

302/9

302/7

SELECTING SAFE BUILDING SITES IN  
SESIMICALLY ACTIVE AREAS OF DEVELOPING COUNTRIES

Loren A. Raymond  
INTERTECT  
Box 10502  
Dallas, Texas, USA  
and  
Department of Geology  
Appalachian State University  
Boone, N.C. 28608

ABSTRACT

Loss of life and property as a result of earthquakes can be significantly reduced through appropriate design and construction of structures on relatively safe sites. Structural-seismic factors, topographic factors, and lithologic factors should all be evaluated by a geologist and an engineer in the site selection process. Active faults, landslides, and poorly consolidated soils must be avoided as building sites. In developing countries, geologists and engineers are not always available for site selection, especially during post-disaster reconstruction. Paraprofessionals, trained by a knowledgeable instructor, may employ specific criteria designed to avoid major problem areas when professional geologists and engineers are not available for site selection. Although the selected sites may have deficiencies, a carefully employed site selection process should significantly reduce earthquake losses.

INTRODUCTION

Preventable deaths resulting from earthquakes occur every year somewhere in the World. On the average, 10,000 people lose their lives in earthquakes annually (Bolt and others, 1975). In some years, for example in 1976, the number of fatalities totals hundreds of thousands. Ultimately, prevention of such deaths will be possible when we develop an earthquake prediction

capability and implement worldwide earthquake warning systems. Implementation of such systems will take years. In the interim, however, the number of earthquake related deaths can be significantly reduced through appropriate design and construction of structures on relatively safe sites.

Property losses can also be reduced. Between 1926 and 1950, UNESCO estimated an average annual property loss of \$400,000,000 (US) (Bolt and others, 1975; p. 7). These annual losses are increasing with increasing development. Single earthquakes now may cause similar amounts of property loss. For example, the 1960 Chilean earthquakes cost \$300,000,000 (U.S.) in housing alone (Flores, 1969), the 1964 Alaskan earthquake resulted in \$310,000,000 (U.S.) worth of property damage (Bolt and others, 1975, p. 7), and the preliminary estimates of damage in the 1976 Guatemalan earthquake totaled \$1,100,000,000 (U.S.) (Espinosa, 1976).

Many countries in seismically active regions have initiated programs to reduce losses of life and property. One early step in such programs is to develop seismic risk maps, maps showing areas of relatively high and low risk with respect to potential earthquake damage (Algermissen, 1969; Lomnitz, 1969; Housner and Jennings, 1974). In addition, detailed maps may be prepared for areas of special concern (e.g. major cities or seaports) (Kuroiwa and others, 1974). These maps provide a base for the detailed geological and engineering studies necessary for thorough site selection analyses.

The value of seismic and earthquake engineering studies, especially in developing countries, was underscored by Flores (1969). Earthquakes can create damage worth the equivalent of the national budget of a developing country. Flores indicates that regulation of construction in Chile prior to

the 1960 earthquakes resulted in a 25% (\$100,000,000 U.S.) decrease in damage relative to pre-regulation projections. Had all houses conformed to applicable standards, losses would have been reduced by 75% or \$300,000,000 U.S.

Damage to the spirit of the people can also be prevented through reduction of losses in property and life. A loss of morale can critically influence the reconstruction efforts and economic growth of a country and should not be ignored. In this paper, I delineate criteria for selecting safe building sites in seismically active areas, as one facet of an approach to reducing property damage, loss of life, and resultant loss of morale.

#### SITE SELECTION FACTORS

Factors important in selecting safe construction sites, whether they be sites for single houses or sites for entire towns, may be categorized into three groups -- structural and seismic factors, topographic factors, and lithologic factors. In long range programs of construction or reconstruction, all factors from each group should be evaluated by a team of geologists and engineers. Where this is not possible, paraprofessionals, trained by a knowledgeable instructor, may use a set of detailed guidelines to select sites which are devoid of obvious flaws.

Structural and Seismic Factors. The seismicity of an area, both recent and historical, is of critical importance in site selection. Studies of recent earthquakes can provide evidence for evaluation of: (1) the location of active faults; (2) the maximum ground acceleration (shaking) expected in a given area; (3) the type of damage (Mercalli intensities) expected on different foundation materials and for different structures for earthquakes

of varying magnitude; and (4) the short term frequency of damaging earthquakes. These recent data can then be combined with historical data to provide a historical record of damaging earthquakes and, with geological data, an estimate of the design earthquake, the earthquake which would give the most severe shaking at a given site (Bolt and others, 1975, p. 48).

Seismicity should not be estimated solely on the basis of historical earthquake activity, however (Allen, 1975; 1978). Topographic, lithologic, and structural data can reveal pre-historic (Holocene and Quaternary) activity on faults. The data expand the seismic record for an area and allow a more thorough analysis of seismic risk, as virtually all large earthquakes (Magnitude >6.0) occur on faults recognizable through field studies (Allen 1978). Thus, active faults may be recognized on the basis of geological, as well as geophysical evidence.

In the United States, the Nuclear Regulatory Commission has defined "capable faults." These are faults thought to be "capable of causing movement at or near the ground surface or generating high vibratory ground motion" (Jackson and others, 1977). The recognition of a capable fault depends on seismic and geological evidence, as capable faults are defined as those faults with recurrent movement history in the past 500,000 years and/or tectonic activity within the past 35,000 years (Jackson and others, 1977). Because historical records extend for only a few hundred or thousand years, geological studies, based on field work, clearly contribute to thorough seismic risk analyses and site selection.

Geological field studies reveal a multitude of important features. For seismic risk studies, evaluation of length of fault rupture is important

in estimating Richter magnitude (Housner, 1969, Bolt and others, 1975, p. 27, 48). Offset stream channels, faulted alluvial and other Quaternary deposits, fault scarps, and sag ponds provide evidence of recent and potentially active or capable faults and should be included in the seismic risk analysis.

In terms of site selection, data indicative of an active or capable fault are important in evaluating the geological structure of an area. Such evidence should be summarized on a geologic map, which, like the seismic risk map, provides a basis for detailed site selection studies. The geologic map should also include data on the age of rock units offset by faults and careful plots of all landslides.

Using the seismic risk and geologic maps as a basis, the geologist and engineer can evaluate the area in which a site is to be selected. Structural features that should be evaluated in the local study include faults and joints. Recognition (and mapping) of the exact location of active or capable faults in the area, location of older faults and their related features, and evaluation of joint systems are all aspects of a thorough analysis. Active or capable faults and the associated zones of crushed rock must be avoided as building sites, as rupture may occur anywhere within the fault zone destroying structures built on the line of fracture (e.g. Lawson and others, 1908). In addition, the crushed rock materials along the zone provide poor foundations. Dead or inactive faults should also be avoided, as these fault zones also contain weak foundation materials. Further, some faults, such as the San Andreas fault of California, have a long history of movement (Hill and Dibblee, 1953) and others have presumably been reactivated during later tectonic events (e.g. Roper and

Justus, 1973).

Criteria useful for the recognition of faults have been summarized by many authors, including Billings (1972). Structural features of note include:

- (1) offset rock layers;
- (2) truncated rock layers;
- (3) slickensides; and
- (4) zones of gouge, breccia, mylonite, or "horses".

Zones containing such features must be rejected as building sites (Figure 1).

Joints are fractures along which no significant movement has occurred. However, highly jointed bedrock does not provide a strong foundation for a structure. In addition, where joints are arranged so as to weaken slope materials, they may lead to landslides (Figure 2). Consequently, it is important to examine potential sites for flaws imparted by jointed rock.

Topographic Factors. The topography--the relief, contour, and slope of the land--can provide many clues to the relative safety of a site. Topographic factors relate to site safety in two ways. First, many topographic features reflect underlying faults. Second, certain sites are unsuitable for construction in seismically active areas because of the topographic considerations alone.

Underlying faults are expressed in the topography by a variety of features. These include offset stream valleys and ridges, truncated ridges (spurs), fault scarps and fault-line scarps (localized steep linear slopes), linear series of springs, linear groups of marshes or ponds (sag ponds), visible zones of surface cracking or offset of man-made objects (e.g. roads or canals), and topographic lineaments such as unusually straight stream or river valleys. Prospective sites should be examined for such

features and sites along the line of any group of such features should be avoided (Figure 3).

In addition to the topographic factors listed above, i.e. those that reflect underlying faults (or joints), sites in certain topographic situations should be avoided for reasons of their own. The Guatemala earthquake of 1976 produced thousands of landslides, many of which resulted in loss of life and property. In Peru, the potential hazard posed by landslides is well known, in part as a result of the Huascarán debris avalanche that buried Yungay (Plafker and others, 1971). Therefore, sites immediately above, within, or below presently developed landslides should be avoided. In addition, sites should be avoided where the landslide potential is great as a result of structural factors (e.g. extensive faulting or jointing), stratigraphic factors (e.g. jointed resistant rock masses overlying weak rock masses that are tilted towards a valley), and topographic factors (e.g. oversteepened slopes).

Relief and slope are critical factors to evaluate in relation to the potential for earthquake generated landslides at a site. In Guatemala, many lives were lost where structures were erected adjacent to cliffs, very steep slopes, or large gullies (barrancas). For example, at Estancia de la Virgen near San Martín, reportedly eleven families were carried with their homes into the Río Pixcayá when the cliff adjacent to the river collapsed during the earthquake. In Guatemala City, residential areas adjacent to barrancas suffered more intensive damage than surrounding areas, probably as a result of amplified ground motion. Here, some individuals lost their lives as a result of landsliding. As a general rule, construction adjacent to cliffs or barrancas or on or near slopes

steeper than  $35^{\circ}$  (75% grade) should be avoided (Figure 4).

Sites on high and especially narrow ridges should also be avoided. High and narrow ridges are known to experience amplified ground shaking (Nason, 1971; Everingham, 1974), which results in greater damage. In addition, narrow ridges are subject to landslides on both sides, a condition developed during the 1976 Guatemalan earthquake in Las Venturas (San Martín), along the San Martín-Chimaltenango road, and along the El Tablón-Las Flores road.

Valley bottoms may also be hazardous. The hazard at such sites is only indirectly related to the topography. Landslides from above provide one type of hazard, especially in narrow, steep walled valleys. The second type of hazard is related to the lithology of the rock or soil in the valley bottom. It is well known that poorly consolidated materials lead to increased earthquake damage (e.g. Lawson and others, 1908; Cluff, 1971). Thus lithologic factors must be evaluated at such sites.

Valley bottoms may also be subject to flooding. For example, the 1976 Guatemalan earthquake produced landslides that dammed at least four major rivers. The 1970 earthquake produced a similar phenomenon in Peru (Plafker, 1971). Landslide dams produced flooding upstream and, if they subsequently collapse, flooding also occurs downstream. Although accounting for the flood factor is difficult because of the many potential sites for landsliding along major rivers and streams, where nearby slides or areas of potential sliding occur, they should be taken into account during the site selection process.



Lithologic Factors. The importance of the lithology of the foundation material at building sites is very important. Solid bedrock provides the best foundation for structures. That damage increases with decreasing strength and cohesion of foundation materials has been revealed by numerous post-earthquake studies (Duke, 1960; Hansen, 1965; Lee and Mange E., 1968, Lomnitz. and Cabré, 1968; Mange E., 1969). Therefore, a thorough site selection study should include a civil engineer's or soil scientist's study of the soils and/or a geologist's evaluation of the bedrock, depending on local conditions.

Hard crystalline rock types provide much firmer foundations than poorly consolidated sediments or pyroclastic rocks. Many of the landslides in Guatemala occurred in weak pyroclastic materials which crumbled on shaking. Glaciofluvial and other similar deposits of the Rio Santa Valley of Peru are subject to similar failure (Plafker, 1971). Granitic rocks, gneiss, metasandstones and similar rocks are preferred as foundation materials to sedimentary rocks. In general, poorly consolidated, weak, wet, organic-rich soils or alluvial deposits should be avoided.

Where sites must be selected in alluvial materials, thin, well compacted dry soils with silty layers provide better foundations than the wet, poorly consolidated soils. Thixotropic clays and highly saturated sands, even at considerable depth below a building site, will make the site unstable and subject to settling or sliding. Turnagain Heights, Alaska, where a whole section of houses slid towards the sea, was constructed in an area with underlying thixotropic clay (Hansen, 1965).

#### SITE SELECTION BY PARAPROFESSIONALS

In post-disaster situations and under other circumstances where

geologists and engineers are not available for long term site selection, paraprofessionals may be trained to make site selections based on a list of criteria. In Appendix A, I present such a list. The list emphasizes easily recognized features and is designed to allow elimination of at least the most dangerous sites.

Building sites completely devoid of dangerous geological conditions are difficult to find. This is especially true in mountainous terrains near continental margins where active volcanism and tectonism are occurring. The geologist and/or engineer ranks the relative dangers of the various negative factors for various sites in a given area during the site selection evaluation. The paraprofessional will generally be unable to make such a ranking, because of limited experience and training. Thus, the paraprofessional must rely on the list of criteria (Appendix A).

In spite of these limitations, the most dangerous sites may be eliminated from consideration by the paraprofessional and some reduction in property loss and the number of deaths due to earthquakes may be realized in reconstructed or newly developed areas. Such reductions can be expected, if careful attention is paid to structural-seismic, topographic, and lithologic criteria during the site selection process.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

I thank C. Lomnitz and E. Rosenblueth for providing me with information and S.E. Swanson, L. Diaz, C. Muirhead for assistance in preparing this paper.

APPENDIX A - SOME CRITERIA FOR A GOOD  
BUILDING SITE

1. Relatively flat
  - a. Not on narrow ridge
  - b. Not on steep slope
  - c. Not in narrow valley
  - d. No nearby cliffs or large gullys (within 150 m)
2. Hard bedrock present at or near the surface.
3. Landslides unknown in immediate area.
4. Evidence of active fault absent
  - a. Lacks offset rock layers.
  - b. Lacks row of ponds or swamps.
  - c. Lacks deep or long cracks in ground.

Figure Captions

- Figure 1. Countryside showing dangerous and safe building sites with respect to a fault zone with breccia and gouge (broken rock), offset beds (layers), and a scarp (steep slope).
- Figure 2. Sketch showing unstable slope resulting from joint system.
- Figure 3. Sites near straight streams and sag ponds may be unsafe, as these features may be found along active faults.
- Figure 4. Building sites should be selected away from the edges of cliffs or barrancas.

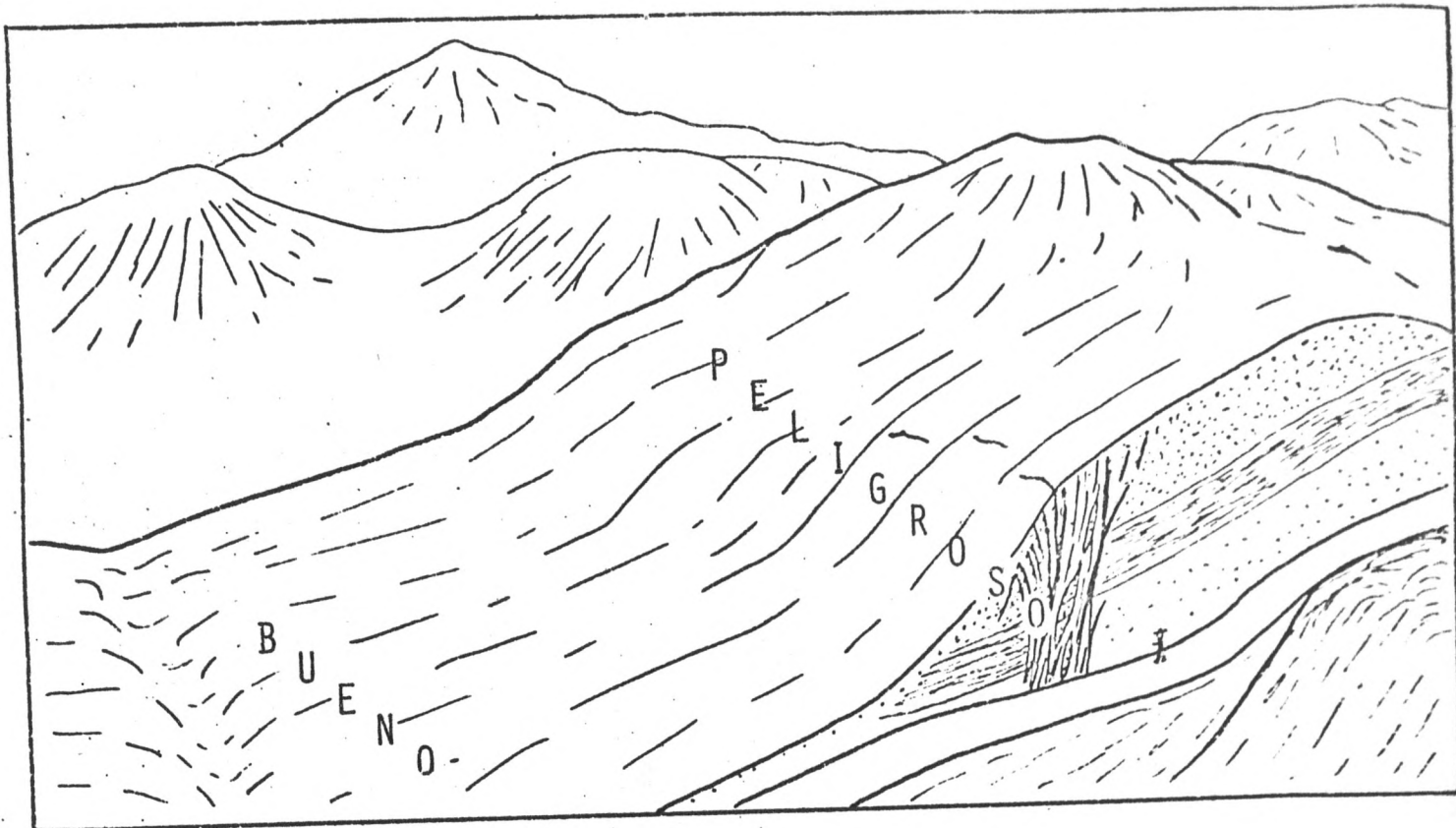


Figure 1.

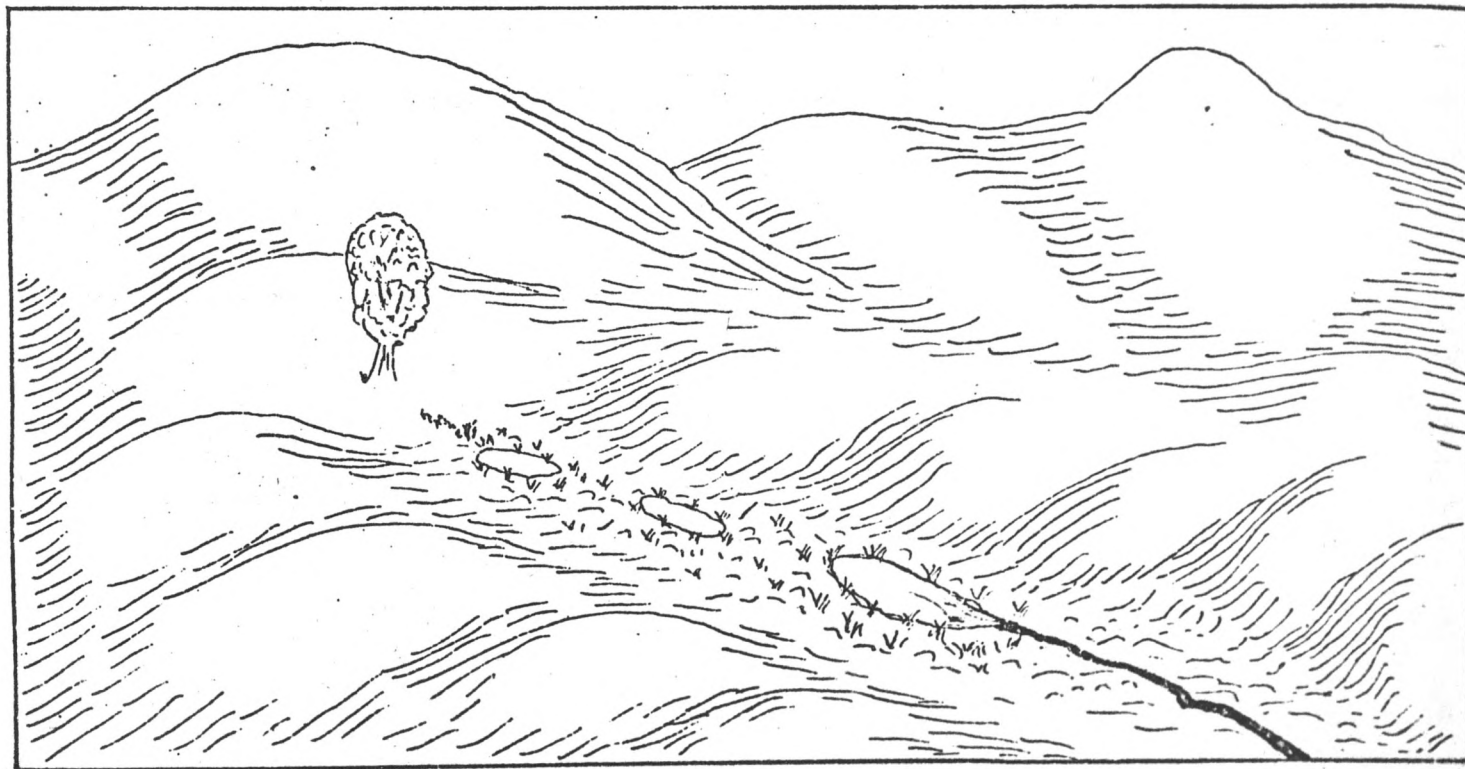


Figure 2.

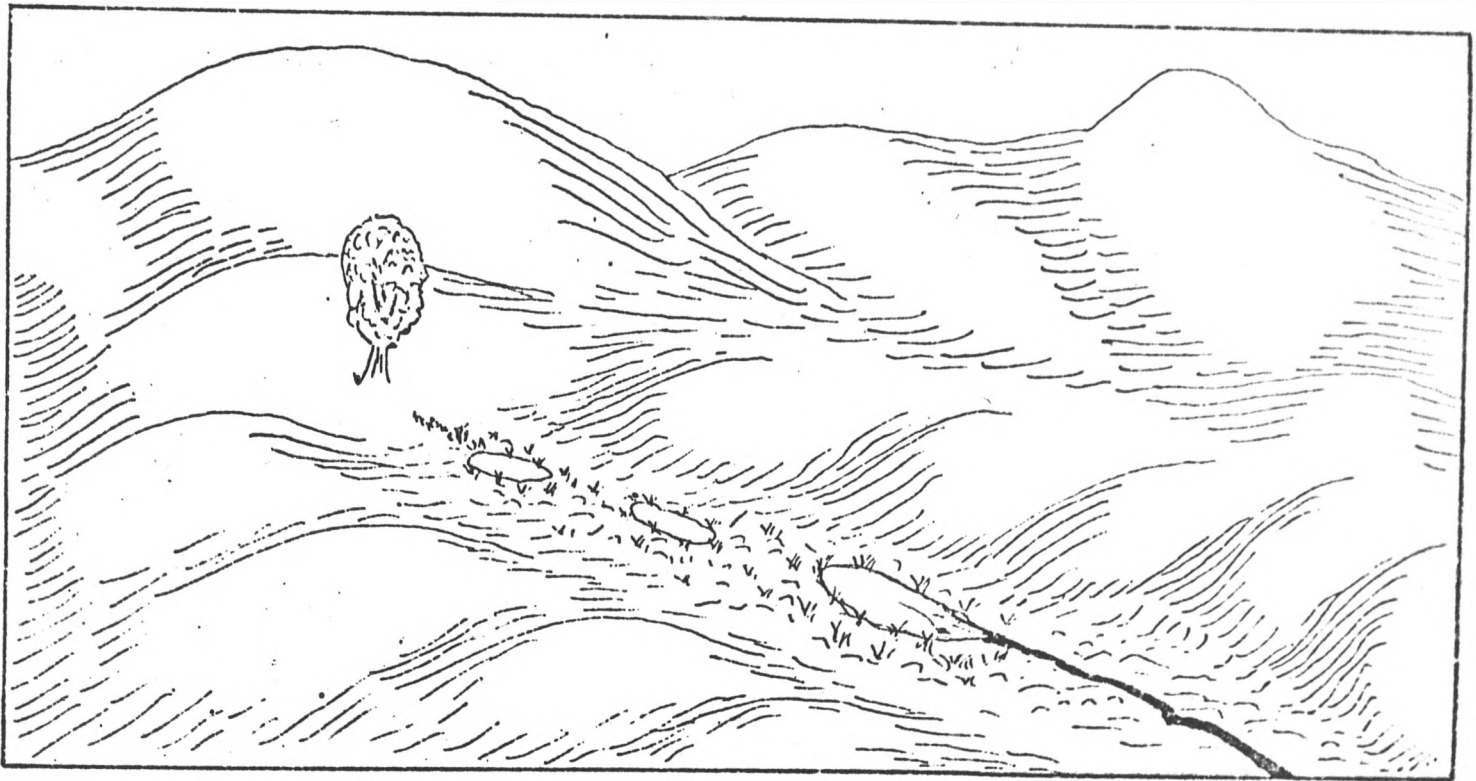


Figure 3.

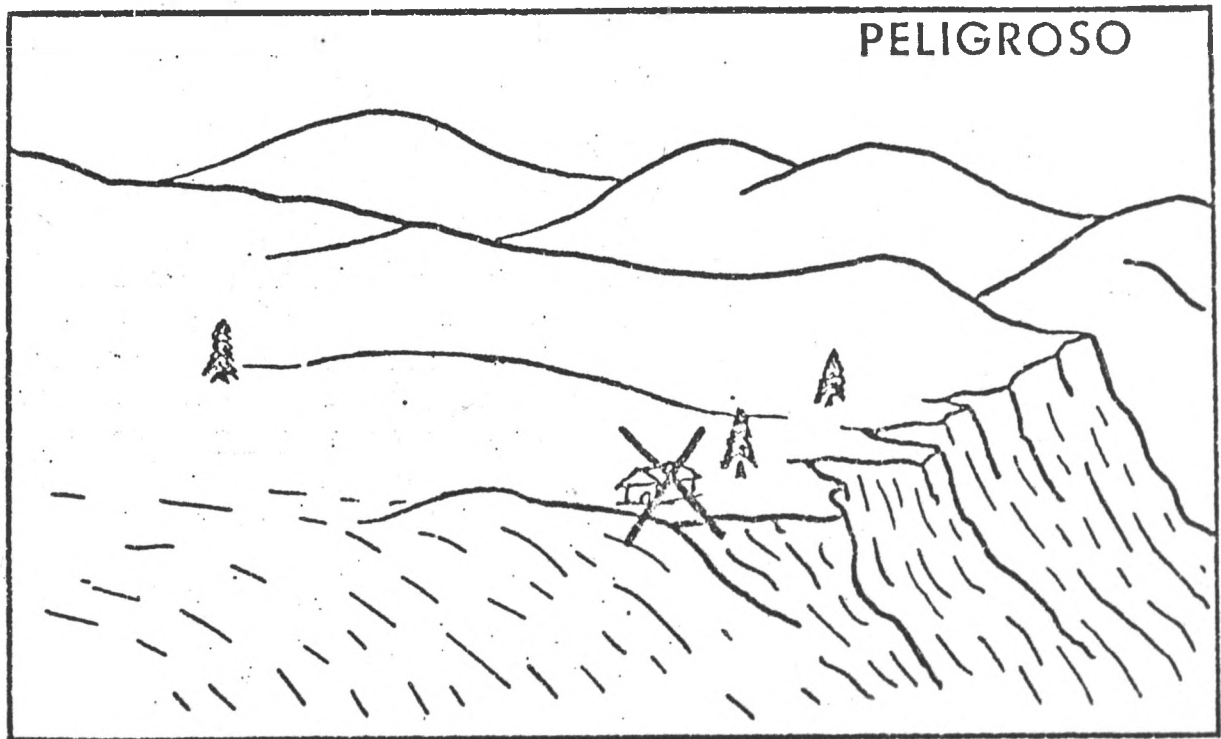


Figure 4.

REFERENCES CITED

- Algermissen, S.T., 1969, Seismic risk studies in the United States: Proc. 4th World Conf. Earthquake Engr., v. I, p. 14-27.
- Allen, C.R., 1975, Geologic criteria for evaluating seismicity: Geol. Soc. America Bull., v. 86, p. 1041-1057.
- \_\_\_\_\_, 1978, Quaternary geology -- An essential clue to evaluating seismicity: Earthquake Info. Bull., v. 10, No. 1, p. 4-11.
- Billings, M.P., 1972, Structural geology (3rd ed.): Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 606 p.
- Bolt, B.A., Horn, W.L., MacDonald, G.A., and Scott, R.F., 1975, Geological hazards: Springer-Verlag, New York, 328 p.
- Cluff, L.S., 1971, Peru earthquake of May 31, 1970; Engineering geology observations: Bull. Seismological Soc. America, v. 61, p. 511-533.
- Duke, C.M., 1960, The Chilean earthquakes of May 1960: Science, v. 132, p. 1797-1802.
- Espinosa, A.F., 1976, The Guatemalan earthquake of February 4, 1976, A preliminary report: U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 1002, 90 p.
- Flores, R., 1969, An outline of earthquake protection criteria for a developing country: Proc. 4th World Conf. Earthquake Engr., v. III, p. 1-14.
- Hansen, W.R., 1965, Effects of the earthquake of March 27, 1964 at Anchorage, Alaska: U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 542-A, 68p.
- Hill, M.L., and Dibblee, T.W., Jr., 1953, San Andreas, Garlock, and Big Pine faults, California--a study of the character, history, and tectonic significance of their displacements: Geol. Soc. America Bull., v. 64, p. 443-458.
- Housner, G.W., 1969, Engineering estimates of ground shaking and maximum earthquake magnitude: Proc. 4th World Conf. Earthquake Engr., v. I, p. 1-13.
- Housner, G.W., and Jennings, P.C., 1974, Problems in seismic zoning: Proc. 5th World Conf. Earthquake Engr., p. 1626-1635.
- Jackson, R.E., Budge, D.R., and Hofmann, R.B., 1977, Interpretation and application of the term "capable fault" in Appendix A, 10 CFR Part 100: Geol. Soc. America Abs. with programs, v. 9, p. 1034-1035.

- Kuroiwa, J., Deza, E., and Hugo, J., 1974, Investigations on the Peruvian earthquake of May 31, 1970: Proc. 5th World Conf. Earthquake Engr., p. 447-456.
- Lawson, A.C., 1908, The California earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission: Carnegie Inst. Wash., v. 1, 451 p.
- Lee, K.L., and Monge E., J., 1968, Effect of soil conditions on damage in the Peru earthquake of October 17, 1966: Bull. Seismological Soc. America, v. 58, p. 937-962.
- Lomnitz, C., 1969, An earthquake risk map of Chile: Proc. 4th World Conf. Earthquake Engr., v. I, p. 161-171.
- Lomnitz, C. and Cabre, R., S.J., 1968, The Peru earthquake of October 17, 1966: Bull. Seismological Soc. America, v. 58, p. 645-661.
- Monge E., J., 1969, Seismic behavior and design of small buildings in Chile: Proc. 45h World Conf. Earthquake Engr., v. III, p. 1-9.
- Nason, R.D., 1971, Shattered earth at Wallaby Street, Sylmar: in The San Fernando, California earthquake of February 9, 1971: U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 733, p. 97-98.
- Roper, P.J., and Justus, P.S., 1973, Polytectonic evolution of the Brevard zone: American Jour. Sci., v. 273-A, p. 105-132.



302/9

302/7

SELECCION DE UN LUGAR SEGURO  
PARA CONSTRUIR EN ZONAS SISMICAMENTE ACTIVAS DE PAISES EN DESARROLLO

Loren A. Raymond

INTERTECT

Box 10502

Dallas, Texas, USA

y

Departamento de Geología

Appalachian State University

Boone, N.C. 28608

RESUMEN

La pérdida de vidas y de propiedad como resultado de terremotos puede ser significativamente reducida a través de un diseño apropiado y a la construcción de edificios en sitios relativamente seguros. Los factores de estructura sísmica, los factores topográficos y los factores litológicos han de ser evaluados por un geólogo y un ingeniero en el proceso de selección del lugar. Fallas activas, corrimientos de tierra y suelos pobremente unidos deben evitarse como lugares de construcción. En los países en desarrollo, los geólogos y los ingenieros no se encuentran siempre disponibles para la selección del lugar, especialmente durante la reconstrucción posterior al desastre. Paraprofesionales, entrenados por un instructor entendido, pueden emplear un criterio específico destinado a evitar problemas mayores cuando los geólogos y los ingenieros profesionales no están a la mano para la elección del lugar. Aunque los sitios seleccionados pueden tener deficiencias, un cuidadoso proceso de selección reducirá significativamente las pérdidas causadas por un terremoto.

INTRODUCCION

Muertes -que de otro modo podrían evitarse- como resultado de terremotos ocurren cada año en alguna parte del mundo. Por lo general, 10.000 personas pierden la vida anualmente a causa de los terremotos (Bolt y otros, 1975). En algunos años, por ejemplo en 1976, el número de muertes ascendió a cientos de

miles. Por fin, la prevención de esas muertes será posible cuando desarrollemos una capacidad de predicción de terremotos y se lleve a cabo un sistema mundial de alarma contra terremotos. Esto aun tardará años. Mientras tanto sin embargo, el número de muertes debidas a terremotos puede reducirse de manera significativa gracias a diseños apropiados y a construcciones en lugares relativamente seguros.

Las pérdidas de propiedad también pueden reducirse. Entre 1926 y 1950, la UNESCO calculó una pérdida media anual de \$400,000,000 (US) (Bolt y otros, 1975, p. 7). Estas pérdidas anuales aumentan con el aumento de desarrollo. Terremotos individuales pueden causar ahora semejante pérdida de bienes. Por ejemplo, los terremotos de Chile de 1960 costaron \$300,000,000 (US) en viviendas solamente (Flores, 1969), el terremoto de Alaska de 1964 resultó en \$310,000,000 (US) de valor en daños de la propiedad (Bolt y otros, 1975, p. 7), y el cálculo preliminar de daños causados por el terremoto de Guatemala en 1976 sumó \$1.100,000,000 (US) (Espinosa, 1976).

Muchos países de regiones sísmicamente activas han iniciado programas que reduzcan esas pérdidas de vida y propiedad. Una primera etapa en tal programa es producir mapas de riesgos sísmicos que muestren las zonas de alto y bajo riesgo en relación con el total daño del terremoto (Algermissen, 1969; Lomnitz, 1969; Housner y Jennings, 1974). Además, deben prepararse mapas detallados para zonas de especial importancia (v. g. grandes ciudades o puertos de mar) (Kuroiwa y otros, 1974). Estos mapas proporcionan una base para estudios detallados geológicos y de ingeniería necesarios para un análisis minucioso de la selección del lugar.

La importancia de los estudios de temblores y terremotos en ingeniería ha sido subrayado por Flores (1969). Los terremotos pueden producir un daño equivalente al presupuesto nacional de un país en desarrollo. Flores indica

que el reglamento para la reconstrucción en Chile anterior a los terremotos de 1960 resultó en una disminución del 25% en daños con relación a los cálculos anteriores. Si todas las viviendas se hubieran sometido a las normas aplicables, las pérdidas se hubieran reducido en un 75% o 300,000,000 U.S.

El daño producido en el espíritu de la gente también puede prevenirse evitando las pérdidas de vida y bienes. Una pérdida de la moral puede influenciar críticamente los esfuerzos de reconstrucción y el crecimiento económico de un país y este factor no debe ser ignorado. En este estudio, yo trazo mi criterio para la selección de lugares seguros para edificios en áreas sísmicamente activas, como parte de un intento de reducir daños a la propiedad, pérdida de la vida y, como resultado, pérdida de la moral.

#### FACTORES PARA LA ELECCION DEL LUGAR

Los factores importantes para la selección de lugares seguros para la construcción, ya sean casas individuales o ciudades enteras, pueden clasificarse en tres grupos -- factores estructurales y sísmicos, factores topográficos, y factores litológicos. En programas de construcción o reconstrucción a largo plazo, todos los factores de cada grupo deben ser evaluados por un equipo de geólogos e ingenieros. Donde esto no sea posible, paraprofesionales, entrenados por un instructor entendido en la materia, pueden emplear una serie de pautas detalladas para seleccionar lugares que estén exentos de hendiduras obvias.

Factores estructurales y sísmicos. La propensión a sismos de una zona, tanto reciente como histórica, es de suma importancia en la elección del lugar. Estudios de terremotos recientes ofrecen evidencia para la evaluación de:

- (1) la localidad de fallas activas;
- (2) la máxima aceleración del suelo (sacúdida) que se espera en esa zona;
- (3) el tipo de daño (Mercalli intensities) que se espera en diversos materiales de los cimientos y en diferentes estructuras a causa del terremotos de diversa magnitud;
- (4) la frecuencia de corta duración de terremotos dañosos.

Estos datos recientes, pueden combinarse con

-1-

los históricos para proporcionar un récord histórico de terremotos dañinos y, con los datos geológicos, un cálculo del terremoto diseño, el terremoto que daría el temblor más severo en un lugar señalado (Bolt y otros, 1975, p. 48).

La propensión a sismos no debe estimarse únicamente de acuerdo con la actividad volcánica histórica (Allen, 1975; 1978). Datos topográficos, litológicos y estructurales pueden revelar una actividad pre-histórica (Holocénico y Cuaternario) en fallas. Los datos extienden el récord sísmico por una zona y permiten un análisis más minucioso del riesgo sísmico, ya que todos los terremotos grandes ocurren (Magnitud 6.0) en fallas fáciles de reconocer a través de estudios en ese campo. (Allen 1978). Así pues, las fallas activas pueden reconocerse en base a su evidencia tanto geológica como geofísica.

En los Estados Unidos, la Comisión Reguladora Nuclear ha definido las "fallas de capacidad". Estas son fallas que se cree son "capaces de causar movimiento en la superficie del suelo o cerca o generar altos movimientos vibratorios" (Jackson y otros, 1977). El reconocimiento de estas fallas de capacidad depende de la evidencia sísmica y geológica, ya que las fallas de capacidad se definen como fallas con un historial de movimientos periódicos en los últimos 500,000 años y/o una actividad tectónica dentro de los últimos 35,000 años (Jackson y otros, 1977). Como los antecedentes históricos se extienden solamente por unos pocos cientos o miles de años, los estudios geológicos contribuyen claramente con los análisis de riesgos sísmicos y con la elección del lugar.

Estudios geológicos en esa materia revelan una multitud de facetas importantes. Para los estudios del riesgo sísmico, la evaluación de la extensión de la quebradura de la falla es importante a la hora de estimar la magnitud Richter (Housner, 1969, Bolt y otros, 1975, p. 27, 48). Torren-tes fuera de cauce, aluviones y otros depósitos Cuaternarios, declives,

estanques hundidos proveen evidencia de fallas recientes y poderosamente activas y deben ser incluidas en el análisis de riesgo sísmico.

En cuanto a la selección del lugar, los antecedentes indicativos de una falla activa o de capacidad son importantes para la evaluación de la estructura geológica de esa zona. Tal evidencia ha de ser resumida en un mapa geológico, el cual, lo mismo que un mapa de riesgo sísmico, provea bases para un estudio detallado de la selección del lugar. El mapa geológico ha de incluir también datos sobre la edad de unidades rocosas desprendidas por las fallas y un trazado cuidadoso de todos los desprendimientos de tierra.

Usando estos mapas de riesgo sísmico y geológicos como base, el geólogo y el ingeniero pueden evaluar la zona en que un lugar va a ser seleccionado. Aspectos estructurales que deben ser evaluados en un estudio local incluyen fallas y grietas. Reconocimiento (y mapas) del lugar exacto de fallas activas en esa zona, localización de fallas más viejas y los aspectos relacionados con ellas, y la evaluación de sistemas de grietas, son todos aspectos importantes de un análisis minucioso. Fallas activas y zonas de rocas deshechas deben evitarse como lugares para construir viviendas, ya que un rompimiento puede ocurrir en cualquier sitio dentro de esa zona destruyendo así los edificios (v.g. Lawson y otros, 1908). Además, materiales de rocas deshechas a lo largo de esa zona proveen fundamentos o cimientos pobres. Fallas muertas o inactivas también deben evitarse, ya que estas zonas también contienen cimientos débiles. Aun más lejos, algunas fallas, como las de San Andreas de California, tienen un largo historial de movimiento (Hill y Dibblee, 1953) y otras han sido probablemente reactivadas durante acontecimientos tectónicos posteriores (v. g. Roper y Justus, 1973).

Un criterio útil para el reconocimiento de fallas ha sido resumido por varios autores, incluyendo Billings (1972). Los elementos estructurales a notar incluyen:

- (1) capas rocosas desalineadas;
- (2) capas rocosas truncadas;
- (3) planos de resbalamiento; y
- (4) zonas de salbanda, brecha, minolita.

Zonas que contengan tales elementos deben ser rechazadas como lugares para construir edificios (Figura 1).

Grietas son fracturas por las cuales no ha ocurrido movimiento significativo. Sin embargo, lechos de roca agrietados no proveen cimientos fuertes para una estructura. De añadidura, allí donde las grietas están dispuestas de tal forma que debiliten materiales en declive, pueden resultar en planos de resbalamiento (Figura 2). Como consecuencia, es importante examinar lugares con potencial para defectos ocasionados por rocas agrietadas.

Factores topográficos. La topografía -- el relieve, el contorno, el declive de la tierra -- ofrece muchos indicios a la relativa seguridad del lugar. Factores topográficos se relacionan a la seguridad del lugar de dos maneras. Primera, muchos rasgos topográficos reflejan imperfecciones ~~ocultas~~ <sup>esenciales</sup>. Segunda, ciertos lugares son inapropiados para la construcción en zonas sísmicamente activas por consideraciones topográficas solamente.

Las imperfecciones ~~ocultas~~ <sup>esenciales</sup> se expresan <sup>en</sup> la topografía por una variedad de rasgos. Estos incluyen cuencas fuera de cauce y cerros, estribaciones, acantilados defectuosos, series lineares de arroyos, grupos lineares de ciénagas o estanques, zonas visibles de superficie agrieta-

da o desalineados objetos hechos por el hombre (v. g. carreteras o canales), y lineamientos topográficos como arroyos o ríos extraordinariamente derechos. Los lugares presuntos deben ser examinados de tales rasgos y lugares a lo largo de cualquiera de estos grupos deben evitarse (Figura 3).

Además de los factores topográficos enumerados arriba, como esos que reflejan defectos ~~estructurales~~<sup>erenciales</sup>, lugares en ciertas situaciones topográficas deben evitarse por razones propias. El terremoto de Guatemala de 1976 produjo miles de derrumbamientos, muchos de los cuales resultaron en la pérdida de vida y propiedad. En Perú, el gran peligro de derrumbamientos es bien conocido, en parte como resultado de la avalancha de escombros de Huascara que enterró Yungay (Plafker y otros, 1971). Por lo tanto, lugares inmediatamente sobre, dentro, o debajo de derrumbamientos ya desarrollados deben evitarse. Además, deben evitarse lugares donde el potencial de derrumbamiento es mayor como resultado de factores estructurales (v. g. defectos o grietas extensivas), factores estratigráficos (v. g. masas rocosas resistentes extendiéndose sobre masas rocosas débiles que se inclinan sobre un valle), y factores topográficos (v. g. inclinaciones excedidas).

El relieve y la inclinación son factores críticos para evaluar en relación con el potencial de derrumbamientos generados por un terremoto en un lugar. En Guatemala, muchas vidas se perdieron donde se levantaron estructuras cercanas a despeñaderos, declives muy pronunciados, o grandes barrancas. Por ejemplo, en Estancia de la Virgen, cerca de San Martín, siete familias fueron arrojadas con sus casas al Río Pixcayá cuando el despeñadero cercano al río se derrumbó durante el terremoto. En la Ciudad de Guatemala, zonas residenciales cercanas a barrancas

cas sufrieron daños más intensivos que otras zonas alrededor, seguramente como resultado de un amplificado movimiento del suelo. Aquí, algunas personas perdieron la vida a causa de desprendimientos de tierra. Como una regla general, construcciones adyacentes a barrancas o cerca de declives más pronunciados que de 35 (75% grado) deben evitarse (Figura 4).

Los lugares en riscos altos y especialmente estrechos deben también evitarse. Se sabe que los riscos altos y estrechos experimentan sacudidas amplificadas del suelo (Nason, 1971; Everingham, 1974), que resultan en mayores daños. Además, riscos estrechos están expuestos a derrumbamientos en ambos lados, condición que se desarrolló durante el terremoto de Guatemala de 1976 en Las Venturas (San Martín), a lo largo de la carretera San Martín-Chimaltenango, y a lo largo de la carretera El Tablón-Las Flores.

El fondo de los valles también puede ser peligroso. El peligro de tales lugares está relacionado solo indirectamente a la topografía. Derrumbamientos desde arriba ocasionan un tipo de peligro, especialmente en valles estrechos, de paredes empinadas. El segundo tipo de peligro está relacionado con la litología de la roca o suelo en el fondo del valle. Es bien sabido que materiales pobremente consolidados incrementan el daño del terremoto (v. g. Lawson y otros, 1908; Cluff, 1971). Por lo tanto los factores litológicos deben ser evaluados en tales lugares.

El fondo de los valles puede también estar sujeto a inundaciones. Por ejemplo, el terremoto de Guatemala de 1976 produjo derrumbamientos que embalsaron por lo menos cuatro ríos importantes. El terremoto de 1970 produjo un fenómeno similar en Perú (Plafker, 1971). El deslizamiento



de embalses produjo inundaciones corriente arriba y, si subsecuentemente se derrumban, ocurren también inundaciones corriente abajo. Aunque dar cuenta del factor de inundación es difícil por los muchos sitios con capacidad de corrimientos a lo largo de ríos importantes y arroyos, donde ocurren corrimientos o áreas de posible corrimiento, éstos deben tenerse en cuenta durante el proceso de selección del lugar.

Factores litológicos. La importancia de la litología del material base en lugares para construir edificios es muy importante. Los lechos de roca sólidos proveen los mejores cimientos para las construcciones. Que ese peligro aumenta con la disminución de la fuerza y la cohesión de cimientos, se ha revelado en numerosos estudios posteriores al terremoto (Duke, 1960; Hansen, 1965; Lee and Mange E., 1968, Lomnitz y Cabré, 1968; Mange E., 1969). Por lo tanto, un detallado estudio de selección debe incluir el estudio de un ingeniero civil o de un científico del suelo y/o la evaluación de un geólogo sobre el lecho de roca, según las condiciones locales.

Tipos de rocas fuertemente cristalizadas proveen bases más firmes que sedimentos pobremente consolidados o rocas piroclásticas. Muchos de los deslizamientos de tierra en Guatemala ocurrieron en materiales piroclásticos débiles que se desmoronaron con el temblor. Depósitos glaciofluviales y otros semejantes del Rio Santa Valley de Perú están sujetos a semejante defecto (Plafker, 1971). Rocas graníticas, gneis, areniscas y rocas similares son preferidas como materiales básicos a rocas sedimentarias. En general, los suelos orgánicamente ricos, pobremente consolidados, débiles y húmedos, o depósitos de aluvión, deben evitarse.

Allí donde el emplazamiento tiene que ser seleccionado en materiales de aluvión, suelos delgados, secos, bien consolidados con capas lodosas proveen mejores cimientos que los suelos húmedos y pobremente unidos. Arcillas cixotrópicas y arenas altamente saturadas, incluso a considerable

profundidad debajo del lugar para edificar, hará que este solar sea inseguro y esté sujeto a hundimiento o deslizamiento. Turnagain Heights, Alaska, donde toda una sección de casas cayó al mar, estaba construido en una zona de arcilla fundamentalmente cixotrópica (Hansen, 1965).

#### SELECCION DEL LUGAR POR PARAPROFESIONALES

En situaciones posteriores al desastre y en otras circunstancias donde los geólogos e ingenieros no están disponibles para hacer una selección de lugar, los paraprofesionales pueden estar entrenados para seleccionar lugares basándose en una lista de criterios. En el Apéndice A, yo presento tal lista. Esta lista enfatiza características fáciles de reconocer y está trazada con objeto de eliminar por lo menos los lugares más peligrosos.

Solares completamente desprovistos de condiciones geológicas peligrosas son difíciles de hallar. Esto es especialmente cierto en terrenos montañosos cerca de los márgenes continentales donde ocurre volcanismo activo y tectonismo. El geólogo y/o el ingeniero clasifica los relativos peligros de los diversos factores negativos, en solares de esa zona, durante la evaluación de la selección del lugar. El paraprofesional no puede generalmente hacer tal clasificación debido a su limitada experiencia y entrenamiento. Así pues, el paraprofesional debe atenerse a la lista de criterios (Apéndice A).

A pesar de estas limitaciones, los solares más peligrosos deben ser eliminados de la consideración del paraprofesional y alguna reducción en pérdidas personales y en el número de muertes debido a los terremotos pueden ser tenidas en cuenta en zonas reconstruidas o nuevamente desarrolladas. Tales reducciones pueden esperarse, si se presta cuidadosa atención al criterio estructural-sísmico, topográfico y litológico, durante el proceso de selección del lugar.

#### RECONOCIMIENTOS

Agradezco a C. Lomnitz y E. Rosenblueth que me proveyeron con infor-

nación y a S.E. Swanson, L. Díaz, C. Muirhead que me ayudaron a preparar este estudio.

APENDICE A - ALGUNOS CRITERIOS PARA UN BUEN SOLAR

1. Relativamente llano
  - a. No en cerros estrechos
  - b. No en declives pronunciados
  - c. No en valles estrechos
  - d. No cerca de riscos o grandes barrancas (dentro de 150 m)
2. Lecho de roca duro presente o cerca de la superficie.
3. Corrimientos de tierra conocidos en la zona inmediata.
4. Evidencia de ausentes fallas activas
  - a. Carencia de capas rocosas fuera de lugar
  - b. Carencia de estanques o pantanos seguidos
  - c. Carencia de grietas en el suelo profundas o largas

Titulos de las figuras

- Figura 1. Zona rural mostrando solares para viviendas peligrosos y seguros con respecto a una zona defectuosa por brecha y saltanda (rocas rotas), lechos deslineados (estratos), y un talud (colina escarpada).
- Figura 2. Dibujo mostrando un declive inseguro como resultado de un sistema de unión.
- Figura 3. Solares cerca de arroyos ininterrumpidos y estanques pueden ser inseguros, ya que estos rasgos pueden encontrarse junto a fallas activas.
- Figura 4. Solares para edificios deben ser seleccionados lejos de las márgenes de riscos o barrancas.

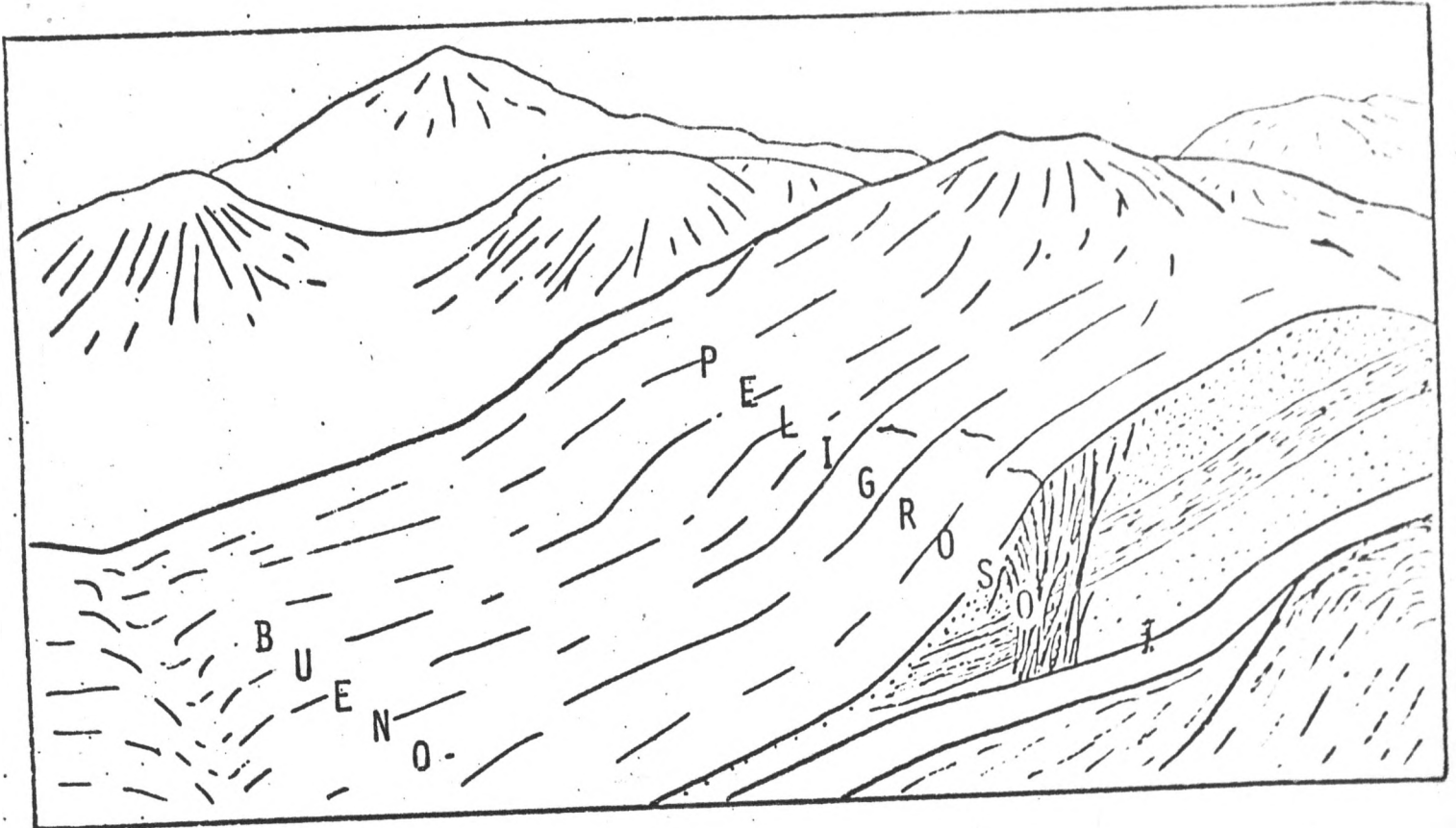


Figure 1.

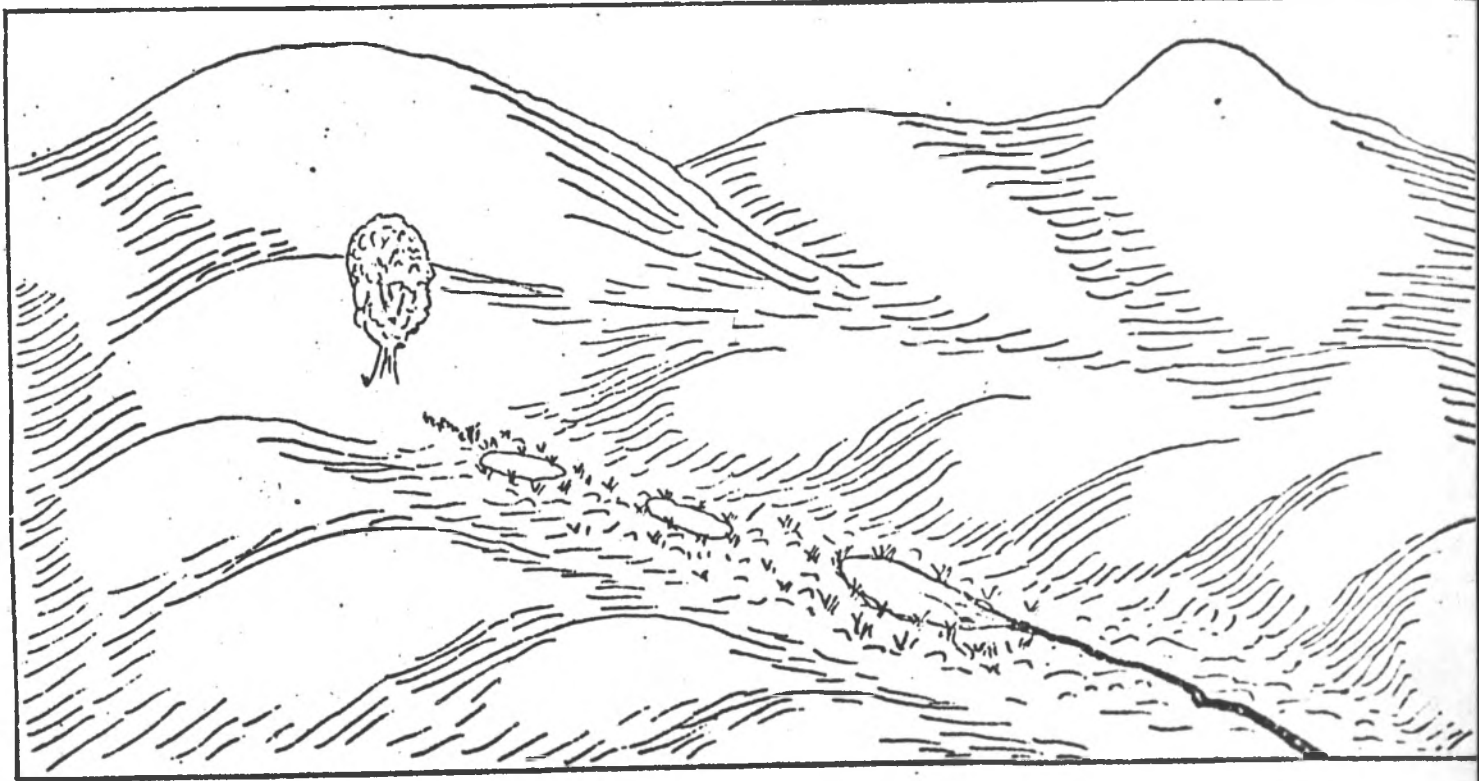


Figure 2.

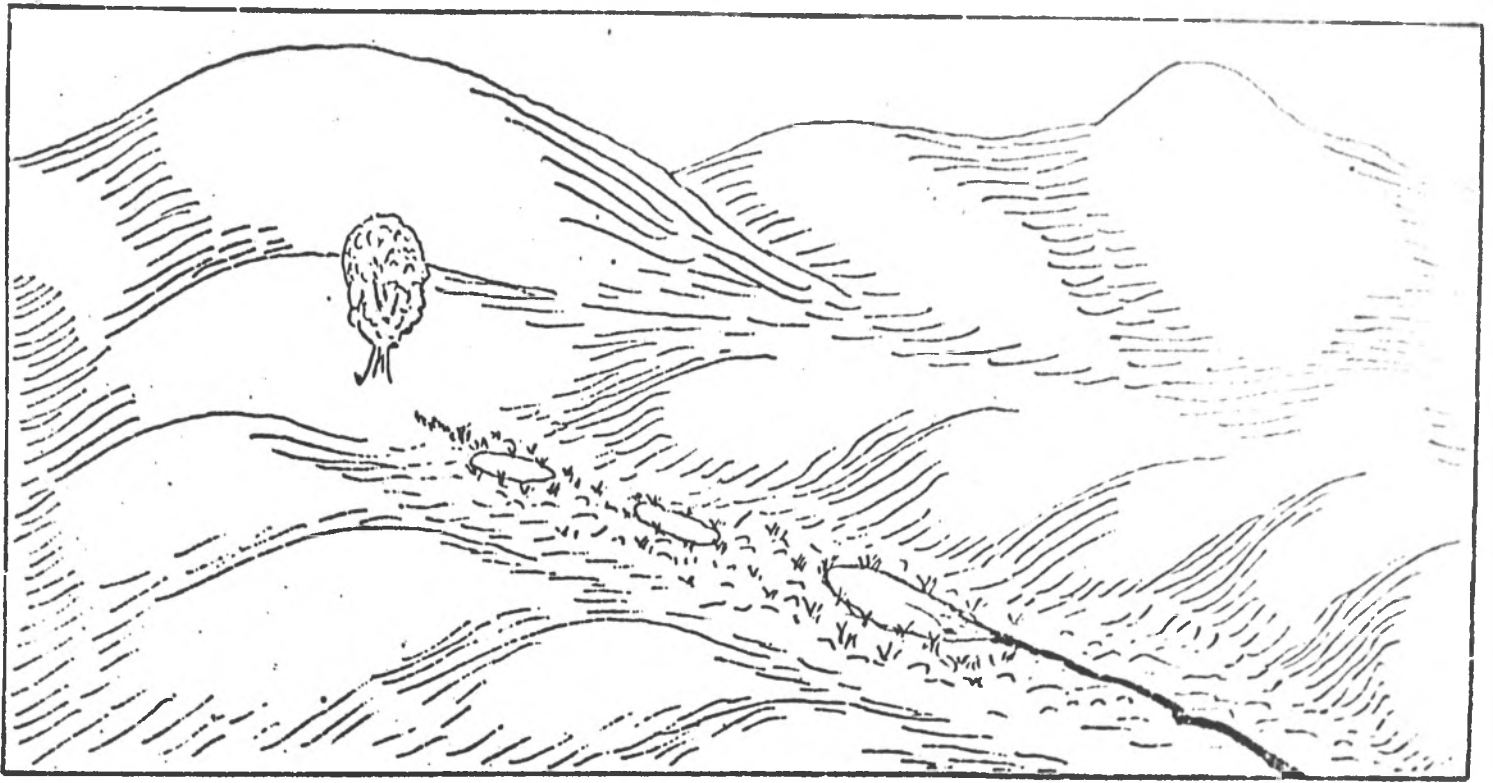


Figure 3.

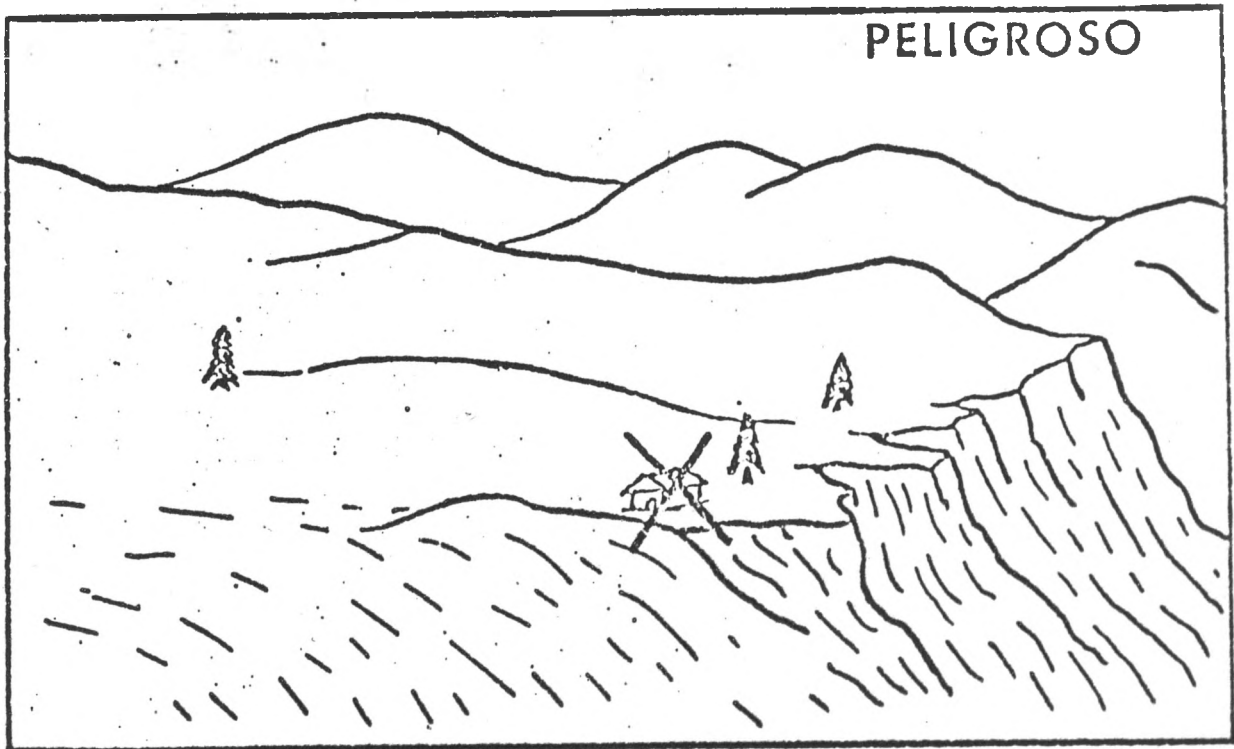


Figure 4.

#### REFERENCES CITED

- Algermissen, S.T., 1969, Seismic risk studies in the United States: Proc. 4th World Conf. Earthquake Engr., v. I, p. 14-27.
- Allen, C.R., 1975, Geologic criteria for evaluating seismicity: Geol. Soc. America Bull., v. 86, p. 1041-1057.
- \_\_\_\_\_, 1978, Quaternary geology -- An essential clue to evaluating seismicity: Earthquake Info. Bull., v. 10, No. 1, p. 4-11.
- Billings, M.P., 1972, Structural geology (3rd ed.): Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 606 p.
- Bolt, B.A., Horn, W.L., MacDonald, G.A., and Scott, R.F., 1975, Geological hazards: Springer-Verlag, New York, 328 p.
- Cluff, L.S., 1971, Peru earthquake of May 31, 1970; Engineering geology observations: Bull. Seismological Soc. America, v. 61, p. 511-533.
- Duke, C.M., 1960, The Chilean earthquakes of May 1960: Science, v. 132, p. 1797-1802.
- Espinosa, A.F., 1976, The Guatemalan earthquake of February 4, 1976, A preliminary report: U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 1002, 90 p.
- Flores, R., 1969, An outline of earthquake protection criteria for a developing country: Proc. 4th World Conf. Earthquake Engr., v. III, p. 1-14.
- Hansen, W.R., 1965, Effects of the earthquake of March 27, 1964 at Anchorage, Alaska: U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 542-A, 68p.
- Hill, M.L., and Dibblee, T.W., Jr., 1953, San Andreas, Garlock, and Big Pine faults, California--a study of the character, history, and tectonic significance of their displacements: Geol. Soc. America Bull., v. 64, p. 443-458.
- Housner, G.W., 1969, Engineering estimates of ground shaking and maximum earthquake magnitude: Proc. 4th World Conf. Earthquake Engr., v. I, p. 1-13.
- Housner, G.W., and Jennings, P.C., 1974, Problems in seismic zoning: Proc. 5th World Conf. Earthquake Engr., p. 1626-1635.
- Jackson, R.E., Budge, D.R., and Hofmann, R.B., 1977, Interpretation and application of the term "capable fault" in Appendix A, 10 CFR Part 100: Geol. Soc. America Abs. with programs, v. 9, p. 1034-1035.



- Kuroiwa, J., Deza, E., and Hugo, J., 1974, Investigations on the Peruvian earthquake of May 31, 1970: Proc. 5th World Conf. Earthquake Engr., p. 447-456.
- Lawson, A.C., 1908, The California earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission: Carnegie Inst. Wash., v. 1, 451 p.
- Lee, K.L., and Monge E., J., 1968, Effect of soil conditions on damage in the Peru earthquake of October 17, 1966: Bull. Seismological Soc. America, v. 58, p. 937-962.
- Lomnitz, C., 1969, An earthquake risk map of Chile: Proc. 4th World Conf. Earthquake Engr., v. I, p. 161-171.
- Lomnitz, C. and Cabre, R., S.J., 1968, The Peru earthquake of October 17, 1966: Bull. Seismological Soc. America, v. 58, p. 645-661.
- Monge E., J., 1969, Seismic behavior and design of small buildings in Chile: Proc. 45th World Conf. Earthquake Engr., v. III, p. 1-9.
- Nason, R.D., 1971, Shattered earth at Wallaby Street, Sylmar: in The San Fernando, California earthquake of February 9, 1971: U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 733, p. 97-98.
- Plafker, G., Ericksen, G.E., and Concha, J.F., 1971, Geological aspects of the May 31, 1970, Peru earthquake: Bull. Seismological Soc. America, v. 61, p. 543-578.
- Roper, P.J. and Justus, P.S., 1973, Polytectonic evaluation of the Brevard zone: American Jour. Sci., v. 273-A, p. 105-132.