licuefacción en un emplazamiento.

110/ 40064

Funciones de atenuación de las ondas sísmicas—Es bien conocido que la amplitud, la composición espectral y la duración del movimiento de tierra ocasionado por un terremoto registrado en un emplazamiento son funciones del mecanismo de fuente sísmica, de la distancia del epicentro y de la geometría y propiedades físicas de las estructuras geológicas atravesadas por las ondas que se propagan por la superficie y el interior de un cuerpo a medida que se propagan desde la fuente al emplazamiento. Las ondas transmitidas por el interior de un cuerpo están caracterizadas generalmente por altas frecuencias (2-10 hertzios) y de ordinario producen la aceleración de tierra máxima en el acelerograma. Las ondas de superficie se desplazan y atenúan más lentamente que las ondas transmitidas por el interior de un cuerpo y generalmente tienen frecuencias más bajas de vibración (por ejemplo, menos de 1 hertzio). Debido a su menor índice de atenuación y bajas frecuencias, las ondas de superficie pueden dañar a los edificios altos situados a alguna distancia del epicentro de un terremoto.

Las funciones de atenuación de las ondas sísmicas para una región geográfica son difíciles de cuantificar. Cuando no se dispone de datos sobre movimientos de tierra fuertes, puede utilizarse un mapa isosísmico detallado para obtener una función de atenuación regional (Figura 15). Sin embargo, los mejores datos son los datos de movimientos de tierra fuertes registrados en terremotos pasados. Estos datos pueden utilizarse para obtener las funciones de atenuación de aceleración máxima del movimiento del suelo (Figura 16) o las funciones de atenuación de velocidad espectral (Figura 17). La especificación de la incertidumbre en el valor medio de la función de atenuación del movimiento del suelo es muy importante, pero no siempre se realiza.

1104 40064

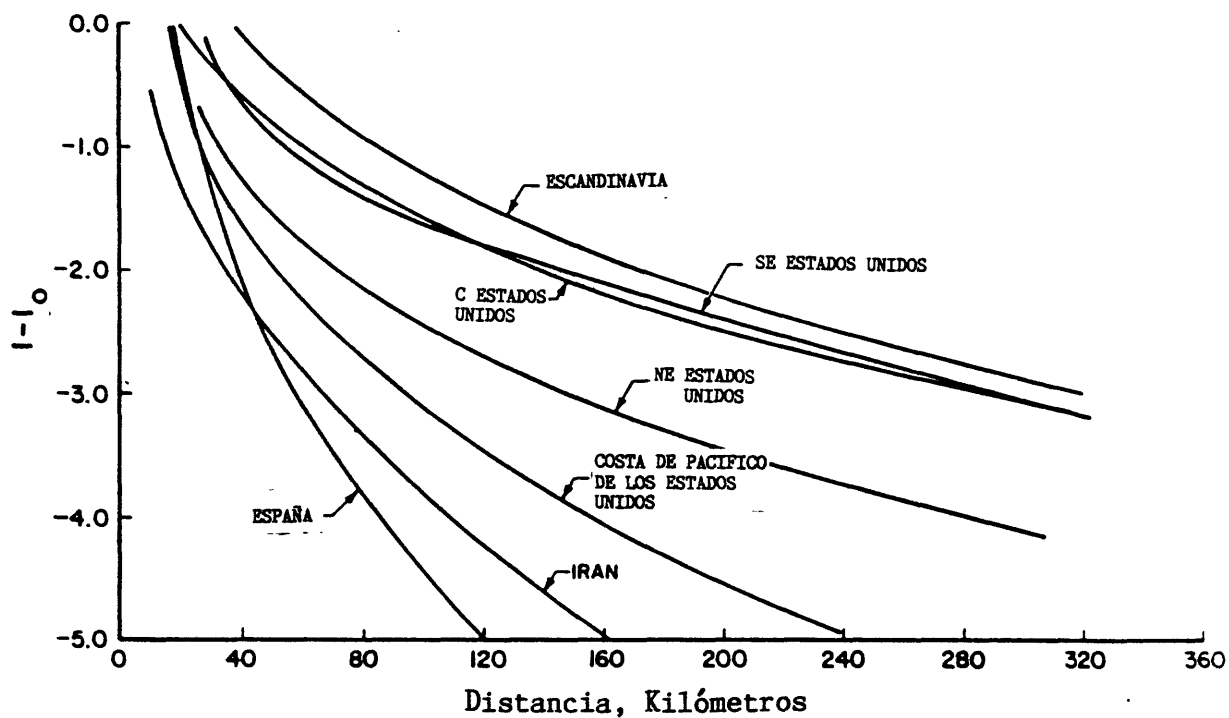


Figura 15.— Ejemplos de las funciones de atenuación regional para distintas regiones del mundo obtenidos de los datos de intensidad Mercalli Modificada.

11B1 40064

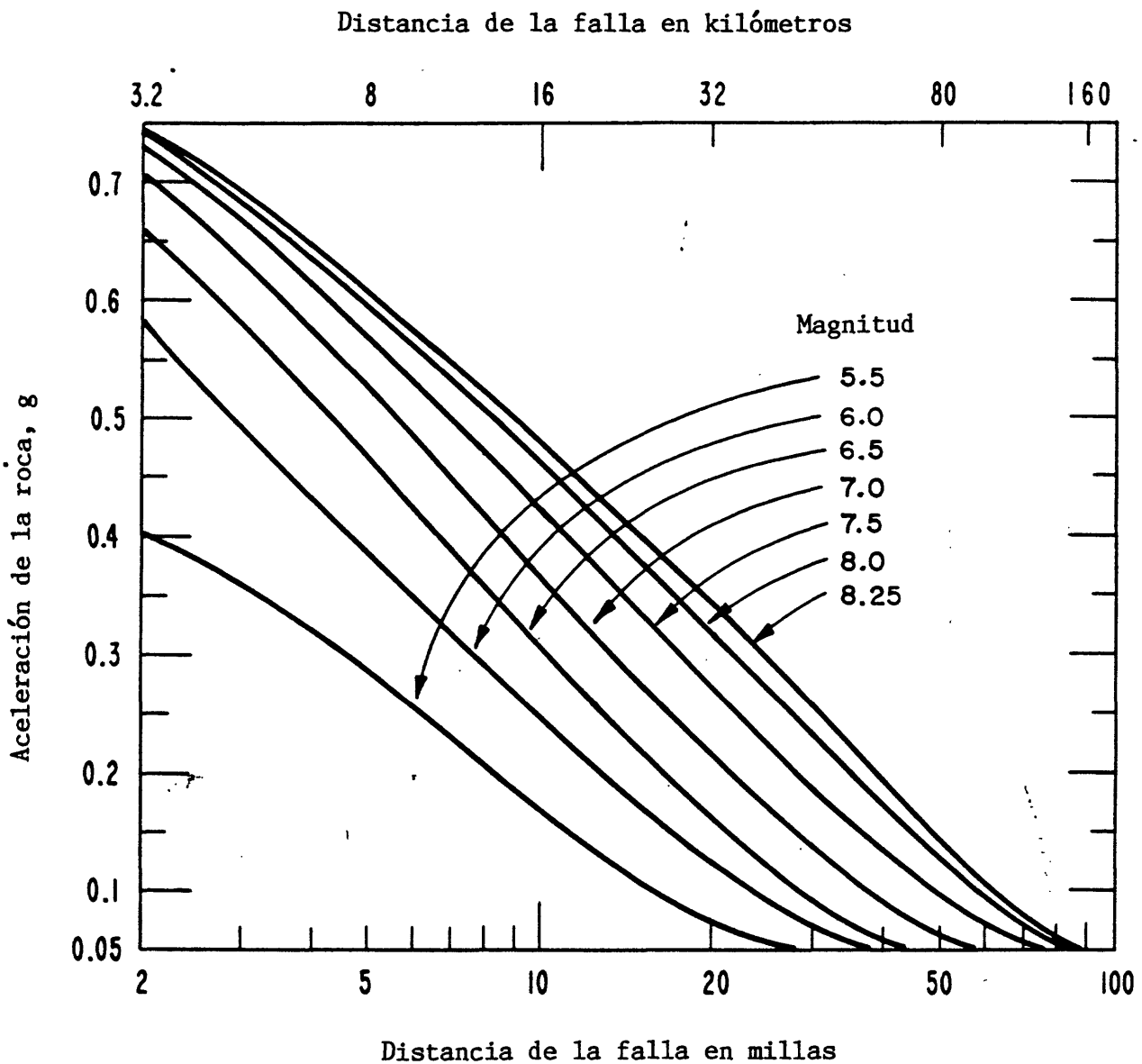


Figura 16.— Ejemplos de la función de atenuación de aceleración máxima de la roca madre propuesta por Schnabel y Seed (1973). Esta función es válida principalmente para la región occidental de los Estados Unidos.

11A4 40064

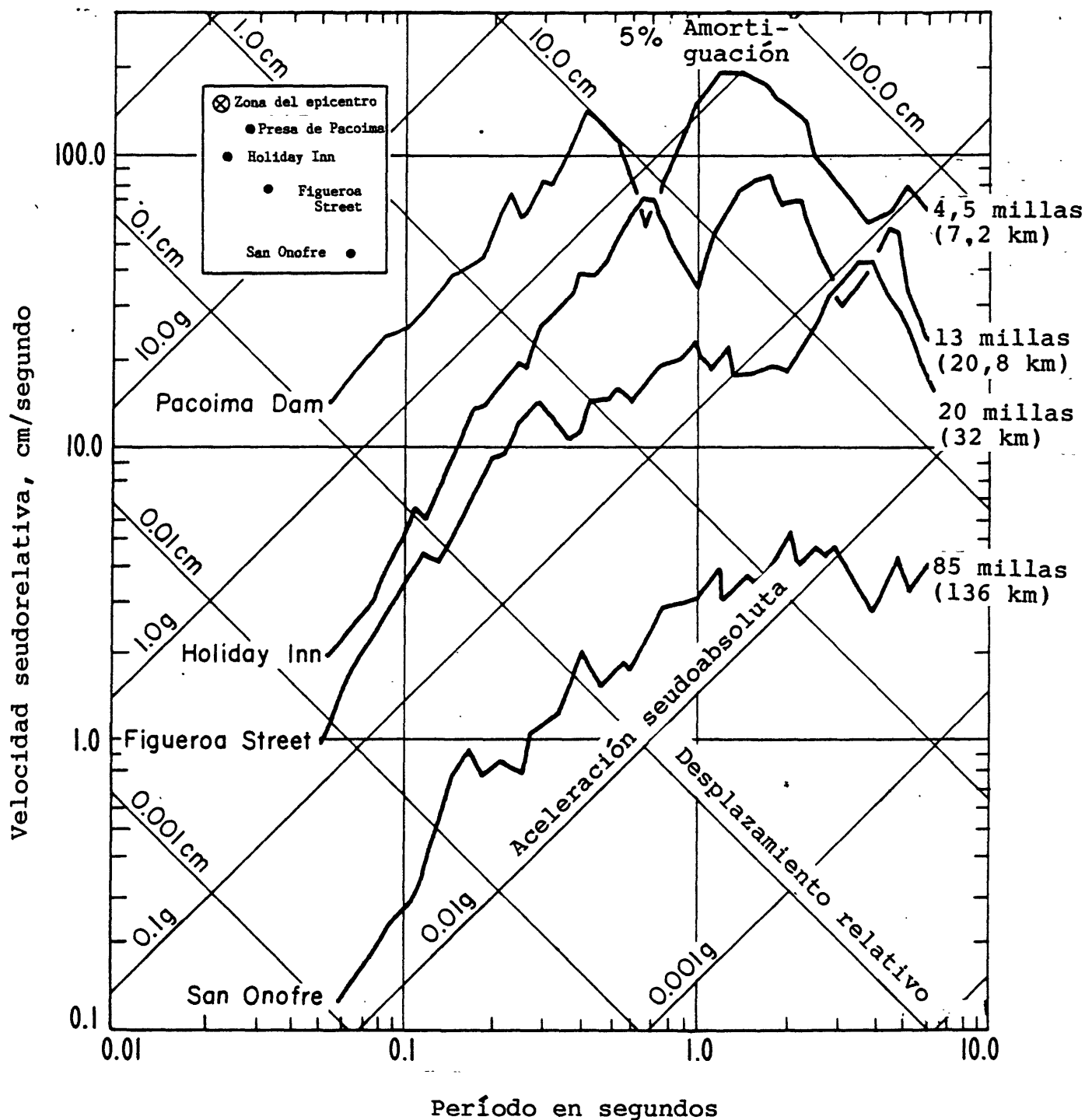


Figura 17.— Ejemplos de la función de atenuación de velocidad espectral para la región sur de California. La tierra actúa como un filtro de bajo paso haciendo que las ondas sísmicas de alta frecuencia se atenúen más rápidamente que las ondas de baja frecuencia.

12A3 40064

Selección de parámetros de diseño sísmico—Para estructuras e instalaciones importantes, se utiliza el concepto de un terremoto nominal. El terremoto nominal es un terremoto que pudiera esperarse razonablemente que ocurriera dentro de la vida planificada de la estructura o instalación y que produjera un temblor de tierra máximo en el emplazamiento. La estimación de la amplitud, composición de frecuencia y duración de temblor de tierra es una tarea compleja ya que el movimiento de tierra (Figura 18) es una superposición compleja de las ondas que se transmiten a través de un cuerpo y de superficie, las cuales han seguido muchas trayectorias distintas entre la fuente y el lugar de construcción. Las longitudes características de la geología a lo largo de estas trayectorias introducen rúbricas dependientes de la frecuencia en el movimiento de tierra. Al seleccionar los parámetros del terremoto nominal, se sigue un procedimiento tal como el ilustrado en la Figura 19. Este procedimiento tiene por fin producir la mejor estimación de:

- la magnitud máxima,
- la distancia menor desde la falla activa o característica tectónica más próxima,
- la intensidad del epicentro y, cuando es posible, la aceleración máxima (también la velocidad máxima y el desplazamiento máximo, cuando es posible),
- el espectro de respuesta desde niveles distintos de atenuación,
- la duración del temblor y

12B2 40064

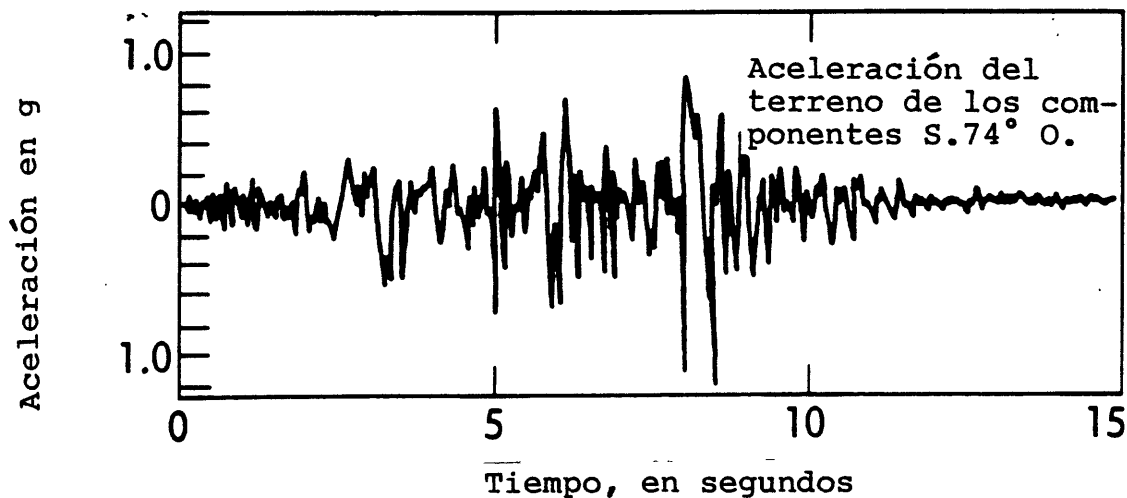
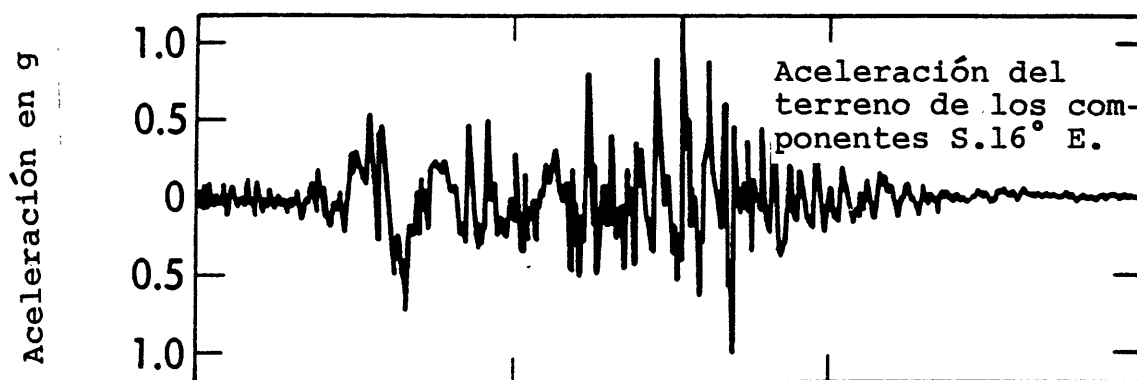
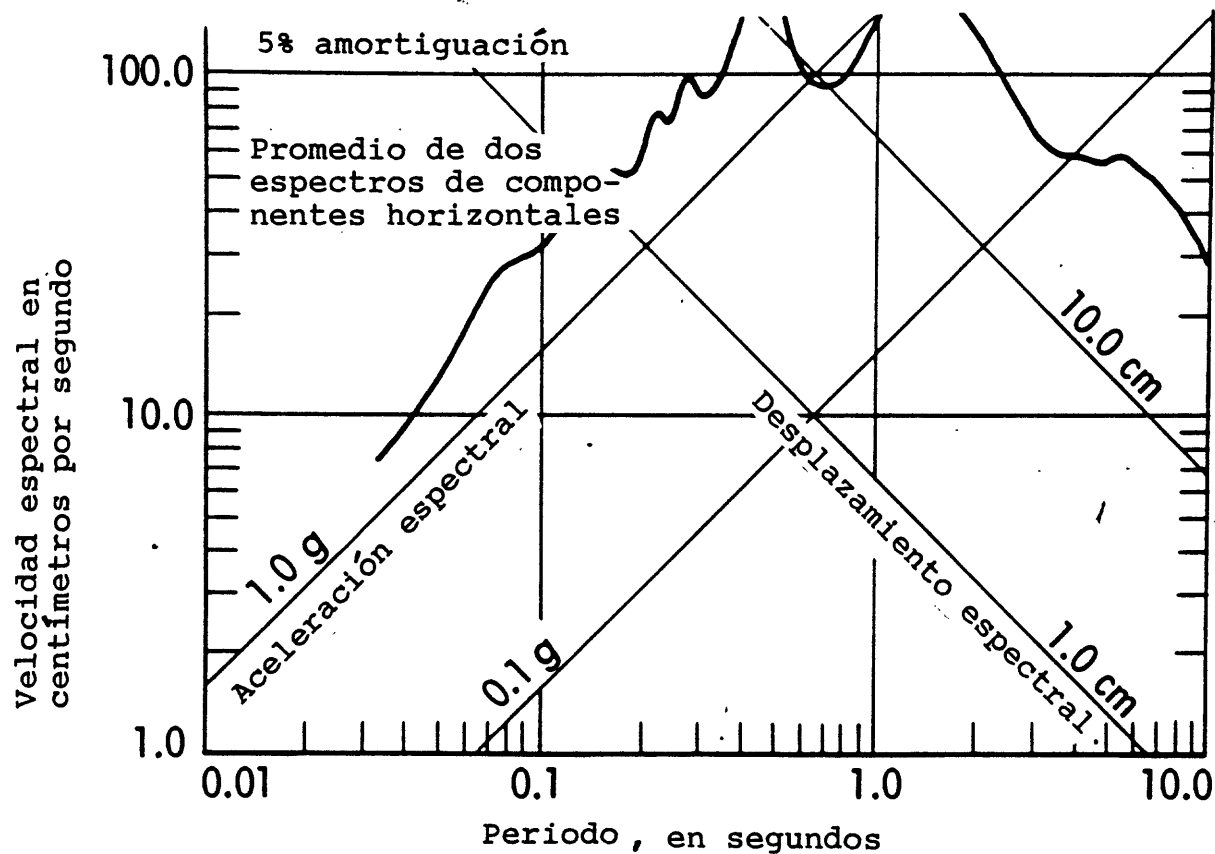


Figura 18.— Componentes horizontales de la aceleración del terreno registrada en la Presa de Pacoína durante el terremoto San Fernando de 1972 y los espectros de respuesta promedio derivados de ellos.

12C3 40064

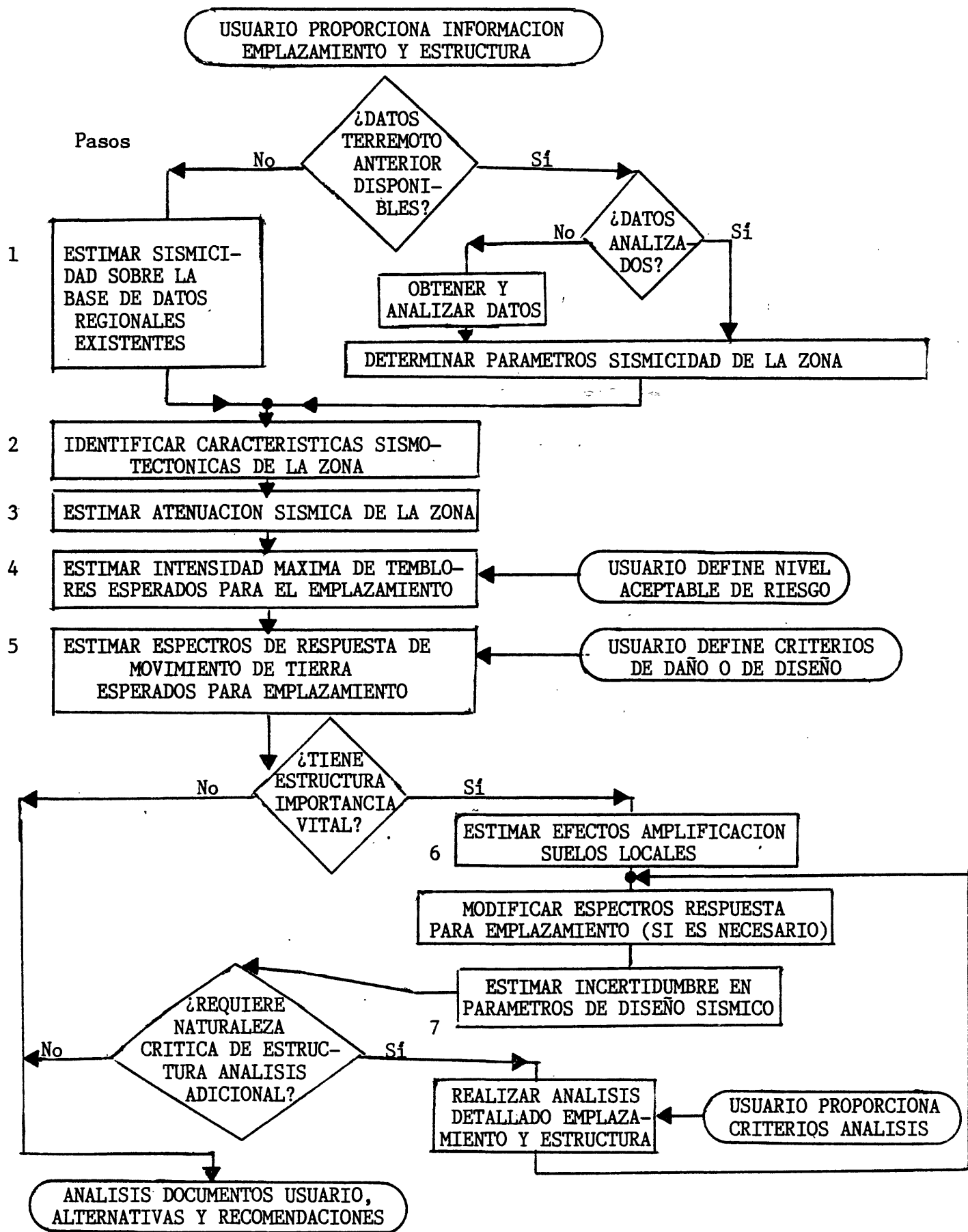


Figura 19.— Diagrama de movimiento que presenta los pasos para seleccionar parámetros de diseño sísmico.

1202 40064

- los efectos dependientes de la frecuencia del suelo o columna de roca local.

Pueden utilizarse procedimientos tanto deterministas como probabilísticos. El proceso depende de la calidad de los datos geológicos, sismológicos y geotécnicos. El producto último que se busca es una especificación de la curva de peligrosidad para el emplazamiento. Una clase de representación se ilustra en la Figura 20 donde la aceleración máxima se expresa como función el tiempo de exposición y la probabilidad de no superación. Dichas curvas de peligrosidad permiten una opción en el nivel aceptable de riesgo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un estudio de microzonación sísmica en España producirá una mejor comprensión técnica de la peligrosidad sísmica y aumentará la capacidad de los científicos, ingenieros y planificadores españoles para incrementar y aplicar sus conocimientos técnicos. Proporcionará respuestas a las preguntas siguientes:

- 1) ¿Dónde han ocurrido en el pasado los terremotos?
- 2) ¿Por qué ocurren?
- 3) ¿Qué efectos físicos (peligros) están asociados con cada terremoto y cuál es su intensidad?
- 4) ¿Con qué frecuencia ocurren?
- y 5) ¿Cuáles son las opciones para reducir las pérdidas por estos peligros?

Un estudio de microzonación sísmica puede proporcionar todos los beneficios siguientes:

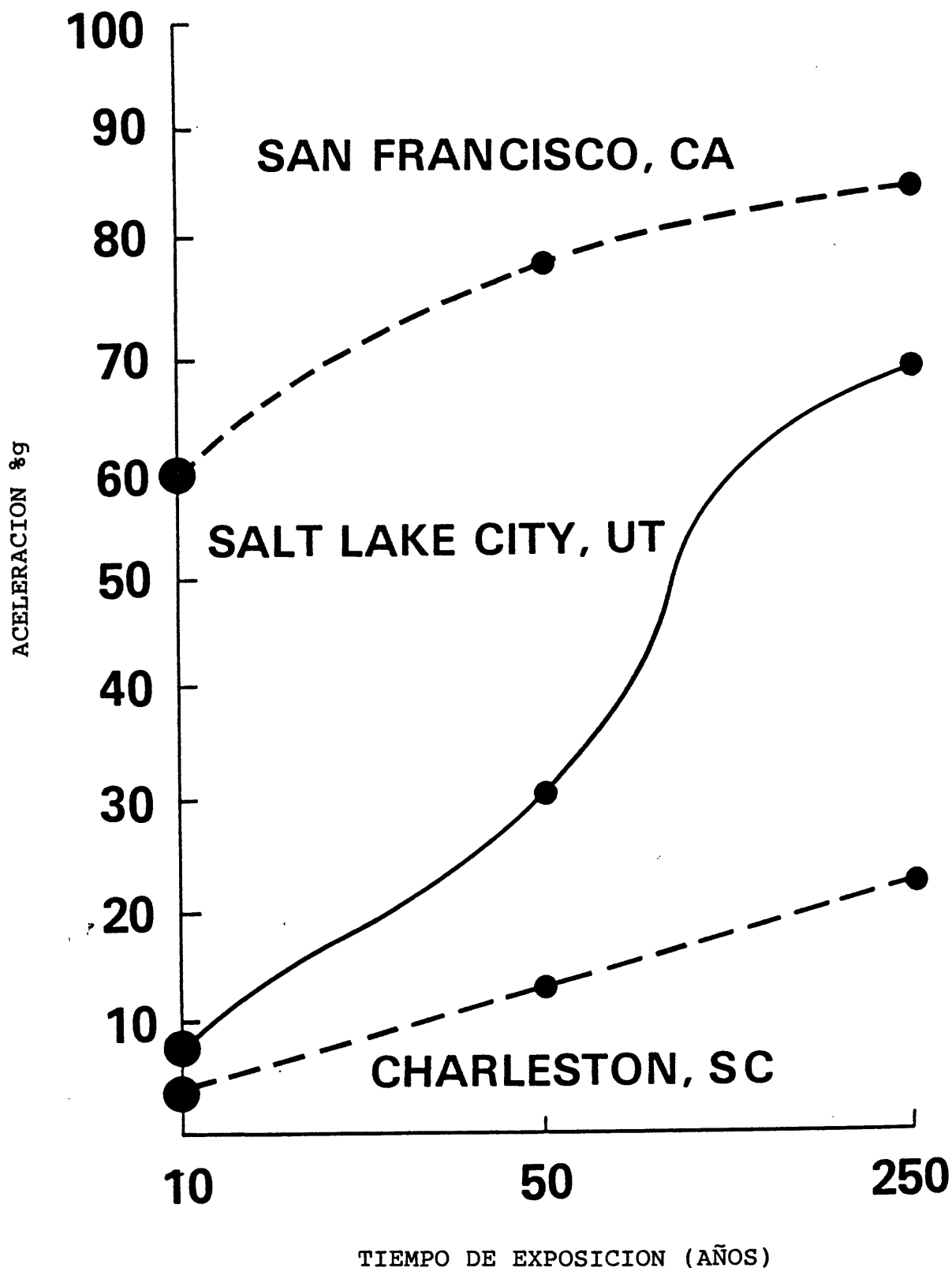


Figura 20.— Ejemplos de cómo ilustrar el peligro de temblor de tierra en un emplazamiento. Estas curvas muestran la aceleración máxima de la roca madre como función del tiempo de exposición y una probabilidad de no superación del 90 por ciento. Aunque existe alguna controversia en cuanto a los valores absolutos de la aceleración máxima, los valores relativos entre los dos lugares son estables. Estas curvas permiten una opción del nivel de riesgo aceptable.

1202 40064

1. La creación de un modelo regional mejorado de peligrosidad sísmica. Se identificarán las zonas sismógenas así como las zonas de fallas "activas" y "activas inferidas".
2. El establecimiento del nivel máximo de aceleración máxima de tierra que se espera ocurra en España durante un tiempo de exposición de unos 50 años. Estos valores de aceleración máxima deberán tener una probabilidad de no superación de 90 por ciento en un período de 50 años. Criterios como éstos son utilizados típicamente en todo el mundo al formular disposiciones de diseño sísmico en los códigos de edificación. También deberán calcularse las aceleraciones máximas del terreno para dos períodos de exposición adicionales (10 y 250 años, aproximadamente) y una probabilidad de no superación del 90 por ciento a fin de proporcionar una perspectiva adicional para evaluar la peligrosidad de los temblores de tierra para los edificios y otras instalaciones que tienen vidas útiles más cortas y más largas o distintos grados de importancia.
3. La confección de mapas de microzonación sísmica para las zonas urbanas de España producirá estimaciones pragmáticas de la gravedad relativa y variación especial de los temblores de tierra, de las fallas de tierra inducidas por terremotos y de la ruptura por falla de superficie en función del tiempo de exposición.
4. La especificación de recomendaciones para mejorar los códigos de edificación y las prácticas de construcción y uso de la tierra.

5. La producción de una metodología técnica para la microzonación sísmica proporcionará aplicaciones que podrán realizarse juntamente con los resultados de otros estudios de microzonación que se realizan en todo el mundo. Estas metodologías proporcionarán una base técnica para estudios de microzonación sísmica en otras regiones de España y para identificar estudios específicos de investigación que deberán emprenderse a fin de aumentar el estado de conocimiento sobre la materia en España.
6. Aumentar el conocimiento técnico de los científicos, ingenieros y planificadores españoles en materia de microzonación sísmica.
7. Asignaciones de recursos para adquirir y analizar datos sobre movimientos fuertes de tierra ocasionados por terremotos futuros que ocurran en España. Estos datos pueden aumentar la precisión del diseño resistente a los terremotos para edificios y otras instalaciones.

RECOMENDACIONES

Se recomienda adoptar las medidas siguientes:

1. Formación de asociaciones de trabajo entre científicos e ingenieros para la realización de los futuros estudios de microzonación.

2. Identificación de las regiones de España que necesitan microzonación e iniciación de la labor requerida de planificación y recopilación de datos.
3. Despliegue de una red de acelerógrafos de los movimientos fuertes para registrar los datos requeridos para resolver cuestiones técnicas relativas a atenuación, duración de temblores y respuesta del terreno. Dicha red deberá coordinarse con las redes de sismicidad.
4. Participación en investigaciones posteriores a los terremotos en otras partes de la región mediterránea para obtener experiencia e información.
5. Recopilación de información sismotectónica adicional en toda España y la región del Mediterráneo para definir la periodicidad de las fallas y las magnitudes máximas y periodicidad para zonas sismógenas discretas.
6. Creación de una base nacional de datos que contenga todos los datos geológicos, sismológicos y técnicos requeridos para fines de microzonación sísmica.
7. Introducción de cambios, según proceda, en el código de edificación y las prácticas de construcción y uso de la tierra en España.
8. Iniciación de capacitación destinada a aumentar el número de científicos e ingenieros españoles expertos en microzonación sísmica.

12A6 40064

La adopción de estas medidas servirá para poner a España en una posición de vanguardia en el campo de la microzonación sísmica.

GLOSARIO

Se incluye, como índice A, un glosario de términos técnicos.

BIBLIOGRAFIA

- Allen, C. R., 1984, Geologic and Seismological Considerations in Earthquake Engineering, Speciality Seminar on Fundamentals of Geology and Seismology for Earthquake Engineering, Stanford University, julio de 1984, Publicación del Earthquake Engineering Research Institute, págs. 1-6.
- Algermissen, S. T., (1969), Seismic risk studies in the United States: Conferencia Mundial sobre Ingeniería Sísmica, 4a., Santiago, Chile, Actas, v. 1, 14 págs.
- Algermissen, S. T. y Perkins, D. M., (1976), A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States: U.S. Geol. Survey Open-File Rept. 76-416, 45 págs.
- Algermissen, S. T., Perkins, D. M., Thenhaus, P. C., Hanson, S. L. y Bender B. L., (1982), Probabilistic estimates of maximum acceleration and velocities in rock in the United States: Earthquake Notes, v. 53 (en imprenta).
- Ambraseys, N. N., (1973), Dynamics and response of foundation materials in epicentral regions of strong earthquakes: Conferencia Mundial sobre Ingeniería Sísmica, 5a., Roma, Italia, Actas, v. 1, 10 págs.
- Applied Technology Council, (1978), Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings. ATC-3-06, 514 págs.
- Borcherdt, R. D., (editor), (1975), Studies for seismic zonation of the San Francisco Bay region: U.S. Geological Survey Professional Paper 941-A, 102 págs.
- Blair, M. L. y Spangle, W. E., (1979), Seismic Safety and land-use planning - selected examples from California: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 941-B, 82 págs.

- Bucknam, R. C. y Anderson, R. E., (1980), Late Quaternary faulting as a guide to regional variations in long-term rates of seismic activity: U.S. Geog. Survey Open-File Rept. 81-437, págs. 27-29.
- Electric Power Research Institute, 1984, Tectonic Stress Regime/Potential Stress Concentrators and Approaches to Developing Tectonic Frameworks and Seismic Sources, Documentos de trabajo para los talleres 3 y 4, Palo Alto, California.
- Hays, W. W., (1980), Procedures for estimating earthquake ground motions: U.S. Geog. Survey Prof. Paper 1114, 77 págs.
- Hays, W. W., (1981), Facing geologic and hydrologic hazards-earth science considerations: U.S. Geog. Survey Prof. Paper 1240-B, 108 págs.
- Hays, W. W. y Gori, P. L. (Editores), 1983, The 1886 Charleston, South Carolina Earthquake and its Implications for Today, Actas de la XX Conferencia, U.S. Geological Survey Open-file Report 83-843, 502 págs.
- Hays, W. W., (Editor), 1983, Site-Specific Effects of Soil and Rock on Ground Motion and the Implications for Earthquake-Resistant Design, Actas de la XXII Conferencia, U.S. Geological Survey Open-file Report 83-845, 501 págs.
- Hays, W. W., Rogers, A. M. y King, K. W., (1970), Empirical data about local ground response: Earthquake Engineering Research Institute, Conferencia Nacional sobre Ingeniería Sísmica, 2a., Stanford, Calif., Actas, págs. 223-232.
- Obermeier, S. F., 1985, Distribution of Recurrence of Prehistoric Earthquakes near Charleston, South Carolina, (Resumen), Earthquake Notes, v. 55, no. 1, pág. 25.
- Rogers, A. M. y Hays, W. W., (1978), Preliminary evaluation of site transfer function derived from earthquakes and nuclear explosions: Conferencia Internacional sobre Microzonación, 2a., San Francisco, Actas, v. 2, págs. 753-764.
- Russ, D. P., (1981), Model for assessing earthquake potential and fault activity in the New Madrid seismic zone, Earthquakes and earthquake engineering: the eastern United States: Ann Arbor, Mich., Ann Arbor Science Publishers, v. 1, págs. 309-336.
- Russ, D. P., 1982, Style and Significance of Surface Deformation in the Vicinity of New Madrid, Missouri, in McKeown, F. A. y Pakiser, L. C. (Editores), Investigations of the New Madrid, Missouri Earthquake Region, U.S Geological Survey Professional Paper 1236, págs. 95-114.
- Schnabel, P. B. y Seed, H. B., (1973), Accelerations in rock for earthquakes in the western United States: Seismol. Soc. of Am. Bull., v. 62, págs. 501-516.

1200 40064

- Schwartz, D. P. y Coppersmith, K. J., 1984, Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones, Journal of Geophysical Research, v. 89, págs. 5681-5698.
- Seed, H. B., Murarka, R., Lysmer, John y Idriss, I. M., (1976), Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes: Seismol. Soc. of Am. Bull., v. 66, págs. 221-224.
- Sieh, K. E., (1978), Prehistoric large earthquakes produced by slip on the San Andreas fault at Pallett Creek, Calif.: Jour. of Geoph. Res., v. 83, págs. 3907-3939.
- Singh, S., (1981), Regionalization of crustal Q in the Continental United States: St. Louis University, Tesis doctoral, 75 págs.
- Sieh, K., 1978, Prehistoric Large Earthquakes Produced by Slip on the San Andreas Fault and Pallet Creek, California, Journal of Geophysical Research, v. 89, págs. 3907-3939.
- Slemmons, D. B., 1977, Faults and Earthquake Magnitude, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station Miscellaneous Paper S-73-1, Informe 6, 166 págs.
- Soto, A., 1984, Ground Failure in Puerto Rico, en Gori, P. L. y Hays, W. W., (Editores), Geologic Hazards in Puerto Rico, Actas de la XXIV Conferencia, U.S. Geological Survey Open-file Report 84-761, págs. 96-100.
- Sykes, L., McCann, W. R. y Kafka, A., 1982, Motion of Caribbean Plate During Last Several Million Years and Implications for Earlier Cenozoic Movements, Journal of Geophysical Research, v. 87, págs. 10656-10676.
- Ulrich, F. P., (1948), Zones of earthquake probability in the Unites States: Building Standards Monthly, v. 17, no. 3, págs. 11-12.

1207 40064

PROPOSAL FOR THE PREPARATION OF A LANDSLIDE ASSESSMENT AND MAPPING PROGRAM
FOR PUERTO RICO

BY

Carlos Rodriquez Molina and Luis Vazquez Castillo
Vazquez Agrait, Vazquez Castillo & Despiau
Hato Rey, Puerto Rico

INTRODUCTION

The cost of landslide damage in Puerto Rico for the past thirty years, although not precisely established, must range in the millions of dollars. Most of these landslides have damaged high, middle high, middle, low income residential and suburban developments, state highways, local roads, private as well as government owned industries, and to some extent, the farming industry. The economic impact of landsliding is difficult to assess. Direct costs of ruptured structures, road pavements, and utility lines must be added to indirect costs attributed to reduced productivity and even loss of jobs, disruption of communication lines, reduced property values, loss of valuable agricultural land, increased sedimentation in reservoirs, and a general disruption of human activity. These losses are particularly unfortunate, in that most landslides are events that are technically predictable, rather than the generally attributed "act of god" cause.

Our company has made landslide damage cost estimates in excess of five million dollars for the five year period covering from 1980 to 1985. The estimates are based on specific company projects and comprise only direct costs related to geotechnical explorations, design specifications and remedial measures implementation. The projects include all the development categories mentioned above. Clearly this estimate is well underestimated bearing in mind that it is only based on our company projects.

OBJECTIVE

The objective of this proposal is to present a comprehensive landslide assessment program directed first towards the prevention of human losses during landslide hazards, and to guide the proper development of hillside ground terrain in Puerto Rico. Furthermore, it will identify developed areas having a high risk of landslide failure, a significant consideration in view of the rapid economic growth of the past three decades which took place with little, if any, consideration of landslide hazards.

GENERAL BACKGROUND

Most of the landslide damage in Puerto Rico results primarily from the location of developments (whether private or government funded) on unstable or potentially unstable hillside grounds. Of greater impact is the fact that landslide damage not only has encompassed monetary losses, but unfortunately human lives have been lost. Records show at least 11 persons have died due to landslide related hazards during the past 30 years. The most recent case being the unfortunate Barrio Mameyes Landslide, where approximately 140 people were caught underneath a large rockslide. Actually the geology, slide characteristics and moving mass geometry at

Mameyes were far more complex than a rockslide (At least three different landslide mechanisms have been recognized by the undersigned at the Mameyes Community).

From a "land development" point of view, a landslide may generally be defined as any movement or displacement of ground which disrupts human activity or imposes restrictions to land use. Not all landslides in Puerto Rico are similar to one another. They generally show a strong correlation to the local geology, topography, and climatic conditions. However, it can generally be established that they all include the downward and outward movement of masses of soil or rock from hillsides under the influence, among many other factors, of gravity.

Knowledge of landslide potential in Puerto Rico has existed by far, prior to the Mameyes landslide. Several unpublished technical papers have been written on the subject by the undersigned and fellow geologist for a number of landslide localities within Puerto Rico.

The United States Geological Survey (U.S.G.S.) has published several geologic maps on which attempts have been made to identify areas containing landslide deposits. These maps include, among others, the Bayamón quadrangle, Manatí quadrangle, and the Utuado quadrangle.

Dozens of landslide assessment technical reports have also been prepared by this office for areas within the most problematic landslide zones in Puerto Rico. These reports date as far back as 1958, and comprise projects ranging from single home family dwellings, private and public developments, and state and rural roads. Most of the reports deal, among other purposes, with landslide detection, assessment, and remedial design implementations.

An Islandwide landslide susceptibility map titled; "MAP SHOWING LANDSLIDES AND AREAS OF SUSCEPTIBILITY TO LANDSLIDING IN PUERTO RICO" was also prepared by the U.S.G.S. in the latest attempt to identify areas susceptible to landslides. Also on several quadrangles a section on "Engineering Geology" has been included so as to assess the user on the engineering characteristics of the geologic materials within the map.

All the work published by the U.S.G.S. is certainly of invaluable assistance for any professional dealing with land development within the island. However, a thorough mapping program with all efforts directed towards assessing the planner (the term planner includes the owner, contractor, government agencies, and the layperson in general) on landslide susceptibility, needs to be implemented in order to reduce human and monetary losses resulting from landslides.

This mapping program must include, not only the mapping of areas susceptible to landslides, but it must also address the geotechnical measures, in general, warranted by the specific landslide prone area, so that proper land development is carried out. That is, available publications delineate, to a certain degree of detail, several areas within the island which exhibit landslides and several areas which are susceptible to landslides (U.S.G.S. map I-1148, MAP SHOWING LANDSLIDES AND AREAS OF SUSCEPTIBILITY TO LANDSLIDING IN P.R., W. H., Monroe, 1979). The use of this map will lead to the

penalization of landslide prone areas without a proper evaluation by qualified Engineering Geologists and Geotechnical Engineers (i.e. the planner decides not to develop the area). No provisions are included in terms of the engineering geologic characteristics of the landslide masses and the general geotechnical guidelines the planner needs in order to develop the area.

PROPOSED PROGRAM

A method of evaluating the relative stability of ground for hillside developments, which was originated in California, has been successfully used and refined in the Cincinnati Area (Rodriguez C.R., 1983), in the San Francisco Bay Area (Soto A.E., 1975), and has since been widely used throughout several states within the mainland.

The Relative Stability Method involves the mapping of landslide features, geologic units, and cultural features relevant to slope stability on a suitable topographic base map (Engineering Geologic Map). Then, factors influencing hillside stability are analysed. Finally, a Relative Stability Map is prepared indicating stable ground, areas presently unstable, and areas with potential for future movement. The Relative stability Map includes provisions or a series of the geotechnical guidelines needed by the planner in the pre-development stages of the project.

The Relative Stability Map is designed so that the professional, as well as, the layperson can interpret it without necessary engineering or geological background.

We propose to implement the Relative Stability Method in Puerto Rico primarily for several reasons:

1. To reduce human, property and the consequent and economic losses resulting from landslides.
2. To assess the Government on the conditions of present unstable hillside ground and areas suspected of instability problems.
3. To provide the Planning Board with a landslide susceptibility map and a set of guidelines the planner must strictly follow prior and during the development of hillside grounds.
4. To assess the planner in the pre-development stages of a project.
5. To educate the public in general with factual data on landslide hazards.
6. Provide work-training experience to geology and geotechnical students at the Department of Geology of the University of Puerto Rico (Mayaguez Campus), who will later become part of the government-private sector workforce responsible for the implementation and study of landslide hazards and landslide related public policy.

WORK SCHEDULE

The following general work schedule encompasses our proposal:

A. Preparatory Stage

1. Research and History

It is of outmost importance that the first stage to this investigation consists of a detailed research of all the available information on past and present instability hazards throughout the island. The main source of this information would be government agencies like: The Planning Board, Housing Department, Highway Authority, Water Authority, Power Authority, Natural Resources and any other agency that is related to developments or any other project where hillside ground is used. With this information a detailed landslide damage cost estimate for Puerto Rico can be prepared.

2. Topographic Maps, Geologic Maps & Aerial Photographs

Of outmost importance is the compilation of island wide sets of U.S.G.S. Topographic and Geologic Quadrangles. These maps are prepared to a scale of 1 : 20,000 and are available for most of the island. The topographic quadrangles can be supplied by the Highway Authority, while the Geologic quadrangles can either be supplied by the Natural Resources Department, or they can be purchased through the U.S. Department of the Interior at Washington, D.C..

The Geologic quadrangles are distributed approximately in the same manner as the topographic maps, and are also available at the same scales (1 : 20,000). Both the geologic and the topographic maps will be used as our general "base maps" for the preparation of Relative stability maps.

Past and recent aerial photographs must also be compiled covering most of the areas covered by the geologic or topographic maps. These aerial photographs are generally available at scales of 1 : 20,000 (although larger scales are also available) ,and they can be provided by the Highway Authority . The photographs will be interpreted using stereoscope and landslide remote sensing techniques.

3. Available Landslide Assessment Reports Borehole Data Bank

Our firm has been in service for over 27 years throughout Puerto Rico, a time span that has resulted in a company library of landslide related assessment reports, as well as a borehole data bank of thousands of boring logs (written record and description of perforations ,or test holes), which when carefully retrieved can be of invaluable help in the investigation. Although the majority of the reports and boreholes were performed on urbanized areas, a great deal were

performed on hillsides (whether urbanized or in remote areas).

The collection and analysis of the above mentioned data is also of outmost importance in this investigation, since they are the only means we can actually observe the subsurface, and thus make qualitative and quantitative stability evaluations of the areas in question.

B. Quadrangle Priorities

Once the preparatory work is completed and all the data is organized and compiled (Islandwide Landslide Damage Cost Estimate, Geologic Map Set , Topographic Map Set, Aerial Photography set, reports library, and Borehole Data Bank), a meeting can be held with the Planning Board or any other interested parties in order to arrange a Schedule of quadrangle investigation. That is, the Planning Board may be interested in promptly investigating areas where there are rumors of instability. Also areas where there are definite landslide developments can be immediately investigated.

We would generally recommend the following schedule of priorities:

1. Start investigating hillside developments (whether rural or urbanized, or in agricultural use) which exhibit instability problems, or where instability problems are suspected.
2. Then mobilize our attention towards future hillside developments (whether private, public, or industrial).
3. Investigate areas specified by the Planning Board or any other interested parties which need to be done to scales larger than 1:20,000 and thus in much greater detail.

C. Field Work

With both, the Preparatory and the Quadrangle Priority completed, we will be ready to commence the Field Work stage of our investigation which will consist of the following:

1. Our first field work effort will be to corroborate in the field areas either suspected of landslides or areas with landslides already developed.
2. A field checking stage will be conducted, so as to confirm the data obtained through: the aerial photo interpretation, topographic & geomorphic characteristics, the history of the areas of instability, and the borehole and library report data.
3. Preparation of Engineering Geologic Map
In the Engineering Geologic Map all the gathered data (topographic, geology, aerial photography, borehole, historic landsliding, landslide features, and any other

engineering geologic characteristic relevant to the areas overall stability) will be plotted on a regular U.S.G.S. topographic Map.

In the event that more detail is warranted, (our proposal calls for the use of maps to a scale of 1:20,000), then special arrangements will be necessary so as to obtain the appropriate topographic base-maps with the corresponding larger scale. The use of base maps to a larger scale has to be specifically ordered and approved by the Planning Board or any other agency related to this investigation (under separate contracts).

D. Preparation of Relative Stability Map-----one per quadrangle.

After the Engineering Geologic Map is prepared, it will be thoroughly analyzed for the possible factors influencing hillside stability.

The final and most practical product of the investigation will be the preparation of a Relative Stability Map, where all the hillsides investigated will be categorized as being Stable, Unstable, or Potentially Unstable. Every category will be accompanied by the appropriate geotechnical considerations the planner will need in order to properly develop the hillside in question.

E. Prepare Relative Stability Report-----one per quadrangle.

All the Quadrangles mapped will be accompanied also by a short, comprehensive and practical report on the general Engineering Geologic characteristics of the soil and/or rock deposits. The report will be provided for in depth geotechnical and geological characteristics of the specific unstable areas.

COMMENTS

It is of outmost importance to point out that this landslide assessment method is primarily designed for the maximum possible prevention of landslide hazards and thus for the proper development of hillside grounds. Its success depends solely on a well organized, interdisciplinary workforce consisting of experienced Geotechnical Engineers, Engineering Geologists, Geologists and Planners.

WORK FORCE

The following group of experienced professionals has been assembled:

Carlos Rodriguez Molina, M.S.,
Senior Engineering Geologist, -----Caribbean Soil
Testing Hato Rey Branch

Luis Vázquez Castillo, P.E., M.E.C.E.

Geotechnical Engineer, -----Prof., Dept. of
Civil Engineering
U.P.P.R.
President at Caribbean
Soil Testing, Hato Rey Branch

Alejandro E. Soto, M.S.,

Engineering Geologist, -----Assistant Prof., Department
of Geology, R.U.M.

Benigno Despiau, P.E.,

Geotechnical Engineer -----Caribbean Soil
Testing, Hato Rey Branch

James Joyce, Ph.d.,

Geologist -----Assistant Prof., Department
of Geology, R.U.M.

Carlos Rodriguez Perez, Ph.d.,

Geotechnical Soil and Rock -----Associate Prof., Department
Mechanics Engineer of Civil Engineering,
R.U.M.
Project Engineer
at Caribbean Soil Testing
Hato Rey Branch

Alfonso Vázquez Castillo, C.E.,

Geotechnical Engineer -----Caribbean Soil
Testing, Hato Rey Branch

Our Soil Testing Laboratories from Caribbean
Soil Testing, Mayaguez Branch, will be assigned to this
investigation.

Students from the Geology Department of The University of
Puerto Rico-Mayaguez Campus will actually participate in this
investigation under a required Special Topics course wherein
the student undertakes faculty-supervised research.

The above mentioned personnel consists of Private
Geotechnical and Engineering Geology Consultants, as well as,
Independent and University (Department of Geology at Mayaguez)
Consultants. Personal resumes on all the proposed personnel
are included in the appendix to this proposal.

Also a list of most of the recent landslide assessment,
or otherwise related reports is included in the same
appendix. The latter list includes the different owners,
whether government or private, for which the reports were
prepared.

ECONOMIC ASPECT

We estimate the investigation will take some four to five

years for completion (using standard 7.5 minute topographic quadrangles), mapping at a rate of approximately one quadrangles per month.

The investigation will take place using our Hato Rey office as our principal base, and the department of Geology at the U.P.R. Mayaguez Campus as a secondary base. In this way the investigation can take place simultaneously from two key points within Puerto Rico.

The cost of the investigation is to be negotiated in detail with the interested parties, since most of the materials required for the investigation can be supplied to us by the government (i.e. historic data, topographic and geologic quadrangles, aerial photographs, transportation and any other relevant data.). However, preliminary estimates indicate the cost should range between \$ 450,000 to \$ 500,000.

As an alternative, the investigation can be carried out in stages. That is, several key urban or industrial quadrangles can be selected as a "pilot" to our investigation. Our personnel can then investigate and produce a "Relative Stability Map and Report", for the inspection and approval of the government.

An in-depth audio visual presentation on the landslide assessment program will be presented to the President of the Puerto Rico Planning Board, Eng. Patria Custodio, on thursday November 14 at 4:00 P.M..

Respectfully submitted,

Carlos Rodriguez Molina, M.S.,
Senior Engineering Geologist

Luis Vázquez Castillo, P.E., M.E.C.E.,
President

THE IMPORTANCE OF TRAINING IN EARTHQUAKE HAZARDS MITIGATION

by

Walter W. Hays and Paula L. Gori

U.S. Geological Survey

Reston, Virginia 22080

INTRODUCTION

The goals of the National Earthquake Hazards Reduction Program, enacted into law in 1977, are to save lives and to reduce economic losses through implementation of mitigation strategies. Successful mitigation of earthquake hazards--reducing the vulnerability of people and property--requires training and many coordinated efforts that are keyed to these goals. If lives are saved, the cost of reconstruction after a damaging earthquake can be tolerated more easily. Currently, economic losses each year from earthquakes average about \$680 million; however, the potential for sudden loss from a great earthquake (magnitudes of 8 or greater) in Southern California is about \$50 billion, depending on the location and magnitude of the earthquake and the time of day when it occurs (Hays 1981). At the present time, the total value of construction exposed to the earthquake threat in the United States is at least \$2.3 trillion (Office of Science and Technology Policy, 1978). The value of contents of buildings and processes that are at risk is an additional factor that must be added to the total potential losses.

Every year approximately 10 million earthquakes having a wide range of magnitudes occur throughout the World, mainly along the boundaries of tectonic plates. Several thousand of these occur in the United States. Although most of the earthquakes are small and do not cause damage or loss of life, some are very destructive (Table 1). The potential for damage and loss of life increases markedly as the magnitude of the earthquake increases above

TABLE 1: MAJOR EARTHQUAKES OF THE 20TH CENTURY

DATE	PLACE	MAGNITUDE, RICHTER SCALE	DEAD
September 19, 1985	Mexico	8.1	10,000
August 23, 1985	Sino-Soviet border	7.5	55
March 3, 1985	Chile	7.4	177
October 30, 1983	Turkey	7.1	1,300
December 13, 1982	North Yemen	6.0	2,800
November 23, 1980	Italy	7.2	4,800
October 10, 1980	Algeria	7.3	4,500
December 12, 1979	Colombia and Ecuador	7.9	800
September 16, 1978	Iran	7.7	25,000
March 4, 1977	Romania	7.5	1,541
November 24, 1976	Eastern Turkey	7.9	4,000
August 17, 1976	Philippines	7.8	8,000
July 28, 1976	Tangshan, China	7.8	240,000 to 650,000
May 6, 1976	Italy	6.5	946
February 4, 1976	Guatemala	7.5	22,778
September 6, 1975	Turkey	6.8	2,312
December 28, 1974	Pakistan	6.3	5,200
December 23, 1972	Nicaragua	6.2	5,000
April 10, 1972	Iran	6.9	5,057
May 31, 1970	Peru	7.7	66,794
March 28, 1970	Turkey	7.4	1,086
August 31, 1968	Iran	7.4	12,000
August 19, 1966	Turkey	6.9	2,520
July 26, 1963	Yugoslavia	6.0	1,100
September 1, 1962	Iran	7.1	12,230
May 21-30, 1960	Chile	8.3	5,000
February 29, 1960	Morocco	5.8	12,000
December 13, 1957	Iran	7.1	2,000
July 2, 1957	Iran	7.4	2,500
June 10-17, 1956	Afghanistan	7.7	2,000
March 18, 1953	Turkey	7.2	1,200
August 15, 1950	India	8.7	1,530
August 5, 1949	Ecuador	6.8	6,000
June 28, 1948	Japan	7.3	5,131
December 31, 1946	Japan	8.4	2,000
December 26, 1939	Turkey	7.9	30,000
January 24, 1939	Chile	8.3	28,000
May 31, 1935	India	7.5	30,000
January 15, 1934	India	8.4	10,700
March 2, 1933	Japan	8.9	2,990
December 26, 1932	China	7.6	70,000
May 22, 1927	China	8.3	200,000
September 1, 1923	Tokyo, Japan	8.3	99,330
December 16, 1920	China	8.6	100,000
January 13, 1915	Italy	7.5	29,980
December 28, 1908	Italy	7.5	83,000
August 16, 1906	Chile	8.6	20,000
April 18-19, 1906	San Francisco	8.3	452

magnitude 5.5. In the United States, all or part of 39 states lie in earthquake-prone regions and are considered to have a moderate to major chance of loss (risk). Within these 39 states, more than 70 million people and large inventories of structures and lifelines are exposed to the earthquake threat.

Information and training programs are keys to mitigating the impacts of earthquakes on society. Before a population can prepare for, mitigate, and respond to the earthquake threat, it needs certain kinds of information that defines the nature and extent of the threat and the actions that can be taken to mitigate it. Training, using multiple ways of imparting relevant information to the populace, is needed to create a technology base for mitigation actions. Repeated exposure in different formats (for example, briefings, conferences, seminars, workshops, summer institutes, short courses, courses, and technology transfer sessions) and in multimedia presentations are required in a training program because of the relative complexity and the general lack of familiarity of the populace with earthquake hazards, as compared with other natural hazards such as hurricanes and floods. Another factor complicates the training process--the populace is not homogeneous. People differ widely in their requirements for information about earthquake hazards and in their capability to absorb and use it. For example, planners, architects, engineers, and scientists have requirements and capabilities that differ markedly from those of Federal, State, and local governments officials and private citizens.

An effective training program must have well formulated short-and long-term goals. The program must:

- 1) Address critical and complex technical-societal-political issues in each region of the Nation.
- 2) Focus on critically important research results that can advance the state-of-knowledge and improve the state-of-practice.
- 3) Develop self reliance in earthquake prone regions of the Nation by training a multidisciplinary group of people who can become the local experts, before, during, and after the earthquake.

- 4) Achieve efficiency and cost effectiveness by using strategies that take advantage of progress made in mitigating other natural hazards.

The following sections describe important factors that must be considered in devising a training program for earthquake hazard mitigation.

IMPORTANT FACTORS IN A TRAINING PROGRAM

Complexity of Earthquake Hazards--An earthquake is caused by the sudden abrupt release of slowly accumulating strain energy along a fault, a surface or zone of fracturing within the Earth's crust. Depending on its size and location, an earthquake causes the physical phenomena of ground shaking, surface fault rupture, earthquake-induced ground failure (landslides, liquefaction, compaction, lurching, and foundation settlement), regional tectonic deformation, seiches, and (in some coastal locations) tsunamis (Figure 1). Each phenomenon (called an earthquake hazard) can cause damage to structures and critical facilities, economic loss, injuries, loss of life, loss of function, and loss of confidence. Fires and floods can also be triggered by these hazards. In addition, aftershocks may follow the main shock over a period of several months to several years and cause additional damage, losses, and psychological impacts.

When comparing earthquake hazards in the Eastern and Western United States, scientists/engineers and decisionmakers must be aware of important differences in the hazards of ground shaking, surface faulting, earthquake-induced ground failure, tectonic deformation, and tsunamis. These differences are summarized below.

- 1) In terms of peak ground acceleration, earthquake ground shaking in the East for a given exposure time such as 50 years (the useful life of an ordinary building) ranges from less than 10% to about 50% of the level expected in California. Although, the level of peak acceleration in the East can be high, ground motion tends to attenuate slowly away from the epicenter and to be characterized by long duration and low frequencies. These characteristics of the

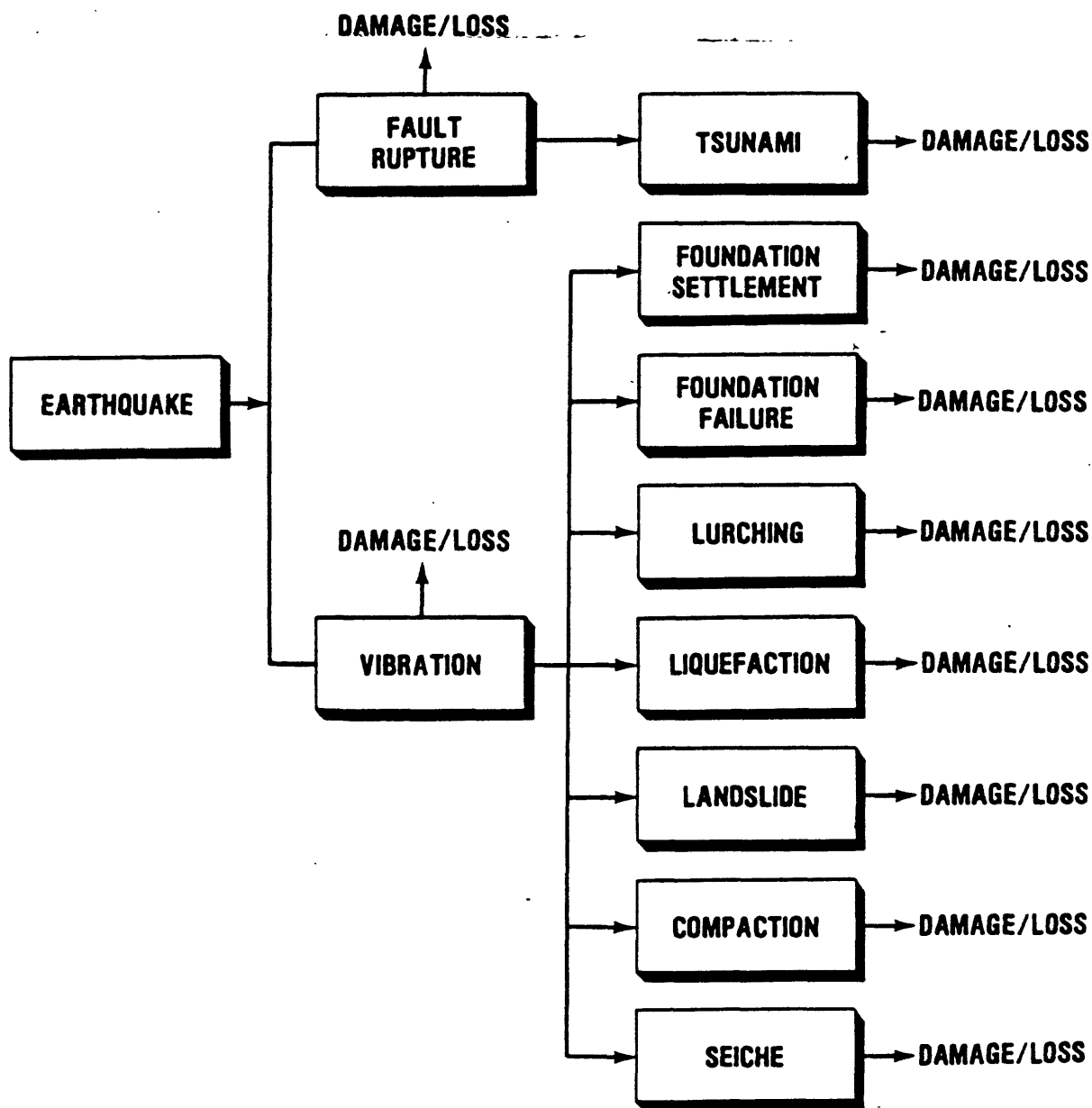


Figure 1.--Schematic illustration of the various types of earthquake hazards. Each hazard can cause damage and economic losses unless mitigation measures are in place. Training programs that provide relevant information on the earthquake hazards are an important part of the process of implementing mitigation measures.

ground shaking create a potential for causing damage to tall buildings (10 stories or greater) located as much as 500 miles away from the epicentral area where no other significant damage from ground shaking is likely to occur.

- 2) Except for the 1911-1812 New Madrid earthquakes, no historic earthquakes have caused surface faulting in the East. Almost all historic surface faulting has taken place on faults that exhibit geologically young displacements (e.g., displacements within the Holocene--last 10,000 years, or the Quaternary--last 2 million years).
- 3) The recurrence interval for major earthquakes in California is about once every 150 years; whereas, the corresponding recurrence interval in the New Madrid Seismic Zone and the St. Lawrence River Valley is on the order of about one every 700-1000 years.
- 4) The rate of attenuation of seismic energy in the East is much slower than in the West, causing a much larger area to experience architectural and structural damage in an earthquake.
- 5) Because of the larger area of strong ground shaking in the East, ground failures which can occur at values on the Modified Mercalli Intensity scale ranging from VI-X are likely to be triggered over a wider area in the East than in the West.
- 6) Unlike in California, soil and rock columns in Utah and in parts of the East appear to have physical characteristics that can cause amplification of ground motion in selected frequency bands. Some sites in the East would enhance high-frequency ground shaking and other sites would enhance low-frequency ground shaking. Low-rise buildings are more susceptible to high-frequency ground shaking than tall buildings; whereas, tall buildings are more susceptible to low-frequency ground shaking than low rise buildings. Amplification by soil deposits can increase the Modified Mercalli Intensity scale rating relative to rock by two intensity units (i.e., from V to VII)

which can result in damage in the upper stories of tall buildings located some distance from the epicenter (for example, like the 1985 Mexico earthquake).

- 7) Tectonic deformation, the characteristic feature of earthquakes having magnitudes of 8 or greater, has occurred in both the East and the West. Deformation over a large area occurred in connection with the 1811-1812 New Madrid, Missouri, earthquakes and the 1964 Prince William Sound, Alaska earthquake.
- 8) The historic record shows no evidence of tsunamis along the East coast; whereas, tsunamis have occurred historically in Alaska and along the West coast.
- 9) A long aftershock sequence, possibly lasting for several years, is typical of major earthquakes in the East. In the West, aftershocks tend to die out after only a few months.

In the United States the diversity and complexity of earthquake hazards make their mitigation (including training) an extraordinarily difficult goal. An integrated, multidisciplinary plan of attack incorporating the efforts of many individuals and the knowledge, skills, and techniques of several professional disciplines is required (Figure 2). Mitigation must involve the following groups of people: (a) elected and appointed public officials and political leaders, (b) earth scientists, architects, geotechnical engineers, and structural engineers from both the academic community and the private sector, (c) urban planners, (d) building officials, and (e) individual and professional builders including representatives of the building materials and crafts industries.

Characteristics of earthquakes that can be used to quantify mitigation efforts--Earthquakes are probably the greatest natural hazard the Nation must face in terms of potential loss of life, property damage, and impact. No region of the country or State is adequately prepared to respond to a major earthquake. Compared with other natural hazards, (e.g., hurricanes, floods, volcanic eruptions), an earthquake has the following four characteristics:

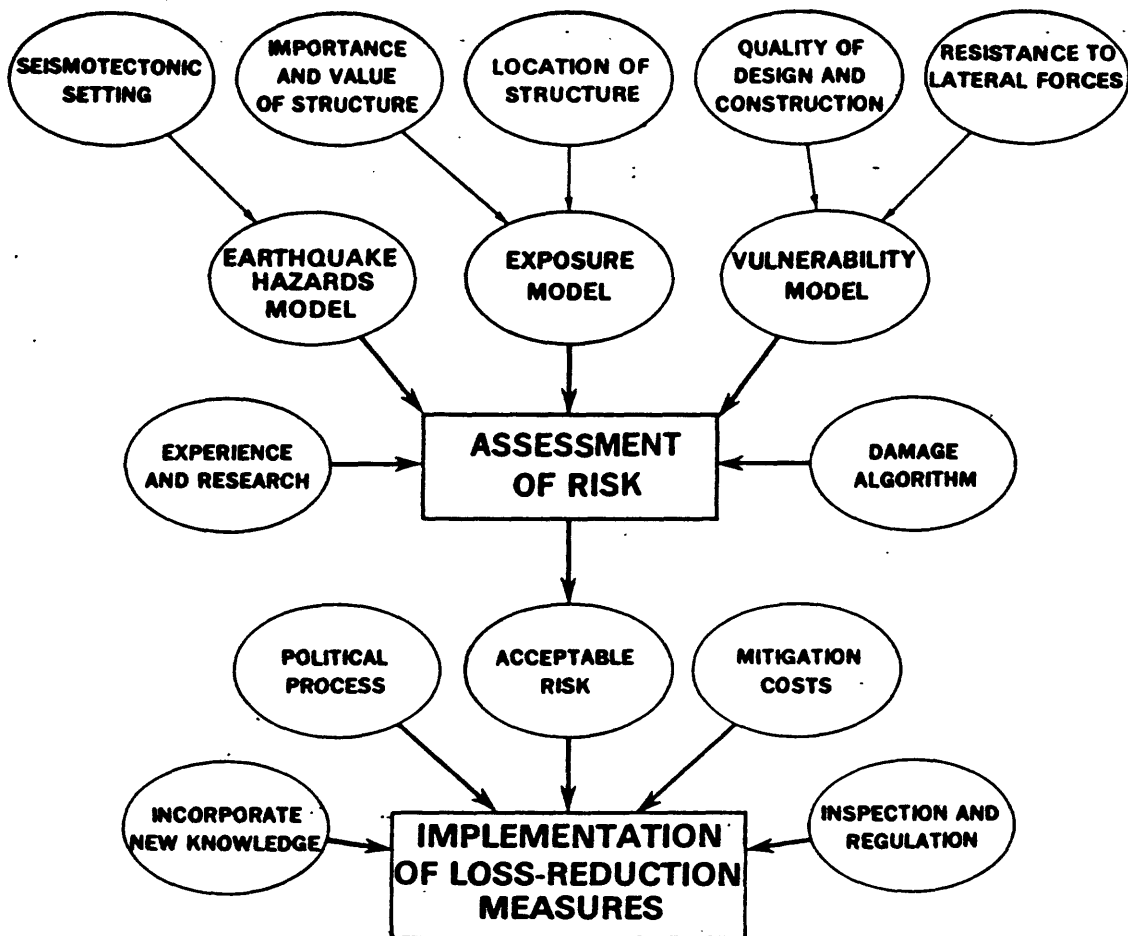


Figure 2.--Schematic illustration of the overall process leading to the implementation of earthquake loss-reduction measures. Training programs in an earthquake-prone region must have a curriculum that addresses each part of the process and is tailored to meet the needs of specific user groups. The earthquake hazards model was illustrated in Figure 1.

- 1) Pattern of Occurrence--Earthquakes occur mainly along the boundaries of tectonic plates throughout the world (i.e., along the boundary of the Pacific and North American Plates in the United States) and recur cyclically where they occurred in the past. Short-term prediction of the size, place, and time of future earthquakes is still an emerging scientific field that cannot be depended upon at the present time to reduce losses independent of training and other mitigation activities.
- 2) Impact Time--The time between the first physical precursors, if any, of a major earthquake and its peak impact is short, on the order of a few hours or less, and no warning system is presently available to reduce potential losses. The duration of an earthquake is very short (a few seconds to several minutes) compared to many other natural hazards.
- 3) Area Affected--A broad area of several hundred thousand square miles centered around the epicenter is affected in a major earthquake with damage and losses generally decreasing with distance from the epicenter. However, as observed in the 1964 Prince William Sound, Alaska earthquake, tsunamis can be very destructive at locations thousands of miles from the epicenter and, in the 1985 Mexico earthquake, ground shaking effects can cause collapse of buildings located 250 miles from the epicenter. Hence, reduction of potential earthquake losses requires mitigation efforts on four scales: (a) global (1:7,500,000 or larger), b) regional (1:250,000 or larger), c) urban (1:24,000 or smaller), and d) engineering (1:5,000 or smaller).
- 4) Frequency--Compared to other natural hazards a major earthquake occurs relatively infrequently, varying, on the average, from once every 30 years in high seismicity areas of the world to once every 500-1,000 years in low seismicity areas of the world. The infrequent annual occurrence of a major earthquake relative to natural hazards like floods that occur annually tends to make loss-reduction measures evolve slowly and to limit progress mainly immediately after the occurrence of a damaging earthquake.

The needs of the people--The people involved in earthquake hazards mitigation need information and methodologies that have been validated. They need the best available answers to the following questions:

- 1) Where have earthquakes occurred in the past? Where are they occurring now?
- 2) Why are they occurring?
- 3) How often do earthquakes of a certain size (magnitude or epicentral intensity) occur?
- 4) How bad (severe) have the physical effects (hazards) been in the past on structures and the populace? How bad can they be?
- 5) How do the physical effects (hazards) vary spatially and temporally?
- 6) What are the viable options for mitigating potential losses (economic, life, function, confidence) from earthquake hazards? How cost effective are they?
- 7) What research is needed to provide a technical data base, cost information, and sound technical and societally-acceptable procedures for devising loss-reduction measures and calling for change in building codes, land use, and construction practices?

Such information is provided best through comprehensive training programs.

The options for mitigation actions--Options for reducing potential losses from earthquakes are varied. They include:

- 1) Increasing awareness of earthquake hazards (training and education, professional registration, use of print, radio, and television media).

- 2) Preparation of development studies and plans (land use and open space inventories and plans, community facility and utility inventories and plans, redevelopment plans, seismic- and public-safety plans).
- 3) Designing and building safe structures (repair and strengthening of existing buildings, siting and design of critical facilities, site-specific investigations for new buildings).
- 4) Discouraging new or removing existing hazardous development (disclosure of hazards information, warnings of hazardous areas, public records of hazards, removal of unsafe structures).
- 5) Regulating development (building and grading ordinances, design and construction regulations, hazard zone investigations, building codes).
- 6) Preparing for and responding to disasters (damage inspection, repair and recovery, earthquake preparedness plans, emergency response plans, insurance).

Training is required to impart the technical knowledge needed to implement these options.

The perspectives of people--Training programs must recognize that the strengths and weaknesses of an earthquake hazards mitigation program are intimately dependent on the people who will implement them. The range of perspectives of the people involved is broad, adding to the complexity (Szanton, 1981). The scientist/engineer and the elected and appointed official/political leader (called a decisionmaker) represent the extremes of the perspectives, which are summarized below.

- 1) The ultimate objective of the decisionmaker is the approval of the electorate; it is the respect of peers for the scientist/engineer.
- 2) The time horizon for the decisionmaker is short; it is long for the scientist/engineer.

- 3) The focus on the decisionmaker is on the external logic of the problem; it is on the internal logic for the scientist/engineer.
- 4) The mode of thought for the decisionmaker is deductive and particular; it is inductive and generic for the scientist/engineer.
- 5) The most valued outcome for the decisionmaker is a reliable solution; it is original insight for the scientist/engineer.
- 6) The mode of expression is simple and absolute for the decisionmaker; it is obtruse and qualified for the scientist/engineer.
- 7) The preferred form of conclusion for the decisionmaker is one "best solution" with uncertainties submerged; it is multiple possibilities with uncertainties emphasized for the scientist/engineer.

The seven differences in perspective listed above are the main reason that an earthquake hazards mitigation program of a country (region, city, agency, or institution) must have well coordinated short- and long-term objectives and involve both the scientific/technical community and decisionmakers in a way that minimizes the differences in their perspectives. Training must be tailored to relate to these differences.

Conditions that hinder implementation of an earthquake hazards mitigation program--A number of real-world conditions hinder implementation of an earthquake hazards mitigation program. They must be addressed in the training program. These conditions are:

- 1) Until a disaster occurs, decisionmakers view other current problems as more pressing and important than mitigation of earthquake hazards.
- 2) Political and economic costs are often seen as disproportionate to the benefits of solving the problems. This perception deters pragmatic actions in spite of the fact that the benefit/cost ratio of earthquake

hazards mitigation programs has been shown to be about 10:1 (that is, an expenditure of \$1 for mitigation saves \$10 later in losses).

- 3) Earthquake hazards are complex and difficult to quantify except in terms that incorporate uncertainty, increasing the complexity even more for the decisionmaker and causing greater dependence on the scientist/engineer than may be wanted by either the scientist/engineer or the decisionmaker.
- 4) Technical and administrative capacities of governments are often limited when dealing with the complexity of earthquake hazards.
- 5) Intergovernmental and intraorganizational complexities often hinder the development of a coordinated hazards mitigation program and can cause conflict and/or distrust among key persons.

CONCLUSIONS

From the beginning, training has been an integral part of the National Earthquake Hazards Mitigation Program. Training requirements are complex because the technical-societal-political problems associated with the goals of saving lives and reducing economic losses are complex and difficult to solve quickly. A well coordinated training program, having integrated short-and long-term objectives, has proven to offer the best chance for success. The most effective strategies for successful training programs include:

- 1) Give key persons a role in the process, asking them to take part in the planning through steering committees, counterpart organizations, review boards, etc. This involvement gives them a target for their influence.
- 2) Keep the information manageable for the participants by focusing on facts that represent the best technical answers to the questions:
 - Where?
 - Why?
 - How Often?
 - What happened?

13E3 400604

- What could have happened?
- What can be done to mitigate the physical effects of the hazard?
- What is the cost/benefit?

- 3) Take advantage of recent occurrences of earthquakes or other natural hazards in the country, disasters in other parts of the world whose lessons are transferable, or dates of the anniversaries of past (but not forgotten) major earthquakes. Use them to gain attention and to add reality.
- 4) Build on existing programs, seeking to strengthen them and to accelerate their progress whenever possible.
- 5) Coordinate planning with other national activities such as major meeting of professional societies, regional, or world conferences.
- 6) Make a concerted effort to identify all of the constraints that hinder implementation of mitigation strategies in the country (region, city, agency, institution) and identify ways to eliminate or minimize their impact. This strategy requires a study of the total process, summarized below:

In order to implement disaster mitigation strategies successfully, the COMMUNITY (people, institutions, or programs) requires INFORMATION (data, maps, and reports) produced by experts for use by the VARIED USER GROUPS IN THE COMMUNITY (scientists, engineers, architects, social scientists, emergency managers, and public officials). The success of implementation is controlled by the degree to which CONSTRAINT (political, legal, technological, economic, and social) are eliminated or minimized by CREATIVE ALTERNATIVES (partnerships, development of new technologies, cost reductions, social benefits, and special incentives). Each acceptable change in public policy is INSTITUTIONALIZED (legislation, ordinances, building codes, standard practices, and regulations).

- 7) Involve selected local experts in the training process so that the students can become the "future teachers." Give them the visual aids.
- 8) Give lecture notes to the participants as a permanent record.
- 9) Provide a glossary of technical terms to facilitate communication.
- 10) Perform a critical evaluation of what happened. Use nonthreatening procedures to obtain feedback that will improve the process.
- 11) Incorporate the results of the critical evaluation in the future seminars so that strong points are always being improved and the weak points are avoided.

The following technical subjects should receive priority in training programs in the United States:

- Making existing hazardous buildings safer.
- Making vital community lifelines and critical facilities safe.
- Siting dams, hospitals, and nuclear power plants.
- Developing earthquake-resistant design criteria and procedures.
- Developing hazards and risk maps.
- Transferring technology to less advanced region.
- Incorporating lessons learned from past earthquakes into design construction.

REFERENCES

- 1) Hays, W.W., (1981) Facing geologic and hydrologic hazards--earth science considerations: U.S. Geological Survey Professional Paper 1240-B, 109 p.
- 2) Office of Science and Technology Policy, (1978), Earthquake hazards reduction--issues for an implementation plan, Government Printing Office, Washington, D.C., 231 p.
- 3) Szanton, Peter (1981) Not well advised: Russell Sage Foundation and Ford Foundation, 81 p.

PLANIFICACION DE MANEJO DE EMERGENCIAS

Comentarios de Ing. Ruth D. Carreras y/o Sr. Mariano Vargas del Departamento Recursos Naturales en el Tercer Taller Anual, sobre Riesgos Geológicos, celebrado en el Hotel Caribe Hilton, San Juan, Puerto Rico, el jueves 15 de mayo de 1986.

BUENAS TARDES.

ESTA TARDE ME PROPONGO HABLAR UN POCO SOBRE EL AMPLIO TEMA DE LA PLANIFICACION PARA EL MANEJO DE EMERGENCIAS EN PUERTO RICO. COMO ES DE CONOCIMIENTO DE TODOS LOS AQUÍ PRESENTES UN EVENTO NATURAL, COMO LO ES UN TERREMOTO, REPRESENTA UNA AMENAZA SERIA PARA QUIENES RESIDEN EN AREAS SISMICAMENTE ACTIVAS. EN PUERTO RICO NOS ENCONTRAMOS, SEGUN HEMOS VISTO, EN DICHA SITUACION.

LA FUNCION PRIMARIA DE UN GOBIERNO ES PROTEGER LA VIDA Y LA PROPIEDAD DE SUS CIUDADANOS. A TRAVES DE LA HISTORIA, SE HA INTENTADO ANTICIPAR LO INESPERADO CON EL PROPOSITO DE REDUCIR EL RIESGO A LA VIDA Y A LA SEGURIDAD DE LOS SERES HUMANOS QUE REPRESENTAN UNA DIVERSIDAD DE EVENTOS NATURALES. EL MANEJO DE LOS PELIGROS Y EMERGENCIAS OCASIONADOS POR ESTOS EVENTOS NATURALES (Y DE LOS CREADOS POR EL HOMBRE) HA TOMADO GRAN IMPORTANCIA EN LOS ULTIMOS AÑOS. SE FUNDAMENTA EN EL PRINCIPIO DE QUE EL HOMBRE NO PUEDE EVITAR LA OCURRENCIA DE UN FENOMENO NATURAL, NO OBSTANTE, PUEDE PREVENIR Y MITIGAR SUS CONSECUENCIAS. EL MANEJO DE PELIGROS ("HAZARD MANAGEMENT") ES ENTONCES, LA ACTIVIDAD ORIENTADA A QUE LA SOCIEDAD SE INFORME ACERCA DE LOS PELIGROS, DECIDA COMO LIDIAR CON ELLOS E IMPLANTE MEDIDAS PARA CONTROLARLOS O MITIGAR SUS CONSECUENCIAS.

EL MANEJO DE EMERGENCIAS HA SIDO DEFINIDO COMO EL PROCESO PARA LIDIAR CON UN EVENTO O DESASTRE CREADO POR LA

NATURALEZA O POR EL HOMBRE. CUATRO FASES CLARAMENTE DIFERENCIABLES E INTERRELACIONADAS HAN SIDO IDENTIFICADAS:

MITIGACION - PROCESO QUE NOS LLEVA A LA DECISION SOBRE QUE HACER DONDE HA SIDO IDENTIFICADO UN RIESGO A LA SALUD, SEGURIDAD O BIENESTAR DE LA SOCIEDAD. ES CUALQUIER ACCION TOMADA PARA ELIMINAR PERMANENTEMENTE O REDUCIR EL RIESGO A LARGO PLAZO SOBRE LA VIDA Y LA PROPIEDAD POR EL EFECTO DE UN EVENTO NATURAL O TECNOLÓGICO.

PREPARACION - CONLLEVA EL DESARROLLO DE PLANES, PROGRAMAS DE ADIESTRAMIENTO Y ACCIONES A SER IMPLANTADAS CON ANTERIORIDAD A LA AMENAZA DE CUALQUIER PELIGRO POTENCIAL CON EL PROPOSITO DE ESTAR MEJOR PREPARADOS EN EL MOMENTO DE SU OCURRENCIA.

RESPUESTA - ES LA ACCION DE PROVEER ASISTENCIA Y AYUDA DE EMERGENCIA INMEDIATA ANTE LA INMINENCIA Y/O OCURRENCIA DE UN DESASTRE.

RECUPERACION - CONLLEVA LA ASISTENCIA O RESPUESTA DURANTE EL PERIODO POSTERIOR AL EVENTO CON EL PROPOSITO DE RETORNAR A LA NORMALIDAD.

CONVIENE CLARIFICAR DOS TERMINOS QUE MUCHAS VECES UTILIZAMOS INDISTINTAMENTE:

PELIGRO (NUESTRA TRADUCCION DEL TERMINO EN EL IDIOMA INGLES: HAZARD) EL CUAL DEFINIMOS EN FORMA GENERAL COMO LA AMENAZA A LOS SERES HUMANOS Y A AQUELLAS COSAS QUE ESTE VALORA, TALES COMO : LA VIDA, EL BIENESTAR Y EL AMBIENTE.

RIESGO (NUESTRA TRADUCCION DEL TERMINO EN EL IDIOMA INGLÉS: RISK) EL CUAL VISUALIZAMOS COMO LA PROBABILIDAD DE QUE UN EVENTO EN PARTICULAR NOS LLEVE A DETERMINADAS CONSECUENCIAS.

ES IMPORTANTE, ADEMÁS, HACER UNA DISTINCION ENTRE LAS FUNCIONES DE MITIGACION DE PELIGROS ("HAZARD MITIGATION") Y EL MANEJO DE EMERGENCIAS ("EMERGENCY MANAGEMENT") PROPIAMENTE.

LA MITIGACION DE PELIGROS VA DIRIGIDA A LIDIAR PRIMORDIALMENTE CON SITUACIONES EN EL LARGO PLAZO Y CON ACTIVIDADES DE CARACTER GENERAL PARA LA REDUCCION DE RIESGOS. PUNTUALIZA EN MEJORAR LA CAPACIDAD DE UNA SOCIEDAD O COMUNIDAD PARA ENFRENTAR EVENTOS POTENCIALMENTE DESASTROSOS. CONLLEVA UN PROCESO DE PLANIFICACION A LARGO PLAZO, EL DISEÑO DE UNA POLITICA PUBLICA Y LA IDENTIFICACION E IMPLANTACION DE ESTRATEGIAS. BUSCA ALCANZAR GENERALMENTE TRES METAS PRINCIPALES:

- 1- ALTERAR O MODIFICAR LA NATURALEZA O COMPORTAMIENTO DEL EVENTO; GENERALMENTE A TRAVES DE MEDIDAS ESTRUCTURALES.
- 2- MODIFICAR LA SUSCEPTIBILIDAD DEL HOMBRE ANTE EL EVENTO CON EL PROPOSITO DE REDUCIR LA VULNERABILIDAD A DAÑOS; GENERALMENTE PROTEGIENDO A LAS PERSONAS Y LAS PROPIEDADES EN EL AREA DE PELIGRO.
- 3- REDUCIR LA EXPOSICION AL PELIGRO; LIMITANDO EL USO DE AREAS PELIGROSAS A TRAVES DEL USO DE HERRAMIENTAS TALES COMO LOS REGLAMENTOS PARA EL USO DE LA TIERRA.

EL MANEJO DE EMERGENCIAS SE CONCENTRA PRIMORDIALMENTE EN LA FASE DE PREPARACION PREVIA Y ENTRA EN ACCION JUSTO ANTES O INMEDIATAMENTE DESPUES DE UN EVENTO O DESASTRE. PUNTUALIZA EN MEJORAR LAS OPERACIONES DE DESASTRE PROVEYENDO LA COORDINACION DE EMERGENCIA NECESARIA Y EN LA TOMA DE DECISIONES PARA LIDIAR CON LA SITUACION CREADA POR EL DESASTRE. ESTA FASE REQUIERE DESTREZAS TACTICAS EFECTIVAS, TALES COMO: COMUNICACION, COMANDO Y CONTROL.

AMBAS FUNCIONES FORMAN PARTE DE LA AGENDA DE UNA SOCIEDAD PARA LIDIAR CON DESASTRES Y ESTAN INTIMAMENTE RELACIONADAS, AUNQUE TÍPICAMENTE OPERAN CON DIFERENTE PERSONAL Y METODOS. EN PUERTO RICO LA RESPONSABILIDAD PRIMARIA PARA EL MANEJO DE EMERGENCIAS RECAE SOBRE LA AGENCIA ESTATAL DE LA DEFENSA CIVIL (Y SOBRE ELLO NOS HABLARA EN MAS DETALLE EL SR. HERIBERTO ACEVEDO). LA RESPONSABILIDAD PRIMARIA SOBRE LA MITIGACION DE RIESGOS RECAE SOBRE LA AGENCIA QUE ESTA TARDE REPRESENTO: EL DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES.

RESULTA OBVIO QUE EL TIPO DE PELIGRO AFECTA LA SELECCION DE LAS METAS QUE HA DE TRATAR DE ALCANZAR LA MITIGACION. EN EL CASO DE EVENTOS NATURALES, LA MITIGACION BUSCA REDUCIR LOS DAÑOS OCASIONADOS POR EL IMPACTO RECURRENTES DE ESTOS EVENTOS, ACTUANDO SOBRE LAS ESTRUCTURAS Y LAS ACTIVIDADES HUMANAS. ES OBVIO, ADEMÁS, QUE EL TIPO DE EVENTO NATURAL JUEGA UN PAPEL DETERMINANTE EN LA ESTRATEGIA DE MITIGACION Y EL MANEJO DE LA EMERGENCIA. LA NATURALEZA DE LOS TERREMOTOS Y DE LOS CONOCIMIENTOS QUE SOBRE ELLOS

TENEMOS, AL PRESENTE, INFLUENCIAN EN GRAN MEDIDA NUESTRAS ACCIONES. EL ELEMENTO QUE MAS RESALTA ES EL HECHO DE QUE UN TERREMOTO ES UN EVENTO EN EL QUE NO SE PUEDE PRECISAR EL LUGAR, LA MAGNITUD Y EL MOMENTO DE SU OCURRENCIA CON ANTELACION AL MISMO. AUNQUE ALGUNOS TERREMOTOS HAN SIDO PREDICHOS POR LOS CIENTIFICOS Y SE HAN LOGRADO GRANDES ADELANTOS EN ESTE ASPECTO, AUN NO CONTAMOS CON UN SISTEMA CONFIABLE DE PREDICCION.

LA MITIGACION DE RIESGOS REQUIERE DE UN PROCESO DE PLANIFICACION A LARGO PLAZO EN EL QUE PUEDEN IDENTIFICARSE DIFERENTES FASES.

EL PROCESO DE PLANIFICACION COMIENZA CON LA IDENTIFICACION DE LOS PELIGROS GEOLOGICOS A LOS QUE ESTAMOS EXPUESTOS Y LA DETERMINACION DE LOS RIESGOS GEOLOGICOS ESPECIFICOS BASADOS EN DICHA IDENTIFICACION. LOS RESULTADOS OBTENIDOS CONSTITUYEN LA INFORMACION BASICA PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LA POLITICA PUBLICA Y DEL DESARROLLO DE LOS ESCENARIOS NECESARIOS PARA PROPOSITOS DE PLANIFICACION.

LOS EXCELENTES TRABAJOS DE INVESTIGACION QUE HAN SIDO PRESENTADOS, EN ESTE Y ANTERIORES SEMINARIOS, HAN CONSTITUIDO UN GRAN ADELANTO EN LA IDENTIFICACION Y EVALUACION DEL PELIGRO AL QUE ESTA EXPUESTO NUESTRA ISLA. EL ESTUDIO DE VULNERABILIDAD SISMICA DEL AREA METROPOLITANA DE SAN JUAN, ELABORADO POR EL DR. JOSE MOLINELLI PARA NUESTRO DEPARTAMENTO, BAJO EL AUSPICIO DE LA AGENCIA FEDERAL PARA EL MANEJO DE EMERGENCIAS, ASI COMO LAS OBSERVACIONES, RECOMENDACIONES Y EL DESARROLLO POSTERIOR DE ESTUDIOS MAS

DETALLADOS, HAN SIDO DE VALIOSA AYUDA Y REPRESENTAN UN GRAN PASO DE ADELANTO EN EL PROCESO DE PLANIFICACION. LA IDENTIFICACION DE LOS PELIGROS GEOLOGICOS PRINCIPALES INDUCIDOS POR LOS TERREMOTOS: LA INTENSIFICACION DE LAS VIBRACIONES DEL TERRENO, LA LICUACION DE ARENAS Y LOS DESPLAZAMIENTOS LATERALES DEL TERRENO ASI COMO LA IDENTIFICACION DE LAS ZONAS SUSCEPTIBLES A ESTOS PELIGROS EN LOS MAPAS TOPOGRAFICOS DEL AREA METROPOLITANA DE SAN JUAN CONSTITUYEN UNA VALIOSA APORTACION HACIA LA META DEL ESTABLECIMIENTO DE UNA ZONIFICACION SISMICA EN PUERTO RICO. DE IGUAL MANERA, EL ESTUDIO DEL IMPACTO ECONOMICO DEL TERREMOTO DE DISEÑO SELECCIONADO EN EL ESTUDIO NOS DEMUESTRA QUE UN TERREMOTO DE DICHA INTENSIDAD TENDRIA UN EFECTO DEVASTADOR SOBRE LA ECONOMIA DEL AREA METROPOLITANA DE SAN JUAN Y EN CONSECUENCIA DE TODO PUERTO RICO.

EL PROXIMO PASO HA SIDO EL HACER EXTENSIVO ESTE ANALISIS A OTRAS AREAS METROPOLITANAS TALES COMO: PONCE, ARECIBO Y AGUADILLA.

LA PROPUESTA DE REVISION Y ENMIENDA AL CODIGO DE EDIFICACION DE PUERTO RICO, ELABORADA POR LA COMISION DE TERREMOTOS DEL COLEGIO DE INGENIEROS Y AGRIMENSORES Y SOMETIDA POR LA ADMINISTRACION DE REGLAMENTOS Y PERMISOS A UN PROCESO DE VISTAS PUBLICAS RECIENTEMENTE, HA DE CONSTITUIR UNA MUY EFICAZ ESTRATEGIA DE MITIGACION AL ADOPTARSE PROXIMAMENTE EL NUEVO REGLAMENTO. ES PRECISO HACER LA ACLARACION DE QUE LA ADOPCION DE UN NUEVO REGLAMENTO SOLO TIENE EFECTOS PROSPECTIVOS Y REQUIERE, PARA QUE SEA

EFFECTIVO, UN SEGUIMIENTO EFICAZ DE LA AGENCIAS REGULADORAS DEL ESTADO. TAMPOCO RESUELVE EL PROBLEMA DE LAS EDIFICACIONES EXISTENTES.

EL PROXIMO PASO DEL ANALISIS DE VULNERABILIDAD LO CONSTITUYE EL ESTABLECIMIENTO DEL IMPACTO DEL TERREMOTO DE DISEÑO SELECCIONADO EN LAS ESTRUCTURAS Y LA POBLACION. ELLO NOS PERMITIRA LA IDENTIFICACION DE UNOS ELEMENTOS MUY NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE UN PLAN DE ACCION DE EMERGENCIA EFFECTIVO. EL DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES, BAJO EL AUSPICIO DE LA AGENCIA FEDERAL PARA EL MANEJO DE EMERGENCIAS, SE ENCUENTRA EN EL PROCESO DE IDENTIFICAR LAS UNIDADES DE VIVIENDA, POBLACION Y ESTRUCTURAS DE SERVICIO PRIMARIO UBICADAS EN LAS AREAS IDENTIFICADAS DE ALTO RIESGO GEOLOGICO INDUCIDO POR UN TERREMOTO. ADEMAS, PROPONEMOS QUE SE LLEVE A CABO UNA DETERMINACION CIENTIFICA DE LOS DAÑOS RESULTANTES ESPERADOS EN DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURAS POR UN DETERMINADO NIVEL DE MOVIMIENTO DEL TERRENO DURANTE UN EVENTO DE TERREMOTO. ADEMAS DE OBTENER UN ESTIMADO DE LOS DAÑOS ESPERADOS EN LAS ESTRUCTURAS SELECCIONADAS, NOS PUEDE PERMITIR, MEDIANTE EL USO DE ALGUNAS CORRELACIONES ESTABLECIDAS, ESTIMAR EL NUMERO DE MUERTES Y HERIDOS.

POR ULTIMO, Y NO POR ELLO MENOS IMPORTANTE, SE ENCUENTRAN LAS ACTIVIDADES DE PREPARACION ("PREPAREDNESS"). UN ASPECTO DE VITAL IMPORTANCIA EN LA FASE DE PREPARACION ES EL CONCIENTIZAR A LA CIUDADANIA SOBRE LOS RIESGOS A QUE ESTAMOS EXPUESTOS Y ORIENTARLOS RESPECTO A LAS MEDIDAS QUE PUEDEN TOMAR COMO INDIVIDUOS PARA PROTEGERSE ELLOS Y SUS

FAMILIAS DURANTE UN EVENTO DE TERREMOTO. LOS TERREMOTOS EN MEXICO EN SEPTIEMBRE PASADO Y EL DERRUMBE EN MAMEYES, EVENTOS QUE HAN SIDO RESEÑADOS Y EVALUADOS EN ESTE SEMINARIO, HAN ELEVADO EL NIVEL DE CONCIENCIA DE NUESTROS FUNCIONARIOS Y DE NUESTRO PUEBLO. AMBOS EVENTOS RECIBIERON UNA COBERTURA AMPLIA EN LOS MEDIOS NOTICIOSOS DEL PAIS Y CALARON MUY PROFUNDO EN LA CONCIENCIA Y LA SENSIBILIDAD DE LOS PUERTORRIQUEÑOS.

EL DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES ESTA EN EL PROCESO DE ELABORAR FOLLETOS INFORMATIVOS CON EL PROPOSITO DE ORIENTAR ADECUADAMENTE A LA CIUDADANIA. UNO DE ELLOS VA DIRIGIDO ESPECIFICAMENTE A LOS ESTUDIANTES. LA DEFENSA CIVIL ESTATAL ESTA REALIZANDO ESFUERZOS SIMILARES ASI COMO OTROS DE VITAL IMPORTANCIA SOBRE LOS CUALES NOS HABLARA EN MAS DETALLE EL SEÑOR HERIBERTO ACEVEDO.

CONCLUYENDO, HAN SIDO MUY IMPORTANTES Y MERITORIOS LOS ESFUERZOS DESARROLLADOS HASTA EL PRESENTE CON EL PROPOSITO DE PREPARARNOS MEJOR ANTE LA EVENTUALIDAD DE UN EVENTO DE TERREMOTO DE GRAN MAGNITUD. AUN NOS QUEDA UN TRECHO LARGO POR RECORRER PARA EVITAR QUE ESTOS FENOMENOS NATURALES, EN LA MEDIDA DE NUESTRAS CAPACIDADES, SE CONVIERTAN EN DESATRES NATURALES. CON ESA AGENDA DE TRABAJO DEBEMOS ESTAR COMPROMETIDOS TODOS LOS AQUI PRESENTES. MUCHAS GRACIAS.

STATUS OF PUERTO RICO BUILDING CODE
By

Miguel Santiago
University of Puerto Rico
Mayaguez, Puerto Rico

INTRODUCTION

Puerto Rico is earthquake country. For thousands of years earthquakes have been relatively frequent in occurrence in this region. The last destructive earthquake occurred on October 11, 1918. It took 116 lives and caused \$4 million in damages. Most buildings were made of unreinforced masonry which accounted for a large number of failures, especially on the west coast.

Building regulations were enacted in 1956 as the result of Act 168 of May 4, 1949, which provided the adoption of such regulations. Seismic provisions at the time still stand to this date.

Part IV of the Building Regulations provides for . . . "such minimum requirements as are necessary to insure that the buildings will be designed to resist stresses due to horizontal forces caused by hurricane winds and by earthquakes." Only once, 1968, has the Puerto Rican Building Regulations been amended as the result of public hearings on May 20, 27, and July 3, 1966.

SEISMIC PROVISIONS FOR BUILDINGS

At present, according to the Code, . . . "All buildings shall be designed and constructed to stand stresses produced by lateral forces at the level of the roof and each floor, as well as at ground level, resulting from Seismic Motion."

The minimum earthquake forces are calculated by formula (a) below or as the results of tests on scale models.

* Eds. This paper is reprinted from Conference XXX.

1402 40064

$$V + K C W \dots\dots\dots(a)$$

V = Base Shear

K = Coefficient dependent on the structural system used

$$C = \frac{0.225}{T^{1/3}} \dots\dots\dots(b)$$

C = 0.05 for one or two story buildings

W = Weight of the structure

$$T = \frac{0.05H}{D^{1/2}} \dots\dots\dots(c)$$

H = Building height

D = Depth of building (perpendicular to lateral load)

The distribution of the total horizontal force is done according to formula (d) below. When $\frac{H}{D}$ is larger than five (5), a concentrated load equal to 10% of V is put at the top and the differences is distributed following formula (d).

$$F_x = \frac{V W_x h_x}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} \dots\dots\dots(d)$$

PROPOSED CHANGES

During three years, 1980 to 1983, a commission appointed by the President of the Institute of Engineers drafted a set of changes directed at improving the seismic design provisions of the Puerto Rico Building Regulations. The draft is still at rest at the Regulations and Permits Administration (ARPE by its Spanish name).

Engineers in private practice in Puerto Rico are aware of loop holes in present Building Regulations and provide in their designs the needed seismic load carrying capacity to modern buildings. This has not eliminated possible discrepancies in the designs of important buildings. There are cases where contractors, one known to this author, include by reference the present

1403 40064
40064

Building Regulations in their contracts resulting in adequate designs as per our present knowledge of seismic behavior of structures.

The proposed changes to the seismic design provisions of the Puerto Rico Building Regulations are based on the Uniform Building Code adapted to the Island.

Earthquake forces must be calculated by:

$$V = Z I K C S W \dots\dots\dots(a')$$

$Z = 0.6$, Seismic Zone Coefficient for Puerto Rico

$I =$ Occupancy Importance Factor; Min. = 1.0, Max. = 1.5

$$C = \frac{1}{15T} \quad \text{for } T \leq 1 \text{ Sec.} \quad \dots\dots\dots(b')$$

$$C = \frac{1}{15^{2/3} T} \quad \text{for } T > 1 \text{ Sec.}$$

value of C not to exceed 0.10

$$T = 0.35 h_n^{3/4} \quad \text{for steel frames}$$

$$T = 0.025 h_n^{3/4} \quad \text{for concrete frames} \quad \dots\dots\dots(c')$$

$$T = \frac{0.05 h_n}{D^{1/2}} \quad \text{for other buildings}$$

$S =$ Soil interaction factor which should not be less than 1.0

In the absence of a soil investigations S should be taken as 1.5.

*The Product CS need not exceed 0.14.

1402 40064 ~~7400~~

In the structures with a fundamental period of vibration in excess of 0.7 sec. a concentrated load equivalent to $F = 0.07TV$ is added on the tip of the structure. This need not to exceed 0.25 V. The difference in total lateral forces is to be distributed to each floor level.

The proposed revisions also includes requirements for the P-Delta effects. Whenever the incremental factors, θ , exceed 0.10, the story drift, resisting moments, and shears should be increased correspondingly.

$$\theta = \frac{Px_D}{V \times h}$$

CONCLUSION

The long awaited revisions to the seismic provisions of the Puerto Rico Building Regulations are badly needed. To keep the usefulness of many buildings after a major earthquake hits the Island, it is necessary to assess the risks of those designed under the present Regulations and bring them to meet the new proposed standards which are consistent with life and property preservation.

REFERENCES

1. Puerto Rico Building Regulation, No. 7, Amended 1968, Puerto Rico Planning Board, San Juan, Puerto Rico.
2. The Porto Rico Earthquake of 1918, Document No 269, House of Representatives, Report by Harry Fielding Reid and Stephen Taber, October 17, 1919.
3. Catalogue of earthquakes felt in Puerto Rico, 1772-1970.

14B3 40064
✓ ~~66664~~

(4000000000)

APPENDIX A

GLOSSARY OF TERMS USED IN PROBABILISTIC EARTHQUAKE HAZARDS ASSESSMENTS

Accelerogram. The record from an accelerometer showing acceleration as a function of time. The peak acceleration is the largest value of acceleration on the accelerogram.

Acceptable Risk. A probability of occurrences of social or economic consequences due to earthquakes that is sufficiently low (for example in comparison to other natural or manmade risks) as to be judged by appropriate authorities to represent a realistic basis for determining design requirements for engineered structures, or for taking certain social or economic actions.

Active fault. A fault is active if, because of its present tectonic setting, it can undergo movement from time to time in the immediate geologic future. This active state exists independently of the geologists' ability to recognize it. Geologists have used a number of characteristics to identify active faults, such as historic seismicity or surface faulting, geologically recent displacement inferred from topography or stratigraphy, or physical connection with an active fault. However, not enough is known of the behavior of faults to assure identification of all active faults by such characteristics. Selection of the criteria used to identify active faults for a particular purpose must be influenced by the consequences of fault movement on the engineering structures involved.

Asthenosphere. The worldwide layer below the lithosphere which is marked by low seismic wave velocities. It is a soft layer, probably partially molten.

Attenuation law. A description of the average behavior of one or more characteristics of earthquake ground motion as a function of distance from the source of energy.

Attenuation. A decrease in seismic signal strength with distance which depends not only on geometrical spreading, but also may be related to the physical characteristics of the transmitting medium that cause absorption and scattering.

b-value. A parameter indicating the relative frequency of earthquakes of different sizes derived from historical seismicity data.

Capable fault. A fault along which future surface displacement is possible, especially during the lifetime of the engineering project under consideration.

Convection. A mechanism of heat transfer through a liquid in which hot material from the bottom rises because of its lesser density, while cool surface materials sinks.

Convergence Zone. A band along which moving plates collide and area is lost either by shortening and crustal thickening or subduction and destruction of crust. The site of volcanism, earthquakes, trenches, and mountain building.

Design earthquake. A specification of the ground motion at a site based on integrated studies of historic seismicity and structural geology used for the earthquake-resistant design of a structure.

Design spectra. Spectra used in earthquake-resistant design which correlate with design earthquake ground motion values. Design spectra typically are smooth curves that take into account features peculiar to a geographic region and a particular site.

Design time history. One of a family of time histories used in earthquake-resistant design which produces a response spectrum enveloping the smooth design spectrum, for a selected value of damping.

Duration. A qualitative or quantitative description of the length of time during which ground motion at a site exhibits certain characteristics such as being equal to or exceeding a specified level of acceleration such as 0.05g.

Earthquake hazards. The probability that natural events accompanying an earthquake such as ground shaking, ground failure, surface faulting, tectonic deformation, and inundation, which may cause damage and loss of life, will occur at a site during a specified exposure time. See earthquake risk.

Earthquake risk. The probability that social or economic consequences of earthquakes, expressed in dollars or casualties, will equal or exceed specified values at a site during a specified exposure time.

Earthquake waves. Elastic waves (P, S, Love, Rayleigh) propagating in the Earth, set in motion by faulting of a portion of the Earth.

Effective peak acceleration. The peak ground acceleration after the ground-motion record has been filtered to remove the very high frequencies that have little or no influence upon structural response.

Elastic rebound theory. A theory of fault movement and earthquake generation that holds that faults remain lock while strain energy accumulates in the rock, and then suddenly slip and release this energy.

Epicenter. The point on the Earth's surface vertically above the point where the first fault rupture and the first earthquake motion occur.

Exceedance probability. The probability (for example, 10 percent) over some period of time that an event will generate a level of ground shaking greater than some specified level.

Exposure time. The period of time (for example, 50 years) that a structure is exposed to the earthquake threat. The exposure time is sometimes related to the design lifetime of the structure and is used in seismic risk calculations.

Fault. A fracture or fracture zone in the Earth along which displacement of the two sides relative to one another has occurred parallel to the fracture. See Active and Capable faults.

Focal depth. The vertical distance between the hypocenter and the Earth's surface in an earthquake.

Ground motion. A general term including all aspects of motion; for example, particle acceleration, velocity, or displacement; stress and strain; duration; and spectral content generated by a nuclear explosion, an earthquake, or another energy source.

Intensity. A numerical index describing the effects of an earthquake on the Earth's surface, on man, and on structures built by him. The scale in common use in the United States today is the Modified Mercalli scale of 1931 with intensity values indicated by Roman numerals from I to XII. The narrative descriptions of each intensity value are summarized below.

- I. Not felt--or, except rarely under especially favorable circumstances. Under certain conditions, at and outside the boundary of the area in which a great shock is felt: sometimes birds and animals reported uneasy or disturbed; sometimes dizziness or nausea experienced; sometimes trees, structures, liquids, bodies of water, may sway--doors may swing, very slowly.
- II. Felt indoors by few, especially on upper floors, or by sensitive, or nervous persons. Also, as in grade I, but often more noticeably: sometimes hanging objects may swing, especially when delicately suspended; sometimes trees, structures, liquids, bodies of water, may sway, doors may swing, very slowly; sometimes birds and animals reported uneasy or disturbed; sometimes dizziness or nausea experienced.
- III. Felt indoors by several, motion usually rapid vibration. Sometimes not recognized to be an earthquake at first. Duration estimated in some cases. Vibration like that due to passing of light, or lightly loaded trucks, or heavy trucks some distance away. Hanging objects may swing slightly. Movements may be appreciable on upper levels of tall structures. Rocked standing motor cars slightly.
- IV. Felt indoors by many, outdoors by few. Awakened few, especially light sleepers. Frightened no one, unless apprehensive from previous experience. Vibration like that due to passing of heavy or heavily loaded trucks. Sensation like heavy body of striking building or falling of heavy objects inside. Rattling of dishes, windows, doors; glassware and crockery clink or clash. Creaking of walls, frame, especially in the upper range of this grade. Hanging objects swung, in numerous instances. Disturbed liquids in open vessels slightly. Rocked standing motor cars noticeably.
- V. Felt indoors by practically all, outdoors by many or most; outdoors direction estimated. Awakened many or most. Frightened few--slight excitement, a few ran outdoors. Buildings trembled throughout. Broke dishes and glassware to some extent. Cracked windows--in some cases, but not generally. Overturned vases, small or unstable objects, in many instances, with occasional fall. Hanging objects, doors, swing generally or considerably. Knocked pictures against walls, or swung them out of place. Opened, or closed, doors and shutters abruptly. Pendulum clocks stopped, started or ran fast, or slow. Move small

objects, furnishings, the latter to slight extent. Spilled liquids in small amounts from well-filled open containers. Trees and bushes shaken slightly.

- VI. Felt by all, indoors and outdoors. Frightened many, excitement general, some alarm, many ran outdoors. Awakened all. Persons made to move unsteadily. Trees and bushes shaken slightly to moderately. Liquid set in strong motion. Small bells rang--church, chapel, school, etc. Damage slight in poorly built buildings. Fall of plaster in small amount. Cracked plaster somewhat, especially fine cracks chimneys in some instances. Broke dishes, glassware, in considerable quantity, also some windows. Fall of knickknacks, books, pictures. Overturned furniture in many instances. Move furnishings of moderately heavy kind.
- VII. Frightened all--general alarm, all ran outdoors. Some, or many, found it difficult to stand. Noticed by persons driving motor cars. Trees and bushes shaken moderately to strongly. Waves on ponds, lakes, and running water. Water turbid from mud stirred up. Incaving to some extent of sand or gravel stream banks. Rang large church bells, etc. Suspended objects made to quiver. Damage negligible in buildings of good design and construction, slight to moderate in well-built ordinary buildings, considerable in poorly built or badly designed buildings, adobe houses, old walls (especially where laid up without mortar), spires, etc. Cracked chimneys to considerable extent, walls to some extent. Fall of plaster in considerable to large amount, also some stucco. Broke numerous windows and furniture to some extent. Shook down loosened brickwork and tiles. Broke weak chimneys at the roof-line (sometimes damaging roofs). Fall of cornices from towers and high buildings. Dislodged bricks and stones. Overturned heavy furniture, with damage from breaking. Damage considerable to concrete irrigation ditches.
- VIII. Fright general--alarm approaches panic. Disturbed persons driving motor cars. Trees shaken strongly--branches and trunks broken off, especially palm trees. Ejected sand and mud in small amounts. Changes: temporary, permanent; in flow of springs and wells; dry wells renewed flow; in temperature of spring and well waters. Damage slight in structures (brick) built especially to withstand earthquakes. Considerable in ordinary substantial buildings, partial collapse, racked, tumbled down, wooden houses in some cases; threw out panel walls in frame structures, broke off decayed piling. Fall of walls, cracked, broke, solid stone walls seriously. Wet ground to some extent, also ground on steep slopes. Twisting, fall, of chimneys, columns, monuments, also factory stacks, towers. Moved conspicuously, overturned, very heavy furniture.
- IX. Panic general. Cracked ground conspicuously. Damage considerable in (masonry) buildings, some collapse in large part; or wholly shifted frame buildings off foundations, racked frames; serious to reservoirs; underground pipes sometimes broken.
- X. Cracked ground, especially when loose and wet, up to widths of several inches; fissures up to a yard in width ran parallel to canal and stream banks. Landslides considerable from river banks and steep coasts.

Shifted sand and mud horizontally on beaches and flat land. Changes level of water in wells. Threw water on banks of canals, lakes, rivers, etc. Damage serious to dams, dikes, embankments. Severe to well-built wooden structures and bridges, some destroyed. Developed dangerous cracks in excellent brick walls. Destroyed most masonry and frame structures, also their foundations. Bent railroad rails slightly. Tore apart, or crushed endwise, pipelines buried in earth. Open cracks and broad wavy folds in cement pavements and asphalt road surfaces.

XI. Disturbances in ground many and widespread, varying with ground material. Broad fissures, earth slumps, and land slips in soft, wet ground. Ejected water in large amounts charged with sand and mud. Caused sea-waves ("tidal" waves) of significant magnitude. Damage severe to wood-frame structures, especially near shock centers. Great to dams, dikes, embankments often for long distances. Few, if any (masonry) structures, remained standing. Destroyed large well-built bridges by the wrecking of supporting piers or pillars. Affected yielding wooden bridges less. Bent railroad rails greatly, and thrust them endwise. Put pipelines buried in each completely out of service.

XII. Damage total--practically all works of construction damaged greatly or destroyed. Disturbances in ground great and varied, numerous shearing cracks. Landslides, falls of rock of significant character, slumping of river banks, etc., numerous and extensive. Wrenched loose, tore off, large rock masses. Fault slips in firm rock, with notable horizontal and vertical offset displacements. Water channels, surface and underground, disturbed and modified greatly. Dammed lakes, produced waterfalls, deflected rivers, etc. Waves seen on ground surfaces (actually seen, probably, in some cases). Distorted lines of sight and level. Threw objects upward into the air.

Liquefaction. Temporary transformation of unconsolidated materials into a fluid mass.

Lithosphere. The outer, rigid shell of the earth, situated above the asthenosphere containing the crust, continents, and plates.

Magnitude. A quantity characteristic of the total energy released by an earthquake, as contrasted to intensity that describes its effects at a particular place. Professor C. F. Richter devised the logarithmic scale for local magnitude (M_L) in 1935. Magnitude is expressed in terms of the motion that would be measured by a standard type of seismograph located 100 km from the epicenter of an earthquake. Several other magnitude scales in addition to M_L are in use; for example, body-wave magnitude (m_b) and surface-wave magnitude (M_s), which utilize body waves and surface waves, and local magnitude (M_L). The scale is open ended, but the largest known earthquake have had M_s magnitudes near 8.9.

Mantle. The main bulk of earth between the crust and core, ranging from depths of about 40 to 2900 kilometers.

Mid-oceanridge. Characteristic type of plate boundary occurring in a divergence zone, a site where two plates are being pulled apart and new oceanic lithosphere is being created.

Plate tectonics. The theory and study of plate formation, movement, interaction, and destruction.

Plate. One of the dozen or more segments of the lithosphere that are internally rigid and move independently over the interior, meeting in convergence zones and separating in divergence zones.

Region. A geographical area, surrounding and including the construction site, which is sufficiently large to contain all the geologic features related to the evaluation of earthquake hazards at the site.

Response spectrum. The peak response of a series of simple harmonic oscillators having different natural periods when subjected mathematically to a particular earthquake ground motion. The response spectrum may be plotted as a curve on tripartite logarithmic graph paper showing the variations of the peak spectral acceleration, displacement, and velocity of the oscillators as a function of vibration period and damping.

Return period. For ground shaking, return period denotes the average period of time or recurrence interval between events causing ground shaking that exceeds a particular level at a site; the reciprocal of annual probability of exceedance. A return period of 475 years means that, on the average, a particular level of ground motion will be exceeded once in 475 years.

Risk. See earthquake risk.

Rock. Any solid rock either at the surface or underlying soil having a shear-wave velocity 2,500 ft/sec (765 m/s) at small (0.0001 percent) strains.

Sea-floor spreading. The mechanism by which new sea floor crust is created at ridges in divergence zones and adjacent plates are moved apart to make room.

Seismic Microzoning. The division of a region into geographic areas having a similar relative response to a particular earthquake hazard (for example, ground shaking, surface fault rupture, etc.). Microzoning requires an integrated study of: 1) the frequency of earthquake occurrence in the region, 2) the source parameters and mechanics of faulting for historical and recent earthquakes affecting the region, 3) the filtering characteristics of the crust and mantle constituting the regional paths along which the seismic waves travel, and 4) the filtering characteristics of the near-surface column of rock and soil.

Seismic zone. A generally large area within which seismic design requirements for structures are uniform.

Seismotectonic province. A geographic area characterized by similarity of geological structure and earthquake characteristics. The tectonic processes causing earthquakes have been identified in a seismotectonic province.

Source. The source of energy release causing an earthquake. The source is characterized by one or more variables, for example, magnitude stress drop, seismic moment. Regions can be divided into areas having spatially homogeneous source characteristics.

Strain. A quantity describing the exact deformation of each point in a body.
Roughly the change in a dimension or volume divided by the original dimension or volume.

Stress. A quantity describing the forces acting on each part of a body in units of force per unit area.

Strong motion. Ground motion of sufficient amplitude to be of engineering interest in the evaluation of damage due to earthquakes or in earthquake-resistant design of structures.

Subduction zone. A dipping planar zone descending away from a trench and defined by high seismicity, interpreted as the shear zone between a sinking oceanic plate and an overriding plate.

Transform fault. A strike-slip fault connecting the ends of an offset in a mid-ocean ridge. Some pairs of plates slide past each other along transform faults.

Trench. A long and narrow deep trough in the sea floor; interpreted as marking the line along which a plate bends down into a subduction zone.

Triple junction. A point that is common to three plates and which must be the meeting place of three boundary features, such as convergence zones, divergence zones, or transform faults.

APENDICE A

GLOSARIO DE TERMINOS PARA ANALISIS PROBABILISTICO DE LOS RIESGOS Y PELIGROS SISMICOS

ACELERACION NOMINAL O DE DISEÑO - Una especificación de la aceleración del terreno en un emplazamiento, términos de un valor único, tales como máximo o rms; utilizados para el diseño resistente a los terremotos de una estructura (como base para derivar un espectro de diseño). Véase "Historia cronológica de diseño".

CARGA DE DISEÑO SISMICO - la representación prescrita (historia cronológica, espectro de respuestas o desplazamiento de la base estática equivalente) de un movimiento sísmico del terreno que se utilizará para el diseño de una estructura.

COEFICIENTE DE VARIACION - la razón de desviación estándar de la media.

CUADRADO MEDIO - valor esperado del cuadrado de la variable aleatoria.
(El cuadrado medio menos el cuadrado de la media da la variancia de la variable aleatoria.)

DAÑO - cualquier pérdida económica o destrucción ocasionada por los terremotos.

DESVIACION ESTANDAR - la raíz cuadrada de la variancia de una variable aleatoria.

DURACION - una descripción cualitativa o cuantitativa de la duración de tiempo en el que el movimiento de tierra en un emplazamiento presenta ciertas características (perceptibilidad, temblores violentos, etc.).

EFFECTOS DE CARGA DE DISEÑO SISMICO - las acciones (fuerzas axiales, deslizamientos o movimientos de flexión) y deformaciones inducidas en un sistema estructural debido a una representación específica (historia cronológica, espectro de respuestas o deslizamiento de la base) del movimiento de tierra de diseño sísmico.

ELEMENTOS SUJETOS A RIESGO - población, propiedades, actividades económicas, incluyendo los servicios públicos, etc., sujetos a riesgo en una determinada zona.

ESPECTRO DE DISEÑO - una serie de curvas para fines de diseño que proporcionan la velocidad de aceleración o desplazamiento (de ordinario, la aceleración absoluta, la velocidad relativa o el desplazamiento relativo de una masa en vibración) en función del período de vibración y amortiguación.

ESPECTRO DE RESPUESTAS - una serie de curvas calculadas a partir de un acelerógrafo sísmico que proporciona valores de respuestas máximas de un oscilador lineal amortiguado, en función de su período de vibración y amortiguación.

ESPERADO - medio, promedio, previsto.

EVENTO NOMINAL O DE DISEÑO, EVENTO SISMICO NOMINAL O DE DISEÑO - una especificación de uno o más parámetros de fuentes de terremotos, y del lugar de la liberación de la energía con respecto al punto de interés; se utiliza para el diseño resistente a terremotos de una estructura.

EVENTO SISMICO - la liberación abrupta de energía en la litosfera terrestre que ocasiona un terremoto.

EXPOSICION - La pérdida económica posible para todas las estructuras o algunas de ellas como resultado de uno o más terremotos en una región. Este término se refiere, de ordinario, al valor asegurado de las estructuras que mantiene uno o más aseguradores. Véase "Valor en riesgo".

FALLA ACTIVA - una falla que, tomando como base la evidencia histórica, sísmológica o geológica, tiene una elevada probabilidad de producir un terremoto (Alternativa: una falla que puede producir un terremoto dentro de un período de tiempo de exposición especificado, dadas las hipótesis adoptadas para un análisis específico del riesgo sísmico).

HISTORIA CRONOLOGICA DE DISEÑO - la variación con el tiempo de movimiento de tierra (por ejemplo, la aceleración del terreno o velocidad o desplazamiento) en un lugar; se utiliza para el diseño resistente a terremotos de una estructura. Véase "Aceleración nominal o de diseño".

INDICE DE ACTIVIDAD SISMICA - el número medio por unidad de tiempo de terremotos con características específicas (por ejemplo, magnitud ≥ 6) que se origina en una falla o zona determinada.

INTENSIDAD - una medida cualitativa o cuantitativa de la gravedad de un movimiento sísmico de tierra en un emplazamiento específico (por ejemplo, intensidad Mercalli Modificada, intensidad Rossi-Forel, intensidad Espectral Houser, intensidad Arias, aceleración máxima, etc.).

INTERVALO MEDIO DE INCIDENCIA, INTERVALO DE INCIDENCIA PROMEDIO - el tiempo promedio entre terremotos o eventos de falla con características específicas (por ejemplo, una magnitud de ≥ 6) en una región específica o en una zona de falla específica.

LEY DE ATENUACION - una descripción del comportamiento de una característica del movimiento de tierra de un terremoto en función de la distancia de la fuente de energía.

LIMITE SUPERIOR - Véase "máximo posible".

MAXIMO - el valor mayor logrado por una variable durante un tiempo de exposición especificado. Véase "Valor máximo".

MAXIMO CREIBLE Estos términos se utilizan para especificar el valor máximo de una variable, por ejemplo, la magnitud de un terremoto, que pudiera esperarse que ocurra razonablemente. En opinión del Comité, son términos equívocos y no se recomienda su uso. (El U.S. Geological Survey y algunos individuos y empresas definen el terremoto máximo creíble como "el terremoto mayor que puede esperarse que ocurra razonablemente". La Oficina de Reclamación, el Primer Grupo de Trabajo Interministerial (septiembre de 1978), definió el terremoto máximo creíble como "el terremoto que ocasionaría el movimiento de tierra vibratorio más agudo capaz de ser producido en el emplazamiento dentro del actual marco tectónico conocido". Es un evento que pueden apoyar todos los datos geológicos y sismológicos conocidos. El USGS define el terremoto máximo esperable o previsto como "el mayor terremoto que puede esperarse razonablemente que ocurra". El terremoto máximo probable es definido a veces como el peor terremoto histórico. Como alternativa, es definido como el terremoto que se reproduce periódicamente cada 100 años o un terremoto que según la determinación probabilística de incidencia ocurrirá durante la vida de la estructura).

MAXIMO POSIBLE - el valor máximo posible para una variable. Sigue a una hipótesis explícita de que no son posibles valores más grandes, o implícitamente a hipótesis en el sentido de que las variables o funciones relacionadas son limitadas en su alcance. El valor máximo posible puede expresarse determinista o probabilísticamente.

MICROZONA SISMICA - una zona generalmente pequeña dentro de la que los requisitos de diseño sísmico para las estructuras son uniformes. Las microzonas sísmicas pueden presentar la amplificación relativa del movimiento del terreno debido a condiciones locales del suelo sin especificar los niveles absolutos de movimiento o peligro sísmico.

MICROZONACION SISMICA, MICROZONIFICACION SISMICA - el proceso de determinar la peligrosidad sísmica absoluta o relativa en muchos emplazamientos, tomando en cuenta los efectos de la amplificación geológica y topográfica del movimiento y de las microzonas sísmicas. Como alternativa, la microzonación es un proceso para identificar características geológicas, sismológicas, hidrológicas y geotécnicas detalladas del emplazamiento en una región específica e incorporarlas en la planificación del uso de la tierra y el diseño de estructuras seguras a fin de reducir el daño a la vida humana y la propiedad como resultado de los terremotos.

MOVIMIENTO DE TIERRA ESPERADO - el valor medio de una o más características del movimiento de tierra en un emplazamiento para un terremoto dado (movimiento medio del terreno).

PELIGRO GEOLOGICO - un proceso geológico (por ejemplo, corrimiento de tierra, suelos en licuefacción, falla activa) que durante un terremoto u otro evento natural puede producir efectos adversos sobre las estructuras.

PELIGRO SISMICO - cualquier fenómeno físico (por ejemplo, temblor de tierra, falla de tierra) asociado con un terremoto que puede producir efectos adversos sobre las actividades del hombre.

PERDIDA - cualquier consecuencia social o económica adversa ocasionada por uno o más terremotos.

PERIODO DE RETORNO MEDIO - el tiempo promedio entre incidencias de movimientos de tierra con características específicas (por ejemplo, aceleración horizontal máxima $\geq 0,1$ g) en un emplazamiento. (Igual a la inversa de la probabilidad anual de superación).

PROBABILIDAD DE SUPERACION - la probabilidad de que un nivel específico de movimiento de tierra o consecuencias sociales o económicas específicas de los terremotos sean superados en el emplazamiento en una región durante un tiempo de exposición específico.

RAIZ CUADRADA MEDIA (rms) - raíz cuadrada del valor cuadrado medio de una variable aleatoria.

RIESGO ACEPTABLE - probabilidad de consecuencias sociales o económicas debidas a terremotos que es suficientemente baja (por ejemplo, en comparación con otros riesgos naturales o creados por el hombre), para que las autoridades pertinentes juzguen que representan un análisis pragmático para determinar requisitos de diseño para estructuras de ingeniería o para adoptar ciertas medidas sociales o económicas.

RIESGO SISMICO - la probabilidad de que las consecuencias sociales o económicas de los terremotos sean iguales o superen valores específicos en un emplazamiento, en varios emplazamientos o en una zona durante un período de exposición específico.

TERREMOTO - un movimiento o vibración repentino de la tierra ocasionado por la liberación abrupta de energía en la litosfera terrestre. El movimiento de las ondas puede oscilar entre violento en algunos lugares e imperceptible en otros.

TERREMOTO NOMINAL O DE DISEÑO - una especificación del movimiento sísmico de tierra en un emplazamiento; se utiliza para el diseño resistente a los terremotos de una estructura.

TIEMPO DE EXPOSICION - el período cronológico de interés para cálculos de riesgos sísmicos, cálculos de la peligrosidad sísmica o diseño de estructuras. Para las estructuras, el tiempo de exposición se selecciona a menudo de forma que sea igual a la vida de diseño de la estructura.

VALOR B - un parámetro que indica la frecuencia relativa de incidencia de terremotos de distintas magnitudes. Es la pendiente de una línea recta que indica la frecuencia absoluta o relativa (trazada logarítmicamente) frente a la magnitud del terremoto o intensidad meissosísmica Mercalli Modificada. (El valor B indica la pendiente de la relación de periodicidad Gutenberg-Richter).

VALOR EN RIESGO - la pérdida económica posible (asegurada o no) a todas las estructuras o cierto juego de estructuras como resultado de uno o más terremotos en una región. Véase "Exposición".

VALOR TOPE O MAXIMO - el valor máximo de una variable dependiente del tiempo durante un terremoto.

VARIABLE DE FUENTE - una variable que describe una característica física (por ejemplo, magnitud, descenso en esfuerzo, momento sísmico, desplazamiento) de la fuente de liberación de la energía que ocasiona un terremoto.

VARIANCIA - la desviación media al cuadrado de una variable aleatoria de su valor promedio.

VULNERABILIDAD - el grado de pérdida a un elemento dado sujeto a riesgo, o una serie de esos elementos, como resultado de un terremoto de una determinada magnitud o intensidad, que de ordinario se expresa en una escala de 0 (sin daño) a 10 (pérdida total).

ZONA DE DISEÑO SISMICO - zona sísmica.

ZONA SISMOGENAS - un término anticuado. Véase "Zona sismogénica" y "Zona sismotectónica".

ZONA DE RIESGOS SISMICOS - un término anticuado. Véase "Zonas sísmicas".

ZONA SISMICA - una zona generalmente grande dentro de la cual los requisitos de diseño sísmico para las estructuras son constantes.

ZONA SISMOGENICA, PROVINCIA SISMOGENICA - una representación planar de un ambiente de tres dimensiones en la litosfera terrestre en el que se infiere que los terremotos tendrán un origen tectónico análogo. Una zona sismogénica puede representar una falla en la litosfera terrestre. Véase "Zona sismotectónica".

ZONA SISMOTECTONICA, PROVINCIA SISMOTECTONICA - una zona sismogénica en la que se han identificado los procesos tectónicos que ocasionan los terremotos. Estas zonas son, de ordinario, zonas de falla.

ZONACION SISMICA, ZONIFICACION SISMICA - el proceso de determinar la peligrosidad sísmica en muchos emplazamientos para fines de delineación de zonas sísmicas.

ZONACION SISMOGENICA - el proceso de delinear regiones que tienen un carácter tectónico y geológico casi homogéneo, para los fines de trazar zonas sismogénicas. Los procedimientos específicos utilizados dependen de las hipótesis y modelos matemáticos empleados en el análisis de riesgo sísmico y el análisis de peligrosidad sísmica.

APPENDIX B

STRONG-MOTION ACCELEROGRAPH STATIONS
IN PUERTO RICO, APRIL 1986

<u>STATION</u>	<u>INSTRUMENT</u>	<u>COORDINATES</u>	<u>OWNER*</u>	<u>COMMENTS</u>
Arecibo Electrical Service Cntr	SMA-2221	18.48°N 66.64°W	PRWR	Ground Level
Humacao Switchyard	SMA-2223	18.15°N 65.82°W	PRWR	Ground Level
Mayaguez Airport Sewage Plant	SMA-1729	18.26°N 67.15°W	FOPR	Ground Level
Ponce Cerrillos Damsite Downstream	SMA-3959	18.08°N 66.58°W	COE	Ground Level
San Juan Capacete - Martin Co. Office Building	SMA-1223	18.41°N 66.10°W	CIAA	Ground Level
San Juan Minillas Govt Center 17th Floor	SMA-1219	18.45°N	CIAA	Minimal Structural Instrumentation
Basement	SMA-1232	66.07°W		
San Juan Port Authority	SMA-1218	18.46°N 66.09°W	CIAA	Ground Level
San Juan V.A. Hospital	SMA-846	18.41°N 66.09°W	VA	Basement

*CIAA Colegio de Ingenieros Arquitectos y Agrimensores de Puerto Rico
COE Corps of Engineers
FOPR Fomento Puerto Rico Industrial Development Corporation
PRWR Puerto Rico Water Resources Authority
VA Veterans Administration

1408 40004

APPENDIX C

FEMA'S EARTHQUAKE HAZARDS REDUCTION PUBLICATIONS

Since 1985, FEMA has developed the Earthquake Hazards Reduction Series to assist local governments in their efforts to improve earthquake preparedness, response, and mitigation. These publications have been widely disseminated at conferences, workshops, and through mailings. They are available from FEMA headquarters in Washington, D.C.. They are comprehensive in scope and include the following titles:

- Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage: A Practical Guide, Earthquake Hazards Reduction Series 1 (1985).
- Comprehensive Earthquake Preparedness Planning Guidelines: City, Earthquake Hazards Reduction Series 2 (1985).
- Comprehensive Earthquake Preparedness Planning Guidelines: County, Earthquake Hazards Reduction Series 3 (1985).
- Comprehensive Earthquake Preparedness Planning Guidelines: Corporate, Earthquake Hazards Reduction Series 4 (1985).
- Earthquake Preparedness Information for People with Disabilities: Earthquake Hazards Reduction Series 5 (1985).
- Pilot Project for Earthquake Hazard Assessment, Earthquake Hazards Reduction Series 6 (1985).
- Earthquake Insurance: A Public Policy Dilemma, Earthquake Hazards Reduction Series 7 (1985).
- Earthquake Public Information Materials: An Annotated Bibliography, Earthquake Hazards Reduction Series 8 (1985).
- Societal Implications: A Community Handbook, Earthquake Hazards Reduction Series 13 (1985).
- Societal Implications: Selected Readings, Earthquake Hazards Reduction Series 14 (1985).
- Proceedings: Workshop on Reducing Seismic Hazards to Existing Buildings, Earthquake Hazards Reduction Series 15 (1985).
- An Action Plan for Reducing Earthquake Hazards of Existing Buildings, Earthquake Hazards Reduction Series 16 (1985).
- NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings: Part 1: Provisions and Part 2: Commentary: Earthquake Hazards Reduction Series 17 and 18 (1986).
- State and Local Earthquake Hazards Reduction: Implementation of FEMA Funding and Support, Civil Preparedness Guide 2 (1985).

1438 40004
✓

PARTICIPANT LIST FOR
WORKSHOP ON "ASSESSMENT OF GEOLOGIC HAZARDS AND RISK IN PUERTO RICO
CARIBE HILTON, SAN JUAN, PUERTO RICO
MAY 14-16, 1986

Lcda. Zenaida Acosta
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Angel M. Adorno Castro
Puerto Rico Telephone Company
Ave. Roosevelt 1500 - Piso 12
G.P.O. 998
San Juan, Puerto Rico 00936

Ramon Alonso
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Amelia Arbona
Department of Housing
10 M. A. 606 Barbosa Avenue
Hato Rey, Puerto Rico 00909

Sonia Arbona
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Jose A. Berrios
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Luis M. Berrios
Puerto Rican-American Insurance Company
P.O. Box St. 112
San Juan, Puerto Rico 00902

Nellie Betancourt Aponte
606 Barbosa Avenue
Department of Housing
Hato Rey, Puerto Rico 00909

Luis E. Biaggi Balbuena
Puerto Rico Planning Board
Minillas Station, Box 41119
Santurce, Puerto Rico 00940-9985

Juan A. Bonnet, Jr.
Center for Energy and Environment Research
G.P.O. Box 3682
San Juan, Puerto Rico 00936

J. M. Canaan
Puerto Rico Electric Power Authority
Eng. Division
GPO Box 4267
San Juan, Puerto Rico 00936

Cesar S. Canals
Principal-Cesar S. Canals Associates
Consulting Engineers
P.O. Box 13931
Santurce, Puerto Rico 00908

Alejandro Candelario
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Ruth M. Carrerass
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Hector Cruz
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Jose A. Delgado Rodriguez
State Civil Defense Agency
Box 5127, Pta. de Tierra Station
San Juan, Puerto Rico 00906

Nicolino Libeostore
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Victor M. Marquez Aponte
Puerto Rico Highway Authority
Centro Minillas
Santruce, Puerto Rico

Gustavo Martinez
Professional Underwriters
Insurance Company
R. H. Todd # 500
G.P.O. Box 4744
San Juan, Puerto Rico 00936

Jose A. Martinez Crusado
University of Puerto Rico
Mayaguez Campus
G.P.O. Box 1381
Mayaguez, Puerto Rico 00709

William R. McCann
Lamont-Doherty Geological Observatory
Route 9W
Palisades, New York 10964

Alvaro Morales
Environmental Quality Board
Box 11488
Santurce, Puerto Rico 00910

Herman Muniz Santi
Department de Terrenos y Edificios
University of Puerto Rico
Apartado A0, UPR Station
Rio Piedras, Puerto Rico 00936

Boris Oxman
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Hector Padilla
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Rosalyn Panet
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Francisco Pumarejo
Department of Housing
606 Barbosa Avenue
Hato Rey, Puerto Rico 00909

Nestor R. Ramiez Ortiz
Public Building Authority
Box 40143 Minillas Station
Santurce, Puerto Rico 00940

Angel L. Rivera
Department of Consumer Affairs
Box 41059, Minillas Station
Santurce, Puerto Rico 00940

Daniela Rocha
Oficina de planificacion y Desarralla
Universidad de Puerto Rico
Box 21926 UPR Station
Rio Piedras, Puerto Rico 00936

Jose Rodriquez
Puerto Rico Turta de Planificacion
Planning Board
Ceatro Gabernanental Minillas
Santurce Puerto Rico

Eng. Gamalier
Rodriquez Mercado
Municipality of Cagus
Box 907
Caguas, Puerto Rico 00625

Enrique Ruiz Miranda, P.E.
President-Colegio de Ingenieros y
Agrimensores de Puerto Rico
Apartado 3845
San Juan, Puerto Rico 00936

Victor A. Santiago
Inter American University of Puerto Rico
G. P. O. Box 3255
San Juan, Puerto Rico 00936

David Schwartz
U.S. Geological Survey
345 Middlefield Road, MS 977
Menlo Park, California 94025

Bernardo Deschappelles
Molina, Garcia & Associates
G. P. O. 4167
San Juan, Puerto Rico 00936

Samuel I. Diaz Hernandez
Structural Consultant
Santa Angela 1634
Sagrado Corazon
Rio Piedras, Puerto Rico 00926

Luis E. Diaz-Hernandez
Catholic University of Puerto Rico
History Department
Ponce, Puerto Rico 00732

A. Rosa Fernandez-Munoz
Insurance Broker
P.O. Box 13535
Santurce, Puerto Rico 00908

Oetavio Franco
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Manuel Garcia Morin
Inter American University of Puerto Rico
Office of the President
G.P.O. Box 3255
San Juan, Puerto Rico 00936

Odniel Gonzalez
Highway Authority
Head, Soils Engineering Office
#155 Barbosa Avenue
Hato Rey, Puerto Rico 00918

Hildelisa Gonzalez
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Jose E. Gonzalez Jr.
Antilles Insurance Company
P.O. Box 3507
Old San Juan
San Juan, Puerto Rico 00904

Paula L. Gori
U.S. Geological Survey
905 National Center
Reston, Virginia 22092

Andrea Hagler
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Walter W. Hays
U.S. Geological Survey
905 National Center
Reston, Virginia 22092

Jorge Hidalgo
Jorge Hidalgo & Associates
P.O. Box 11506 Caparra Station
San Juan, Puerto Rico 00922

Randall W. Jibson
U.S. Geological Survey
922 National Center
Reston, Virginia 22092

Rafael Jimenez - Perez
Univeristy of Mayaguez
Mayaguez, Puerto Rico 00708

James Joyce
Department of Geology
Univeristy of Puerto Rico
Mayaguez, Puerto Rico 00708

Carla J. Kitzmiller
U.S. Geological Survey
905 National Center
Reston, Virginia 22092

Richard W. Krimm
Federal Emergency Management Agency
500 C Street, S.W.
Washington, D.C. 20470

Jose G. Lebron
Oficina de planificacion y Desarralla
Universidad de Puerto Rico
box 21926 UPR Station
Rio Piedras, Puerto Rico 00936

Robert A. Shuman
Box 1393
Hato Rey, Puerto Rico 00919

Alejandro E. Soto
Department of Geology
University of Puerto Rico-Mayaguez
Department Geologia - RUM
Mayaguez, Puerto Rico 00708

Rafael Tihinez Perez
Department of Ingenieria Civil
University of Puerto Rico
Mayaguez Campus, Puerto Rico

Elba I. Torres
Puerto Rico Highway Authority
Calle Rio Caguaitas L-2
Riohondo
Bayamon, Puerto Rico 00619

Mariano Vargas
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

William Vazquez
Metmor Financial, Inc.
Caribbean Division
431 Ponce de Leon Avenue
Hato Rey, Puerto Rico 00917

Eng. Eduardo Veguilla
Municipality of Caguas
Box 907
Caguas, Puerto Rico 00626

Santini Victarm
Departamento vivienda
606 Barbosa Avenue
Hato Rey
Rio Piedras, Puerto Rico 00909

Maribel del Toro
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Genaro del Valle
Secretario de la Vivienda
Department of Housing
606 Barbosa Avenue
Hato Rey, Puerto Rico 00909

Dr. Hermenegildo Ortiz
Graduate School of Planning
University of Puerto Rico
Rio Piedras, Puerto Rico 00928

Dr. Fernando Zalacain
Econometric Systems
Gardenia CC-29
Borinquen Gardens
Rio Piedras, Puerto Rico 00926

Miguel Santiago
University of Puerto Rico
Mayaguez, Puerto Rico 00709

Dr. Miguel Santiago
University of Puerto Rico
Box 5089 College Station
Mayaguez, Puerto Rico 00708

Alejandro Santiago Nieves
Department of Natural Resources
Box 5887
Puerta de Tierra
San Juan, Puerto Rico 00906

Mr. Carlos Rodriguez Molina
Soil Testing Inc.
P.O. Box 3967
San Juan, Puerto Rico 00936

CONFERENCES TO DATE

Conference I	Abnormal Animal Behavior Prior to Earthquakes, I Not Open-Filed
Conference II	Experimental Studies of Rock Friction with Application to Earthquake Prediction Not Open-Filed
Conference III	Fault Mechanics and Its Relation to Earthquake Prediction Open-File No. 78-380
Conference IV	Use of Volunteers in the Earthquake Hazards Reduction Program Open-File No. 78-336
Conference V	Communicating Earthquake Hazard Reduction Information Open-File No. 78-933
Conference VI	Methodology for Identifying Seismic Gaps and Soon-to- Break Gaps Open-File No. 78-943
Conference VII	Stress and Strain Measurements Related to Earthquake Prediction Open-File No. 79-370
Conference VIII	Analysis of Actual Fault Zones in Bedrock Open-File No. 79-1239
Conference IX	Magnitude of Deviatoric Stresses in the Earth's Crust and Upper Mantle Open-File No. 80-625
Conference X	Earthquake Hazards Along the Wasatch and Sierra-Nevada Frontal Fault Zones Open-File No. 80-801
Conference XI	Abnormal Animal Behavior Prior to Earthquakes, II Open-File No. 80-453
Conference XII	Earthquake Prediction Information Open-File No. 80-843
Conference XIII	Evaluation of Regional Seismic Hazards and Risk Open-File No. 81-437
Conference XIV	Earthquake Hazards of the Puget Sound Region, Washington Open-File No. 83-19
Conference XV	A Workshop on "Preparing for and Responding to a Damaging Earthquake in the Eastern United States" Open-File No. 82-220
Conference XVI	The Dynamic Characteristics of Faulting Inferred from Recording of Strong Ground Motion Open-File No. 82-591
Conference XVII	Hydraulic Fracturing Stress Measurements Open-File No. 82-1075
Conference XVIII	A Workshop on "Continuing Actions to Reduce Losses from Earthquakes in the Mississippi Valley Area Open-File No. 83-157
Conference XIX	Active Tectonic and Magmatic Processes Beneath Long Valley Caldera, Eastern California Open-File No. 84-939
Conference XX	A Workshop on "The 1886 Charleston, South Carolina, Earthquake and its Implications for Today" Open-File No. 83-843

Conference XXI	A Workshop on "Continuing Actions to Reduce Potential Losses from Future Earthquakes in the Northeastern United States" Open-File No. 83-844
Conference XXII	A Workshop on "Site-Specific Effects of Soil and Rock on Ground Motion and the Implications for Earthquake-Resistant Design" Open-File No. 83-845
Conference XXIII	A Workshop on "Continuing Actions to Reduce Potential Losses from Future Earthquakes in Arkansas and Nearby States" Open-File No. 83-846
Conference XXIV	A Workshop on "Geologic Hazards in Puerto Rico" Open-File No. 84-761
Conference XXV	A Workshop on "Earthquake Hazards in the Virgin Islands Region" Open-File No. 84-762
Conference XXVI	A Workshop on "Evaluation of the Regional and Urban Earthquake Hazards in Utah" Open-File No. 84-763
Conference XXVII	Mechanics of the May 2, 1983 Coalinga Earthquake Open-File No. 85-44
Conference XXVIII	A Workshop on "The Borah Peak, Idaho, Earthquake" Open-File No. 85-290
Conference XXIX	A Workshop on "Continuing Actions to Reduce Potential Losses from Future Earthquakes in New York and Nearby States" Open-File No. 85-386
Conference XXX	A Workshop on "Reducing Potential Losses From Earthquake Hazards in Puerto Rico" Open File No. 85-731
Conference XXXI	A Workshop on "Evaluation of Regional and Urban Earthquake Hazards and Risk in Alaska" Open File No. 86-79
Conference XXXII	A Conference on "Future Directions in Evaluating Earthquake Hazards of Southern California" Open-File No. 86-401
Conference XXXIII	A Workshop on "Earthquake Hazards in the Puget Sound, Washington Area" Open-File No. 86-253
Conference XXXIV	A Workshop on "Probabilistic Earthquake-Hazards Assessments" Open-File No 86-185
Conference XXXV	A Workshop on "Earth Science Considerations for Earthquake Hazards Reduction in the Central United States" Open-File Report 86-425
Conference XXXVI	A Workshop on "Assessment of Geologic Hazards and Risk in Puerto Rico" Open-File Report 87-008

For information on ordering the above publications, please contact:
U.S. Geological Survey, Books and Open-File Reports Service Section, Federal Center, Building 41, Box 25425, Federal Center, Denver, Colorado 80225

Imp.

E-2

14C4 40064