Este libro responde las inquietudes más comunes sobre uno de los fenómenos naturales que se presentan con frecuencia en el planeta: Los terremotos. ¿Qué son? ¿Cómo se producen? ¿Dónde se producen? ¿Cómo nos han afectado? y ¿Cómo podemos protegernos y minimizar sus efectos?

IG Escuela Politécnica Nacional Instituto Geofísico Quito - Ecuador
Volcan Tungurahua

CORPORACIÓN EDITORA NACIONAL

COMISIÓN EUROPEA
Ayuda Humanitaria

CAFOD just one world

CRS CATHOLIC RELIEF SERVICES

CISP COMITATO INTERNAZIONALE PER LO SVILUPPO DEI POPOLI

9 789978 844601

Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador

1

Francisco Rivadeneira, Mónica Segovia, Alexandra Alvarado
José Egred, Liliana Troncoso, Sandro Vaca, Hugo Yepes

Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador

Serie El riesgo sísmico en el Ecuador 1

INSTITUTO GEOFÍSICO DELA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CORPORACIÓN EDITORA NACIONAL

Breves fundamentos sobre los TERREMOTOS en el Ecuador

COMISIÓN EUROPEA

Ayuda Humanitaria

PROYECTO DIPECHO IV

"Fortaleciendo la capacidad comunitaria y científica de las poblaciones más vulnerables del Ecuador", Contrato No. ECHO/DIP/BUD/2005/03001, ejecutado por el Catholic Relief Services (CRS) en el marco del Cuarto Plan de Acción DIPECHO para la Comunidad Andina y co-financiado por el Programa de Preparación ante Desastres (DIPECHO) del Departamento de Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea (ECHO) y el Catholic Agency for Overseas Development (CAFOD) - CRS. Los socios del proyecto fueron Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Comisión Episcopal de Pastoral Social-Caritas del Ecuador, El Vicariato de Esmeraldas y Diócesis de Latacunga y el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

Director de Proyecto: Edgardo Bartomioli

CRS Ecuador, Av. América 1830 y Mercadillo, Edificio Radio Católica 3er. piso • Apartado postal 17-03-0226 • Teléfono 2568874
crs@crsecuador.org.ec • Quito-Ecuador

PROYECTO DIPECHO IV

"Fortalecimiento de las capacidades locales de preparación para desastres y gestión de los riesgos en la Costa Norte de Ecuador", Contrato ECHO/DIP/BUD/2005/03007, ejecutado por el Comitato Internazionale per lo Sviluppo dei Popoli (CISP) en el marco del Cuarto Plan de Acción DIPECHO para la Comunidad Andina y co-financiado por el Programa de Preparación ante Desastres (DIPECHO) del Departamento de Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea (ECHO) y el CISP. Realizado entre febrero de 2006 y mayo de 2007, tiene como escenario los cantones Sucre y San Vicente; su objetivo es generar capacidades de respuesta a emergencias e incorporar el componente de riesgos en la planificación de los cantones, como también sensibilizar y capacitar a la comunidad educativa y a la población más expuesta al riesgo por deslizamiento y sismos.

Director de Proyecto: Marco Antonio Giraldo Rincón

CISP Sede Central en Italia, Via Germanico, 198 – Int.10, 00192 Roma, Italia • *www.cisp-ngo.org* • CISP Ecuador, Noboa Camaño 186 y Humboldt. • Tel/fax 022235337-022521467
cisp-ecu@uio.satnet.net • Quito-Ecuador

Serie:
El riesgo sísmico
en el Ecuador

1

Breves fundamentos sobre los TERREMOTOS en el Ecuador

Francisco Rivadeneira
Mónica Segovia
Alexandra Alvarado
José Egred
Liliana Troncoso
Sandro Vaca
Hugo Yepes

IG
INSTITUTO GEOFÍSICO DE
LA ESCUELA POLITÉCNICA
NACIONAL

CORPORACIÓN
EDITORA NACIONAL

Noviembre 2007
Quito-Ecuador

Serie:
El riesgo sísmico
en el Ecuador
1

Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador

Francisco Rivadeneira[1], Mónica Segovia[2], Alexandra Alvarado[2], José Egred[2], Liliana Troncoso[2], Sandro Vaca[2], Hugo Yepes[2]

1 Colaborador del Instituto Geofísico.
2 Miembro del Instituto Geofísico/Departamento de Geofísica, Escuela Politécnica Nacional
Ladrón de Guevara s/n, Apdo. Postal 17-01-2759, Quito-Ecuador.

© Corporación Editora Nacional
ISBN: 978-9978-84-460-1
Derechos de autor: 027802
Depósito legal: 003869
Noviembre de 2007

Supervisión editorial: Jorge Ortega
Diagramación: Sonia Hidrobo
Impresión: Ediciones Fausto Reinoso, Av. Rumipamba E1-35 y 10 de Agosto, ofic. 203, Quito

Foto de la portada: "El terremoto de Ibarra de 1868", Rafael Troya. Tomada de: Alexandra Kennedy Troya, *Rafael Troya El pintor de los Andes Ecuatorianos*, Quito, Ediciones Banco Central, 1999.
Foto de la contraportada: "El fatal 22 de marzo en Quito, 1859", pintor anónimo. Museo de la Casa de la Cultura Ecuatoriana de Quito.

Corporación Editora Nacional
Roca E9-59 y Tamayo, teléfonos: (593-2) 255 4358, 256 6340, fax: ext. 12, apartado postal 17-12-886
correo electrónico: cen@accessinter.net
página web: www.cenlibrosecuador.org
Quito-Ecuador

Para más información, contáctenos:
Instituto Geofísico de la EPN, Quito-Ecuador
teléfono: 222 5655
fax: 256 7847
e-mail: geofisico@igepn.edu.ec
página web: www.igepn.edu.ec

Este libro se publica con el apoyo financiero de la Dirección General de Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea ECHO, a través de los proyectos:

- Fortaleciendo la capacidad comunitaria y científica de las poblaciones más vulnerables del Ecuador
- Fortalecimiento de las capacidades locales de preparación para desastres y gestión de los riesgos en la Costa Norte de Ecuador

Contenido

Agradecimientos 7

Dedicatoria 9

Presentación 11

Capítulo 1
La Tierra es un planeta en continua transformación 15
La estructura de la Tierra y la tectónica de placas 15
El entorno geodinámico del Ecuador 20
Las fallas geológicas en el Ecuador 21
Sismos relacionados con volcanes 24

Capítulo 2
La historia sísmica del Ecuador 27
Sismicidad histórica en relación con las regiones fisiográficas 32
Sismos en el Valle Interandino 34
Sismos en la región costera 36
Sismos en la región oriental 36
Sismos en la región insular de Galápagos 37
Tsunamis del Ecuador 37

Capítulo 3
Investigando los terremotos para minimizar sus efectos 43
Evolución histórica del monitoreo sísmico en el Ecuador 43
Monitoreo sísmico 47
¿Cómo se localiza un sismo? 49
¿Cómo se determina la magnitud? 51

Minimizar los efectos de los terremotos 52
Reducción del riesgo sísmico 53

Referencias 59

Glosario 61

Anexos

1. Tipos de límites de placas 69

2. Tipos de fallas 71

3. Sismos volcánicos 77

4. Escalas de magnitud e intensidad 79

5. Intensidad histórica máxima en cada provincia 93

Agradecimientos

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento:

- A CRS, ECHO y CISP por financiar esta publicación.
- A la Escuela Politécnica Nacional, que es el marco institucional que respalda las labores del Instituto Geofísico.
- A los miembros del Instituto Geofísico, que con su dedicada labor diaria han contribuido al conocimiento de los peligros sísmicos y volcánicos en el país.

Dirección:

Ing. Hugo Yepes, MSc.

Área técnica:

Ing. Mayra Vaca (Jefa de Área)
Fís. Jorge Aguilar MSc.
Tlgo. Vinicio Cáceres
Ing. Wilson Enríquez MSc.*
Tlgo. Sandro Jua
Ing. Pablo Marcillo
Tlgo. Eddy Pinajota
Ing. Cristina Ramos MSc.
Tlgo. Santiago Arrais
Tlgo. Cristian Cisneros
Srta. Lorena Gomezjurado
Fís. Omar Marcillo*
Srta. Miriam Paredes
Tlgo. Javier Pozo
Fís. Freddy Vásconez

Área de Sismología:

Ing. Alexandra Alvarado MSc. (Jefa de Área)
Sr. José Egred
Srta. Johanna León
Sr. Andrés Ojeda
Fís. Pablo Palacios MSc.
Dr. Mario Ruiz
Ing. Mónica Segovia
Ing. Liliana Troncoso
Srta. Silvia Vallejo
Sr. Guillermo Viracucha
Sra. Verónica Lema
Srta. Karla Muela
Sr. Daniel Pacheco
Srta. Angélica Robles
Sr. Javier Santo
Sr. Juan Carlos Singaucho
Ing. Sandro Vaca MSc.
Sr. Fabián Villares
Sr. Cristian Viracucha

Área de Vulcanología:

Dr. Pablo Samaniego (Jefe de Área)
Ing. Daniel Andrade MSc.*
Ing. Diego Barba
Dra. Silvana Hidalgo
Dr. Minard Hall
Ing. Patricio Ramón
Ing. Gorki Ruiz*
Fís. Santiago Arellano
Sr. Jorge Bustillos
Dr. Karim Kelfoun
Ing. Patricia Mothes
Dr. Claude Robin

Área de Secretaría y Servicios:

Srta. Sandra Jiménez (Jefa de Área)

Sr. Carlos Ayol

Sr. Servilio Riofrío

Sra. Grace Erazo

Sra. Carmen Zambrano

* Personal realizando estudios de posgrado en el exterior.

Dedicatoria

Al amigo lector, interesado en conocer más sobre uno de los fenómenos naturales más fascinantes e intrigantes...hasta ahora.

Esperamos que el contenido ayude a aclarar muchos mitos y dudas.

Presentación

Este libro ha sido elaborado para responder a las inquietudes más comunes que tenemos los ecuatorianos, sobre uno de los fenómenos naturales que se presentan con frecuencia en nuestro territorio: los terremotos. Las preguntas a las que se tratará de responder de la forma más concisa y sencilla en los diferentes capítulos de este libro son:

¿Qué son los terremotos? ¿Cómo se producen? ¿Dónde se producen? ¿Cómo nos han afectado los terremotos? y ¿Cómo podemos protegernos y minimizar sus efectos?

La posición del Ecuador en la costa oriental del Océano Pacífico lo hace parte del llamado "**Cinturón de Fuego del Pacífico**". Zona del planeta que ha tomado esta denominación debido a que es la región más susceptible de experimentar los efectos de terremotos y erupciones volcánicas. Esto se debe a que se presentan cambios continuos en la superficie del planeta como respuesta a la interacción de las llamadas **placas tectónicas**.

Para el caso del Ecuador, la interacción entre la Placa Sudamericana y la Placa Nazca genera una **zona de subducción** frente a las costas y varias **zonas tectónicamente activas** al interior del territorio, en donde se originan la mayor parte de sismos que se registran en nuestro país.

En este contexto geológico se establece una relación inevitable de los habitantes con los fenómenos naturales que amenazan su progreso y desarrollo como socie-

dad. Entre todos los fenómenos asociados a una zona de subducción, los más peligrosos son los temblores o terremotos. A nivel mundial, se estima que en las zonas de subducción se libera la mayor cantidad de energía sísmica (alrededor de un 80%).

Aunque la frecuencia con la que se producen los terremotos destructores no es alta, cuando éstos se presentan pueden tener un efecto devastador en un país, en especial en los países en desarrollo, ya que retrasan aún más su progreso al afectar la infraestructura y los sistemas económicos, sin contar con la pérdida de vidas cuyo precio es inestimable.

En la historia del Ecuador se han producido varios eventos destructivos, entre los más recientes y que aún permanecen en la memoria de muchos ecuatorianos están los terremotos de Ambato (1949), Esmeraldas (1979), Reventador (1987), Macas (1995) y Bahía (1998). Todos ellos con graves secuelas sociales, sicológicas y económicas para la población de las regiones más afectadas.

El conocimiento de la sismicidad de una localidad, región o país es necesario para todo cálculo o plan de mitigación de sus efectos y es fundamental para elaborar los códigos de construcción y los escenarios sísmicos. Por esta razón, se hace importante el conocimiento de las características de la sismicidad en el Ecuador.

La permanente tarea científica del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), así como el compromiso de varios sectores sociales nacionales e internacionales, como CRS-CAFOD (Catholic Relief Services-Catholic Agency for Overseas Development) CISP y DIPECHO (Programa de preparación ante desastres de ECHO, Departamento de Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea), han impulsado proyec-

tos conjuntos para el estudio de este tipo de fenómenos, permitiendo la publicación de este documento.

En los capítulos siguientes se tratará de describir la situación del Ecuador en su contexto geológico, para explicar y ejemplificar las causas que generan los sismos en este territorio. También se detallarán y se mostrarán los diferentes métodos de monitoreo sísmico y su capacidad para orientarnos en la prevención de estos fenómenos.

Usando datos instrumentales y datos históricos, se tratará de establecer, a base del estado actual de la información, diferentes escenarios que se podrían presentar en caso de producirse un sismo destructor en el futuro.

Finalmente se hará una descripción general de las maneras en que nuestra sociedad y la infraestructura que tenemos pueden disminuir el riesgo al que están expuestas por los sismos.

Los anexos presentan información resumida en forma de tablas y cuadros relacionadas con diferentes aspectos del estudio de los terremotos que no han sido incluidas dentro del cuerpo principal de la obra, tales como las escalas completas de magnitud e intensidad, reseñas históricas de interés y otros elementos que ayuden a la comprensión de estos fenómenos.

En los capítulos se han incluido frases que contienen un hecho notable o curioso relativo al tema principal para ayudar a retener la información tratada.

1. La Tierra es un planeta en continua transformación

Para responder a las preguntas sobre qué son los terremotos y su origen, hay que conocer cómo es nuestro planeta y entender que es un sistema dinámico que está en continua transformación y movimiento.

En un inicio, la geología (la ciencia que estudia la Tierra y sus procesos) consideraba que el planeta y sus estructuras estaban inmóviles desde hacía millones de años. Con el desarrollo de estudios relacionados con la forma de los continentes y su ubicación actual, se estableció que las costas de Sudamérica y África coincidían como piezas de un enorme rompecabezas. Con este descubrimiento y otros, especialmente en el fondo oceánico, se introdujo la idea de la **Deriva Continental** (Wegener, 1946). Con ella se pudo justificar las observaciones y estudios que inducían a pensar que la superficie de nuestro planeta se movía y que ese movimiento hacía de la Tierra un planeta dinámico (Figura 1), dando origen a la teoría de la **Tectónica de Placas.**

■ LA ESTRUCTURA DE LA TIERRA Y LA TECTÓNICA DE PLACAS

Los estudios de geofísica y geoquímica en los últimos 50 años han logrado demostrar que la Tierra está formada por cuatro capas concéntricas principales: litósfera, astenósfera, mesósfera y endósfera.

La **Litósfera** (espesor entre 50-300 km) es la capa más superficial y externa de la Tierra. Se caracteriza por ser rígida y por estar formada por las cortezas con-

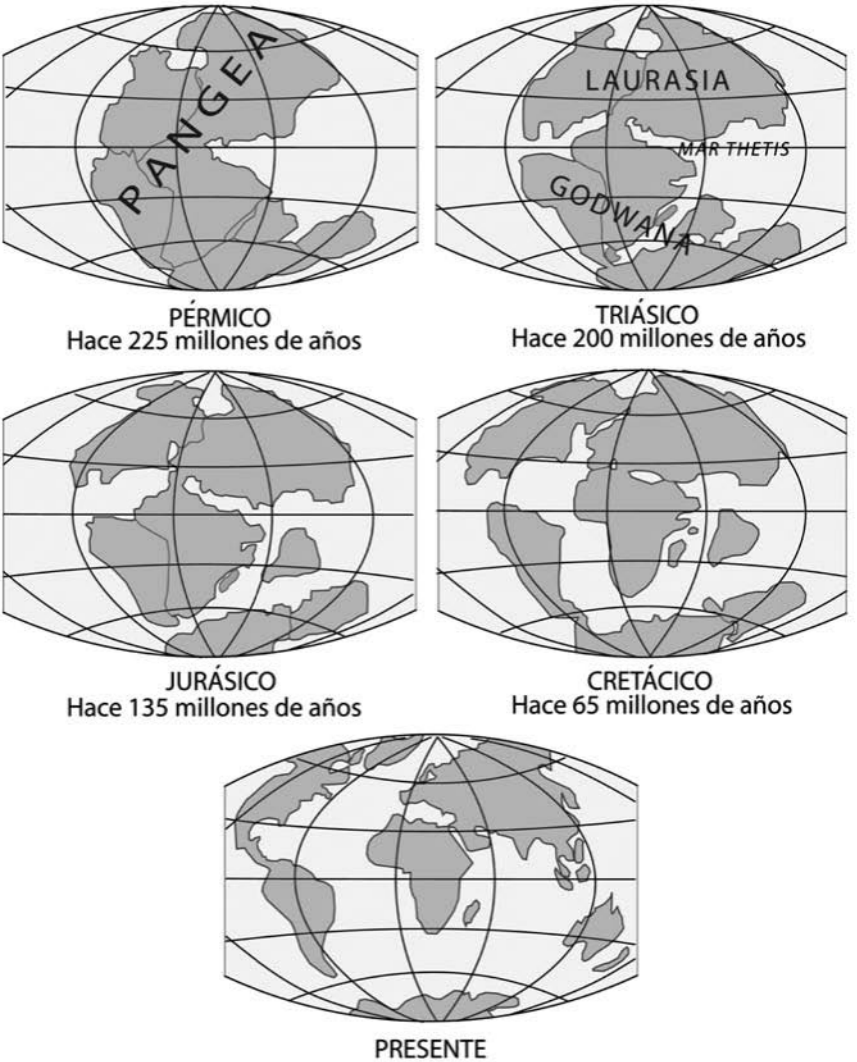


Figura 1. Evolución de los continentes. Modificado de: Kious y Tilling.

tinental y oceánica, y la parte externa del Manto Superior. Está fragmentada en una serie de "placas tectónicas" o litosféricas, en cuyos bordes se generan los fenómenos como el magmatismo (incluido el vulcanismo), la sismicidad y la formación de cordilleras. El límite inferior está definido por la fusión de las rocas de la Astenósfera (Figura 2).

La **Astenósfera** corresponde al resto del Manto Superior y se caracteriza por comportarse como un fluido denso. Por esta razón no produce sismos, pero tiene una importancia fundamental para explicar el movimiento de las placas tectónicas. El proceso para dicho movimiento se da por la presencia de celdas de convección, que es un fenómeno similar al que ocurre cuando se calienta un líquido en la cocina, y en el que las partes más frías se hunden y las más calientes suben (Figura 3), provocando que las placas litosféricas sobre ella se muevan lentamente. Su límite inferior se encuentra a 2.900 km de profundidad.

La **Mesósfera,** también llamada Manto Inferior, se caracteriza porque los minerales se vuelven más densos sin cambiar su composición química. Está formada por rocas calientes y sólidas, pero con cierta plasticidad (Figura 2).

La **Endósfera** corresponde al Núcleo que está formado por el Núcleo Externo, que se caracteriza por ser de material fundido, cuya composición es hierro y níquel, y el Núcleo Interno sólido y formado principalmente por hierro. Se cree que en esta capa se origina el campo magnético terrestre (Figura 2).

La teoría de la Tectónica de Placas nació en la década de 1960, cuando se produjo un verdadero "movimiento científico" que estructuró y desarrolló con fundamentos irrefutables la idea inicial de la deriva de los

continentes propuesta por el alemán Alfred Wegener en la primera década del siglo XX. Al comparar la forma de las costas orientales de Sudamérica y África occidental, descubrió que aquellas se podían unir casi a la perfección. Para tratar de demostrar esta observación se desarrollaron métodos de comprobación que aplicaban varias disciplinas:

- Se usó la comparación entre el tipo de rocas de la costa occidental de África y las de la costa oriental de Sudamérica y se verificó que éstas coincidían en todas sus características.
- Se midió y estableció una serie de "franjas" de igual respuesta magnética desde el centro hacia afuera de la cordillera centro-oceánica del Atlántico y se confirmó que las franjas de las costas de América y África concordaban en edad y sentido magnético.
- Otros argumentos científicos que corroboran la teoría involucran ciencias como la paleontología (estudio de fósiles), la paleo-climatología (estudio del medio ambiente pasado), entre otras.

Con estas pruebas se estableció que la historia de la deriva continental empezó hace aproximadamente 180 millones de años, partiendo de un gran mega-continente al que se denominó Pangea que deriva del prefijo griego *pan* que significa *todo* y de la palabra en griego *Gaia*, que significa *suelo o tierra*. De este modo, quedaría una palabra cuyo significado es *"toda la tierra"*.

Como resultado de esta teoría se ha determinado que el planeta Tierra está dividido en al menos quince placas tectónicas que interactúan entre sí, moviéndose en diferentes direcciones (Figura 4). También se estableció que en los límites entre las placas tectónicas

existen zonas de "creación" de nueva litósfera y otras zonas donde la litósfera se "consume" o se "reabsorbe". En función de esto se establecieron tres límites básicos: convergentes, divergentes y transformantes.

Los límites "**convergentes**" son los responsables de la construcción de la mayoría de las cadenas montañosas de la superficie de la Tierra, es una zona de alta actividad sísmica y pueden generar vulcanismo. Funcionan de dos maneras, dependiendo del tipo de placas que interactúan. La primera es que placas con densidades similares, al chocar forman relieves, denominándose **colisión continental,** un ejemplo son los Himalayas. En un segundo caso, una de las placas en general la litósfera oceánica, es más pesada que la otra, lo que genera que se hunda debajo de la litósfera menos pesada (continente) provocando el fenómeno conocido como **subducción** (Figura 5); un ejemplo es la interacción de las placas Nazca y Sudamericana.

En los límites "**divergentes**" las placas se alejan una respecto de la otra en direcciones opuestas. Este fenómeno se produce más fácilmente en la placa oceánica (7-15 km de espesor) que es más delgada que la placa continental (30-75 km de espesor). El rasgo fisiográfico que resulta de este rompimiento se llama **dorsal oceánica** que es una enorme fisura por donde sale material incandescente del manto (roca fundida o magma). Este material forma una cadena montañosa en el fondo del mar que recibe aportes constantes de nuevo material **magmático,** constituyéndose en una fuente de creación de corteza terrestre (Figura 5). En el anexo 1 se muestra una tabla en donde se presentan los tipos de límite entre las placas.

Los límites "**transformantes**" se caracterizan porque las placas se mueven paralelas entre sí, a lo largo de

una falla denominada falla transformante (Figura 5). Este límite se encuentra generalmente en las placas oceánicas, en las zonas de las dorsales pero también se pueden encontrar en los continentes, por ejemplo la falla de San Andrés en Estados Unidos.

DATO CURIOSO:

• *¿Sabía que la velocidad de las placas tectónicas es comparable con la velocidad de crecimiento de las uñas de nuestros dedos?*

EL ENTORNO GEODINÁMICO DEL ECUADOR

Al reducir la escala de nuestra perspectiva y enfocarnos en las costas del Océano Pacífico, podemos entender cuales fueron las fuerzas dinámicas que hacen que el Ecuador se encuentre en el denominado "Cinturón de Fuego del Pacífico" donde la Placa Nazca se hunde (o se subduce) bajo la Placa Sudamericana a una velocidad de 60 mm/año y con una dirección aproximada Este-Oeste (Trenkamp *et al.*, 2002). Esta interacción entre placas hace que se acumulen esfuerzos tanto en zona de contacto como en la parte interna de las placas continental y oceánica.

Con estos antecedentes, podemos finalmente responder a las preguntas que nos interesan: *¿Qué son los terremotos?, ¿Cómo se producen?* y *¿Dónde ocurren?*

Los temblores o terremotos (sismos más grandes), también conocidos como movimientos telúricos debido a su relación con la Tierra como planeta, son el resultado de la ruptura de las rocas, liberando súbitamente energía en un punto determinado de la corteza terres-

tre. Se transmiten en forma de ondas sísmicas que se propagan alejándose de su punto de origen, de igual manera que en un estanque lo hacen las olas al alejarse del punto donde arrojamos una piedra. Se denomina **hipocentro** al lugar bajo la Tierra en donde se genera el sismo, y **epicentro** su proyección hacia la superficie.

En el caso del Ecuador el motor de la acumulación de energía para la generación de sismos es la subducción de la placa Nazca con la Sudamericana. En la figura 6, se puede observar las características topográficas tanto continentales como submarinas, diferenciándose claramente la placa de Nazca de la Sudamericana, cuyo contacto es bajo el nivel del mar.

DATO CURIOSO:

• La zona de subducción del Ecuador tiene una fosa de profundidad máxima de 6 km (zona sur, frente al Golfo de Guayaquil). Esta es una fosa de poca profundidad comparada con la fosa de las Islas Marianas que alcanza los 11 km de profundidad.

LAS FALLAS GEOLÓGICAS EN EL ECUADOR

Una falla geológica es una fractura en las rocas que por efecto de las grandes fuerzas a la que está sometida, se mueve, provocando sismos. En el Ecuador debido a que la interacción de las placas Nazca y Sudamericana produce fuerzas muy importantes sobre los bordes de ambas placas, se producen fracturas en el interior de ellas, denominándose **fallas geológicas**.

Existen varios tipos de fallas que se han clasificado por el movimiento relativo que experimentan los blo-

ques que las forman (Anexo 2). En el Ecuador, así como en muchos otros lugares con características similares, existen casi todo tipo de fallas, que se agrupan en sistemas de fallas que se caracterizan por su geometría, extensión y tipo de movimiento.

La identificación de estas fallas es de gran importancia para poder determinar cuáles pueden constituir una amenaza para el Ecuador. Un mapa inicial que describe estos sistemas se puede consultar en la página web (*www.igepn.edu.ec*). Una actualización del mapa se está preparando y se muestra en la figura 7. Por otro lado, las fallas que se encuentran descritas son aquellas que se presume pueden tener movimientos recientes, ya que existen otras que durante el tiempo geológico se movieron pero que en la actualidad no son una amenaza y no se toman en cuenta para estos estudios.

Para lograr que nuestros lectores tengan una idea aproximada de las fallas que existen en el Ecuador, se va a detallar unos pocos ejemplos de fallas activas tratando de describir sus características de la manera más concreta posible.

El principal sistema de fallas activo del Ecuador es el Pallatanga-Chingual, que comienza en el Golfo de Guayaquil, pasa por la Isla Puná, continúa por la zona de La Troncal, ingresa a la cordillera por Bucay y continúa por Pallatanga, donde su identificación es muy clara. Al salir al valle de Riobamba su trazo no es evidente debido a la gran cantidad de material volcánico reciente, que cubre las evidencias de movimiento. Hacia el norte se interna en el Callejón Interandino y continúa hasta empatarse con la falla de Chingual, ubicada al extremo nor oriental del Ecuador y que se inicia al norte del volcán Cayambe (Figura 7). Se cree que el sismo que destruyó la antigua ciudad de Riobamba en

1797, cuya magnitud estimada fue mayor a 7, se produjo en uno de los ramales de este sistema (Soulas *et al.*, 1991).

Otro sistema de fallas importantes se ubica en el borde subandino de la cordillera Oriental de los Andes, éste nace de la falla Chingual en el sector de la población de La Sofía y se dirige al sur pasando por el lado occidental del volcán El Reventador. Luego, continúa hacia Baeza y sigue hasta la zona de Consanga (Figura 7). Este sistema se caracteriza por estar compuesto de fallas principalmente transcurrentes e inversas. Se cree que la falla ubicada al oeste del volcán El Reventador fue la causante del sismo de magnitud 6,9 de marzo de 1987.

Hacia el oriente del borde Subandino, se identifica además el sistema de fallas inversas que limitan la parte este de los Andes de la llanura amazónica, y se extiende desde Colombia, pasando por el Ecuador y continuando hacia el Perú (Figura 7). Está compuesto por una serie de fallas con diferente tipo de movimiento. Una de estas fallas en el sector de la cordillera de Cutucú, fue la causante del sismo denominado de Macas de 1995, cuya magnitud fue 6,9.

Otros sistemas de fallas menos extensas que las anteriores, pero que podrían afectar zonas pobladas son: el sistema de fallas Quito, el sistema Pastocalle-Poaló-Saquisilí y el sistema de fallas El Ángel-San Gabriel (Figura 7). El sistema de fallas Quito muestra en superficie una serie de colinas alineadas de baja altura que se inician en el sector de Tambillo y continúan al norte con las lomas de Puengasí, Ilumbisí, El Batán, La Bota, Bellavista y Catequilla, en el sector de la Mitad del Mundo. Su longitud total se estima en 45 km. Esta falla provocó que la zona en donde se ubica la ciudad ac-

tual esté elevada sobre el resto del Callejón Interandino entre 300 y 400 m. La falla muestra una actividad microsísmica constante con ocasionales eventos de magnitud superior o igual a 4,0 grados en la escala de Richter, se estima que el sismo probable que podría generar sería entre 6 y 6,5. En el anexo 2 se hace una descripción más detallada de este sistema.

El sistema Pastocalle-Poaló-Saquisilí muestra características muy similares al de Quito, sin embargo es más extenso que este y los bloques levantados no superan los 200 m. Una falla asociada a este sistema pudo generar el sismo de Pastocalle de 1976 de 5,1 grados en la escala de Richter. En el anexo 2 también se hace una breve descripción de éste y el de El Ángel-San Gabriel, al que se le atribuye el sismo de Ibarra de 1868.

DATOS CURIOSOS:

- *El sistema de fallas más largo del territorio ecuatoriano es el Subandino, que se extiende por unos 200 kilómetros en dirección casi Norte-Sur en el costado oriental de la Cordillera Real.*

- *Los sismos más profundos en el Ecuador ocurren bajo la zona oriental, sobre la corteza oceánica subductada que se encuentra a una profundidad mayor a 200 km.*
  El evento más profundo hasta ahora detectado –275 km– ocurrió el 9 de noviembre de 2005, a unos 50 km al este de la población de Tena y tuvo una magnitud de 5,3 grados.

■ SISMOS RELACIONADOS CON VOLCANES

Es necesario mencionar otro tipo de sismos cuya fuente está asociada a los volcanes. Estos sismos se originan en la sobrepresión generada por los fluidos

magmáticos que tienden a salir a la superficie y/o por el movimiento o vibraciones que causan estos fluidos al abrirse paso entre las rocas. Debido a esto, tienen diferentes características que permiten su clasificación. En el anexo 3 se muestran los principales tipos de sismos generados en volcanes y que son usados dentro del monitoreo. Esta clasificación es referencial, ya que cada volcán tiene su propio comportamiento.

Las características más comunes de los sismos asociados con volcanes son las siguientes:

- La ubicación del epicentro se relaciona con el edificio volcánico. Los sismos volcánicos del Ecuador están bien catalogados para cada volcán en base a los datos del monitoreo continuo de los mismos.
- La profundidad característica de estos sismos se considera "superficial" y va generalmente de 1 a 10 kilómetros.
- La magnitud puede ser variable, pero los sismos relacionados con volcanes tiene magnitudes generalmente bajas, entre 1 y 4,5 grados máximo. La magnitud siempre es proporcional a la energía que se libera.
- Al tratarse de sismos de magnitudes bajas y de poca profundidad, las ondas liberadas solamente podrían ser sentidas en las proximidades del volcán y muy rara vez causar daños en los lugares más próximos al epicentro.
- En cuanto a la frecuencia con la que ocurren estos sismos (recurrencia), es necesario decir que cada volcán produce en períodos cortos de tiempo, una serie de eventos sísmicos o concentraciones de dichos eventos llamados "enjambres de sismos". Esto se da especialmente cuando se produce una inyec-

ción de material magmático nuevo en el volcán.

- La existencia de mayor o menor número de sismos puede constituir una guía para identificar las condiciones de una futura erupción. Aunque hay una relación inequívoca entre los tipos de sismos, o de un cierto número de sismos de una magnitud determinada con la inminencia de una erupción, es imposible o al menos muy difícil de establecerla.
- Por otro lado, la información que da la sismicidad es una parte del proceso de control, ya que en el monitoreo se aplican numerosas técnicas, que en conjunto permiten tener una visión global de lo que ocurre en el volcán.

2. La historia sísmica del Ecuador

En términos generales, si tomamos en cuenta los temblores de pequeña magnitud y los que no son sentidos por las personas y son detectados únicamente por los sismógrafos, el número de sismos que se registran en nuestro territorio puede sumar varios miles por año. De esta gran cantidad de actividad sísmica, desde 1541 hasta la actualidad, han ocurrido en nuestro país 37 terremotos de intensidad igual o mayor a VIII en la escala de intensidad MSK (viene de las iniciales **M**edvedev-**S**ponheuer-**K**arnik), intensidad desde la cual los efectos son de consideración. En el anexo 4 se hace una descripción de las escalas de intensidad, incluida la MSK. Y si se toma en cuenta los sismos a partir de la intensidad VI (que es el grado desde el cual se presentan daños leves), hay que añadir 86 eventos al registro histórico de sismos importantes.

Es imposible cuantificar las pérdidas materiales ocasionadas por estos terremotos, y en lo referente a las pérdidas de vidas humanas, éstas superan las 80.000 muertes.

La figura 8 muestra las localizaciones de los sismos con magnitud mayor a 4 ocurridos en el Ecuador y, como se puede advertir, los epicentros cubren prácticamente todo el territorio, con zonas de mayor y menor concentración de eventos (Anexo 4). Esto demuestra que todo el territorio ecuatoriano está expuesto a este tipo de fenómenos en cualquier momento. La información que proviene del monitoreo indica que el promedio anual de sismicidad en el país es de 2.600 eventos, de

éstos alrededor de 300 tienen magnitudes superiores a 4 grados y pudieron ser sentidos por la población.

En lo que a la intensidad se refiere, los terremotos de grado igual o mayor a VIII MM (Mercalli Modificada), son aquellos cuyos efectos se catalogan entre considerables y catastróficos, razón por la cual se los considera para los estudios de análisis de peligro sísmico. En concordancia con este criterio, para nuestro territorio, se ha extraído del Catálogo de Terremotos del Ecuador el listado de los eventos que han tenido intensidades iguales o mayores a VIII (Tabla 1) y que, por consiguiente, han constituido verdaderas catástrofes en nuestra historia. Como puntos de referencia para el lector, recordemos que los últimos terremotos que padeció el Ecuador son: el de Pujilí (1996), que fue un terremoto moderado de intensidad máxima VII, a pesar de lo cual se produjeron serios problemas especialmente en el sector rural; el sismo ocurrido en 1998, cuyo epicentro se localizó muy cerca de Bahía de Caráquez, en donde se estimó una intensidad máxima de VIII. En la tabla 1, se encuentra el listado de eventos que alcanzaron intensidades superiores a VIII, indicando la provincia que tuvo el mayor impacto.

DATO CURIOSO:

• *El primer sismo del que se tiene referencia en el Ecuador, ocurrió en 1541 y su epicentro se ubicó en la provincia de Napo. Este evento da inicio al catálogo sísmico en el país.*

Tabla 1. Terremotos del Ecuador con intensidades ≥ VIII

No.	FECHA Año/mes/día			EPICENTRO Lat.	Lon.	INT MAX	ZONA DE MAYOR AFECTACIÓN
1	1541	04	sd	0,10	-77,80	VIII	Napo
2	1587	08	31	0,00	78,40	VIII	Pichincha
3	1645	03	15	1,68	-78,55	IX	Chimborazo, Tungurahua
4	1674	08	29	1,70	-79,00	IX	Chimborazo, Bolívar
5	1687	11	22	-1,10	-78,25	VIII	Tungurahua
6	1698	06	20	1,45	78,30	X	Tungurahua, Chimborazo
7	1736	12	06	0,78	78,80	VIII	Pichincha, Cotopaxi
8	1749	01	20	4,00	79,20	VIII	Loja
9	1755	04	28	0,21	78,48	VIII	Pichincha
10	1757	02	22	0,93	78,61	IX	Cotopaxi, Tungurahua
11	1786	05	10	1,70	78,80	VIII	Chimborazo
12	1797	02	04	-1,43	-78,55	XI	Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi, Bolívar
13	1834	01	20	1,30	-76,90	XI	Carchi, Nariño* (Colombia)
14	1859	03	22	0,40	78,40	VIII	Pichincha, Imbabura, Cotopaxi
15	1868	08	15	0,60	78,00	VIII	Carchi
16	1868	08	16	0,31	78,18	IX	Imbabura, Carchi, Pichincha
17	1896	05	03	0,51	80,45	IX	Manabí
18	1906	01	31	1,00	81,30	IX	Esmeraldas. Nariño (Colombia)
19	1911	09	23	1,70	-78,90	VIII	Chimborazo, Bolívar

No.	FECHA Año/mes/día	EPICENTRO Lat.	Lon.	INT MAX	ZONA DE MAYOR AFECTACIÓN
20	1913 02 23	4,00	79,40	VIII	Loja, Azuay
21	1914 05 31	0,50	78,48	VIII	Pichincha, Cotopaxi
22	1923 02 05	0,50	78,50	VIII	Pichincha
23	1923 12 16	0,90	77,80	VIII	Carchi, Nariño (Colombia)
24	1926 12 18	0,80	77,90	VIII	Carchi
25	1929 07 25	0,40	78,55	VIII	Pichincha
26	1938 08 10	0,30	78,40	VIII	Pichincha
27	1942 05 14	0,01	-80,12	IX	Manabí, Guayas, Bolívar
28	1949 08 05	1,25	78,37	X	Tungurahua, Chimborazo, Cotopaxi
29	1953 12 12	3,40	80,60	VIII	Loja, norte del Perú
30	1955 07 20	0,20	78,40	VIII	Pichincha, Imbabura
31	1958 01 19	1,22	79,37	VIII	Esmeraldas
32	1961 04 08	2,20	-78,90	VIII	Chimborazo
33	1964 05 19	0,84	80,29	VIII	Manabí
34	1970 12 10	-3,79	80,66	IX	Loja, El Oro, Azuay, norte del Perú
35	1987 03 06	0,87	-77,14	IX	Napo, Sucumbíos, Imbabura
36	1995 10 02	-2,79	-77,97	VIII	Morona Santiago
37	1998 08 04	-0,55	-80,53	VIII	Provincia de Manabí

* Intensidad máxima en Nariño, Colombia: XI Latitud = Lat.; + = Norte, - = Sur.
Longitud = Lon: - = Oeste INT = Intensidad máxima sd = sin fecha exacta

Tomado de: Egred, inédito.

De la tabla anterior se pueden extraer los siguientes datos:

Número total de terremotos destructivos	37
Período de años (1541-1999)	458
Promedio de sismos destructivos por año	0,08
Recurrencia de sismos destructivos (años)	12,37

De estos datos se puede deducir que en promedio cada 12 años nuestro país ha tenido que soportar un terremoto destructor, pero en la realidad los intervalos entre un sismo destructor y el siguiente han sido muy variables, siendo el mayor intervalo de 68 años (entre 1587 y 1645), y el menor intervalo de 1 día en agosto de 1868. Son también significativos los intervalos entre 1923-1929, en que ocurrieron cuatro terremotos de intensidad VIII, cuatro eventos de intensidad VII y dos de intensidad VI, que totalizan diez sismos importantes en 6 años. Entre 1953-1964 se produjeron cinco terremotos de intensidad VIII, cinco de intensidad de VII y cuatro de intensidad VI, con un total de 14 eventos importantes en 11 años. Estos períodos fueron verdaderamente nefastos para el país pues, especialmente en el primer caso (año de 1968) y en el tercero (entre 1953-1964), ocurrieron en promedio más de un terremoto por año.

Los terremotos de intensidad VII, sin ser tan catastróficos como en los grados superiores, pueden ocasionar daños de consideración especialmente en las construcciones de adobe, típicas de los sectores rurales y periféricos de las ciudades, principalmente en la serranía ecuatoriana. Por consiguiente, estos terremotos afectan en particular a las clases sociales de menores recursos económicos que habitan ese tipo de construcciones, además de casas y monumentos coloniales.

La intensidad VI es aquella a partir de la cual se presentan daños moderados en las construcciones, sin afectarlas estructuralmente y, por ende son fácilmente reparables y con inversiones relativamente bajas. Desde 1541 a la fecha, han ocurrido 50 sismos de estas características, incluyendo el sismo de Santa Rosa del Tejar de Imbabura del 8 de octubre de 2000, de magnitud 5,4.

De todo lo dicho, podemos llegar a la conclusión de que los terremotos pueden ocurrir indistintamente en cualquier momento y en cualquier región, esto fundamentalmente debido a que existen numerosas fuentes que pueden producir sismos, tal como se explicó anteriormente.

La distribución de la intensidad de los efectos provocados por un terremoto nos muestra que la distancia entre un sitio afectado y el sitio donde se ubica el epicentro del sismo no es el único factor que debe ser tomado en cuenta para observar efectos similares a los cercanos al epicentro. Varios estudios que consideran el **efecto de sitio** permiten entender mejor esta situación. En estos estudios queda claro que el entorno geológico en el que está asentada una comunidad o una infraestructura es determinante en el resultado de los efectos de un terremoto, es decir la intensidad.

■ SISMICIDAD HISTÓRICA EN RELACIÓN CON LAS REGIONES FISIOGRÁFICAS

La sismicidad es diferente de acuerdo a las características geológicas y tectónicas de cada región, las mismas que dependen de varios factores, como la estructura y composición del subsuelo, las fallas tectónicas activas del lugar, entre otras. Como resultado de las diferentes condiciones sísmicas de cada región,

también la amenaza sísmica potencial difiere entre estas regiones.

Al hacer el análisis estadístico de la sismicidad histórica en el Ecuador, se observa una alta concentración de eventos a nivel del Valle Interandino (Zona del Arco Volcánico) y sus zonas próximas. En este entorno ocurrió el terremoto de mayores daños del que se tenga conocimiento con intensidad XI (en 1797) y los dos que han tenido intensidad X (en 1698 y 1949). Se observa también que la cantidad de terremotos de grado VIII es mucho mayor que en otras regiones. Por otro lado, las máximas intensidades registradas en las zonas de la planicie costera (Ante Arco), la zona subandina y de la planicie oriental (que comprende el Tras Arco) son de IX y se han registrado en menos ocasiones que en la Sierra.

Sin embargo, estas características se deben fundamentalmente a que el Valle Interandino ha tenido históricamente una mayor densidad poblacional y por ende mayor cantidad de infraestructuras, siendo estos unos de los componentes que se evalúan cuando se asignan intensidades de un sismo. De ninguna manera significa que las magnitudes máximas registradas, es decir, la mayor cantidad de energía sísmica liberada se ubiquen en esta región, en este caso la máxima energía liberada ocurrió en el sismo del 31 de enero de 1906, que tuvo lugar frente a las costas de Esmeraldas con una magnitud de 8,8, que lo ubica como uno de los eventos más grandes registrados a escala mundial desde que se tiene vigilancia instrumental. Dicho sismo está relacionado a la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental Sudamericana. Sus efectos no causaron serios daños, porque en aquella época la zona que hoy ocupa la provincia de Esmeraldas estaba escasamente poblada y el epicentro se ubicó costa afuera.

Sismos en el Valle Interandino

Entre los sismos históricos registrados se destaca el terremoto de Riobamba ocurrido en febrero de 1797 con intensidad máxima de XI. Por sus efectos, es el terremoto que mayores daños ha causado en nuestro territorio hasta la actualidad. En este sismo, incluso ocurrieron cambios en la topografía del terreno de lo que actualmente es la provincia de Chimborazo. Debido al alto grado de destrucción que sufrió la ciudad de Riobamba, ésta fue reubicada en el lugar que ocupa actualmente. También sufrieron daños considerables las actuales provincias de Tungurahua, Cotopaxi, Bolívar e incluso Pichincha. En Quito fueron afectados todos sus templos (J. Egred, 2004). Este evento tiene como probable origen una ruptura de la falla de Pallatanga cuyo trazo pasa cerca de la zona de Colta.

En la época colonial también se dieron otros grandes terremotos, como el de 1698 (intensidad X) que afectó las provincias del Chimborazo y Tungurahua y cuyos efectos se extendieron en todas las otras provincias centrales del país. Estas mismas provincias fueron epicentros de otros terremotos de intensidades VIII y IX. Algunos de estos terremotos han causado efectos en la provincia de Pichincha. En comparación con las ciudades de las provincias centrales, los efectos en Quito han sido de menor cuantía, pero no por ello menos significativos, dado que la capital siempre tuvo mayor desarrollo. Además, Pichincha ha sido escenario de varios epicentros importantes en la época colonial.

La provincia de Imbabura también ha sufrido serias consecuencias con los terremotos. Se destaca el que tuvo lugar en agosto de 1868, conocido como el "terremoto de Ibarra", que provocó daños muy importantes en la ciudad y sus alrededores. Este evento posible-

mente tiene como fuente una ruptura en alguna de las fallas del sistema El Ángel-San Gabriel.

En época más reciente, tenemos el terremoto de Ambato-Pelileo ocurrido en agosto de 1949, con intensidad máxima X y cuyos efectos se extendieron en las provincias de Tungurahua, Cotopaxi, Chimborazo, parte de Bolívar, Pichincha y Pastaza, siendo uno de los terremotos más desastrosos del presente siglo en el Ecuador. De acuerdo a varios estudios, se considera que la zona epicentral se ubica en el sector de Pisayambo, sin embargo no se ha podido asociar a un sistema de fallas en particular. En la figura 9 a y b, se observan los daños causados por el terremoto de 1949.

La provincia de Bolívar, aun cuando no ha sido escenario de epicentros de los grandes terremotos, se ha visto seriamente afectada por sismos que se originaron en las provincias vecinas e incluso en la Costa.

Al sur del Valle Interandino, en la zona correspondiente a las provincias de Cañar, Azuay y Loja, únicamente el terremoto con epicentro cercano a Loja de 1970 llegó a tener efectos de intensidad VIII. Sin embargo la provincia de Loja ha registrado intensidades de VIII, a causa de la incidencia de terremotos de gran magnitud cuyos epicentros estuvieron ubicados en el norte del Perú. En Cañar, la máxima intensidad ha llegado a VII.

Dentro del Valle Interandino queda por mencionar la provincia de Carchi, donde en una sola ocasión (1868) se ha presentado un terremoto de intensidad VIII. Pero esta provincia ha sufrido afectaciones por causa de sismos en provincias vecinas. En todo caso, la ciudad de Tulcán, sumada a Cuenca y Azogues, son las capitales de provincia menos destruidas por terremotos en nuestra historia.

Sismos en la región costera

La zona costera ha registrado los sismos con magnitud más importante, tal como se indicó anteriormente. Todos estos eventos tienen como origen rupturas en la zona de subducción y es por esta razón que la energía liberada es muy importante. A parte del sismos de 1906, cabe destacar otros eventos como los siguientes: el sismo de mayo de 1942, en la costa de Manabí, con magnitud de 7,8, el sismo de enero de 1958 de magnitud 7,7 y el de diciembre de 1979 de magnitud 8,2. Las zonas epicentrales de los dos últimos eventos mencionados se ubican entre Esmeraldas y el sur de Colombia.

El último sismo con magnitud 7,1 ocurrió frente a la ciudad de Bahía de Caráquez, provocando ingentes pérdidas económicas, en especial al sector turístico, ya que hubo una importante reducción del flujo turístico a la zona, así como pérdidas debido al desplome y daños estructurales de algunos edificios ubicados en la ciudad.

Sismos en la región oriental

En la región oriental la cantidad de sismos históricos es menor y éstos han provocado daños moderados. Sin embargo en épocas recientes se registraron dos eventos de importancia como son, el terremoto en la zona de El Reventador, ocurrido el 5 de marzo de 1987 y el del Cutucú el 3 de octubre de 1995, ambos de magnitud 6,9 en la escala de Richter. El terremoto de El Reventador ocasionó graves efectos en la economía nacional. El origen del sismo de este sismo está relacionado al sistema de fallas subandinas que pasan al occidente del volcán El Reventador, tal como se indicó anteriormente. En el caso del sismo del Cutucú, su origen es-

tá asociado a los sistemas de fallas que pasan de norte a sur por el borde oriental de los Andes.

En el detalle histórico se menciona que el terremoto de 1541 se produjo en esta región destruyendo una población indígena, en una zona que a esa fecha era casi despoblada. Este es el primer sismo reportado en nuestro territorio, luego de la llegada de los españoles.

Sismos en la región insular de Galápagos

Por su origen tectónico y volcánico, la región de Galápagos es altamente sísmica y volcánica, pero los sismos de esa zona se caracterizan por ser de magnitudes moderadas y consecuentemente nunca se ha presentado un sismo de intensidad mayor o igual a VIII.

En el anexo 5 se presenta una tabla en la que constan las intensidades máximas registradas en cada provincia en el Ecuador.

■ TSUNAMIS DEL ECUADOR

Tsunami, del **japonés** *tsu*: puerto o bahía y *nami*: ola, que literalmente significa *gran ola en el puerto,* es una ola o un grupo de olas de gran energía que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua. Otra denominación para este fenómeno es maremoto.

Los tsunamis son ondas que se propagan a través de los océanos y/o mares a gran velocidad, con períodos y longitudes de onda extremadamente largos. Aunque los mecanismos para generar un tsunami son variados, comúnmente se asocian a terremotos con epicentros en el piso oceánico.

Las ondas marinas no son percibidas a bordo de embarcaciones que se encuentran mar adentro en aguas

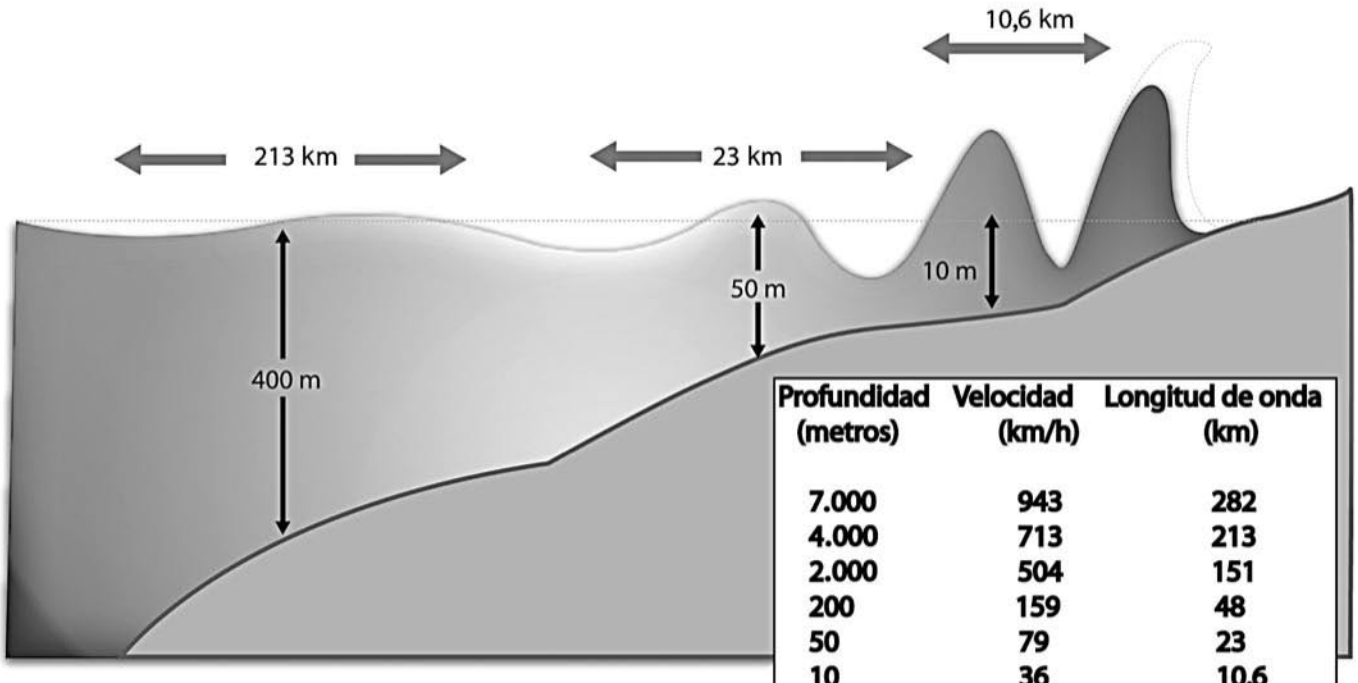
profundas, pero mientras más se acercan a las costas aumentan de tamaño hasta alcanzar alturas que pueden superar los treinta metros (casos excepcionales) causando severos daños en las zonas costeras. En la figura 10 se esquematiza como el tsunami llega a las zonas costeras.

La magnitud de un tsunami generado por un sismo depende de varios factores como: las características de la ruptura y magnitud del terremoto, la configuración del perfil costanero, el relieve de la fosa marina y las características del avance de la onda. Estas ondas no tienen relación con las mareas o con las olas producidas por el viento, que cuando son intensas se las llama marejadas.

Los tsunamis se pueden estimar, tomando en cuenta los factores mencionados como el epicentro y magnitud del terremoto, y como se conoce la velocidad a la que viajan las ondas, es posible anunciar la intensidad y la hora aproximadas con las que puede llegar a la costa. El tiempo que demora en llegar la ola marina a la costa depende de la distancia entre el epicentro y la costa, pudiendo ser desde unos pocos minutos hasta horas en caso de sismos lejanos.

A veces es fácil anticipar si luego de un sismo en la costa se va a producir un tsunami, pues suele ocurrir que el mar se retira como si bajara rápidamente la marea, y lo hace hasta distancias superiores a las de las mareas, a tal punto que en ocasiones han quedado peces en las orillas.

A partir del año 1900 han ocurrido más de dos mil tsunamis en las costas del Océano Pacífico, la mayoría de los cuales no han tenido efectos graves, pero unos pocos han causado gran destrucción. Por lo menos un treinta por ciento del total ha ocurrido en las costas de Japón y un diez por ciento en Sudamérica.



Profundidad (metros)	Velocidad (km/h)	Longitud de onda (km)
7.000	943	282
4.000	713	213
2.000	504	151
200	159	48
50	79	23
10	36	10,6

Figura 10. Diagrama que muestra el movimiento de mar para generar un tsunami.

Las costas ecuatorianas no han estado exentas de estos fenómenos naturales. En la tabla 2 se muestra un resumen de los tsunamis registrados en el Ecuador. Debe recalcarse la dificultad de encontrar datos relativos a la ocurrencia de estos fenómenos antes de 1896, debido a la poca población que se encontraba en la zona costera. Sin embargo, es importante aclarar que debieron haberse producido muchos eventos a lo largo de la historia que lamentablemente no han sido identificados.

De los sismos que han producido tsunamis, el que mayor cantidad de daños causó fue el de 1979 con graves afectaciones a la ciudad de Tumaco en el sur de Colombia.

Tabla 2. Tsunamis que afectaron al Ecuador, relacionados con terremotos de subducción cercanos al Ecuador

Fecha	Lugar afectado	Epicentro del terremoto (lat. long.)	
1896-mayo-3	Manta-Bahía	-0,50	80,45
1906-enero-31	Esmeraldas y costas de Colombia	1,00	81,30
1933-octubre-2	Península de Santa Elena	-2,00	-81,00
1953-diciembre-12	Costas peruanas y Península de Santa Elena	-4,00	-81,00
1958-enero-19	Costas de Esmeraldas, Salinas, El Callao (Perú)	1,22	79,37
1970-diciembre-10	Guayaquil, costas de El Oro	-3,79	-80,66
1976-abril-9	Esmeraldas	0,85	-79,63
1979-diciembre-12	Costas norte del Ecuador y sur de Colombia	2,00	-78,90

(Extracto de: CATÁLOGO DE TERREMOTOS DEL ECUADOR-INTENSIDADES, Escuela Politécnica Nacional-Instituto Geofísico, José Egred A.)

3. Investigando los terremotos para minimizar sus efectos

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL MONITOREO SÍSMICO EN EL ECUADOR

La historia de los primeros estudios relacionados con la Geofísica en el Ecuador va íntimamente ligada a la de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) y, en sus inicios, al Observatorio Astronómico de Quito, entidades que nacieron juntas, pero sin lazos de dependencia. En el siglo XIX, la EPN fue cuna de las primeras investigaciones geológicas y vulcanológicas, y el Observatorio Astronómico de Quito fue la institución donde se inició el estudio de la sismología a nivel nacional.

Las primeras observaciones geofísicas que se realizaron en el Observatorio Astronómico estuvieron dedicadas a la declinación magnética, pero también se orientaron a los eventos tectónicos, como se desprende de las crónicas que se publicaron en los boletines del Observatorio, donde, a más de datos meteorológicos, constan noticias sobre sismos sentidos en Quito o reportados desde otros lugares del país.

En esos primeros años, los instrumentos para las observaciones magnéticas que tenía el Observatorio sirvieron para las primeras *"observaciones de sismos"*, pues la aguja se alteraba cuando ocurría un sismo local.

En el año 1900 el astrónomo francés Francisco Gonnesiat gestiona la adquisición de instrumental sismológico para el Ecuador. Como resultado de esta iniciativa se logró instalar la primera estación sísmica que con-

sistía de dos sismógrafos horizontales marca Bosh-Omori.

En 1913 fuertes temblores que se sintieron en Azuay, Loja y Guayas, sirvieron de impulso para adquirir dos sismógrafos horizontales Mainka-Bosh, de gran calidad en su época, instalados en 1928.

Desde que entraron en funcionamiento las estaciones Mainka-Bosch se comenzaron a hacer en el Observatorio determinaciones epicentrales, con la precisión que la técnica de la época permitía.

En 1945 se instaló un "Acelerógrafo Montana" gracias a un convenio de cooperación entre el OAQ y el Coast and Geodetic Survey de los Estados Unidos (USCGS).

El Observatorio Astronómico de Quito adquirió tres sismógrafos *"Sprengnether"* con registro fotográfico que llegaron en noviembre de 1954 y en diciembre del mismo año comenzaron a funcionar en una sala subterránea especialmente adaptada para el efecto.

Al final de la década de los años 50, los Estados Unidos habían emprendido el proyecto de instalar la *"Red Mundial de Estaciones Sismológicas Estandarizadas"* (World-Wide Network of Standarized Seismograph Stations, WWNSSS) que inicialmente contemplaba el montaje de 125 estaciones distribuidas estratégicamente en todo el mundo. Una de éstas entró en funcionamiento en Quito en febrero de 1963.

En el año 1988 el CODIGEM (Corporación de Desarrollo Geológico y Minero) con la cooperación italiana instalaron una red de 10 sensores para el volcán Guagua Pichincha.

En el año de 1983 se fundó el Instituto Geofísico de la EPN (IG-EPN) con la intención de concentrar los es-

fuerzos por estudiar los volcanes y paralelamente la actividad sísmica en el Ecuador. La idea fue impulsada por el doctor Minard Hall y varios estudiantes voluntarios de geología y electrónica que llegaron a ser parte de esta iniciativa, contando inicialmente con 2 estaciones.

A partir de 1988, se instalan las primeras estaciones sísmicas con recepción en Quito con el doble propósito de vigilar la actividad tanto volcánica como tectónica en el país, por esta razón, el Valle Interandino fue la primera zona en ser vigilada.

Hasta 1992 se completaron pequeñas redes en los volcanes Guagua Pichincha, Cotopaxi y Tungurahua. En el Cotacachi, Chimborazo, Cayambe y Antisana se instaló una estación por volcán.

En la Costa, la vigilancia sísmica empezó en 1991 y hasta 1998 se completaron 6 estaciones regularmente repartidas a lo largo de la línea costera. En el Oriente, han funcionado estaciones en tres sectores, Palora, Tena y El Reventador, esta última a raíz de la reactivación de este volcán en el año 2002.

Después de que se cerró el CODIGEM los equipos pasaron en comodato al IG-EPN en el año de 1998 y sirvieron para reforzar la red ya existente en el volcán Guagua Pichincha.

La red de estaciones se agrupó dentro de lo que se denomina la Red Nacional de Sismógrafos del Instituto Geofísico (RENSIG) y actualmente cubre un 70% del territorio continental del país, con estaciones ubicadas en la Costa, Sierra y Oriente, faltando cubrir la parte sur del Ecuador.

En la figura 11 se muestra la distribución de la RENSIG que actualmente cuenta con 17 estaciones de período corto, 6 estaciones de 5 segundos y 8 estaciones

de banda ancha. Para la localización de eventos se utilizan también las estaciones sísmicas pertenecientes a los observatorios vulcanológicos. Todas estas estaciones han sido incorporadas dentro de varios proyectos o convenios que hasta el momento se mantienen, como: la Red Mundial IRIS, Institut de Recherche pour le Développement (IRD de Francia), Servicio Geológico de Canadá, DIPECHO-CRS, USGS, Natural Resource of Canada, Japanese International Cooperation Agency (JICA de Japón) y OEA.

En el sector insular de las Islas Galápagos se cuenta con 5 estaciones sísmicas instaladas en las islas Fernandina (1 estación), Isabela (3 estaciones) y Bartolomé (1). Adicionalmente, en Santa Cruz está instalada 1 estación de banda ancha que es parte de la red mundial de estaciones sísmicas IRIS.

La RENSIG emite reportes sísmicos para las autoridades, medios de comunicación y población a partir de magnitudes iguales o superiores a 4 grados en la escala de Richter, magnitud sobre la cual la mayoría de eventos son sentidos, o para eventos de magnitud menor que hayan sido percibidos por la población. Por otro lado, se realizan informes sísmicos sobre eventos de importancia ocurridos en el país o en países vecinos, y cada año se realiza un informe de la actividad sísmica anual del país. A través de esta red el país cuenta con una base de datos sísmica continúa e ininterrumpida desde 1988.

Además, en colaboración con el CERESIS (Centro Regional de Sismología), el IG compiló la información instrumental del Ecuador desde 1900 hasta 1990, y efectúo la base sísmica histórica desde 1541. Por lo tanto, se cuenta con una base de datos sísmicos desde 1541.

■ MONITOREO SÍSMICO

Existen tres principales objetivos para los cuales se implementan redes sísmicas: para emitir avisos, establecer las características de la sismicidad de una región e investigar el interior de la Tierra.

Con respecto al primer objetivo, la función de los avisos es dar una información rápida y precisa de dónde ocurrió el evento para que los organismos encargados de la emergencia den prioridad a esa zona. Por lo tanto se requiere establecer con la mayor precisión posible la localización epicentral de un sismo. Para este propósito se necesitan al menos tres estaciones que registren el evento.

Con el segundo objetivo lo que se busca es obtener una base de datos que permita evaluar el peligro sísmico de una región, al definir las áreas más propensas a sufrir aceleraciones importantes, producidas por el paso de las ondas sísmica por la región. Debido al grado de aceleración que impriman las ondas sísmicas, se tendrán los efectos en las edificaciones. Estos datos son importantes para el diseño de estructuras y para realizar el reforzamiento estructural de aquellas ya construidas.

Finalmente, cumplir el tercer objetivo permitirá conocer la estructura interna de la Tierra y comprender su funcionamiento.

Para el monitoreo sísmico se utilizan 2 tipos de instrumentos, los acelerógrafos y los sismómetros. Los primeros registran la aceleración del suelo y los segundos miden la velocidad. Los acelerógrafos son usados fundamentalmente para registrar movimientos fuertes, que están relacionados con sismos grandes o terremotos. Se usan especialmente en zonas pobladas para ver

el comportamiento del suelo sobre el que se asientan las ciudades. En cambio los sismómetros pueden detectar sismos de cualquier magnitud.

Esto condiciona la selección de uno u otro tipo de sensor para ser instalado en una región. Debido a que los sismómetros son sensibles en un rango más amplio, estos equipos son los que frecuentemente se emplean en el monitoreo.

Por otro lado, actualmente se pueden dividir los tipos de sismómetros en tres categorías:

- Períodos cortos, son los que pueden registrar ondas que tienen frecuencias entre 0,1 a 100 Hz.
- Sensores de banda ancha cuyo rango de registro va desde 0,01 a 100 Hz.
- Finalmente los que pueden registrar desde 0,001 Hz hasta 10 Hz, que reciben el nombre de sensores de "banda muy ancha".

Los sismómetros de período corto se caracterizan por ser fáciles de instalar y operar y no requieren mucha energía. Con ellos se pueden obtener buenos resultados en la localización de eventos, sin embargo para el cálculo de magnitudes y análisis sísmicos tienen restricciones debidas a sus características técnicas (Trnkoczy *et al.*, 2002).

Los sensores de banda ancha son muy populares actualmente. Estos proveen una información sísmica completa debido a que pueden registrar ondas en un mayor rango de frecuencias, lo que ayuda a estudios sismológicos más detallados permitiendo dar una visión más completa del fenómeno. Sin embargo, son equipos mucho más costosos y su instalación y mantenimiento involucran procesos de mayor complejidad.

Del mismo modo, el análisis de datos requiere rutinas diferentes y herramientas informáticas más avanzadas (Trnkoczy *et al.*, 2002).

Los sensores de "banda muy ancha" tienen un mayor rango de registro y se emplean principalmente en estudios sismológicos globales. Permiten detectar movimientos muy leves como las denominadas "mareas terrestres", que es un fenómeno similar al que ocurre en el océano, en el caso de la Tierra las fuerzas gravitacionales que ejercen el Sol y el resto de planetas sobre la Tierra deforman la corteza terrestre. Estos sensores son mucho más costosos y debido a su sensibilidad los lugares de instalación deben estar en la mayoría de los casos bajo tierra en roca firme (Trnkoczy *et al.*, 2002).

La Red Mundial (IRIS) instaló dos estaciones sísmicas banda ancha en Otavalo y Galápagos, cuya objetivo principal es la de registrar eventos sísmicos importantes generados en cualquier lugar del planeta.

Como se indicó anteriormente uno de los objetivos del monitoreo es establecer la localización de un sismo. Por lo que a continuación se resume el proceso de localización y estimación de la magnitud de un sismo.

¿Cómo se localiza un sismo?

Una de las metodologías más sencillas para localizar el epicentro de un sismo es la triangulación. Este método, al igual que los otros, usan los diferentes tipos de ondas que generan los sismos, las mismas que viajan a distintas velocidades, por lo que arriban a las estaciones sísmicas a diferente tiempo.

Las llamadas ondas *P* o primarias viajan más rápido que cualquier otro tipo de onda sísmica y en consecuencia llegan primero a cualquier estación. Las ondas *S* o

secundarias viajan aproximadamente a unos dos tercios de la velocidad de las ondas *P*. Conforme las estaciones se alejan de la fuente de las ondas, la diferencia en el tiempo de arribo de las ondas *P* y *S* se incrementa. En la figura 12 se muestra un ejemplo, en el cual se utilizan tres estaciones sísmicas de la RENSIG, la estación JAMA es la más cercana al epicentro y las ondas sísmicas llegan primero, y la estación COTA es la más alejada al epicentro. Se nota claramente la diferencia de tiempo que tiene cada arribo de la onda *P* y *S*.

El tiempo entre el arribo de la onda *P* y la onda *S* es medido en cada estación. Esta diferencia está relacionada con la distancia entre la estación y el sismo, tal como se saca la distancia entre el relámpago y el trueno por la diferencia en la llegada de la luz y el sonido. A base de la observación de muchos sismos se ha llegado a establecer un factor que permite transformar el tiempo en distancia, que para el caso del Ecuador es aproximadamente 8. Este factor, al multiplicar por la diferencia de tiempo de arribo de la onda *P* y *S*, da por resultado la distancia del lugar de origen del sismo para cada estación.

Tomando como centro cada estación, se dibuja un círculo de radio igual a la distacnia encontrada previamente. El punto de intersección de los círculos será la ubicación del sismo, tal como se observa en la figura 13.

Este procedimiento permite determinar únicamente el epicentro de un sismo superficial, es decir, menos de 30 km de profundidad. Lo anteriormente descrito es un procedimiento rápido y manual. Cuando se cuentan con más estaciones, se recurren a programas más sofisticados que entre otras cosas consideran las características del medio por el que viajan las ondas.

¿Cómo se determina la magnitud?

El concepto de magnitud fue introducido por Richter (1935) cuyo objetivo fue establecer de una manera instrumental el tamaño de un sismo o cuanta energía libera éste. La magnitud contrasta con la intensidad sísmica, cuyo valor se obtiene al evaluar la percepción de las personas y/o animales, los efectos en las estructuras (por ejemplo, muebles e inmuebles) y cambios en el paisaje, donde todos estos parámetros son dependientes de la distancia a la fuente (Bormann *et al.*, 2002).

Para este cálculo, Richter demostró que la amplitud de las ondas tiene una relación con la cantidad de energía liberada por el sismo a una distancia dada. En función de esto elaboró unas tablas y curvas para numerosos eventos, construyendo finalmente una ecuación que podría ser usada para calcular la magnitud. Como esta investigación se realizó en California, para estimar las magnitudes en otras regiones se determinó una escala de factores que permiten usar la ecuación en cualquier región.

En la actualidad existen numerosas maneras de calcular la magnitud de un sismo usando diferentes herramientas. En algunos casos las ecuaciones de magnitud pueden subestimar la energía del sismo, por esto se usan diversas maneras de cálculo para confirmar este parámetro. Lo que normalmente hacen los observatorios sismológicos en los catálogos sísmicos es reportar diferentes magnitudes. En el caso de los boletines sísmicos se toma la magnitud que más rápido puede calcularse, que para nuestro caso está basada en la duración del sismo. En el anexo 4 se describen brevemente los tipos de magnitudes, así como una relación entre la magnitud y la cantidad equivalente de dinamita.

■ MINIMIZAR LOS EFECTOS DE LOS TERREMOTOS

Está claro que la instrumentación y la cobertura nacional de las redes de sismógrafos proveen a los científicos miles y miles de datos sobre los sismos. Pero el lector se puede estar preguntando **¿Para qué sirven tantos datos? ¿Cómo se beneficia la sociedad del trabajo de los investigadores?**

Trataremos de explicar de manera simple el uso que se da a estos datos sísmicos y veremos cómo se relaciona con nuestro diario vivir en más de lo que podemos imaginar.

El estudio de un fenómeno natural como los sismos nos sirve para entender nuestro entorno natural, para saber en qué clase de territorio estamos habitando y a partir de aquello saber si el territorio que ocupamos para vivir, trabajar o donde hemos edificado nuestras principales obras de infraestructura es seguro. Dicho de forma más simple, el estudio de los sismos nos permite saber si el territorio en el que habitamos puede ponernos en una situación de peligro o no.

Existen varios métodos para estimar el grado de peligro que enfrentamos ante un fenómeno natural, en este caso surge la pregunta **¿Cuánto peligro tendremos que enfrentar si se produce un sismo?**

Entre los métodos más usados está el de la elaboración de escenarios sísmicos que se transforman en parámetros de referencia para la elaboración de zonificaciones del territorio, con fines de planificación o en parámetros de referencia para elaborar nuevos instrumentos reguladores como son los códigos de la construcción.

El resultado máximo y el más difícil de lograr es la generación de los mapas de riesgo sísmico que conden-

san la información relativa al fenómeno natural así como la información relativa a nuestras vulnerabilidades como sociedad.

Es decir el tratamiento responsable de la información sísmica tiene el objetivo de convertirse en un instrumento de planificación para el desarrollo sustentable de una sociedad.

■ REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

Es necesario aclarar que los elementos que configuran lo que se denomina el **riesgo** son: la amenaza o peligro y la vulnerabilidad. La **amenaza** o **peligro** tiene relación directa con el fenómeno, que en este caso es de origen natural y son los sismos. Estos fenómenos no pueden controlarse, es decir, no podemos como seres humanos evitar que sucedan, ya que son eventos que tienen una íntima relación con la dinámica de la Tierra como planeta. En cambio, la **vulnerabilidad** se asocia a nuestra capacidad para soportar la presencia de un evento. En caso de que suceda un terremoto, la vulnerabilidad está dada por la susceptibilidad a sufrir daños de nuestras casas o infraestructuras, el grado de preparación y capacidad como individuos y sociedad para organizarnos durante la emergencia y cómo el país puede económicamente reponerse de los efectos y consecuencias del terremoto.

Por lo tanto, nuestro nivel de riesgo sísmico está dado en función de las características del terremoto (amenaza) y nuestro grado de vulnerabilidad frente a este fenómeno. De acuerdo a lo anotado, podemos concluir que para disminuir el riesgo debemos disminuir nuestro grado de vulnerabilidad, es decir, prepararnos y capacitarnos para afrontar los efectos de un sismo, ya

que no podemos impedir la generación de un terremoto (amenaza).

En este sentido existen algunos mecanismos que pueden contribuir a disminuir nuestra vulnerabilidad desde una perspectiva física y/o funcional de infraestructuras. A continuación se sugieren como acciones las siguientes (Cardona, 2004):

- Aumentar la resistencia de las líneas vitales mediante el reforzamiento estructural.
- Reforzar edificaciones vulnerables que no pueden ser o no son factibles de reubicarse.
- Elaboración de "códigos de la construcción" que regulen la edificación de nuevos inmuebles.
- Adecuación de hospitales y sus vías de acceso para atención pronta y masiva de víctimas.
- Reubicación de viviendas, de infraestructura o de centros de producción localizados en zonas de alta amenaza.

Las acciones detalladas anteriormente tienen que ver con procesos de reducción de riesgos desde el punto de vista estructural, sin embargo hay otras acciones que son tan importantes como las anteriores. Estas acciones tienen que ver con medidas no estructurales y deberían combinarse con las anteriores.

- Organización para la atención de emergencias.
- Desarrollo y fortalecimiento institucional.
- Educación formal y capacitación.
- Información pública y campañas de difusión.

- Participación comunitaria y gestión a nivel local.
- Reglamento de uso de suelo, planificación del territorio.
- Estímulos fiscales y financieros.
- Promoción de seguros.

De manera general, estas medidas no requieren en la mayoría de casos grandes inversiones de recursos, por lo que son posibles de aplicar.

Todas las acciones sugeridas anteriormente deben ser continuas y sus resultados se ven a largo plazo, ya que en muchos casos implican un cambio de perspectiva de vida del individuo y la sociedad. Esto es lo que se denomina prevención, y viene a ser un elemento de la reducción del riesgo. Parte de la prevención son todas las acciones que hay que efectuar en estructuras ya establecidas para la mitigación de efectos.

El Ecuador actualmente cuenta con el **Código Ecuatoriano de la Construcción**, el mismo que establece un conjunto de especificaciones básicas y adecuadas para el diseño de estructuras que están sujetas a los efectos de terremotos que podrían presentarse durante su vida útil. La intención del Código es prevenir daños en los elementos estructurales y no estructurales con terremotos pequeños, prevenir daños estructurales graves y controlar daños no estructurales con terremotos moderados y por último evitar el colapso ante terremotos severos. El detalle del código se puede conseguir en las oficinas del INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), bajo el nombre de "Código Ecuatoriano de la Construcción. Requisitos generales de diseño: peligro sísmico, espectros de diseño y requisitos mínimos de cálculos para diseño sismoresistente", año 2001.

Adicionalmente, para enfrentar un sismo se requiere actuar de forma adecuada cuando éste se presente, con el fin de afrontar una emergencia y no un desastre. Para esto se necesita implementar otro de los elementos de reducción del riesgo que es la preparación, la misma que tiene dos niveles: uno es el familiar y el otro es el municipal o local, pensando también en la necesidad de una participación a nivel nacional.

En el primer caso, la preparación empieza con el conocimiento de las características de la vivienda en la que vivimos, definir los lugares seguros, establecer acuerdos con los miembros de la familia sobre cómo actuarían en el caso de un sismo, en qué lugar se encontraría, si existen familiares que tenga problemas de salud, habría que planificar cómo evitar que sus tratamientos sean interrumpidos, entre otras acciones. Como se ve no existe una receta única para todos, ya que se ajusta a las particularidades de cada núcleo familiar, sin embargo es importante establecer estos acuerdos con anterioridad, pensando adicionalmente en la necesidad de la solidaridad con el resto de personas que viven en el sector, para lo cual las asociaciones comunitarias deberían establecer igualmente las acciones que emprenderían.

La organización a nivel de las autoridades pasa por la necesidad de establecer escenarios de riesgos ante el fenómeno, los cuales se constituyen en las principales herramientas para planificar las acciones durante la emergencia. Estos escenarios se construyen en función de las vulnerabilidades actuales de las ciudades y se modela un sismo o varios sismos que podrían tener efectos sobre esta región. Un ejemplo de estos escenarios es el que se realizó para la ciudad de Quito (Escuela Politécnica Nacional *et al.*, 1995). En este análisis se trabajó con un hipotético sismo generado por un seg-

mento de la falla de Quito, y se definieron los posibles impactos desde el punto de vista estructural sobre los sistemas de agua potable, redes eléctricas y vías de comunicación.

Para que todas estas acciones tengan éxito deben prepararse con anterioridad y estar en constante revisión. Se debe establecer una comunicación continua entre todos los miembros y entidades involucradas, definiendo normas comunes a pesar de las particularidades de cada región. En este sentido se hace fundamental que el proceso de preparación se adapte a las características de la sociedad y del medio.

Dentro de los planes de preparación, otro componente fundamental es el ente científico, ya que es la fuente de información del fenómeno y su desarrollo. En el Ecuador, se cuenta en la actualidad con un mapa que tiene la zonificación en función de las aceleraciones sísmicas, que fueron calculadas usando los datos del catálogo de sismicidad del Ecuador. En la figura 14 se presenta el mapa y es claro que las áreas en las que mayor aceleración se espera son la franja costera y la zona andina, esto se puntualiza ya que es necesario conocer con anterioridad las características de la amenaza sísmica en la región.

Finalmente, otro elemento importante para la reducción del riesgo viene a ser el proceso de **reconstrucción y rehabilitación**, el mismo que debe considerar como premisa básica la no generación de nuevas vulnerabilidades en el área afectada por el terremoto, para lo cual se requiere aplicar correctamente los códigos y normas establecidas en la región. Es además primordial indicar la necesidad de implementar mecanismos financieros, tanto a nivel estatal como local, que permitan **transferir el riesgo**, con el fin de cubrir de alguna forma los

importantes gastos que se deben realizar en esta etapa. Uno de estos mecanismos financieros y que actualmente se están aplicando como en Manizales-Colombia, es la utilización de seguros. En esta ciudad, los seguros se establecieron para cada vivienda de acuerdo a su nivel de riesgo, y la póliza es pagada en un porcentaje por el propietario y el resto por el municipio. De esta forma cuando suceda un evento sísmico, el dinero para la reconstrucción del inmueble se obtiene del seguro.

Referencias

Beatty, J. K., ayd A. Chaikin, edits.,
1990 The New Solar System. Massachusetts: Sky Publishing, 3rd Edition.

Cardona O.,
2004 Gestión del riesgo colectivo. Curso de Educación Superior Gestión Integral de riesgos y desastres. Capítulo 3. Barcelona España. 39-62 pp.

Collot J-Y., F. Michaud, Y. Legonidec, A. Calahorrano, F. Sage, A. Alvarado y el personal científico y técnico de Inocar,
2006 Mapas del margen continental centro y sur de Ecuador: batimetría, relieve, reflectividad acústica e interpretación geológica. Publicación 10A-CVM-04-Post.Inocar Guayaquil.

DeMets, C., R. G. Gordon, D.F. Argus y S. Stein,
1990 Current plate motions, Geophys. J. Int., 101, pp. 425-478.

Egred J.,
1999 Catálogo de Terremotos del Ecuador-Hipocentros. Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional. Inédito. Quito.

2004 Terremoto de Riobamba del 4 de febrero de 1797. *Investigaciones en Geociencias*, vol. 1, Quito, Corporación Editora Nacional.

Escuela Politécnica Nacional, GeoHazards International, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, ORSTOM, OYO Corporation,
1995 Síntesis General del Proyecto para manejo del riesgo sísmico de Quito. Colección Quito Metropolitano, vol. 4, pp. 33.

INEN,
2001 Código Ecuatoriano de la Construcción. Requisitos generales de diseño: peligro sísmico, espectros de diseño y requisitos mínimos de cálculos para diseño simoresistente. Código de práctica ecuatoriana. Primera edición. Parte 1. Capítulo 12. CPE INEN 5:2001.

Kanamori, H., y K.C. McNally,
1982 Variable rupture mode of the subduction along the Ecuador-Colombia coast, Bulletin of the Seimological Society of America, vol. 72, No. 4, pp. 1241-1253.

Kelleher, J.A.,
1972 Rupture Zones of Large South American Earthquakes and Some Predictions, Journal of Geophysical Research, vol. 77, No. 11, pp. 2087-2103.

Kious, J., R. Tilling,
This Dynamic Earth: the story of Plate Tectonics. Serie General Interest Publications of the U.S. Geological Survey, Branch of Information Services.

Soulas, J.-P., A. Egüez, H. Yepes y V. H. Pérez,
1991 Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes ecuatorianos y el extremo sur de Colombia, Boletín Geológico Ecuatoriano, vol. 2, No. 1, pp. 3-11.

Tarbuck E., F. Lutgens,
1999 Ciencias de la Tierra una Introducción a la Geología Física. Prentice Hall, Madrid, pp. 616.

Trnkoczy A., J. Havskov y L. Ottemoller,
2002 Seismic Networks. IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice, vol. 1, capítulo 8.

Wegener, A.,
1946 The Origin of Continents and Oceans, 4th Ed. (Dover, New York).

Glosario

Aceleración sísmica: Aceleración del terreno producido por las ondas sísmicas generadas por un terremoto.

Acelerógrafo: Es el instrumento que sirve para registrar la aceleración del terreno en función del tiempo.

Amenaza sísmica: Es la cuantificación de las acciones sísmicas o de los fenómenos físicos asociados con un sismo que pueden producir efectos adversos al hombre y sus actividades. Parámetro que cuantifica la ocurrencia de futuros eventos sísmicos y las acciones sísmicas asociadas.

Amplitud de onda: Máxima altura de una cresta o del valle de una onda.

Arco volcánico: Montañas formadas en parte por la actividad ígnea asociada con la subducción, por ejemplo los Andes.

Catálogo sísmico: Es la información ordenada cronológicamente de los sismos o terremotos ocurridos en un área determinada. En estos se detalla información como localización, tiempo de origen, magnitud y efectos (intensidad).

Cinturón de Fuego del Pacífico: Comprende las costas alrededor del Océano Pacífico, y está caracterizado por su alta actividad sísmica y volcánica.

Corteza terrestre: Es la capa más externa de la Tierra. Se distinguen, según su origen, dos tipos de corteza:

Corteza Oceánica, compuesta básicamente de basalto y sobre éste, de los sedimentos.

Corteza Continental, comprende básicamente los continentes y está compuesta principalmente por rocas de composición granítica y además sedimentos.

Declinación magnética: Es el ángulo formado entre

el Norte Magnético y el Norte Geográfico.

Deriva continental: Hipótesis según la cual todos los continentes estuvieron agrupados en un único súper continente y que derivó en los continentes que actualmente se conocen.

Diseño antisísmico: Conjunto de normas vigentes en el código de construcción que se aplican en las obras en su fase de proyecto, ejecución y utilización, que pretenden evitar daños a causa de un terremoto.

Distancia epicentral: Distancia desde un punto de referencia al epicentro. Distancia estimada por el arco de círculo máximo entre los dos puntos.

Distancia focal: Distancia entre un punto dado en la superficie de la Tierra y el foco de un terremoto.

Distancia hipocentral: Distancia entre el hipocentro o foco (sinónimo de profundidad del foco) y el punto considerado.

Dorsal oceánico: Son cadenas montañosas que se ubican en el fondo de las cuencas oceánicas y generalmente forman sistemas más o menos conectados. Los dorsales oceánicos representan los bordes de placas divergentes.

Efecto de sitio: Es una amplificación de las ondas sísmicas debido a una influencia local relacionada con características del tipo de suelo y/o topografía.

Elementos en riesgo: Son aquellos que pueden ser afectados por un terremoto, tales como población, viviendas, estructuras, actividades económicas, entre otras.

Energía sísmica: Parte de la energía elástica de deformación liberada durante un sismo, que es irradiada en forma de ondas elásticas u ondas sísmicas; la mayor parte de la energía elástica acumulada es disipada en forma de calor.

Enjambre de sismos: Se denomina así a una secuencia de sismos de similar tamaño (magnitud) que ocurren en una misma región y en un período corto de tiempo.

Epicentro: Punto en la superficie de la tierra exactamente sobre el hipocentro.

Estación sísmica: Equipo conformado por varios instrumentos que sirven para registrar eventos sísmicos.

Evacuación: Abandono de un sitio determinado. La evacuación debe realizársela en forma ordenada; debe ser segura y lo más rápida posible. Se debe tomar en cuenta que la ruta de evacuación por emergencia sísmica puede diferir de otras de diferente índole.

Falla: Fractura o zona de fracturas donde se produce un desplazamiento de un bloque respecto a otro.

Falla inversa: Se produce cuando el movimiento horizontal transverso corresponde a un acortamiento. El bloque superior se desliza hacia arriba por el plano de falla. También se la denomina falla compresional.

Falla normal: Se produce cuando el movimiento horizontal transverso corresponde a una distensión. El bloque superior se desliza hacia abajo por el plano de falla. También se la denomina falla en dilatación.

Falla de rumbo: Se la conoce también como falla de desgarre o de salto en dirección. Son aquellas en que un bloque se desliza lateralmente con relación al otro.

Foco sísmico: Es el lugar en el cual se origina la ruptura que produce el terremoto (se considera un punto). También se lo denomina hipocentro.

Fosa: Es una depresión alargada que se ubica en el fondo marino y su origen está relacionado con el proceso de la subducción.

Frecuencia de onda: Número de veces que se repite un proceso cíclico por unidad de tiempo, siendo su unidad el hertz y su inverso es el período de onda.

Geodinámica: Es una subdisciplina de la geofísica que estudia la dinámica de los procesos que han dado lugar a la estructu-

ra de la Tierra, como la convección en el Manto terrestre. Las técnicas de estudio más frecuentemente utilizadas son: análisis de ondas sísmicas, medidas de GPS de alta precisión, estudios geológicos estructurales de campo, datación de muestras rocosas, cuantificación de las tasas de erosión en base al contenido isotópico en muestras de roca y simulación computacional de procesos.

Geofísica: Parte de la geología que estudia la física terrestre.

Geoquímica: Estudio de la distribución, proporción y asociación de los elementos químicos de la corteza terrestre, y de las leyes que las condicionan.

Hipocentro: Ver foco sísmico

Intensidad sísmica: Es un parámetro que evalúa los efectos y daños sobre personas, construcciones y terreno. Existen varias escalas de intensidad como la EMS, MSK, Mercalli, etc.

Inyección magmática: Se denomina así al ingreso de magma a la cámara o conductos magmáticos.

Litósfera: Capa rígida de la tierra formada por la corteza y parte del manto superior.

Macrosismo: Nombre que se les asigna también a los terremotos o a sismos destructores.

Magma: Roca fundida que resulta en una mezcla líquida que incluye gases disueltos y cristales. Se encuentra en el interior de la Tierra y cuando alcanza la superficie se denomina lava.

Magmatismo: Se refiere a todos los procesos en los que intervienen los materiales de la Tierra cuando encuentran fundidos o en forma de magma.

Magnitud: Mide la energía liberada en el foco sísmico en forma de ondas sísmicas. Existen varias escalas de magnitud dependiendo del tipo de onda que se utilice para determinarla.

Manto: Capa de la tierra de aproximadamente 2.900 km de espesor que se

ubica entre la Corteza y el Núcleo.

Mapa de Riesgo: Mapas que incluyen los probables efectos a causa de un sismo esperado.

Maremoto: Movimiento de la superficie marina a causa de terremotos, deslizamientos marinos o erupciones volcánicas.

Mercalli (escala): Escala de intensidad sísmica. Evalúa daños sísmicos en un determinado lugar. Se divide en 12 grados y es muy parecida a la escala MSK.

Microsismo: Son sismos de pequeña magnitud que generalmente son percibidos únicamente por sensores sísmicos. Pueden estar asociados al movimiento del viento, olas del mar y actividad humana.

Mitigación: Es el conjunto de medidas que se toman para disminuir o contrarrestar los posibles efectos negativos que pueden atentar contra la vida y los bienes.

MSK (escala): Escala de intensidad sísmica. Evalúa daños sísmicos en un determinado lugar. Se divide en 12 grados y es muy parecida a la escala Mercalli.

Onda sísmica: Ondas elásticas generadas por un sismo que se propagan a partir del foco en todas las direcciones.

Placa tectónica: Sección rígida de la litósfera que se mueve como una unidad sobre el material de la Astenósfera. Para el Ecuador se tiene la interacción de las placas Nazca y Sudamerica.

Premonitores (sismos): Sismos que preceden a un sismo principal. Son de menor magnitud.

Réplicas: Sismos relacionados y que son posteriores al terremoto principal. El período de tiempo en que se generan réplicas es relativamente largo y puede ser hasta de meses.

Richter (escala de magnitud): Escala de magnitud introducida por Richter en 1935. La magnitud del sismo es de tipo logarítmico.

Riesgo sísmico: Es la probabilidad de daños a causa de un sismo en un

espacio y tiempo determinado basado en observaciones pasadas y presentes.

Sismicidad: Ocurrencia de sismos en espacio y tiempo.

Sismicidad histórica: Recopilación histórica de los terremotos y sus efectos.

Sismicidad instrumental: Sismicidad recopilada a través de instrumentación y que a la vez sirve para análisis técnicos y científicos.

Sismo: Sacudida de la superficie terrestre por dislocación de la corteza. Las fuentes son de varios tipos (tectónicas, volcánicas, explosiones, meteoritos, etc.), siendo las más comunes las tectónicas. También se los conoce con el nombre de terremotos o temblores o movimiento telúricos.

Sismógrafo: Instrumento que sirve para registrar el movimiento del suelo producido por un sismo. El registro obtenido se denomina sismograma.

Sismología: Es la ciencia que se encarga del estudio de los sismos, las fuentes sísmicas y la propagación de las ondas sísmicas a través del medio sólido y líquido de la Tierra.

Sismorresistente: Capacidad de resistir a las acciones de un sismo en cierta medida.

Subducción: Hundimiento de gran amplitud de una porción de litosfera bajo otra. El término designa el hecho de hundirse la litosfera oceánica bajo otra litosfera.

Tamaño (del sismo): Se lo estima sobre la base de parámetros como la magnitud, energía, intensidad o efectos.

Tectónica: Es el estudio de la deformación de la corteza terrestre.

Tectónica de placas: Es la teoría que propone que la capa externa de la Tierra está constituida por capas individuales que interactúan para producir terremotos, volcanes, montañas y la propia corteza.

Telúrico: Relativo a la tierra como planeta.

Terremoto: (Ver Sismo).

Tiempo geológico: El concepto de tiempo geológico maneja períodos temporales muy grandes como son, millones o miles de millones de años. Esto se debe a que se contempla que la Tierra existe desde aproximadamente 4.600 millones de años y muchos procesos referentes a esta necesitan enormes lapsos de tiempo para generar resultados importantes.

Trazo de falla: Es la intersección del plano de falla con la superficie o la expresión superficial de la falla.

Tsunami: Término japonés que sirve para denominar las olas o conjunto de olas gigantes que se propagan por el mar y generalmente tienen su origen en un terremoto. También se los conoce como maremotos.

Volcán: Cualquier fractura u orificio de la superficie de la tierra a través del cual sale magma. Con el mismo nombre se denomina la elevación topográfica formada por lava, materiales piroclásticos o ambos.

Vulcanismo o volcanismos: Se refiere al fenómeno de salida de rocas fundidas o magma desde el interior de la Tierra hacia la superficie, y que está acompañada de la emisión de gases a la atmósfera.

Vulnerabilidad: Es el grado de pérdida o conjunto de elementos en riesgo, como consecuencia de la ocurrencia de un evento dado. Se expresa en una escala de 0 (ningún daño) a 1 (daño total).

Anexo 1

TIPOS DE LÍMITES DE PLACAS

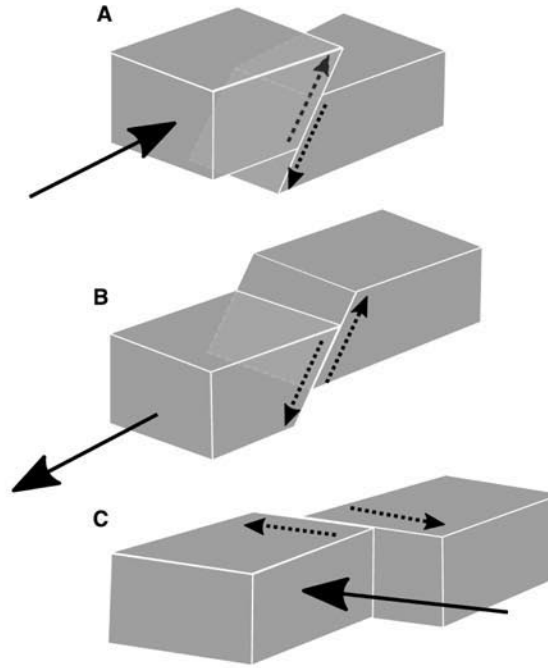
TIPO DE LÍMITE	PLACAS QUE INTERVIENEN		CARACTERÍSTICAS DEL LÍMITE DE PLACAS			
	Placa 1	Placa 2				
	Tipo de corteza que interactúa	*Tipo de corteza que interactúa*	**Fenómeno que se produce**	**Fenómenos naturales asociados**	**Efecto en la corteza**	**Ejemplo**
CONVERGENTE	**Nazca**	**Sudamericana**	Subducción	Sismos/volcanes Arco Continental	Se consume corteza	Ecuador
	Oceánica	*Continental*				
CONVERGENTE	**Euro-Asiática**	**Pacífica**	Subducción	Sismos/volcanes Arco Insular	Se consume corteza	Archipiélago de Japón
	Oceánica	*Oceánica*				
CONVERGENTE	**Euro-Asiática**	**Indo-Australiana**	Colisión Continental	Sismos/ Levantamiento	Corteza se deforma	Cordillera del Himalaya
	Continental	*Continental*				
DIVERGENTE	**Sudamericana**	**Africana**	Dorsal Centro-oceánica	Sismos/volcanes submarinos	Se crea nueva corteza	Dorsal Atlántica
	Oceánica	*Oceánica*				
TRANSCURRENTE	**Norteamérica**	**Juan de Fuca**	Falla Transformante	Sismos y gran desplazamiento	No se crea/No se consume	Falla de San Andrés
	Oceánica	*Continental*				
RIFT CONTINENTAL	**Africana**	**Somalí**	Apertura de Continente	Sismos/volcanes	Se separa corteza continental	Rift de Tanzania
	Continental	*Continental*				

Observar que algunas de las placas tectónicas están compuestas tanto de corteza continental como de corteza oceánica. Para la ejemplificación se toma en cuenta el tipo de corteza (sea continental u oceánica) de la placa que está interactuando.

TIPOS DE FALLAS

Las fallas inversas son aquellas en las que el bloque superior sube respecto al otro usando como "rampa" el plano de falla localizado entre ellos (A).

Las fallas son "normales" cuando el bloque de arriba desciende por acción de la gravedad debido a la falta de sustento en el plano de falla (o escarpe) (B).



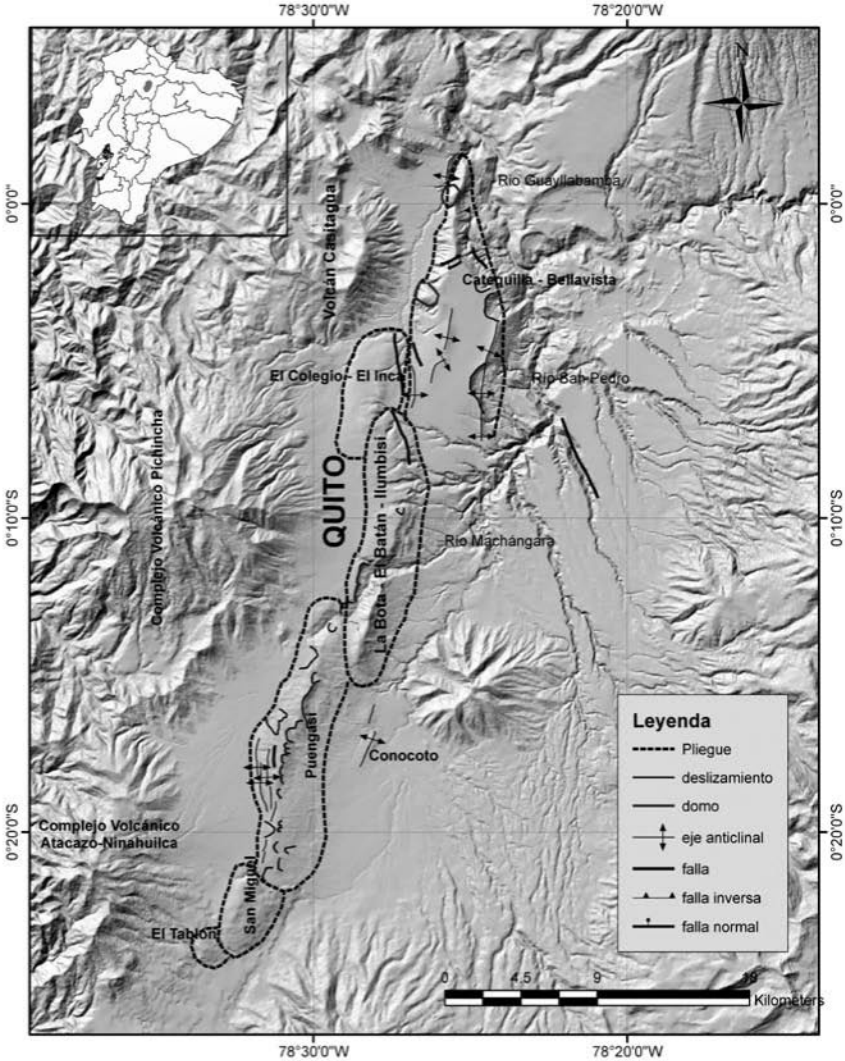
En A se observa una falla inversa, el bloque de la izquierda se desplaza hacia arriba, sobre el plano de falla. B. Muestra una falla normal, en este caso el bloque de la izquierda se desplaza hacia abajo sobre el plano de falla. C. Falla transcurrente, el movimiento de los bloques es paralelo al plano de falla.

Cuando las fuerzas que provocan el movimiento de los bloques son diagonales a la dirección del plano de falla, se produce un movimiento tangencial de los bloques que determina la formación de una falla transcurrente (C). Las fallas trancurrentes pueden presentar dos tipos de movimiento. Fallas transcurrentes *dextrales*, cuando uno de los bloques se mueve hacia la derecha respecto del otro bloque, por el contrario cuando un bloque se mueve hacia la izquierda respecto del otro se las conoce como fallas transcurrentes *sinestrales*.

Para ejemplificar algunos de estos tipos fallas en nuestro país se describen a continuación los siguientes casos:

El **sistema de fallas Quito** se inicia a la altura de la población de Tambillo, al sur y avanza hacia el norte hasta San Antonio de Pichincha, definiendo un trazado de 47 a 50 km de longitud. Morfológicamente (según la forma del terreno) está representado por las colinas de Puengasí, Ilumbisí, El Batán-La Bota y Bellavista-Catequilla. Estas colinas son el resultado superficial del fallamiento de tipo inverso que no alcanza la superficie, pero que pliegan las capas formando estas colinas. Esta característica es un rasgo que a menudo presentan las fallas inversas. Para la falla de Quito el bloque sobre el que se asienta la ciudad se levanta (aproximadamente 400 metros) con respecto al nivel del Valle Interandino. Este es un caso típico de fallas ocultas, pero que muestran actividad sísmica constante en el tiempo.

El mayor sismo registrado desde el monitoreo instrumental en el área del Distrito Metropolitano de Quito y que se ha relacionado con la falla de Quito, ocurrió el 10 de agosto de 1990 a las 22H00 tiempo local (11 de agosto 03H00 GMT) y alcanzó una magnitud de 4,9

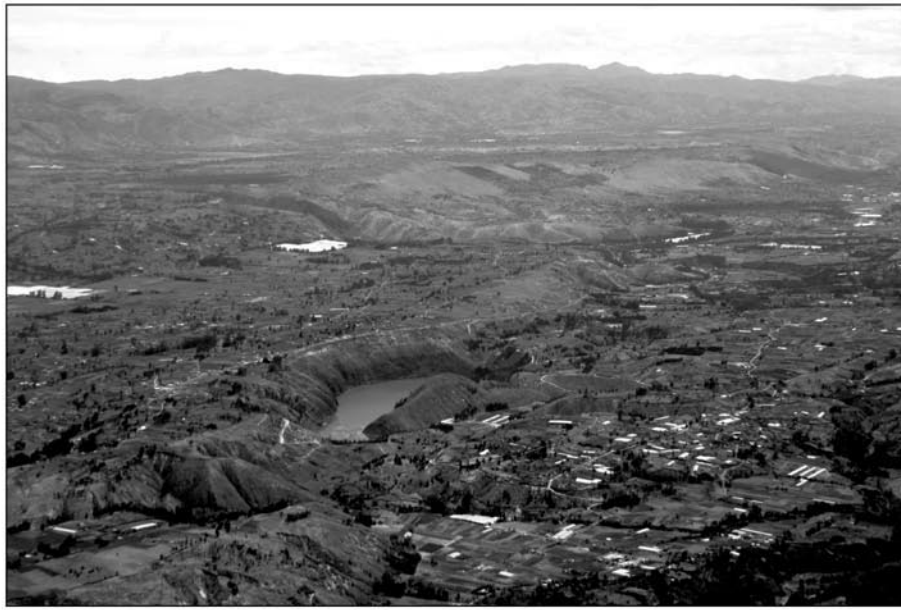


Sistemas de Fallas de Quito

grados en la escala de Richter. Este sismo tuvo al menos 50 réplicas con magnitudes mayores a tres. Este evento produjo derrumbes y cuarteamientos de mampostería de algunas construcciones del sector de Pomasqui y San Antonio de Pichincha y además fue sentido en toda la ciudad, ocasionando caída de objetos en los pisos altos de las edificaciones. El epicentro se localizó en 78° 25' 39,36" W y 0° 1' 58,44" S, a 3 kilómetros al norte de la población de Pomasqui. El hipocentro fue calculado en 4,1 kilómetros de profundidad.

En la época colonial, varios sismos afectaron a la capital de la República, tal como lo evidencian los grabados de las iglesias de Quito. Sobre la base a estos reportes gráficos, se observa cómo fueron cambiando las cúpulas de las iglesias, debido a las reconstrucciones que prosiguieron a sus colapsos por causa de algún fenómeno telúrico. De estos estudios, se deriva que al menos 50 sismos golpearon la ciudad y sobre la base de reportes en los que se evaluó la intensidad en todo el Callejón Interandino, al menos 5 se originaron en una falla cercana a la capital, si no fue en su misma falla. Los sismos más fuertes ocurrieron en 1587, 1755, 1797, 1868 y 1859 (Del Pino y Yepes, 1990).

El **sistema de fallas de Pastocalle-Poaló-Saquisilí** tiene características muy similares al de Quito, su expresión en el terreno es una serie de colinas de baja altura, que se extienden desde Pastocalle al norte, continúan por el sector de Saquisilí, luego hacia Nagsiche, pasando por la laguna de Yambo y termina al sur de la ciudad de Ambato. Al igual que el sistema de Quito, es inverso y no se observan las fallas en superficie, sin embargo a este sistema se le atribuyen sismos importantes como el de Pastocalle de 1976, con una intensidad máxima de VII.



Pliegues de Yambo (primer plano) y Nagsiche, al fondo la Cordillera Occidental. Foto P. Ramón, IG.

El **sistema de fallas de El Ángel-San Gabriel** tiene rasgos muy claros en la zona de El Ángel, sin embargo se cree que puede empezar en el sector de Urcuquí y Salinas de Ibarra, en donde hay anomalías morfológicas secundarias, y que además han presentado una serie de sismos pequeños. Hacia el norte este sistema pasa al oeste de Tulcán. Su movimiento es principalmente transcurrente. A este sistema de fallas se atribuye el sismo de 1868 (terremoto de Ibarra) que tuvo una intensidad máxima de IX.

Anexo 3

■ SISMOS VOLCÁNICOS

Ibáñez (1997) señala que se considera que un sismo es volcánico cuando su fuente está directamenter relacionada con procesos magmáticos o movimientos de fluidos relacionados con el volcán, tales como inyecciones de magma, expansión de gases, entre otras.

Para la generación de señales sísmicas la fuente está directamente relacionada con fluidos, los mismos que producen ruptura en la roca o vibración entre fracturas. Con este antecedente, trataremos de explicar con la mayor precisión y brevedad los mecanismos que generan sismos dentro de un volcán.

Los sismos de origen volcánico se dividen principalmente en cuatro tipos de eventos: sismos volcano-tectónicos, sismos de largo período o LP, sismos híbridos y tremor.

Los sismos **volcano-tectónicos** se relacionan con fracturamiento de roca, siendo los procesos magmáticos la de energía para dicha fractura, pero donde el fluido no está directamente involucrado. Estos sismos son de duración variable y se puede identificar los arribos de la onda P y S, su contenido de frecuencias es amplio y mayor a los 5 Hz. Este tipo de eventos sísmicos se presenta de manera común casi en todos los ambientes volcánicos e independientemente del estado de actividad del volcán.

Los eventos de **largo período** o **LP** son generados por procesos que involucran fluidos, donde la clave es

la presión, es decir fluidos que se mueven o intentan moverse como respuesta a un exceso de presión. En estos eventos no se puede identificar claramente el arribo de la onda P, su contenido de frecuencia es restringido a una banda estrecha y generalmente está entre 1 y 5 Hz.

Para los eventos **híbridos** el mecanismo de generación más aceptado es un proceso de ruptura seguido por una migración de fluido. Están caracterizados, por lo general, por un inicio con alta frecuencia con arribos claros de las ondas P y S, seguido por un tren de ondas característico de eventos LP.

El **tremor volcánico** es una señal asociada a procesos que involucran fluidos. Esta señal se caracteriza por mantenerse constante por períodos de tiempo mayores a un minuto y mostrar una amplitud aproximadamente constante. Su contenido de frecuencia es muy variado y puede tomar diferentes denominaciones de acuerdo con una característica sobresaliente del evento.

Anexo 4

ESCALAS DE MAGNITUD E INTENSIDAD

■ ESCALA MSK

En la mayoría de los países de Europa, la escala sísmica utilizada es la MSK propuesta en 1964 por **S. V. Medvedev, W. Sponheuer y V. Karnik**.

● Grado I

La sacudida no es percibida por los sentidos humanos, siendo detectada y registrada solamente por los sismógrafos.

● Grado II

La sacudida es perceptible solamente por algunas personas en reposo, en particular en los pisos superiores de los edificios.

● Grado III

La sacudida es percibida por algunas personas en el interior de los edificios y solo en circunstancias muy favorables en el exterior de los mismos.

La vibración percibida es semejante a la causada por el paso de un camión ligero.

Observadores muy atentos pueden notar ligeros balanceos de objetos colgados, más acentuados en los pisos altos de los edificios.

● Grado IV

- El sismo es percibido por personas en el interior de los edificios y por algunas en el exterior.
- Algunas personas se despiertan, pero nadie se atemoriza.
- La vibración es comparable a la producida por el paso de un camión pesado con carga.
- Las ventanas, puertas y vajillas vibran.
- Los pisos y muros producen chasquidos.
- El mobiliario comienza a moverse.
- Los líquidos contenidos en recipientes abiertos se agitan ligeramente.

● Grado V

a.

- El sismo es percibido en el interior de los edificios por la mayoría de las personas y por muchas en el exterior.
- Muchas personas que duermen se despiertan y algunas huyen.
- Los animales se ponen nerviosos.
- Las construcciones se agitan con una vibración general.
- Los objetos colgados se balancean ampliamente.
- Los cuadros golpean sobre los muros o son lanzados fuera de su emplazamiento.
- En algunos casos los relojes de péndulo se paran.
- Los objetos ligeros se desplazan o vuelcan.
- Las puertas o ventanas abiertas baten con violencia.
- Se vierten en pequeña cantidad los líquidos contenidos en recipientes abiertos y llenos.
- La vibración se siente en la construcción como la producida por un objeto pesado arrastrándose.

b.

- En las construcciones de tipo A son posibles ligeros daños (clase 1).

c.

- En ciertos casos se modifica el caudal de los manantiales.

● Grado VI

a.

- Lo siente la mayoría de las personas, tanto dentro como fuera de los edificios.
- Muchas personas salen a la calle atemorizadas.
- Algunas personas llegan a perder el equilibrio.
- Los animales domésticos huyen de los establos.
- En algunas ocasiones, la vajilla y la cristalería se rompen, los libros caen de sus estantes, los cuadros se mueven y los objetos inestables vuelcan.
- Los muebles pesados pueden llegar a moverse.
- Las campanas pequeñas de torres y campanarios pueden sonar.

b.

- Se producen daños moderados (clase 2) en algunas construcciones del tipo A.
- Se producen daños ligeros (clase 1) en algunas construcciones de tipo B y en muchas del tipo A.

● Grado VII

a.

- La mayoría de las personas se aterroriza y corre a la calle.

- Muchas tienen dificultad para mantenerse en pie.
- Las vibraciones son sentidas por personas que conducen automóviles.
- Suenan las campanas grandes.

b.

- Muchas construcciones del tipo A sufren daños graves (clase 3) y algunas incluso destrucción (clase 4).
- Muchas construcciones del tipo B sufren daños moderados (clase 2).
- Algunas construcciones del tipo C experimentan daños ligeros (clase 1).

c.

- En algunos casos, se producen deslizamientos en las carreteras que transcurren sobre laderas con pendientes acusadas; se producen daños en las juntas de las canalizaciones y aparecen fisuras en muros de piedra.
- Se aprecia oleaje en las lagunas y el agua se enturbia por remoción del fango.
- Cambia el nivel de agua de los pozos y el caudal de los manantiales. En algunos casos, vuelven a manar manantiales que estaban secos y se secan otros que manaban.
- En ciertos casos se producen derrames en taludes de arena o de grava.

● Grado VIII

a.

- Miedo y pánico general, incluso en las personas que conducen automóviles.

- En algunos casos se desgajan las ramas de los árboles.
- Los muebles, incluso los pesados, se desplazan o vuelcan.
- Las lámparas colgadas sufren daños parciales.

b.

- Muchas construcciones de tipo A sufren destrucción (clase 4) y algunos colapso (clase 5).
- Muchas construcciones de tipo B sufren daños graves (clase 3) y algunas destrucción (clase 4).
- Muchas construcciones de tipo C sufren daños moderados (clase 2) y algunas graves (clase 3).
- En ocasiones, se produce la rotura de algunas juntas de canalizaciones. Las estatuas y monumentos se mueven y giran.
- Se derrumban muros de piedra.

c.

- Pequeños deslizamientos en las laderas de los barrancos y en las trincheras y terraplenes con pendientes pronunciadas.
- Grietas en el suelo de varios centímetros de ancho.
- Se enturbia el agua de los lagos.
- Aparecen nuevos manantiales.
- Vuelven a tener agua pozos secos y se secan pozos existentes.
- En muchos casos cambia el caudal y el nivel de agua de los manantiales y pozos.

● Grado IX

a.

- Pánico general.

- Daños considerables en el mobiliario.
- Los animales corren confusamente y emiten sus sonidos peculiares.
- Muchas construcciones del tipo A sufren colapso (clase 5).

b.

- Muchas construcciones de tipo B sufren destrucción (clase 4) y algunas colapso (clase 5).
- Muchas construcciones del tipo C sufren daños graves (clase 3) y algunas destrucción (clase 4).
- Caen monumentos y columnas.
- Daños considerables en depósitos de líquidos.
- Se rompen parcialmente las canalizaciones subterráneas.
- En algunas casos, los carriles del ferrocarril se curvan y las carreteras quedan fuera de servicio.

c.

- Se observa con frecuencia que se producen extrusiones de agua, arena y fango en los terrenos saturados.
- Se abren grietas en el terreno de hasta 10 centímetros de ancho y de más de 10 centímetros en las laderas y en las márgenes de los ríos.
- Aparecen, además, numerosas grietas pequeñas en el suelo.
- desprendimientos de rocas y aludes.
- Muchos deslizamientos de tierras.
- Grandes olas en lagos y embalses.
- Se renuevan pozos secos y se secan otros existentes.

● Grado X

a.

- La mayoría de las construcciones del tipo A sufren colapso (clase 5). Muchas construcciones de tipo B sufren colapso (clase 5).
- Muchas construcciones de tipo C sufren destrucción (clase 4) y algunos colapso (clase 5).
- Daños peligrosos en presas; daños serios en puentes.
- Los carriles de las vías férreas se desvían y a veces se ondulan.
- Las canalizaciones subterráneas son retorcidas o rotas.
- El pavimento de las calles y el asfalto forman grandes ondulaciones.

b.

- Grietas en el suelo de algunos decímetros de ancho que pueden llegar a un metro.
- Se producen anchas grietas paralelamente a los cursos de los ríos.
- Deslizamientos de tierras sueltas en las laderas con fuertes pendientes.
- En los ribazos de los ríos y en las laderas escarpadas se producen considerables deslizamientos.
- Desplazamientos de arenas y fangos en las zonas litorales.
- Cambio del nivel de agua en los pozos.
- El agua de canales y ríos es lanzado fuera de su cauce normal.
- Se forman nuevos lagos.

● Grado XI

a.

- Daños importantes en construcciones, incluso en las bien realizadas, en puentes, presas y líneas de ferrocarril.
- Las carreteras importantes quedan fuera de servicio.
- Las canalizaciones subterráneas quedan destruidas.

b.

- El terreno queda considerablemente deformado por desplazamientos de terrenos y caídas de rocas.
- Para determinar la intensidad de las sacudidas sísmicas se precisan investigaciones especiales.

● Grado XII

a.

- Prácticamente se destruyen o quedan gravemente dañadas todas las estructuras, incluso las subterráneas.

b.

- La topografía cambia.
- Grandes grietas en el terreno con importantes desplazamientos horizontales y verticales.
- Caída de rocas y hundimientos en los escarpes de los valles, producidos en vastas extensiones.
- Se cierran valles y se transforman en lagos.
- Aparecen cascadas y se desvían los ríos.

84

Tipos de construcciones

Tipo A: Con muros de mampostería en seco o con barro, de adobe o de tapial.

Tipo B: Con muros de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, de mampostería con mortero, de sillarejo, entramados de madera.

Tipo C: Con estructura metálica o de hormigón armado.

Términos de cantidad

Los términos de cantidad utilizados en la definición de los grados de intensidad corresponden aproximadamente a los siguientes porcentajes:

Algunos	*5%*
Muchos	*50%*
La mayoría	*75%*

Clasificación de los daños en las construcciones

Clase 1 *Daños ligeros:* Fisuras en los revestimientos, caída de pequeños trozos de revestimiento.

Clase 2 *Daños moderados:* Fisuras en los muros, caída de grandes trozos de revestimiento, caída de tejas, caída de pretiles, grietas en las chimeneas e incluso derrumbamientos parciales en las mismas.

Clase 3 *Daños graves:* Grietas en los muros, caída de chimeneas de fábrica o de otros elementos exteriores.

Clase 4 *Destrucción:* Brechas en los muros resistentes, derrumbamiento parcial, pérdida de enlace entre distintas partes de la construcción, destrucción de tabiques y muros de cerramiento.

Clase 5 *Colapso:* Ruina completa de la construcción.

85

■ ESCALA MERCALLI MODIFICADA

I	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
II	Se percibe solo por algunas personas en reposo, particularmente las ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
III	Se percibe en los interiores de los edificios y casas.
IV	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. La sensación percibida es semejante a la que produciría el paso de un vehículo pesado. Los automóviles detenidos se mecen.
V	La mayoría de las personas lo percibe aún en el exterior. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y aún pueden derramarse. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
VI	Lo perciben todas las personas. Se atemorizan y huyen hacia el exterior. Se siente inseguridad para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se producen grietas en algunos estucos. Se hace visible el movimiento de los árboles, o bien se les oye crujir.
VII	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. Se producen daños de consideración en estructuras de albañilería mal construidas o mal proyectadas. Se dañan los muebles. Caen tro-

	zos de estucos, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos. Se producen ondas en los lagos; el agua se enturbia.
VIII	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aún el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. Caen igualmente monumentos, columnas, torres y estanques elevados. Se quiebran las ramas de los árboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos.
IX	Se produce pánico general.
X	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. El agua de canales, ríos, lagos, etc., sale proyectada a las riberas.
XI	Muy pocas estructuras de albañilerías quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las tuberías (cañerías subterráneas) quedan totalmente fuera de servicio.
XII	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

■ MEDICIÓN DE MAGNITUD

La magnitud de un sismo es una medida relacionada a la energía liberada por un sismo. Existen varias escalas de magnitud de acuerdo al parámetro que se analiza. Así se tiene:

Magnitud local (M_L), definida por C. Richter en 1935. La magnitud local o de Richter toma en cuenta la má-

xima amplitud observada en un sismógrafo de tipo Wood-Anderson estándar (un sismógrafo de péndulo horizontal muy sencillo), además de correcciones hechas a causa de la atenuación y dependiente de la distancia existente entre la estación y el evento. Richter definió esta magnitud en base a las características del medio en California-Estados Unidos y para distancias menores de 600 km. Estas restricciones hacen que para su aplicación deba hacerse correcciones si se aplica en otras partes del mundo y con otro tipo de sensor.

La *Magnitud de ondas de cuerpo* (M_b), se la calcula basándose en la amplitud máxima y el período de las ondas de cuerpo. El cálculo de magnitud de ondas de cuerpo toma en cuenta una corrección debido a la distancia y profundidad del evento. Esta determinación presenta un problema denominado "saturación" que consiste básicamente en la subestimación de la magnitud cuando los sismos sobrepasan una determinada magnitud (aproximadamente 6,2).

La *Magnitud de ondas de superficie (Ms),* es calculada de manera similar a la magnitud de ondas de cuerpo, es decir en función de la amplitud y frecuencia, pero que son medidas en las ondas superficiales. Al igual que en el caso anterior, se hace una corrección debido a la distancia y profundidad del sismo. Esta magnitud también presenta problema de saturación pero para magnitudes mucho mayores (aproximadamente 8,3).

Para evitar el problema de saturación se introduce la *magnitud de momento sísmico* (Mw) que se calcula basándose en el momento sísmico, el mismo que toma en cuenta la geometría de la ruptura (superficie), el desplazamiento en el callamiento y la resistencia de la roca, según un módulo de deformación (módulo de Young). Esta forma de cálculo de magnitud fue desarrollada por Hans y Kanamori en el año 1979.

■ RELACIÓN DE LA MAGNITUD (RICHTER) CON LA ENERGÍA LIBERADA POR UNA CANTIDAD EN PESO DE DINAMITA (TNT)

Magnitud Richter	Ejemplo	Equivalencia de la energía TNT
-1,5	Rotura de una roca en una mesa de laboratorio	1g
0,5	Granada de mano	6 lb
1,0	Pequeña explosión en un sitio de construcción	30 lb
1,5	Bomba convencional de la Segunda Guerra Mundial	320 lb
2,0	Bomba convencional de la Segunda Guerra Mundial	1 ton métrica
2,5	Bomba "Blockbuster" de la Segunda Guerra Mundial	4,6 ton métricas
3,0	MOAB–Arma no nuclear	29 ton métricas
3,5	Explosión de una mina	73 ton métricas
4,0	Pequeña bomba atómica	1 kilotón
4,5	Tornado promedio (energía total)	5,1 kilotón
5,0	Bomba atómica de Nagasaki	32 kilotón=32.000 ton
5,5	Little Skull Mtn., NV Quake, 1992	80 kilotón
6,0	Double Spring Flat, NV Quake, 1994	1 megatón
6,5	Northridge quake, 1994	aprox. 5 megatón
7,0	La mayor arma termonuclear	aprox. 50 megatón
7,5	Landers, CA Quake, 1992	aprox. 160 megatón
8,0	Sismo de San Francisco, CA, 1906	aprox. 1 gigatón
8,5	Sismo de Anchorage, Alaska, 1964	aprox. 5 gigatón
9,0	Sismo de Sumatra, diciembre 2004	aprox. 30 gigatón
10,0	Estimado para un meteorito (bólido) de 10 km impactando a una velocidad de 25 km/s	1 teratón

Anexo 5

■ INTENSIDAD HISTÓRICA MÁXIMA EN CADA PROVINCIA

PROVINCIA	INT. MÁX.
CHIMBORAZO	XI
COTOPAXI	X
TUNGURAHUA	X
IMBABURA	X
ESMERALDAS	IX
LOJA	VIII
MANABÍ	IX
NAPO Y SUCUMBÍOS	IX
PICHINCHA	VIII
BOLÍVAR	VIII
CARCHI	VIII
EL ORO	VIII
AZUAY	VIII
GUAYAS	VIII
LOS RÍOS	VIII
MORONA SANTIAGO	VIII
PASTAZA Y FRANCISCO DE ORELLANA	VII
ZAMORA CHINCHIPE	VII
CAÑAR	VII
GALÁPAGOS	IV

Instituto Geofísico / Departamento de Geofísica Escuela Politécnica Nacional

El Instituto Geofísico/Departamento de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional constituye el primer centro de investigación sísmica y volcánica existente en el país. A partir de enero de 2003, mediante Decreto Presidencial, tiene a cargo en forma oficial el diagnóstico y vigilancia de los peligros sísmicos y volcánicos en todo el territorio nacional y a la vez la comunicación oportuna de estos fenómenos.

Conjuntamente con el diagnóstico de la amenaza, el Instituto Geofísico mantiene un activo programa de monitoreo instrumental en tiempo real, que asegura la vigilancia científica permanente sobre volcanes activos y fallas tectónicas en el territorio nacional. Una serie de publicaciones tanto científicas como de divulgación general a nivel nacional e internacional, dan fe de la capacidad y mística de trabajo de los científicos y técnicos que conforman el Instituto.

A lo largo de su corta vida, el Instituto Geofísico se ha hecho acreedor a importantes premios y reconocimientos, a nivel local e internacional, por su trabajo en el diagnóstico y prevención de los desastres naturales. En 1992, el Premio SASAKAWA, otorgado por las Naciones Unidas y, varios reconocimientos y condecoraciones por parte del Ilustre Municipio de Quito (1999), del Honorable Congreso Nacional (2000) y del Gobierno de la Provincia de Pichincha (2003).

Referencia de este libro:

Francisco Rivadeneira, Mónica Segovia, Alexandra Alvarado, José Egred, Liliana Troncoso, Sandro Vaca, Hugo Yepes
2007

Serie: El riesgo sísmico en el Ecuador, No. 1

Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador
Corporación Editora Nacional, IG-EPN.

Este libro es el inicio de una serie sobre el riesgo sísmico en el Ecuador, en donde se incluirá todos los trabajos sobre el análisis del peligro o amenaza, los estudios de vulnerabilidad y las medidas o acciones necesarias para reducir el riesgo de los sismos en el Ecuador.

El contenido de este documento es responsabilidad exclusiva del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) y no refleja necesariamente las opiniones de ECHO o de los proyectos del programa Dipecho, de CAFOD-CRS y CISP. Tanto el IG-EPN como ECHO, CAFOD-CRS y CISP tienen el derecho de utilizar libremente y como mejor lo consideren el contenido de la presente publicación.

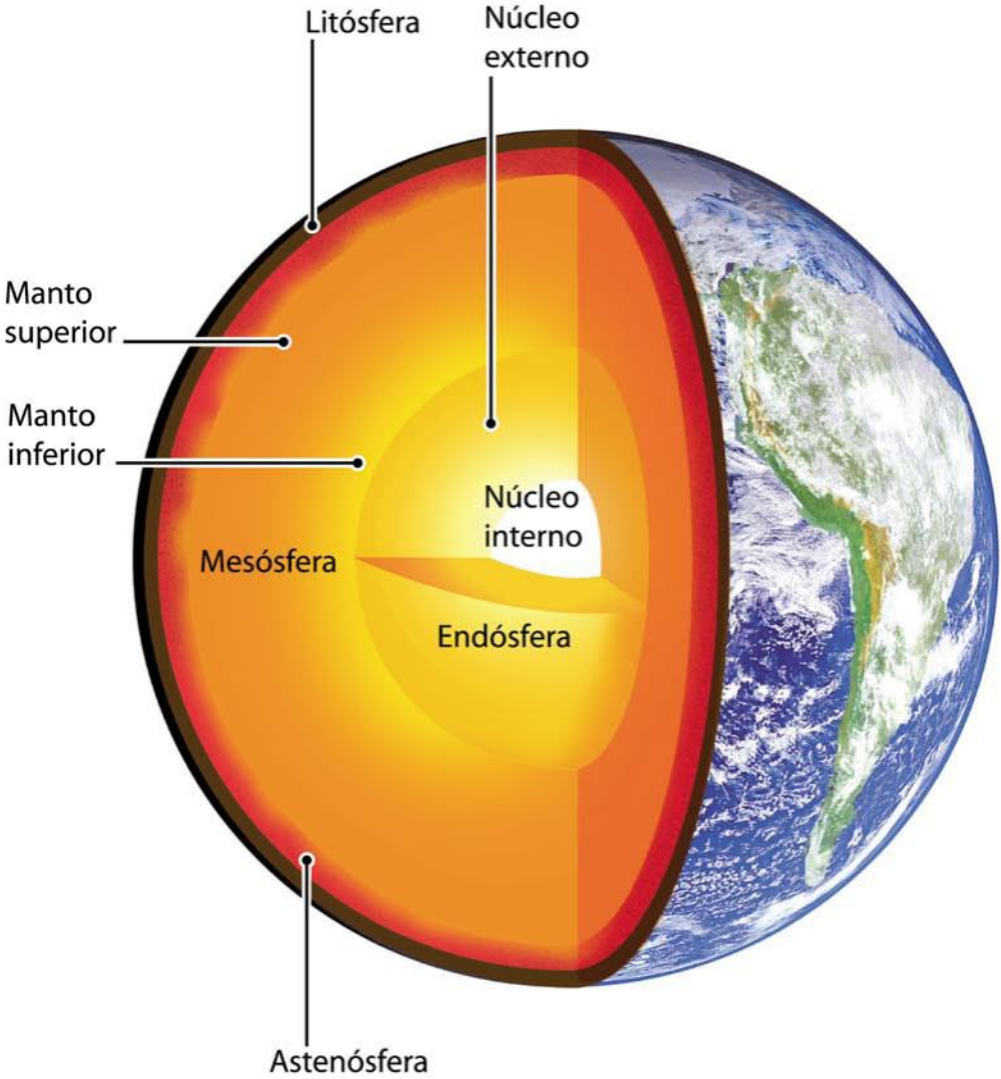


Figura 2. Capas que conforman la Tierra.

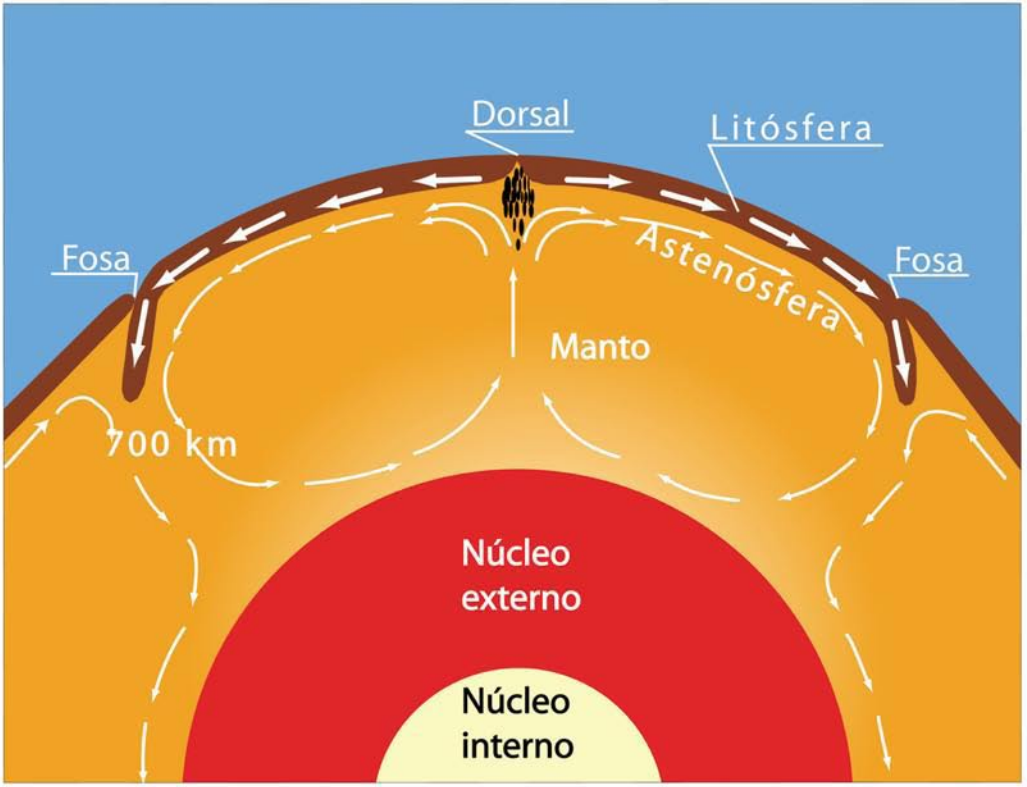


Figura 3. Modelo esquemático de convección del interior de la Tierra. Modificado de Tarbuck y Lutgens, 1999.

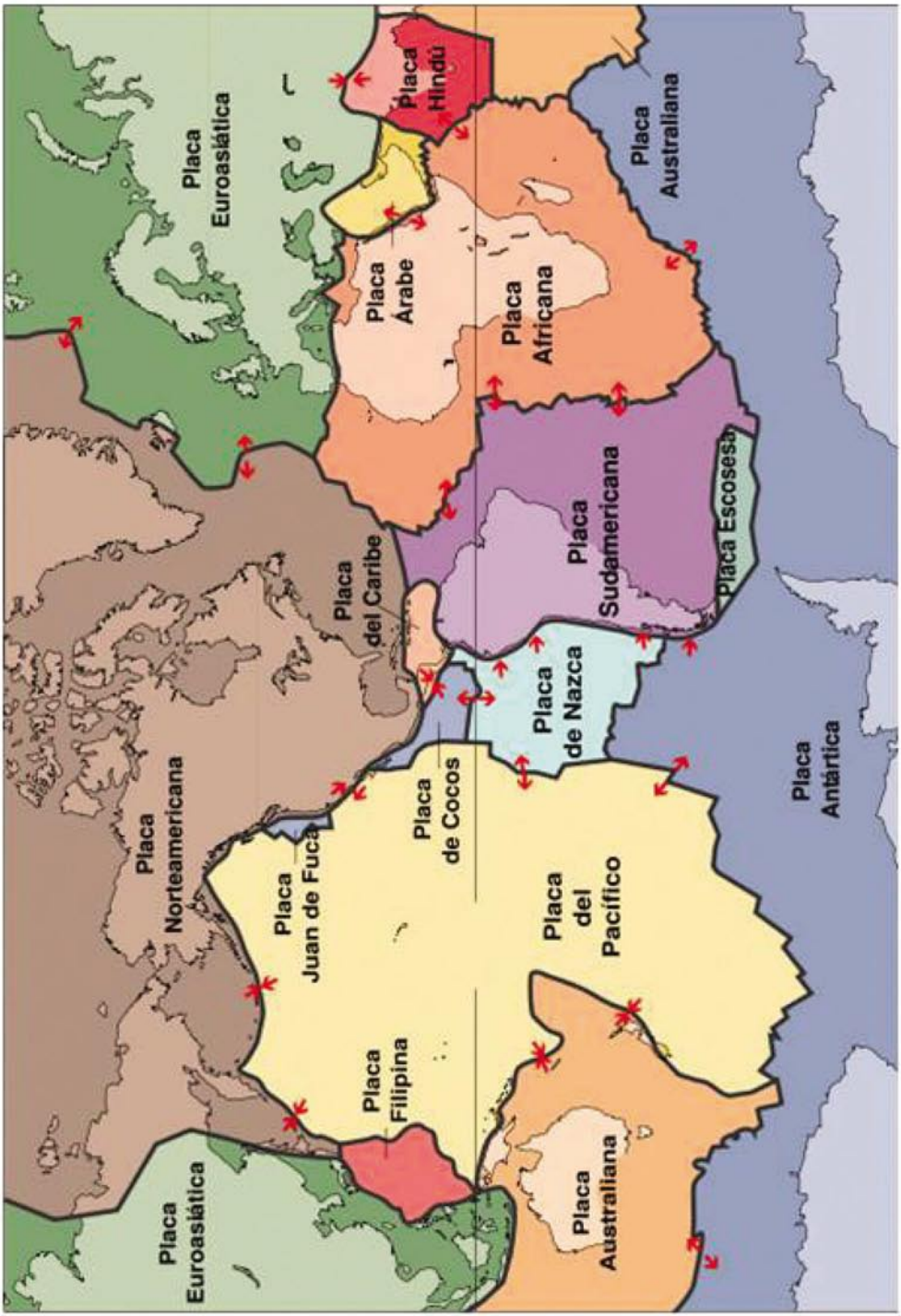


Figura 4. Placas tectónicas. Tomado de: Kious y Tilling.

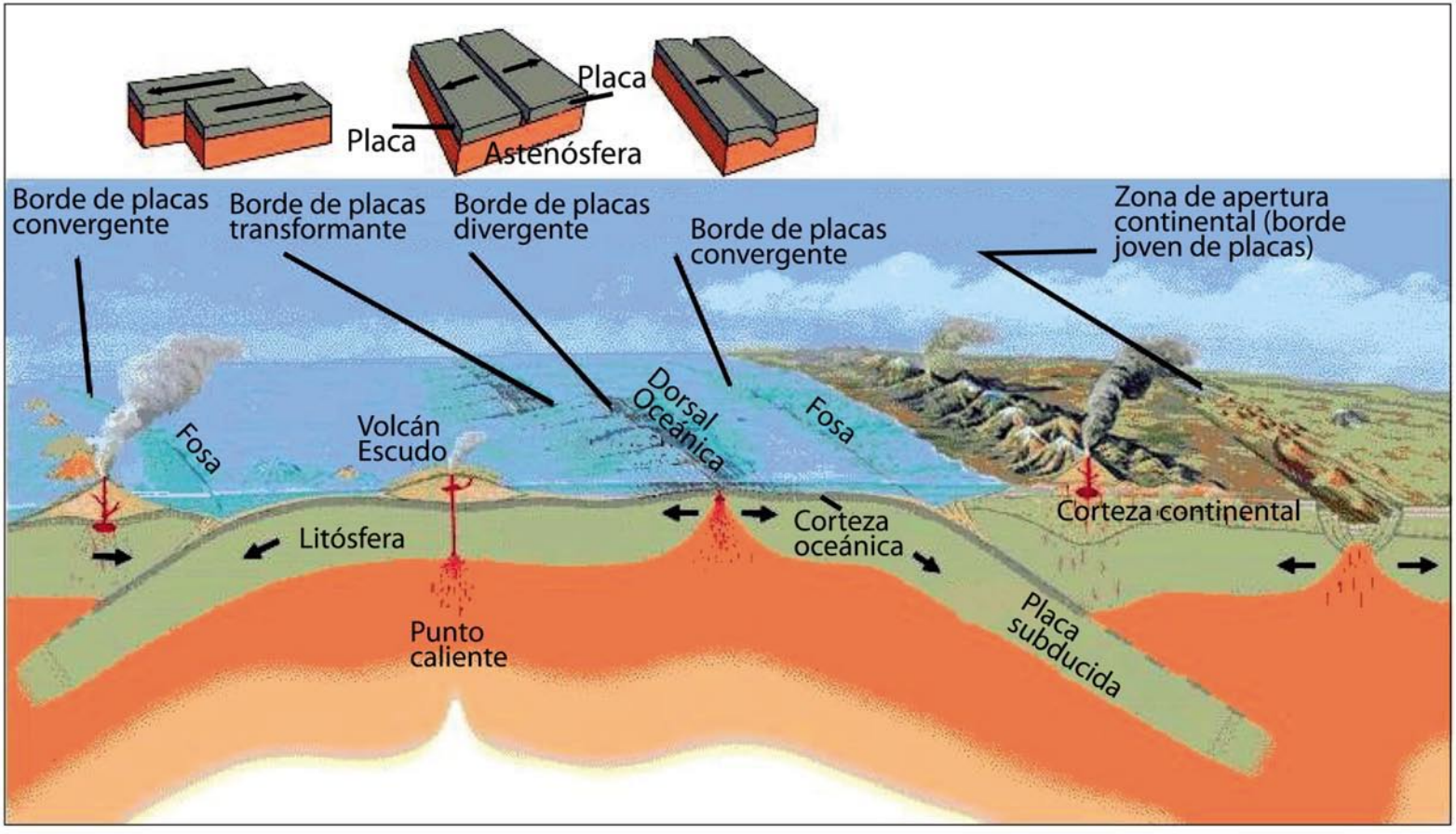


Figura 5. Esquema que muestra el funcionamiento de los límites entre las placas. Tomado de Kious y Tilling.

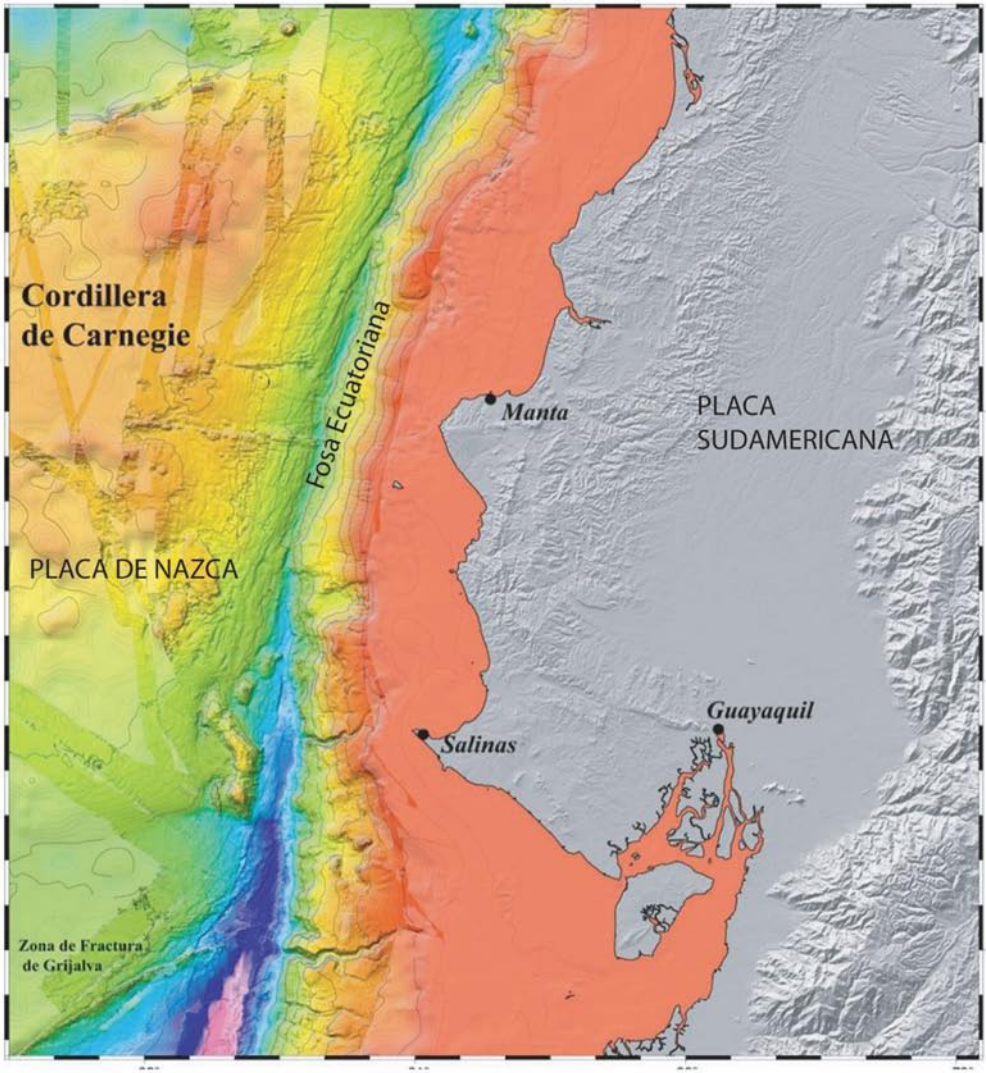


Figura 6. Características del contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana en la zona del Ecuador. Modificado de: Collot *et al.*, 2006.

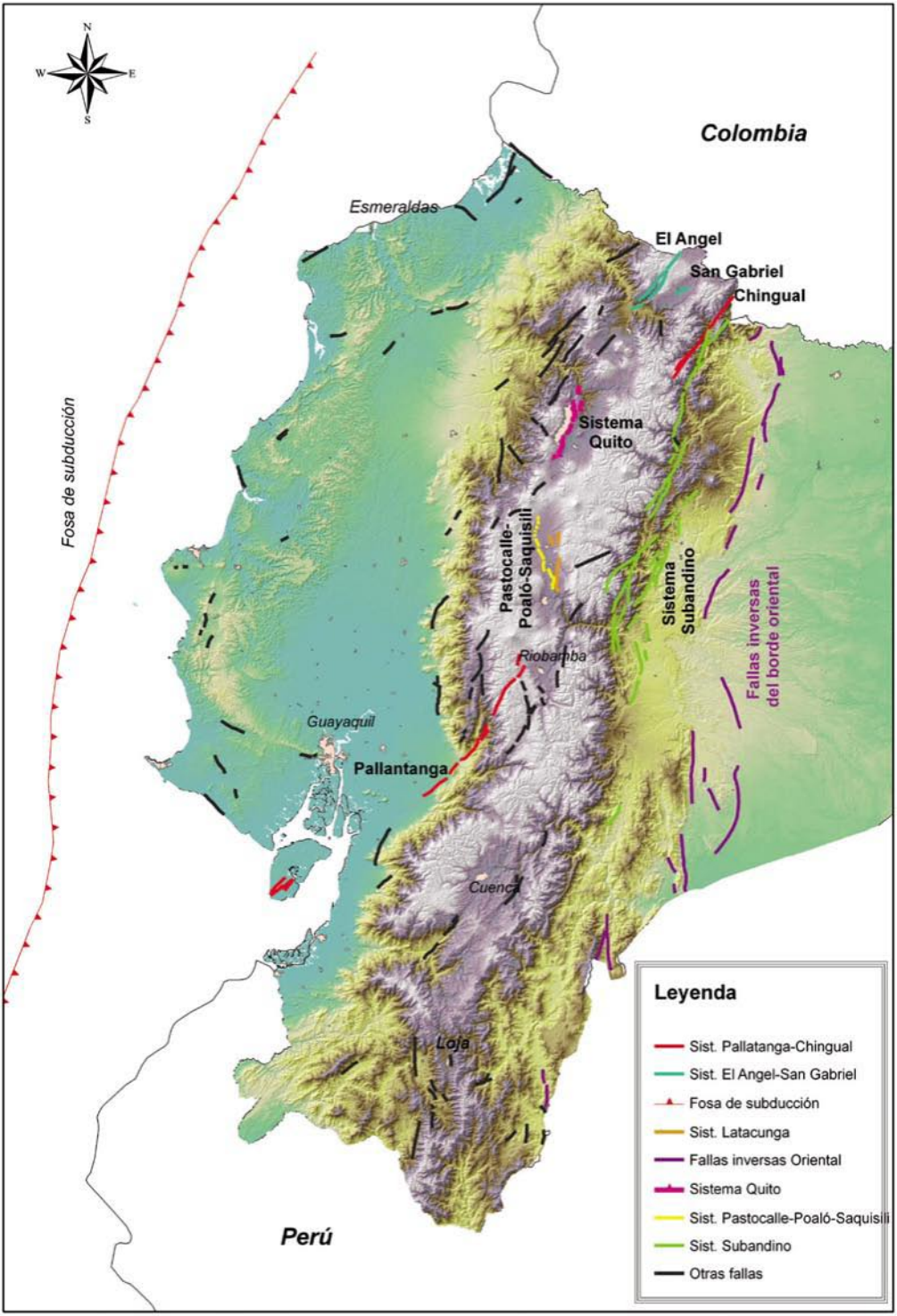


Figura 7. Mapa de fallas activas (Instituto Geofísico, inédito).

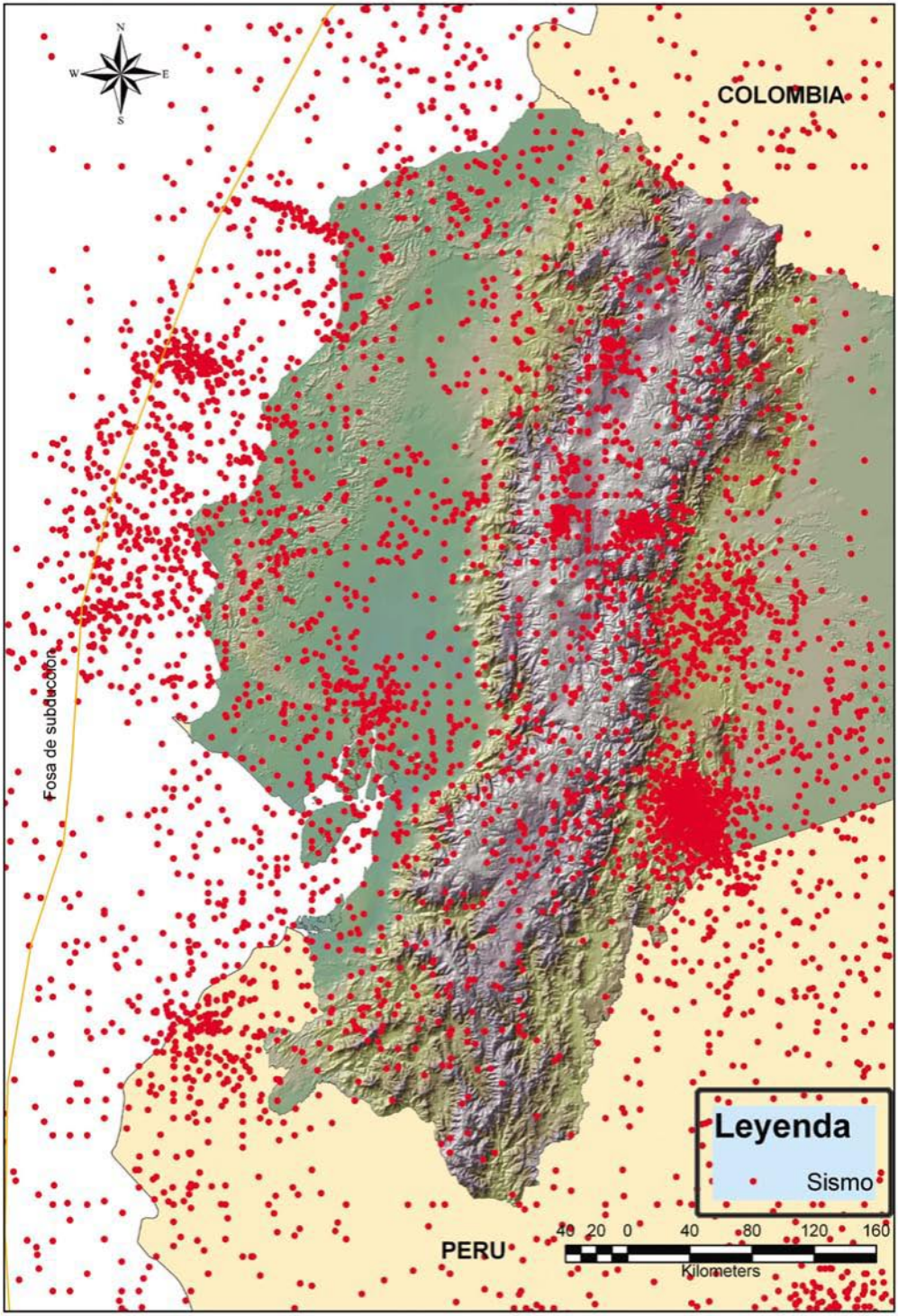


Figura 8. Mapa de epicentros del Ecuador 1541-2007.

Figura 9a. Daños registrados a causa del terremoto de Pelileo de 1949, en la calles Bolívar y Rocafuerte de la ciudad de Ambato. (*Revista Ambato*,

Figura 9b. Vista del Cuartel de Policía de la ciudad de Ambato antes y después del terremoto de Pelileo de 1949. Tomado de la *Revista Ambato*,

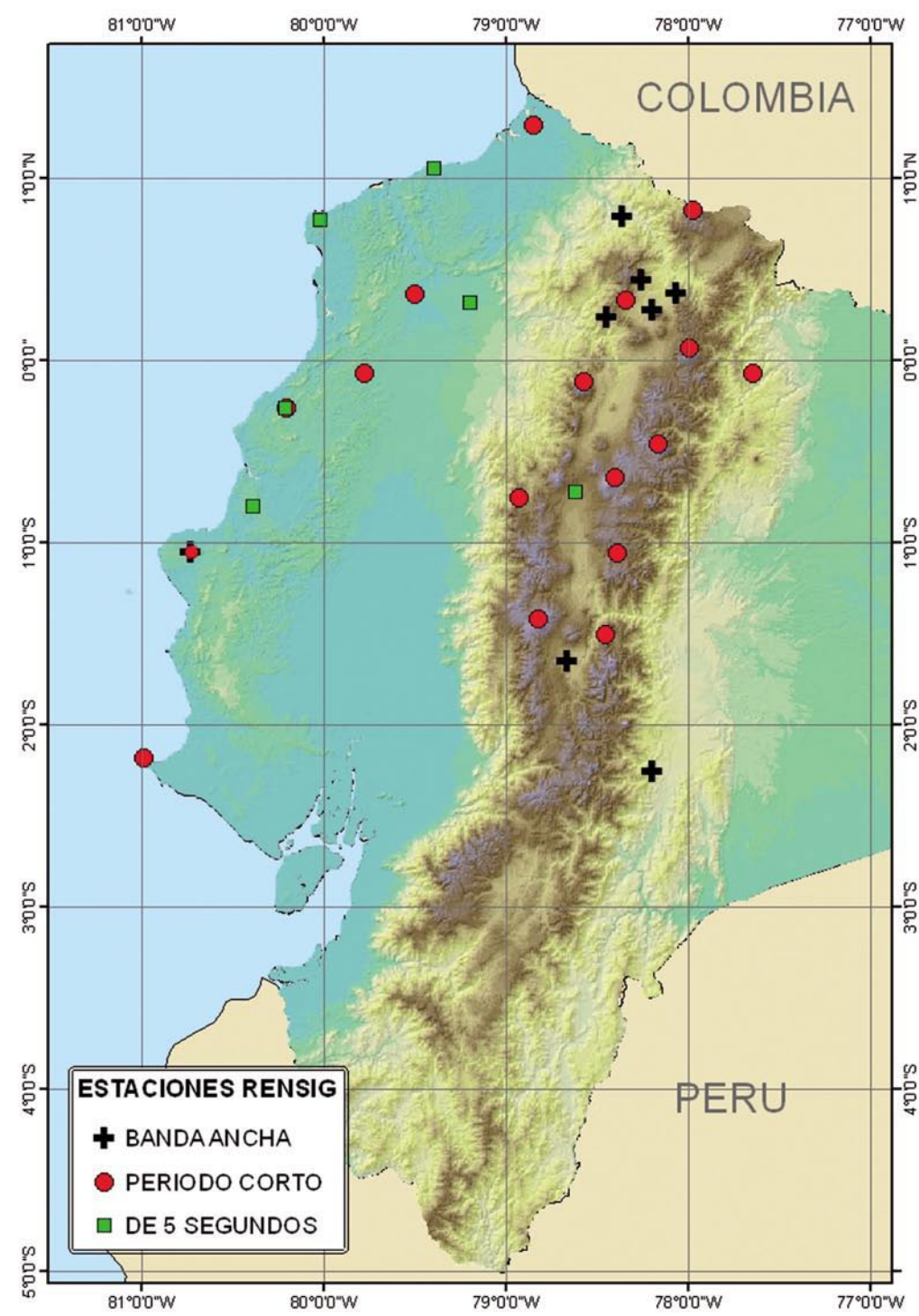


Figura 11. Distribución actual de la Red Nacional de Sismógrafos (REN-

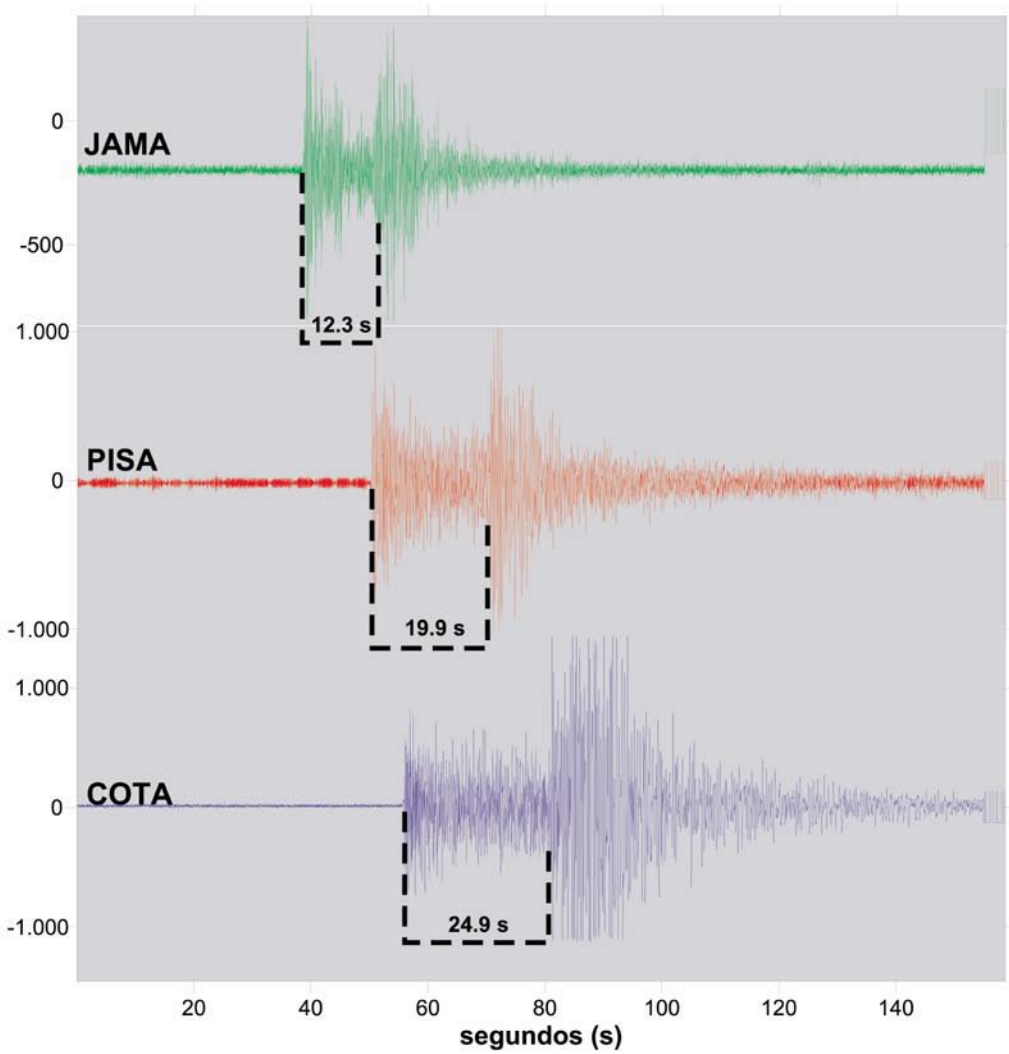


Figura 12. Sismogramas de un sismo local que llega a las estaciones JAMA, PISA y COTA.

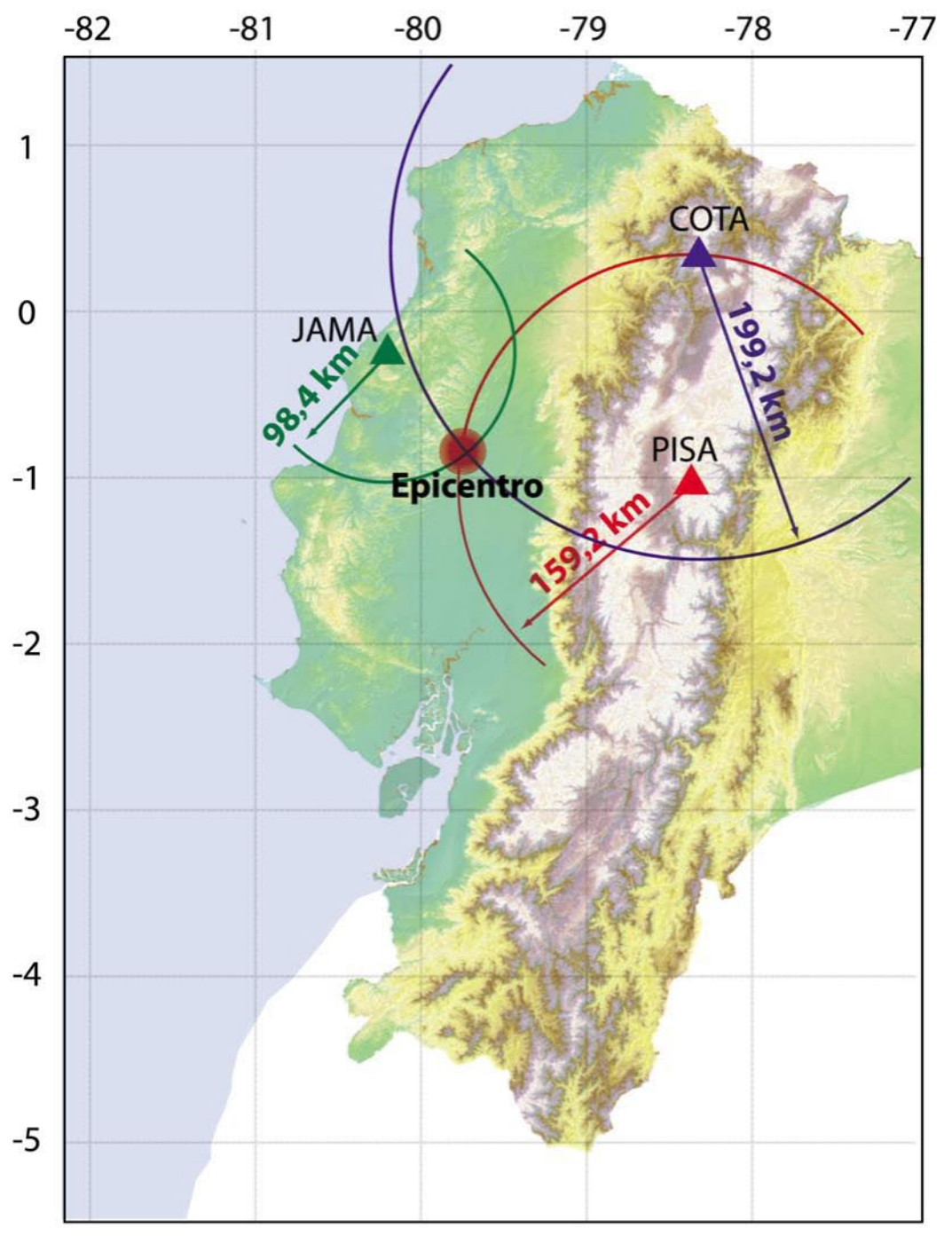


Figura 13. Localización epicentral de un sismo mediante el método de triangulación.

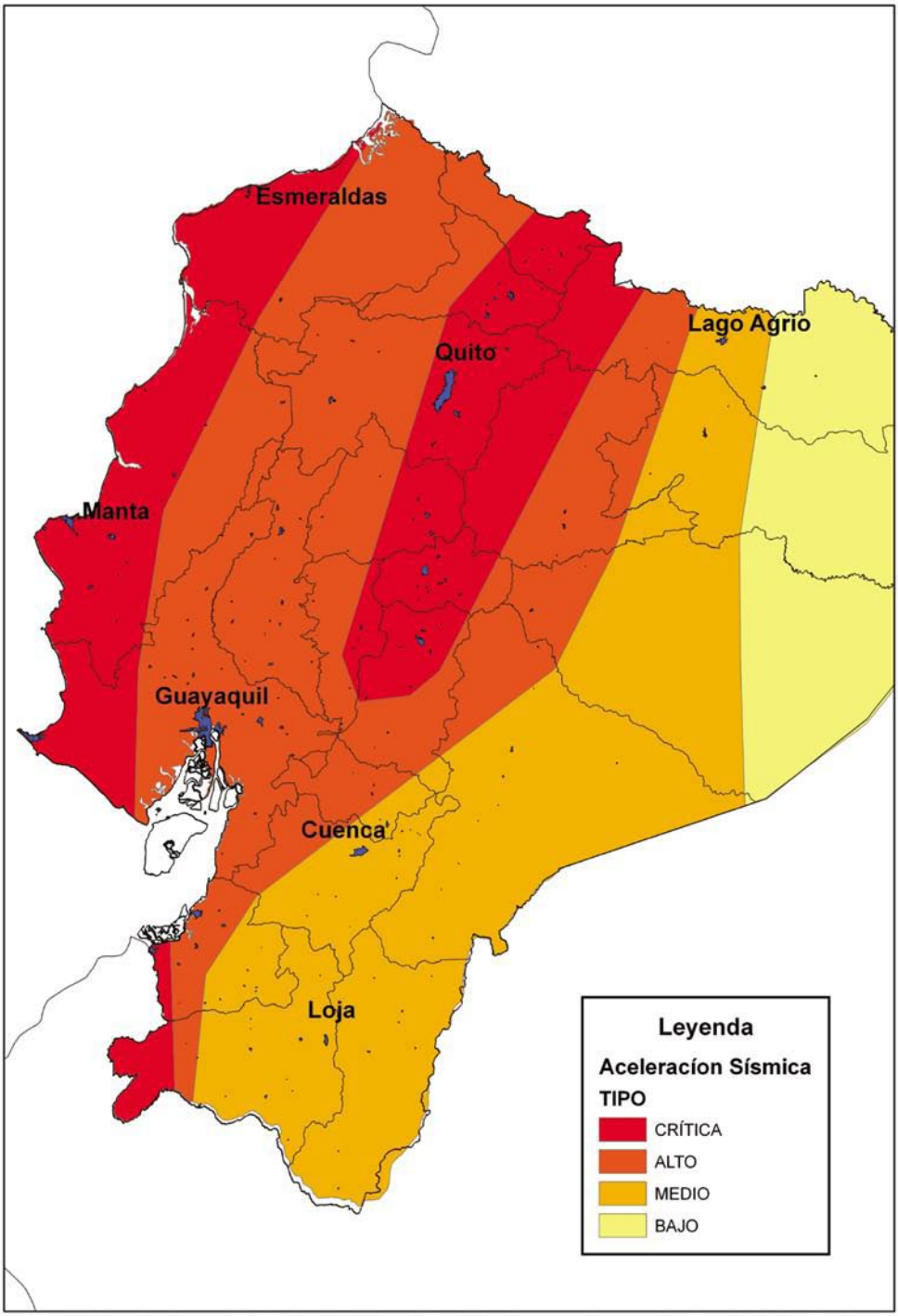


Figura 14. Mapa de aceleraciones sísmicas en el Ecuador. Tomado del Código Ecuatoriano de la Construcción (INEN, 2001).