



DESDE EL INTERIOR DE LA TIERRA



LOS INQUIETOS ANDES



TERREMOTOS

La cordillera de los Andes se originó por la colisión de las placas tectónicas Suramérica y Nazca (Figura 2.1). Esta última choca contra el continente a una velocidad de seis a ocho centímetros por año y se sumerge bajo él.

A lo largo de la franja de choque de las placas, llamada zona de subducción, las presiones acumuladas hacen que las rocas se fracturen súbitamente; el rompimiento se traduce en vibraciones que son más fuertes en la medida en que la zona de falla sea mayor. Las vibraciones se desplazan en todas las direcciones como ondas sísmicas y cuando llegan a la superficie las percibimos como terremotos.

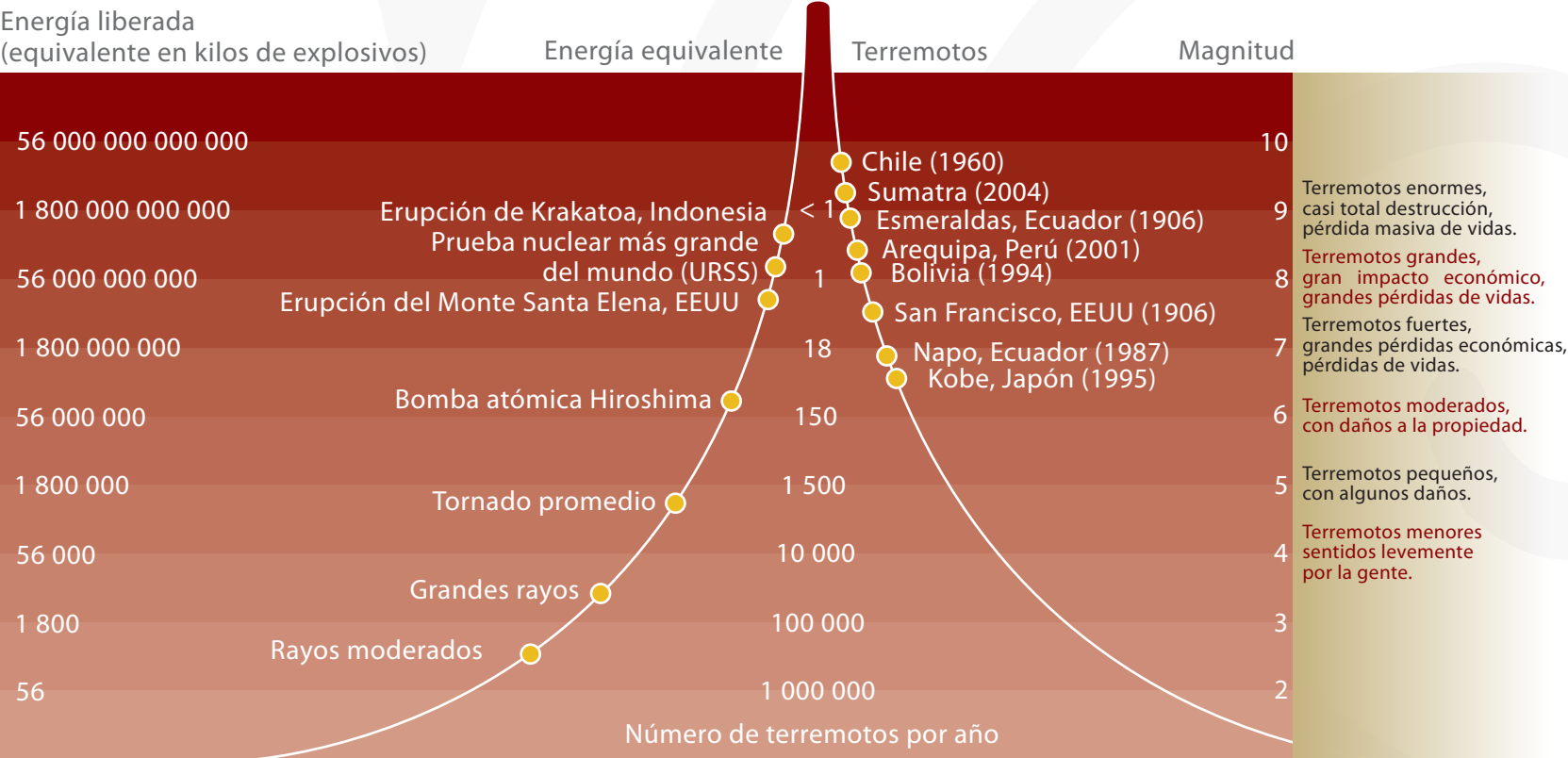
Los esfuerzos ocasionados por el choque de placas se distribuyen y transmiten por la placa Suramérica y abarcan toda la cordillera de los Andes, en donde generan fracturas o fallas geológicas, fuente de los terremotos continentales.

El tamaño o magnitud de los terremotos se mide según la cantidad de energía liberada. Un sismo de magnitud 6 libera energía equivalente a 56 millones de toneladas de explosivos, un poco menos que la energía liberada por la bomba de Hiroshima. Un terremoto de magnitud 9 liberaría energía equivalente a 36 mil bombas de Hiroshima.

En la Tierra ocurren sismos de magnitud inferior a 5 todos los días, mientras que terremotos de magnitud 6 suceden, en promedio, 150 por año, y tan sólo hay un sismo de magnitud 8 cada año (Figura 3.1). El terremoto más grande del mundo, desde que se inició la era de la sismología instrumental a finales del siglo XIX, ocurrió el 22 de mayo de 1960 frente a costas chilenas. Tuvo una magnitud de 9,5 y fue causado por una falla de mil kilómetros de longitud. Generó un tsunami enorme que atravesó el océano Pacífico y llegó a Hawaii 15 horas después, en donde las olas alcanzaron 10 metros de altura y dejó 61 víctimas mortales. A Japón llegó 22 horas después de ocurrido el sismo y dejó 138 muertos.

Los terremotos generan múltiples fenómenos naturales secundarios como deslizamientos, tsunami y licuación de suelos. La licuación de suelos es la pérdida momentánea de la capacidad de soportar peso por reacomodamiento de las partículas de arena en suelos saturados de agua.

Figura 3.1 Número de terremotos por año y energía equivalente alrededor del mundo



Fuente: Adaptado de IRIS (2009).

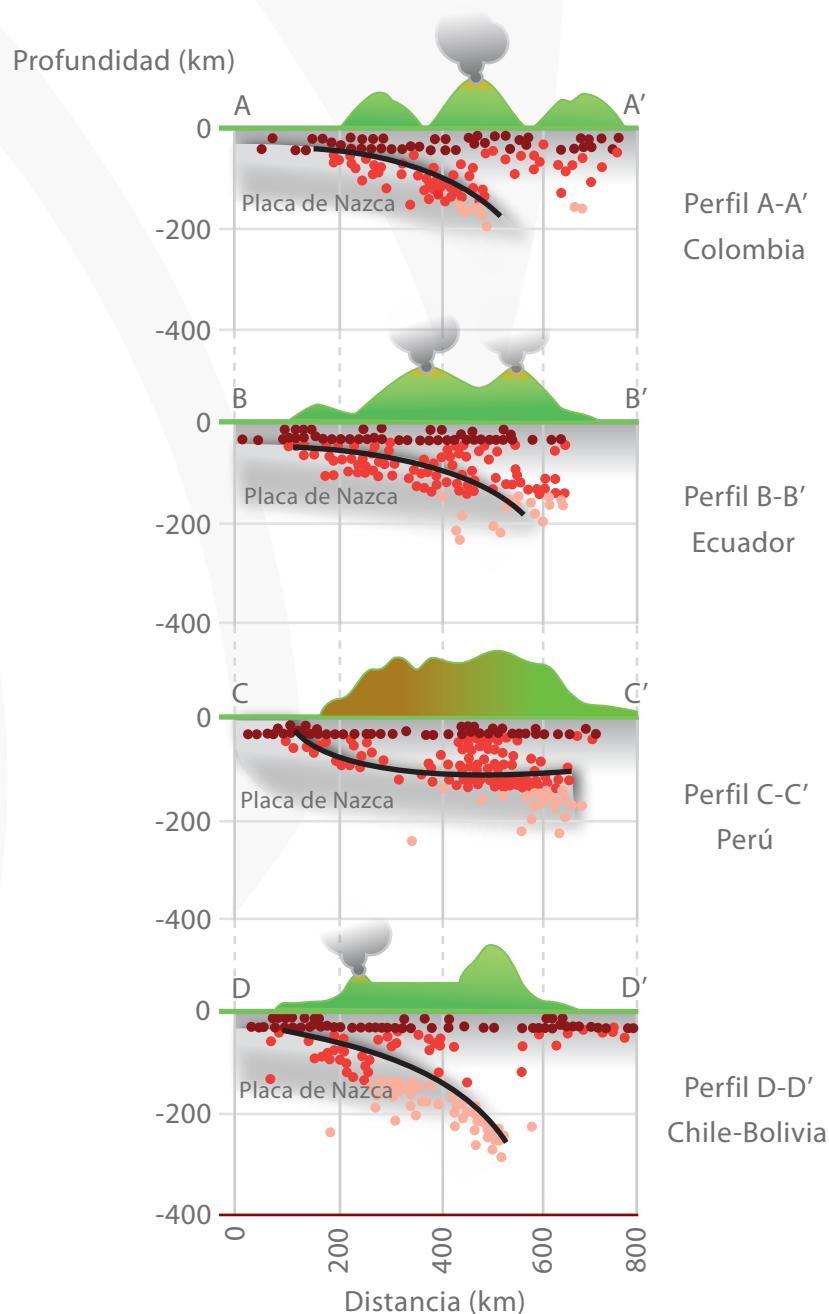
Los terremotos han ocurrido en los Andes desde hace millones de años y, con seguridad absoluta, seguirán ocurriendo.

Los terremotos se clasifican, según su magnitud, en grandes de 7 grados en adelante y según la profundidad a la que ocurren se consideran superficiales hasta 33 kilómetros. Entre 1973 y 2009 se han registrado en la subregión más de 7 mil terremotos de magnitud superior a 4,5, de los cuales 861 tuvieron magnitud mayor a 5,5. Esta sismicidad se representa en el Mapa 16 donde se destaca lo siguiente:

- **Sismos superficiales**, asociados principalmente a la zona de subducción, con magnitudes superiores a 7.
- **Sismos con magnitudes intermedias** (5 a 7), asociados con el roce entre la placa oceánica sumergida y la de Suramérica.
- **Sismos de diversa magnitud**, asociados con las fallas continentales a lo largo de toda la cordillera de los Andes, la cual está fracturada como resultado de los esfuerzos a gran escala ocasionados por el choque de las placas.
- **Sismos profundos**. Los Andes se destacan a nivel mundial por la ocurrencia de sismos muy profundos y de gran magnitud como el ocurrido en la región amazónica de Bolivia el 9 de junio de 1994, a más de 500 kilómetros bajo la superficie, con magnitud 8,2, que fue sentido en todo el continente americano desde la Patagonia hasta Alaska.

La profundidad de los sismos se representa en la Figura 3.2 por medio de los perfiles A-A', B-B', C-C' y D-D'. Los perfiles son vistas transversales en diferentes zonas de la costa pacífica, según se indica en el Mapa 16; en cada uno se representa el ángulo de inclinación de la placa de Nazca. En Colombia, Ecuador, sur del Perú y Bolivia el ángulo es alto, de tal manera que la zona de roce entre las placas alcanza condiciones de presión y temperatura tales que las rocas se funden y generan zonas volcánicas. En comparación, en gran parte de la costa del norte y centro del Perú el ángulo de inmersión es bajo, de modo que no hay fusión de las rocas y no hay vulcanismo, pero sí más frecuentes y fuertes terremotos superficiales.

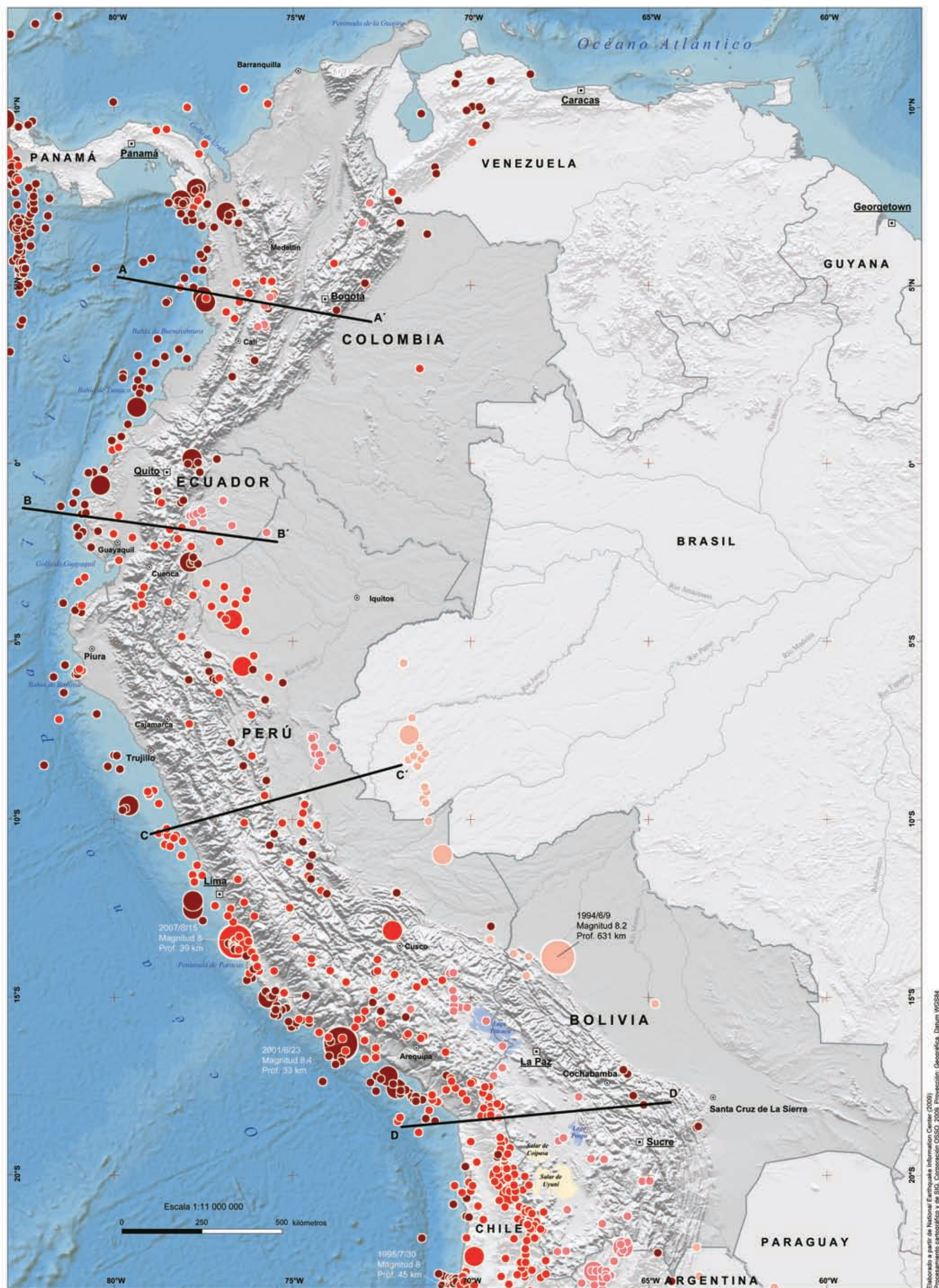
Figura 3.2. Profundidad de los terremotos en la corteza terrestre andina



La placa de Nazca se sumerge bajo los Andes con diferentes ángulos de inclinación: en aquellas regiones donde el ángulo es alto, las condiciones de presión y temperatura a unos 100 km de profundidad son tales que las rocas se funden y hay vulcanismo.

Fuente: Elaboración propia a partir de sismicidad de NEIC (2009).

16. Sismos de magnitud superior a 5,5, 1973 - 2009



Los terremotos, esos bruscos movimientos de la corteza terrestre, ocurren en toda la subregión. Desde 1973 se han registrado más de 7 000; 50 de ellos han causado destrucción. Los sismos ocurren, comparativamente, con mayor frecuencia y fuerza, en la porción sur de la costa del Perú.



AMENAZA SÍSMICA

La amenaza sísmica es la probabilidad de que en una región determinada ocurran vibraciones sísmicas con un cierto nivel de aceleración con respecto a la fuerza de la gravedad, en un periodo preestablecido. Ya que fenómenos como los terremotos obedecen a causas que son activas desde hace millones de años (el choque de placas), su ocurrencia puede considerarse como una variable estacionaria en el tiempo, es decir, allí donde han ocurrido grandes terremotos es esperable que en el futuro ocurran otros de magnitud similar.

El nivel con el que las vibraciones sísmicas llegan a un sitio depende de varios factores: (1) la magnitud del terremoto; (2) la distancia desde la falla (fractura) hasta un sitio de interés y (3) el llamado “efecto local”, que depende de los tipos y espesores de suelos, las formas de las cuencas y la topografía. Los suelos blandos depositados sobre las rocas amplifican las vibraciones sísmicas y por lo tanto los daños tienden a ser mayores. Las vibraciones generan efectos secundarios, principalmente deslizamientos y licuación de suelo: si éste está conformado por depósitos arenosos con alto contenido de agua, se comportan como líquidos al paso de las vibraciones, de modo que estructuras, edificios o casas que estén cimentados sobre ellos pueden hundirse parcialmente.

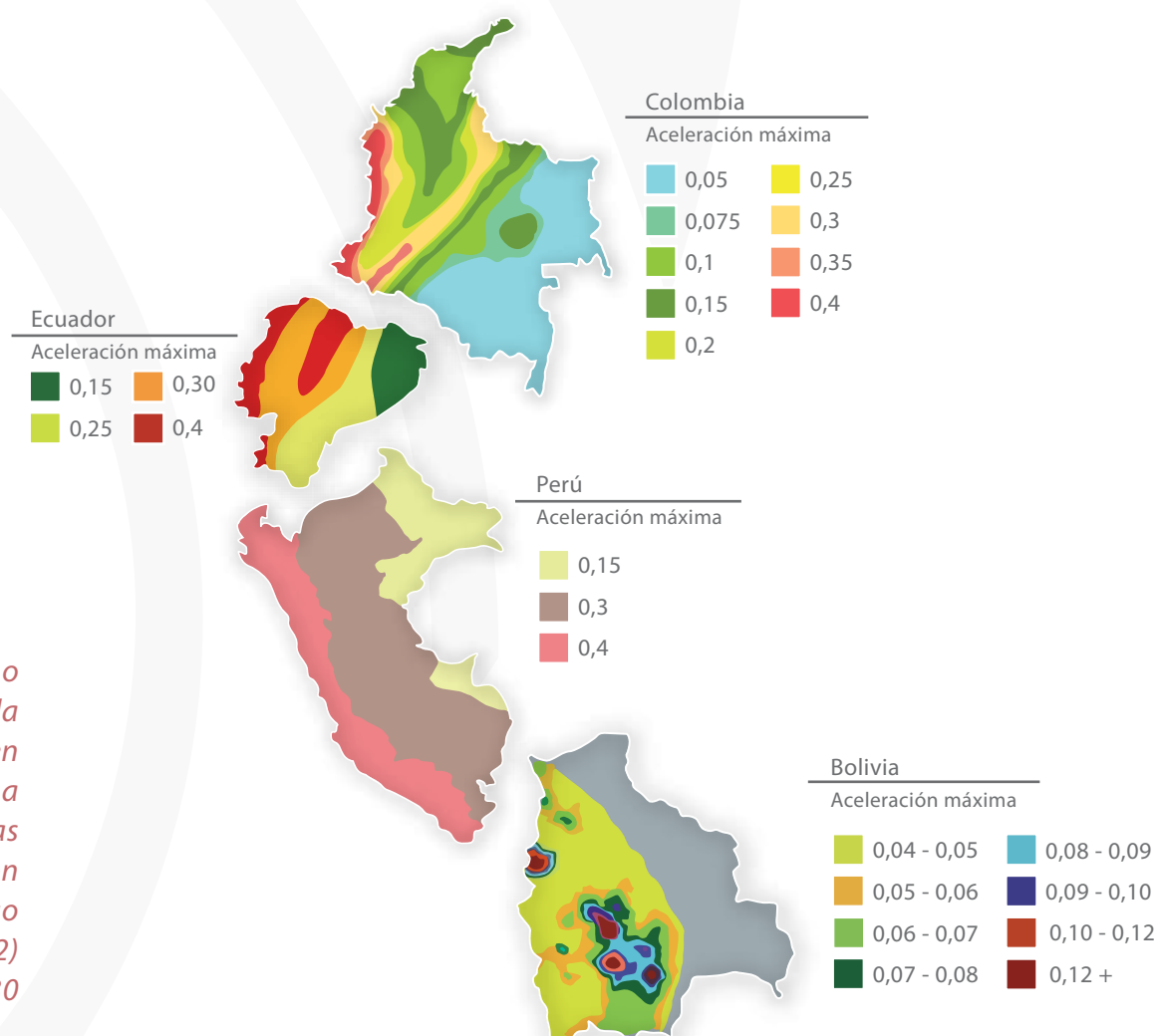
La amenaza sísmica regional se muestra en el Mapa 17, que indica cuál es la fuerza equivalente a la de la gravedad con la cual los terrenos en roca pueden ser sacudidos en un periodo de cincuenta años, con una probabilidad de excedencia del 10%.

En el nivel de amenaza sísmico alto se esperan vibraciones sísmicas con aceleraciones de 250 cm/s^2 a 400 cm/s^2 . Esto quiere decir que el terreno puede ser empujado por las vibraciones con fuerzas equivalentes al 25% y al 40% de la aceleración de la gravedad, respectivamente.

La fuerza con la que es sacudida una roca o suelo durante la ocurrencia de un terremoto se expresa en términos del porcentaje de la aceleración de la gravedad.

Los terremotos no generan muertes por sí mismos. La debilidad de las construcciones es una de las principales causas de pérdidas de vidas y daños materiales. Aplicando normas vigentes es factible disminuir pérdidas futuras.

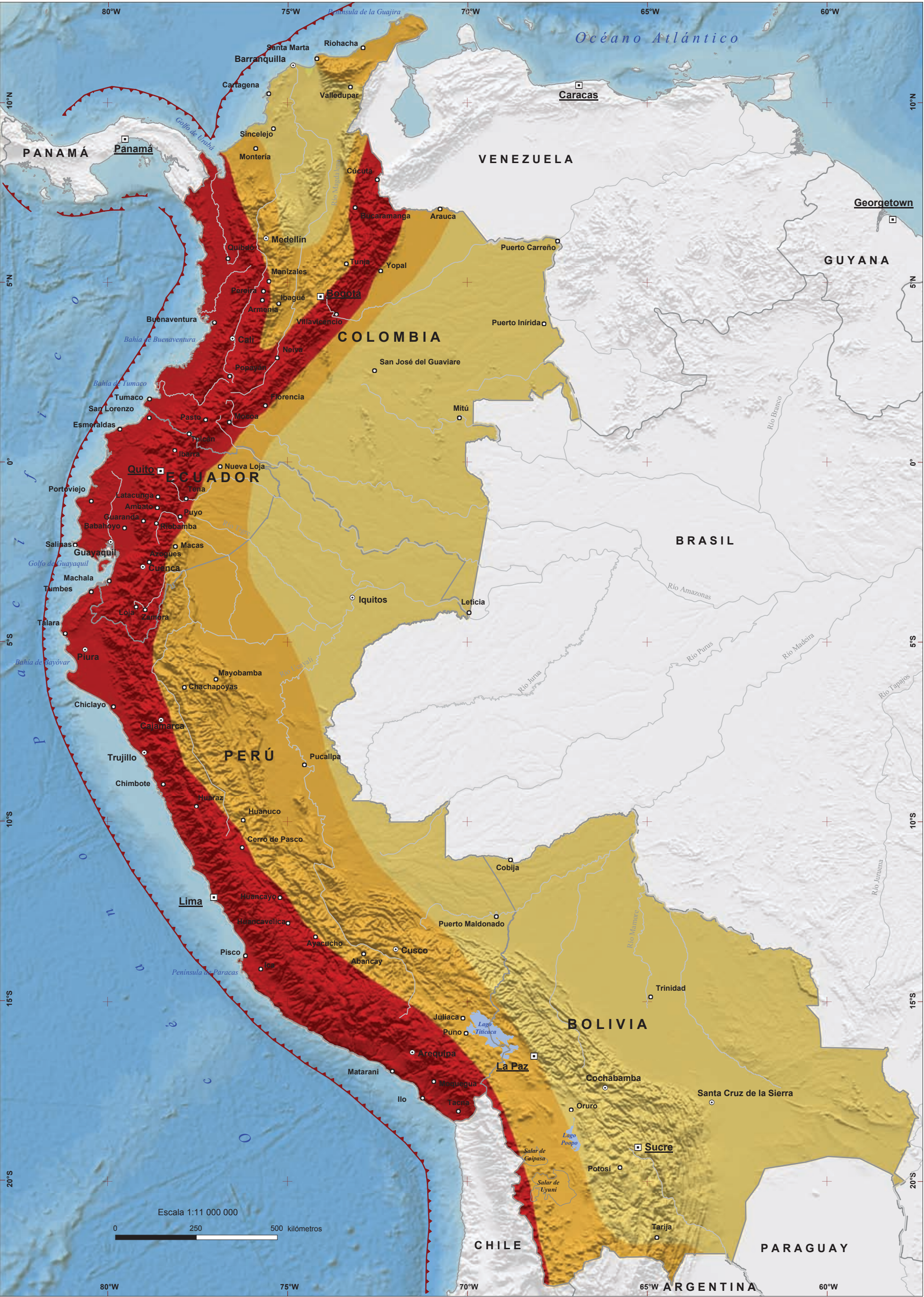
Figura 3.3. Peligro sísmico en los códigos nacionales de construcción



Elaborado a partir de Norma Boliviana de Diseño Sísmico (2006); Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistentes (1998); Código Ecuatoriano de la Construcción (2002) y Norma Técnica de Edificación (2003), de Perú.

Los países de la subregión han hecho significativos avances en evaluar la amenaza sísmica e incorporarla en normas nacionales: Norma Boliviana de Diseño Sísmico (2006); Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistentes (1998); Código Ecuatoriano de la Construcción (2002) y Norma Técnica de Edificación E-030 (2003), de Perú.

17. Amenaza sísmica



La zona de subducción desde Perú hasta Colombia es la mayor fuente de terremotos y también de los más grandes; por eso la amenaza sísmica es mayor en el borde del Pacífico de la subregión, donde la fuerza de los terremotos sobre la superficie de la Tierra y las edificaciones es más destructiva.

La fuente (CERESIS, 1996) representa isocurvas de aceleración máxima con probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, lo que equivale a un periodo de retorno de 500 años.

Elaborado a partir de CERESIS (1996); la zona de subducción a partir de PMA-GCA (2008) y Schobbenhaus y Belliza (2001). Procesamiento cartográfico y de SIG, Corporación OSSO, 2009. Proyección: Geográfica, Datum WGS84.



EXPOSICIÓN A AMENAZA SÍSMICA

Entre los principales elementos expuestos a las vibraciones sísmicas se encuentran las edificaciones e infraestructura, que pueden sufrir daños de acuerdo con su capacidad de resistencia, la cual depende de las condiciones de mantenimiento, de la calidad de los materiales y de la configuración o forma de distribución de sus elementos estructurales y arquitectónicos. Las vibraciones sísmicas también generan deslizamientos y efectos como la licuación de suelos arenosos que pierden momentáneamente su capacidad de sostener edificaciones.

El objetivo de esta sección es mostrar la exposición a la amenaza sísmica sin analizar los posibles daños, ya que éstos dependen de las variables expuestas anteriormente, lo que requiere hacer estudios a escala de mayor detalle.

POBLACIÓN Y ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

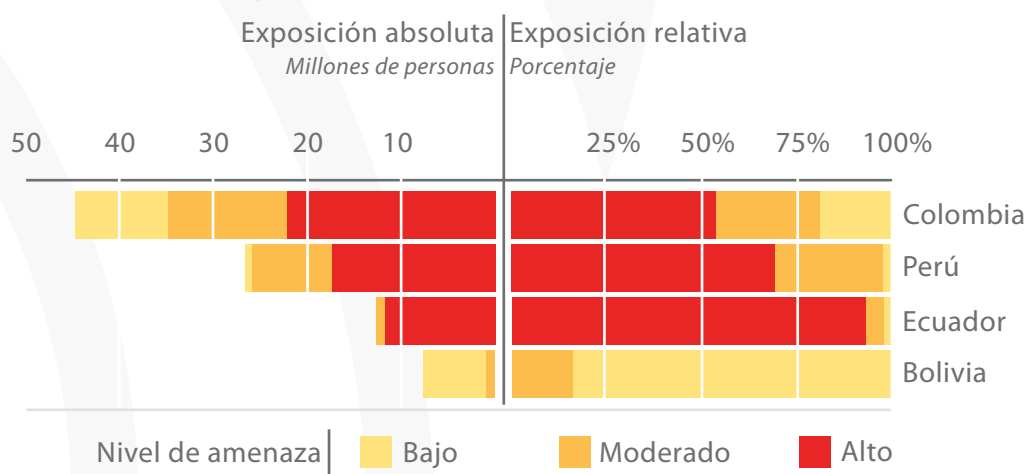
El 59% de la población de la Comunidad Andina, 54 millones de habitantes, se asienta en zonas de amenaza sísmica alta. Los mayores asentamientos urbanos expuestos están en la costa pacífica de Ecuador y Perú y en los Andes de Colombia y Ecuador (Mapa 18). El porcentaje de población expuesta es proporcional a las unidades habitacionales e infraestructura básica y de servicios públicos expuestas, como redes viales, conducción energética y de comunicaciones, saneamiento y agua potable, edificios públicos como escuelas y universidades, e instalaciones vitales como hospitales y centros de salud.

Colombia y Perú tienen la mayor cantidad de población expuesta a amenaza sísmica alta, con 22,3 y 18,7 millones de personas, que representan el 52% y el 69% de la población total, respectivamente. Ecuador, con 13 millones de habitantes, tiene casi toda su población en amenaza sísmica alta, ya que alcanza el 97% del total. Bolivia tiene una parte marginal de su territorio en amenaza sísmica alta, que en población representa menos del 1% de sus 8,1 millones de habitantes (Figura 3.4).

Cincuenta y nueve millones de habitantes de la Comunidad Andina residen en zonas de amenaza sísmica alta.

Perú y Colombia tienen la mayor cantidad de habitantes en amenaza sísmica alta: con 18,7 y 22,3 millones, respectivamente.

Figura 3.4. Población expuesta a amenaza sísmica



Fuente: Elaboración propia a partir de los mapas 17 y 7. Ver memoria técnica.

La mayor concentración urbana expuesta a amenaza sísmica alta es el área metropolitana de Lima– Callao con 8,8 millones de habitantes en el 2009. Además, en Perú varias ciudades principales están en la misma condición: Arequipa, Trujillo, Chiclayo, Tacna, Moquegua, Piura, Pisco y Tumbes, entre otras. En Ecuador, casi la totalidad de las ciudades más importantes está en esta misma zona, incluyendo a Quito y Guayaquil. En Colombia, además de las ciudades costeras del Pacífico, donde se destacan Buenaventura y Tumaco por su alta concentración de población e infraestructura con altos niveles de vulnerabilidad, están las ciudades andinas, entre las que destacan Armenia, Bucaramanga, Cali, Cúcuta, Manizales, Neiva, Pasto, Pereira y Popayán.

En Colombia el 28% de los habitantes (12,2 millones) están expuestos a amenaza sísmica media; en Perú, el 28% (7,6 millones); en Bolivia, el 16% (1,6 millones) y en Ecuador, el 5% (700 mil). Las zonas de baja exposición, localizadas al oriente de la cordillera de los Andes, comprenden especialmente las regiones de los Llanos Orientales y Caribe en Colombia, y la Amazonia, región compartida por los cuatro países. En ella está el 83% de la población de Bolivia, el 2% de la población de Colombia y menos del 1% de las poblaciones de Ecuador y Perú.

INTERCAMBIO DE BIENES Y SERVICIOS Y MOVILIDAD

VÍAS

El 42% de las vías del Sistema Andino de Carreteras (Decisión 271 de la CAN), equivalente a 10 100 kilómetros, está expuesto a amenaza sísmica alta (Mapa 19). El 23% y el 35% del sistema están expuestos a amenaza sísmica media y baja y corresponden respectivamente a 5 700 y 8 300 kilómetros (Tabla 3.1).

El 50% de las vías expuestas a amenaza sísmica alta corresponde a los ejes troncales fundamentales en el comercio intracomunitario andino con Mercosur y Suramérica, dentro de la Iniciativa para la Integración de la Infraestructura Regional Suramericana, IIRSA. Se destaca la carretera Panamericana, que está en amenaza sísmica alta a su paso por Perú, Ecuador y sur de Colombia.

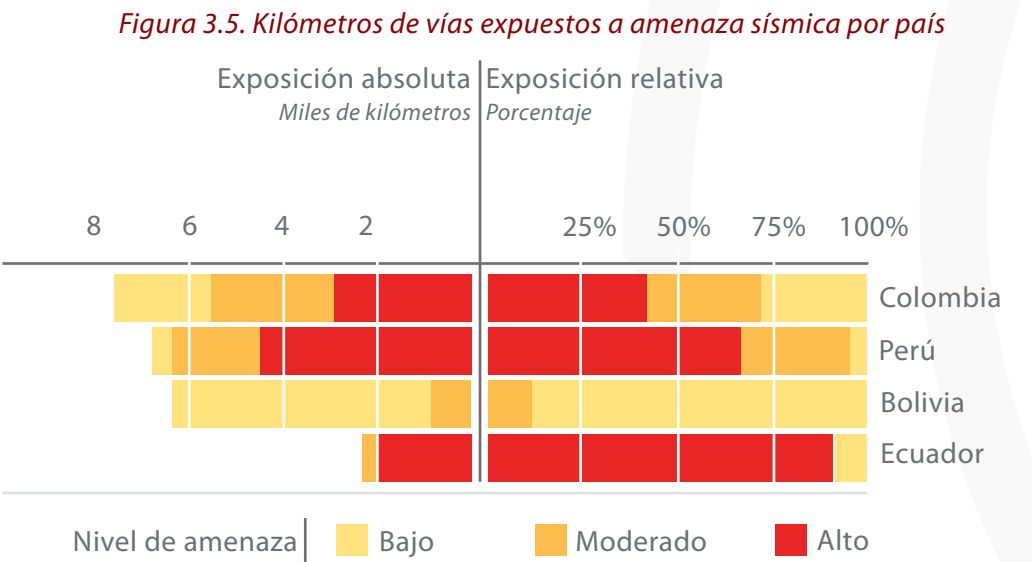
En Bolivia el 87% de la red vial, equivalente a 5 900 kilómetros, se encuentra expuesto a amenaza sísmica baja y el 13% restante, que corresponde a tramos estratégicos del eje troncal que comunica el país con Perú y Chile, a amenaza sísmica media. En Colombia el 41% de las vías que pertenecen al sistema andino de carreteras está expuesto a amenaza sísmica alta, mientras que en Ecuador lo están casi todas las vías del sistema, el 92%. En Perú el 67% de las vías se encuentra en amenaza sísmica alta y tan sólo un 5%, el tramo que comunica con el Brasil a través de Iñapari, está en amenaza sísmica baja (Figura 3.5).

El 50% del eje vial troncal (carretera Panamericana) está expuesto a amenaza sísmica alta en Perú, Ecuador y el sur de Colombia.

Tabla 3.1. Kilómetros de vías expuestos a amenaza sísmica según tipo de eje

Exposición	Troncal	Interregional	Complementaria	Total
Alta	6 300	500	3 300	10 100
Media	2 800	600	2 300	5 700
Baja	3 400	1 600	3 300	8 300
Total	12 500	2 700	8 900	24 100

Fuente: Elaboración propia a partir de los mapas 12 y 7.



Fuente: Elaboración propia a partir de los mapas 12 y 7.

Los daños más comunes en las carreteras causados por sismos son las deformaciones, los deslizamientos y la licuación de suelos. Los puentes pueden colapsar por falta de capacidad para resistir las fuerzas del sismo o por incapacidad para resistir los desplazamientos del suelo.

Una de las principales causas de daños por sismo en los puertos es la licuación de suelos arenosos, poco densos y saturados de agua.

Las tuberías y elementos enterrados se ven afectados por las deformaciones del suelo causadas por las vibraciones sísmicas, deslizamientos y licuación ocasionados por terremotos.

Las líneas de interconexión eléctrica de Ecuador con Perú y Colombia se encuentran en zona de amenaza sísmica alta.

❖ PUERTOS MARÍTIMOS Y FLUVIALES

De los 26 puertos marítimos y fluviales más importantes de la Comunidad Andina, 12 están expuestos a amenaza sísmica alta (Mapa 19). De éstos, todos localizados sobre el océano Pacífico, 3 concentran el 83% de la carga movilizada: Lima-Callao en Perú, Buenaventura en Colombia y Guayaquil en Ecuador, con 15,4, 9,9 y 7,1 millones de toneladas movilizadas durante el 2007, respectivamente. Los 14 puertos expuestos a amenaza sísmica baja son los fluviales de Bolivia y Perú y los marítimos de Colombia sobre el Caribe.

❖ AEROPUERTOS INTERNACIONALES

De los 25 principales aeropuertos internacionales de la Comunidad Andina existentes en el 2007, 11 están expuestos a amenaza sísmica alta (Mapa 20). De éstos, los que mueven más de dos millones de pasajeros al año son: Lima-Callao en Perú con 7,5 millones, Quito y Guayaquil en Ecuador con 4,2 y 3,2 millones, respectivamente, y Cali, en Colombia, con 2,4 millones. Los aeropuertos de las capitales de Bolivia y Colombia están expuestos a amenaza sísmica media.

❖ INFRAESTRUCTURA DE HIDROCARBUROS

La Comunidad Andina cuenta con 18 refinerías de petróleo, de las cuales 7 están expuestas a amenaza sísmica alta: las cuatro de Perú, dos de las cuatro de Ecuador (Esmeraldas y La Libertad) y una (Orito) de las cinco de Colombia (Mapa 21).

Aunque la mayoría de los oleoductos está en situación de baja o de media exposición, hay tramos importantes en zonas de amenaza alta que, especialmente en el caso de Ecuador, son relevantes. Por países, los tramos expuestos a amenaza sísmica alta son: el que transcurre entre la frontera de Bolivia con Chile y el puerto de Arica, donde se embarca el petróleo boliviano; el oleoducto transandino que une Orito (lugar de explotación) con Tumaco (puerto de exportación de petróleo), y parte del tramo que une a Villavicencio con Bucaramanga, en Colombia. En Ecuador está expuesto un tramo del oleoducto que une Nueva Loja con Quito así como el tramo Quito-Esmeraldas y el poliducto Quito-Guayaquil-Manta (Mapa 22). En Perú, un tramo del oleoducto que une Piura con la Amazonia, al oriente de la cordillera.

De los gasoductos, solo algunos tramos en Perú (Lima-Pisco) y en Colombia (Villavicencio-Bogotá y Neiva-Mocoa) están en alta exposición. Toda la infraestructura de gasoductos de Bolivia está en zonas de amenaza sísmica baja o media (Mapa 23).

❖ GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

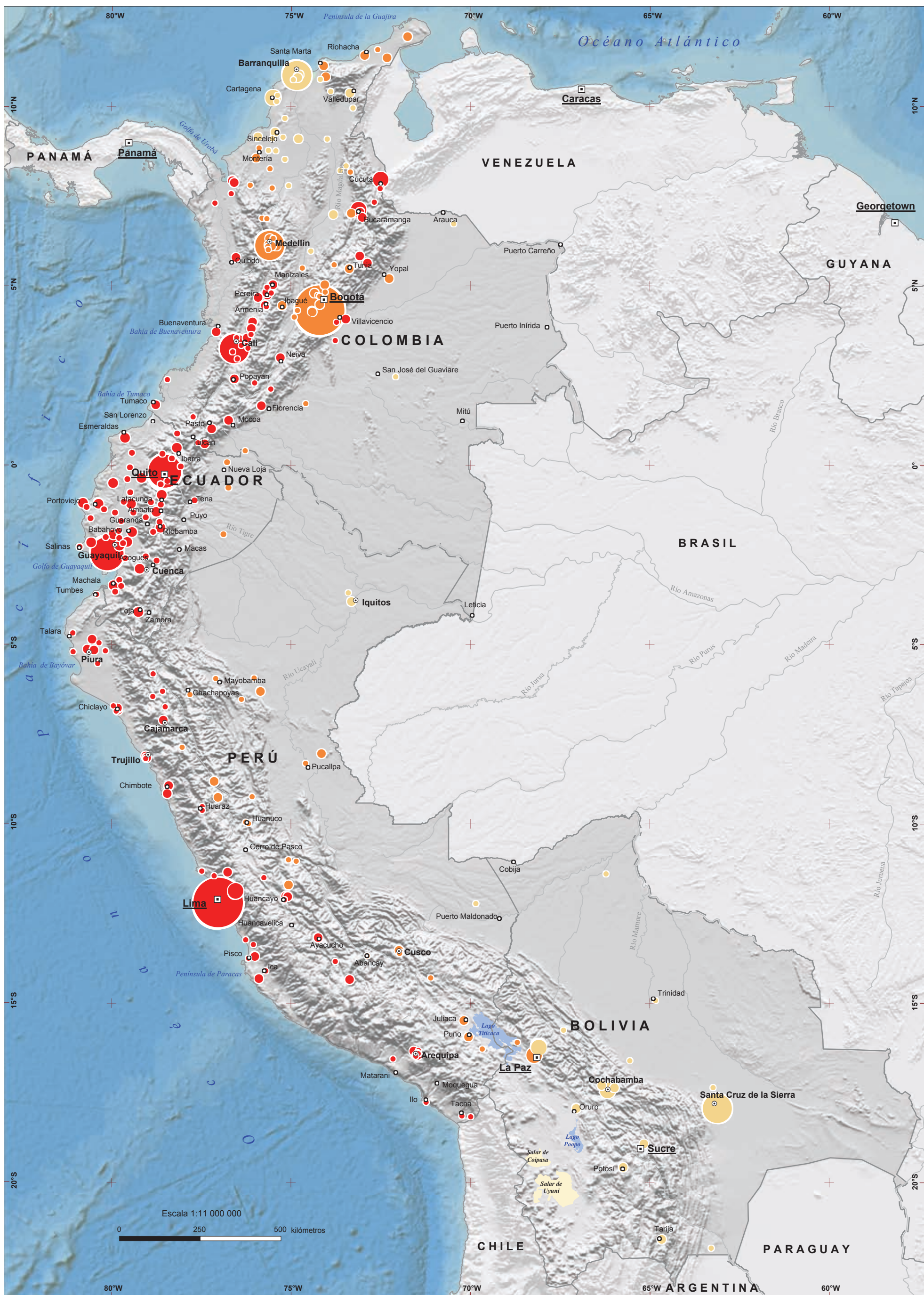
El 55% de las líneas de transmisión eléctrica con capacidad superior a 100 kV, que suman más de 19 500 kilómetros, está expuesto a amenaza sísmica alta. De las 186 centrales hidroeléctricas y térmicas que hacen parte de los sistemas interconectados nacionales, el 35% está en amenaza sísmica alta; el 3%, en media y el 35% restante, en baja (Mapa 24).

En Bolivia el 93% de las líneas de transmisión y el 91% de las centrales están expuestas a amenaza sísmica baja. Al no tener interconexión con Perú y al estar en baja y media exposición frente a la amenaza sísmica, Bolivia tiene menores probabilidades de verse afectado, ya sea directamente o por lo que pueda suceder en los otros países.

En Colombia la exposición de las líneas de transmisión eléctrica y las centrales se distribuye entre un 20% y un 40% en cada nivel de amenaza sísmica. En Ecuador el 96% de las líneas de transmisión y el 87% de las centrales están expuestas a amenaza sísmica alta. En Perú el 72% de las líneas de transmisión y el 66% de las centrales están expuestas a amenaza sísmica alta, y el 28% de las líneas y de las centrales están en amenaza media.

Debido a que la infraestructura energética del sur de Colombia está en alta exposición, se podría interrumpir el suministro de energía a Ecuador. Por ello es necesario contar con sistemas de redundancia que permitan sortear los posibles daños. Ello implica contar con dos o más líneas de conexión entre los países.

18. Población expuesta a amenaza sísmica, 2005



Nivel de exposición

Alto
Medio
Bajo

Población

Mayor a 5 000 000
1 000 000 - 2 300 000
500 000 - 1 000 000
100 000 - 500 000
50 000 - 100 000

Capital

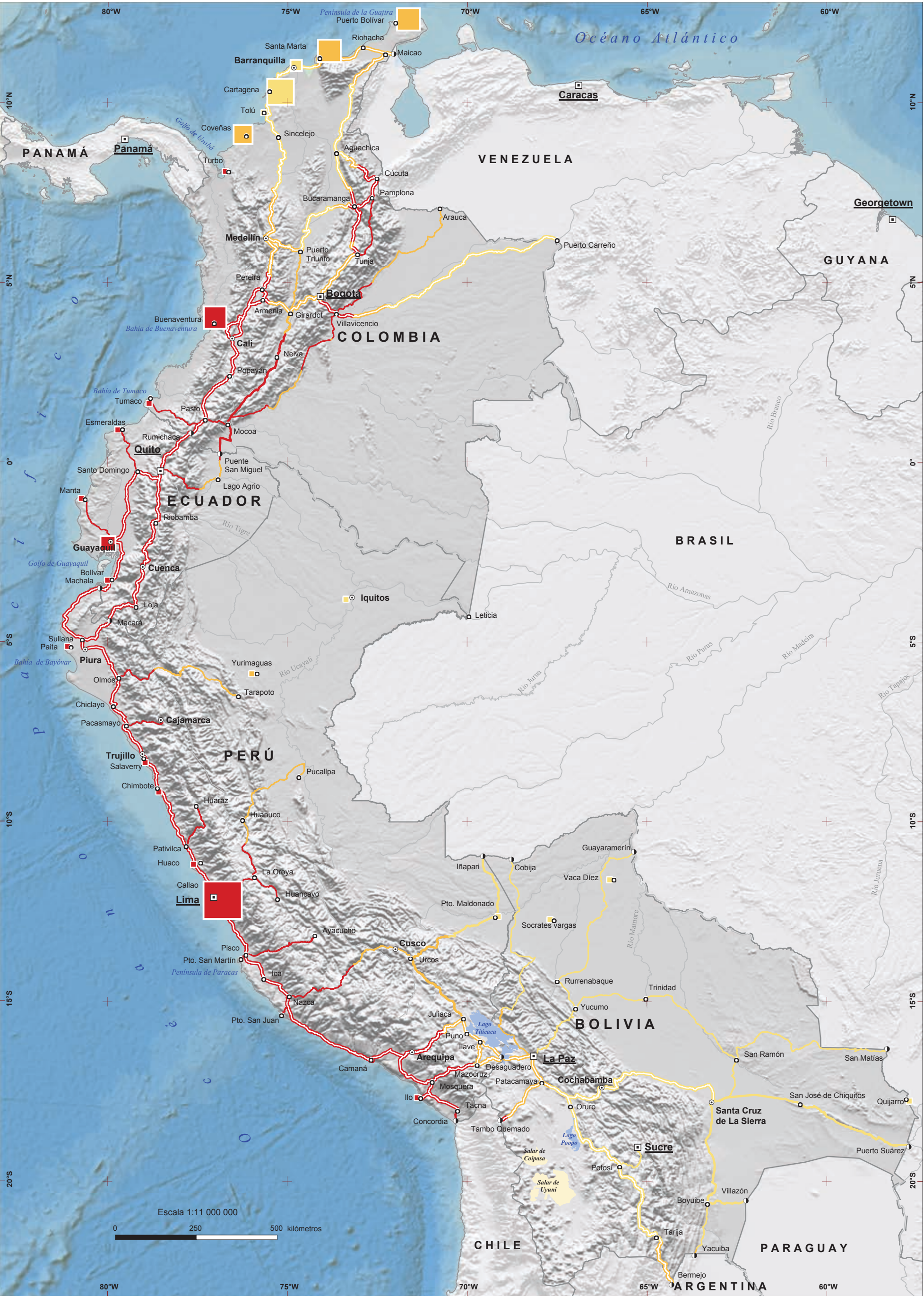
Ciudades principales

Otras ciudades o poblaciones

Nota: La población está representada a escala de provincia en Bolivia, municipio en Colombia, cantón en Ecuador y distrito en Perú. Los distritos en Lima y Callao se representan de manera agrupada.

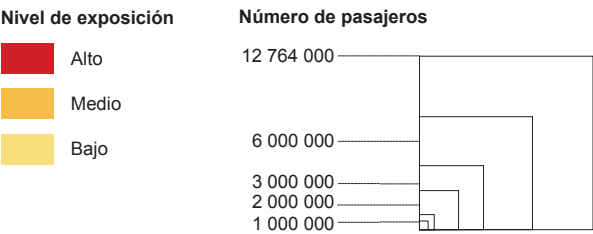
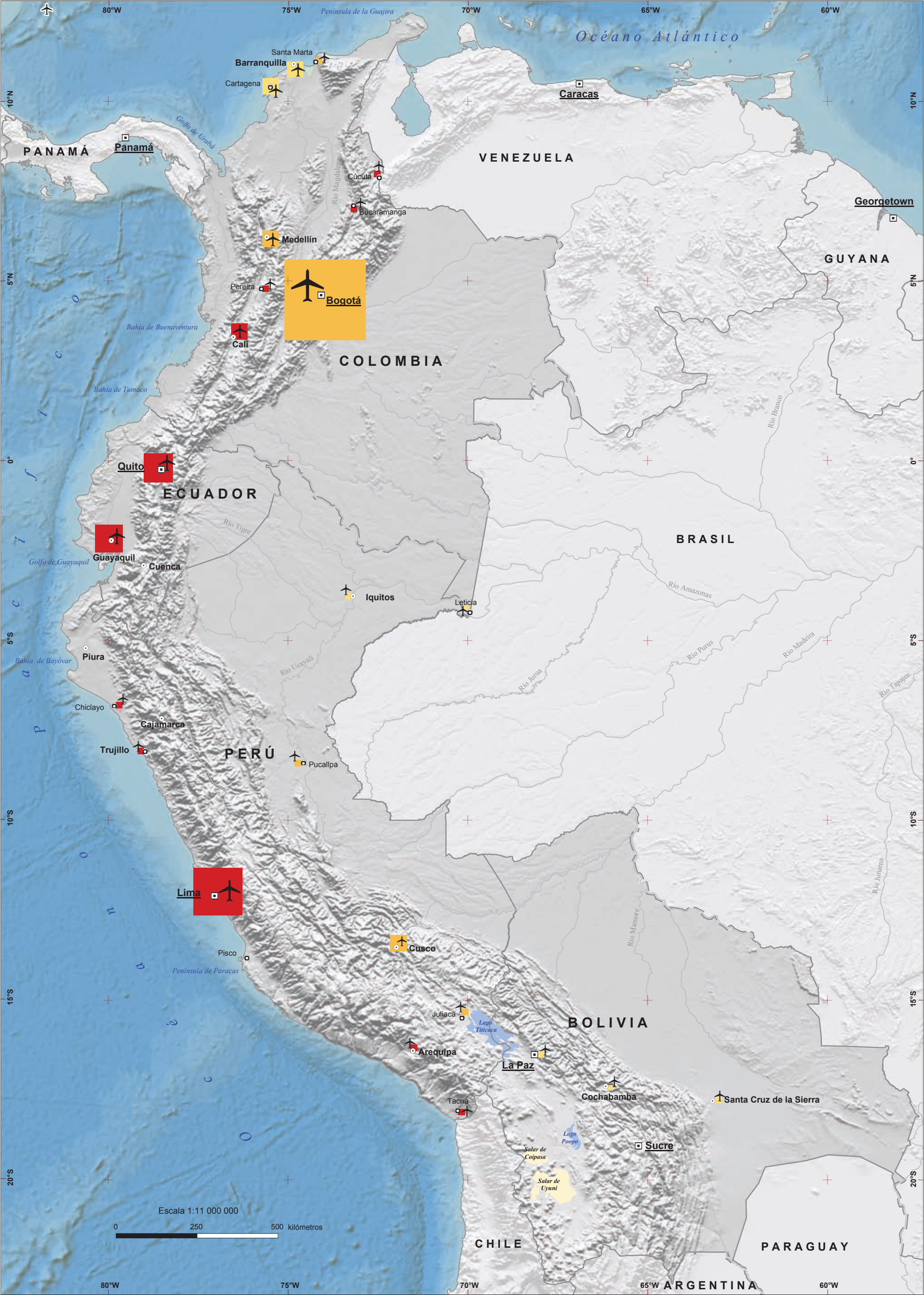
Lima metropolitana, con 8,8 millones de habitantes (en el 2009), que representan cerca del 27% del total de la población del Perú, concentra a nivel subregional el mayor volumen de habitantes con exposición alta a la amenaza sísmica.

19. Sistema Andino de Carreteras y puertos expuestos a amenaza sísmica



Gran parte del comercio exterior de la CAN transita por el sistema andino de carreteras que conecta los puertos con el interior de los países. Buenaventura, Guayaquil y Lima-Callao enfrentan la posibilidad de terremotos fuertes que afectarían la infraestructura vial y portuaria, lo que podría generar efectos importantes en las actividades viales y portuarias.

20. Aeropuertos internacionales expuestos a amenaza sísmica



- Capital
- Ciudades principales
- Otras ciudades o poblaciones

Los aeropuertos de Quito, Guayaquil y Lima, con más de 20 millones de pasajeros al año, están altamente expuestos a la amenaza sísmica. Por ello, en caso de daño o afectación de su funcionamiento el impacto en la movilidad de pasajeros sería importante.

21. Oleoductos y refinerías expuestos a amenaza sísmica



Nivel de exposición

Alto

Medio

Bajo

Oleoducto

Refinería

Capitales

Ciudades principales

Otras ciudades o poblaciones

En todos los países, incluido Bolivia con el oleoducto transandino hasta Arica en Chile, pueden ocurrir daños a los oleoductos por sismo. Con excepción de los oleoductos transandinos del sur de Colombia y norte de Ecuador, los sistemas no tienen redundancia.

Elaboración propia
Procesamiento cartográfico y de SIG, Corporación OSSO, 2009. Proyección: Geográfica, Datum WGS84