PERÚ | Ministerio del Ambiente | Instituto Geofísico del Perú | Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida - SCTS



RE-EVALUACIÓN DEL PELÍGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO PARA EL PERÚ

Hernando Tavera
Isabel Bernal
Cristóbal Condori
Mario Ordaz
Antonio Zevallos
Oscar Ishizawa

Proyecto en Cooperación con el Banco Mundial

Lima - Perú

2014

RE-EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO PARA EL PERÚ

Hernando Tavera
Isabel Bernal
Cristóbal Condori
Mario Ordaz
Antonio Zevallos
Oscar Ishizawa

Proyecto en Cooperación con el Banco Mundial

Lima – Perú

2014

RESUMEN

El Perú es uno de los países más sísmicos de América del Sur e históricamente, ha sido testigo de la ocurrencia de grandes terremotos que han producido pérdidas tanto humanas como materiales. En ingeniería, el peligro sísmico es una de las herramientas más utilizadas para la prevención y reducción de dichas pérdidas. En el presente estudio se revisa el estado del arte de la metodología probabilística a fin de ser aplicada al Perú considerando una base sísmica evaluada y actualizada. Se definen nuevas fuentes sismogénicas (interplaca, intraplaca de profundidades intermedias y corticales) a fin de estimar para cada una de ellas las curvas de recurrencia sísmica, además de sus respectivas leyes de atenuación. Con estos nuevos datos y usando el algoritmo CRISIS (Ordaz et al, 2007), se generan los mapas de aceleración horizontal máxima (PGA) esperada para una cierta probabilidad en un determinado período de vida útil donde no solo influye la fuente interplaca, sino que también las fuentes intraplaca de profundidad intermedia y cortical. Los resultados muestran valores de aceleración mayores a lo largo de toda la costa peruana y que disminuyen conforme se avanza hacia el interior del continente. En zonas con presencia de fallas activas (zona subandina norte), estos valores se incrementan.

ÍNDICE

RESÚMEN

1.- INTRODUCCIÓN
2.- CARACTERÍSTICAS SISMOTECTÓNICAS
3.- SISMICIDAD EN PERÚ
    3.1.- Sismicidad Histórica
    3.2.-Sismicidad Instrumental
4.- HOMOGENIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS
    4.1.- Homogenización
    4.2.- Depuración
5.- FUENTES SISMOGÉNICAS Y PARÁMETROS SISMOLÓGICOS
    5.1.- Recurrencia Sísmica
6.- PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
    6.1.- Leyes de Atenuación
7.- ALGORITMO CRISIS-2007
8.- ISOACELERACIONES EN EL PERÚ
9.- ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME
    CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
    BIBLIOGRAFÍA

ANEXO 1: Curvas de Probabilidad de Excedencia
ANEXO 2: Espectros de peligro uniforme para cada capital de departamento
ANEXO 3: Mapas de aceleraciones para periodos de retorno de 500 años por departamento.

1.- INTRODUCCIÓN

La República del Perú se encuentra ubicada en el borde occidental de América del Sur, región de mayor actividad sísmica en el mundo y por lo tanto, es necesario conocer el comportamiento probable de este peligro en un área determinada a fin de planificar y mitigar los efectos que podrían producirse en el futuro. La manera de conocer este comportamiento, es a través de la evaluación del peligro sísmico.

En el Perú, los estudios del peligro sísmico fueron iniciados por Casaverde y Vargas (1980) haciendo uso de datos de la red sísmica mundial para el periodo 1913-1976, siendo el trabajo realizado por Castillo y Alva (1993) con datos de la red sísmica mundial y de CERESIS para el periodo 1900-1991, el que tuvo mayor aplicación en los estudios de ingeniería y en la Norma de Construcción Sismorresistente aplicable en el Perú (Norma E030). Otros estudios fueron hechos dentro del Proyecto “Pilot Project for regional Earthquakes Monitoring and seismic Hazard Assessment” (Giardini et al, 1999; Dimate et al, 1999), Bolaños y Monroy (2004), Gamarra y Aguilar (2009) y Ocola (2010). Sin embargo, en todos estos trabajos se ha hecho uso de diversas leyes de atenuación de la aceleración provenientes básicamente de EEUU (McGuire, 1974), además de las propuestas por Casaverde y Vargas (1980) utilizando datos de sismos ocurridos y registrados en el Perú.

En general, el uso de diferentes bases de datos y leyes de atenuación, permitieron tener variados valores de aceleración para un mismo punto de interés, siendo necesario superar estas diferencias para el mejor conocimiento del peligro sísmico en el Perú.

En este estudio, el peligro sísmico para el Perú es calculado haciendo uso de datos sísmicos para el periodo 1960 – 2012 proveniente de la unificación de tres catálogos, el primero del Instituto Geofísico del Perú, el segundo de Engdahl y Villaseñor (2002) y el tercero del United States Geological Survey (USGS). El peligro sísmico probabilístico se obtiene siguiendo la metodología propuesta y desarrollada por Esteva (1968), Cornell (1968) y el programa de computo CRISIS-2007, desarrollado y actualizado por Ordaz et al (2007). Para este objetivo se ha considerado las siguientes tareas:

.- Actualizar y homogenizar la base de datos sísmicos, principalmente la magnitud y profundidad de los focos sísmicos,

.- Proponer nuevas fuentes sismogénicas con geometrías de acuerdo a la subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana, a la deformación interna de la placa oceánica a profundidades intermedias y a la deformación cortical a profundidades superficiales,

.- Evaluar las leyes de atenuación utilizadas en los estudios de peligro sísmico,

.- Hacer uso del algoritmo CRISIS-2007

.- Validar los resultados con la elaboración de espectros de respuesta de sismos ocurridos en los últimos 10 años.

Los resultados a obtenerse en este estudio representan un aporte para el desarrollo de la ingeniería y a la Norma de Construcción Sismorresistente aplicable en el Perú (Norma E-030).

2.- CARACTERÍSTICAS SISMOTECTÓNICAS

Las características de los principales elementos estructurales que intervienen en el proceso de deformación regional y local en el Perú son descritos a continuación (Figura 1).

Proceso de Subducción: Presente en el borde occidental de Perú y es originado por la convergencia de las placas de Nazca (oceánica) y Sudamericana (continental). Las características de este proceso ha sido ampliamente descrito por Cahill y Isacks (1992), Tavera y Buforn (2001), Bernal y Tavera (2003). En el Perú se distingue dos modos de subducción, subhorizontal en las regiones norte y centro, y normal en la región sur. En la actualidad, estudios de GPS han permitido conocer que el proceso de subducción se realiza con velocidades del orden de 7 a 9 cm/año (DeMets et al, 1994, Norabuena et al, 1999).

Placa de Nazca: Su geometría es heterogénea, subhorizontal en las regiones norte y centro de Perú y normal en la región sur. En superficie, la placa sostiene a las Dorsales de Nazca, Sarmiento y Alvarado, y de las fracturas de Mendaña, Nazca y Virú; además de la depresión de Trujillo y la fosa peruano-chilena. Esta heterogeneidad aporta al comportamiento geodinámico presente en Perú.

Dorsal de Nazca: Estructura montañosa sumergida en el fondo oceánico y ubicado a la altura de la latitud de 15 ° con una orientación NE-SO. Su eje principal incide perpendicular a la línea de costa a la altura de la ciudad de Nazca. La estructura de la dorsal es asimétrica y está básicamente constituida por rocas volcánicas de hace 5 a 10 Ma.

Dorsales de Sarmiento y Alvarado: Ambas se encuentran frente al departamento de Piura con una orientación NE y longitud aproximada de 400 km con ejes paralelos entre sí. Están compuestas por lava del tipo basalto toleítico a alcalino (Castillo y Lonsdale, 2004).

Fractura de Mendaña: Ubicada en el extremo oeste del Perú, a la altura de la latitud de 11° con orientación NO perpendicular a la fosa. Su origen la asociada a una antigua zona de divergencia de placas (Yamano y Uyeda, 1990).

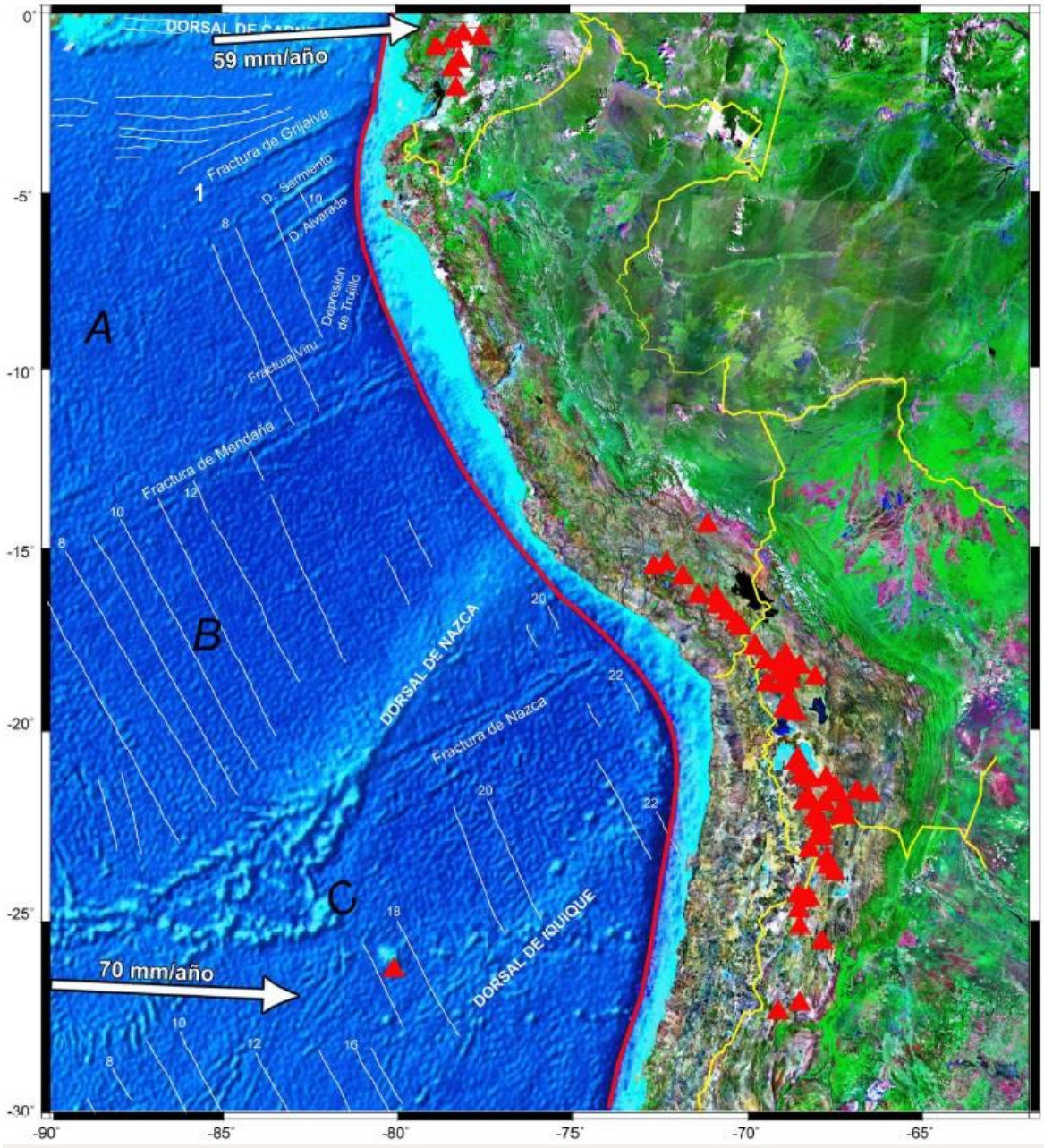


Figura 1.- Geometría de la placa de Nazca (estructuras lineales o rasgos tectónicos) y subducción generalizada de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. La línea roja representa la fosa Perú-Chile. Las flechas blancas indican la dirección del movimiento relativo de las placas y los triángulos rojos, la actividad volcánica activa.

Fractura de Nazca: Ubicada frente al departamento de Arequipa, siendo la característica batimétrica más notable, junto a la fractura de Mendaña. La fractura se alinea en dirección NE-SO incidiendo perpendicular a la fosa con alturas del orden de 700 m sobre la superficie y profundidades de hasta 300 metros (Robinson et al, 2006).

Fractura de Virú: Se encuentra a 100 km al norte de la fractura de Mendaña y corresponde a una falla inversa con orientación N15°E (Krabbenhoft et al 2004).

Depresión de Trujillo: Estructura de aproximadamente 5 km de ancho en su punto más alto y de 500 metros en el más bajo. La depresión presenta una estructura muy accidentada y por ende muy áspera con una extensión de 270 km de longitud.

Fosa peruano-chilena: Rasgo fisiográfico que indica el inicio del proceso de subducción, tiene una longitud de 5000 km desde Colombia hasta Tierra del Fuego en Chile. La fosa sigue una orientación paralela a la costa con profundidades de hasta 6 km y distancias, desde la fosa, entre 80 y 150 km.

Placa Sudamericana: A través del tiempo, el proceso de subducción ha modificado la morfología del Perú permitiendo el engrosamiento de la corteza y el plegamiento de sedimentos para dar origen a la formación de sistemas de fallas geológicas presentes en superficie. La Cordillera de los Andes es el principal resultado de esta deformación, se extiende paralela a la costa, desde Venezuela hasta Chile con anchos que oscilan entre 250 km en la región central hasta 500 km en la región sur de Perú. La configuración estructural de esta placa permite considerar las siguientes unidades: los Taludes inferior, medio y superior; la plataforma continental; la zona costanera; el pie de Monte Pacífico; la Cordillera Occidental, el Altiplano, la Cordillera Oriental, la zona Subandina y la Llanura Amazónica, Las características de estas unidades pueden discutirse en detalle en Macharé et al, (1986).

Zona Sismogénica: En Perú, los sismos de mayor magnitud tienen su origen en la superficie de fricción existente entre las placas de Nazca y Sudamericana produciendo áreas de ruptura que involucran segmentos menores proporcionales a la cantidad de energía liberada. Estas áreas se encuentran a niveles de profundidad variable dependiendo de cada región. En general y según Hyndman et al (1997), Shimamoto et al (1993) y Guardia y Tavera (2011), las zonas sismogénicas pueden ser divididas en tres áreas principales:

- *Límite Asísmico Superior: Da origen a sismos de pequeña magnitud debido a que la fricción entre placas es casi nula por la presencia de sedimentos acarreados provenientes de los prismas de acreción. Esta situación permite la existencia de una zona de subducción estable conocida como zona asísmica, por debajo de la cual se inicia el contacto directo entre placas.*

- *Zona Sismogénica: Superficie sobre la cual se produce el contacto directo entre las placas, encontrándose ambas trabadas a la espera de que los esfuerzos se acumulen al punto de producir deslizamientos bruscos. La actividad sísmica más importante tiene su origen en esta zona.*

- *Limite Asísmico Inferior: Superficie por debajo de la zona sismogénica que se caracteriza por la diminución en el número de sismos. En el Perú, esta zona se encuentra por debajo de las profundidades de 60 a 70 km.*

Tectónica: La sismicidad en Perú tiene su origen en la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana, y en los reajustes producidos en continente a consecuencia de dicho proceso. La unidad de mayor envergadura la constituye la Cordillera de los Andes, presente desde Colombia hasta Chile, paralela a la línea de costa con anchos y alturas variables. Esta unidad alberga a las cadenas volcánicas más importantes del continente. La segunda fuente de origen de sismos la constituyen las fallas geológicas, formadas como efecto secundario de la colisión de placas que producen fracturas y plegamientos en la corteza terrestre. En Perú, los principales sistemas de fallas se encuentran en el Altiplano, zona Subandina, al pie de nevados, cordilleras y entre los límites de la Cordillera Occidental y zona costanera, ver Tabla 1.

Tabla 1. Principales Sistemas de Fallas activas en Perú (Macharé et al, 2003).

Código	Nombre	Tipo	Fecha último movimiento sísmico
PE-01	F. Amopate	Inversa	<1.6 Ma
PE-03	F. Shitari	Inversa	Histórico
PE-04	F. Chalquibamba	Normal	Histórico(1937)
PE-05	F. Shonita	Normal	Histórico (1937)
PE-07	F. C. Blanca	Normal	Histórico
PE-08	F. Quiches	Normal	Histórico (19469
PE-11	F. Cayesh	Normal	<1.6 Ma
PE-12	F. Huaytapallana	Inversa	Histórico (1969)
PE-13	F. Cusco	Normal	Histórico (1986)
PE-14	F. Acongate	Normal	<15 Ma
PE-15	F. Vilcanota	Normal	<1.6 Ma
PE-19	F. Marcona	Normal	<1.6 Ma
PE-26	F. Solarpampa	Normal	Histórico (1998)
PE-28	F. Pampacolca	Normal	<1.6 Ma
PE-42	F. Chololo	Inversa-Sinestral	<15 Ma
PE-51	F. Sama-Calientes	Inversa	Histórico (2006)
PE-xx	F. Ichupampa	Normal	
PE-58	Fosa Perú-Chile	Inversa	Histórico (2007)

3.- SISMICIDAD EN PERÚ

La sismicidad en el territorio peruano es debida al proceso de subducción de placas y a la dinámica de cada una de las unidades tectónicas presentes en el interior del continente. En la Figura 2 se presenta el mapa de la actividad sísmicas ocurrida en Perú entre 1960 al 2012 (Mw>4.0). Los sismos han sido diferenciados por su rango de profundidad focal en superficiales (h<60 km), intermedios (61<h<350 km) y profundos (h>351 km).

Los sismos de foco superficial se encuentran distribuidos entre la línea de la fosa peruano-chilena y la costa, desde el departamento de Tumbes hasta Tacna (círculos de color rojo), y definen a la principal fuente sismogénica del país. La deformación cortical es considerada como la segunda fuente sismogénica al dar origen a sismos sobre los bordes de la Cordillera Andina (círculos rojos) y zona subandina, para luego desaparecer completamente sobre la Llanura Amazónica.

Los sismos de foco intermedio o intraplaca se distribuyen en tres sectores bien definidos (círculos verdes), el primero paralelo a la costa por debajo de 8° latitud Sur, el segundo sobre la zona subandina al NE de la región norte y el último, sobre toda la región sur de Perú. Los sismos de foco profundo (círculos azules), se encuentran, en su totalidad, alineados de Sur a Norte, en la frontera Perú con Brasil y en dirección Este-Oeste en la frontera de Perú con Bolivia. El origen de estos eventos aún sigue siendo tema de investigación.

3.1.- Sismicidad Histórica: Considera información sobre los grandes sismos que afectaron al territorio peruano en el pasado y ella es importante porque permite definir el real potencial sísmico de cada región. En Perú la información sobre la sismicidad histórica data del año 1500 y la calidad y veracidad de su información dependerá de la distribución y densidad poblacional en las regiones afectadas por los sismos. Para estos eventos se conoce la fecha de ocurrencia, entonces pueden ser utilizados para evaluar la tasa de recurrencia y la sismicidad de una determinada región. La recopilación de esta información fue hecha por Silgado (1978) y Dorbath et al (1990); siendo mayor para eventos ocurridos frente a la costa peruana con respecto a los que habrían ocurrido en el interior del país (Tabla 2).

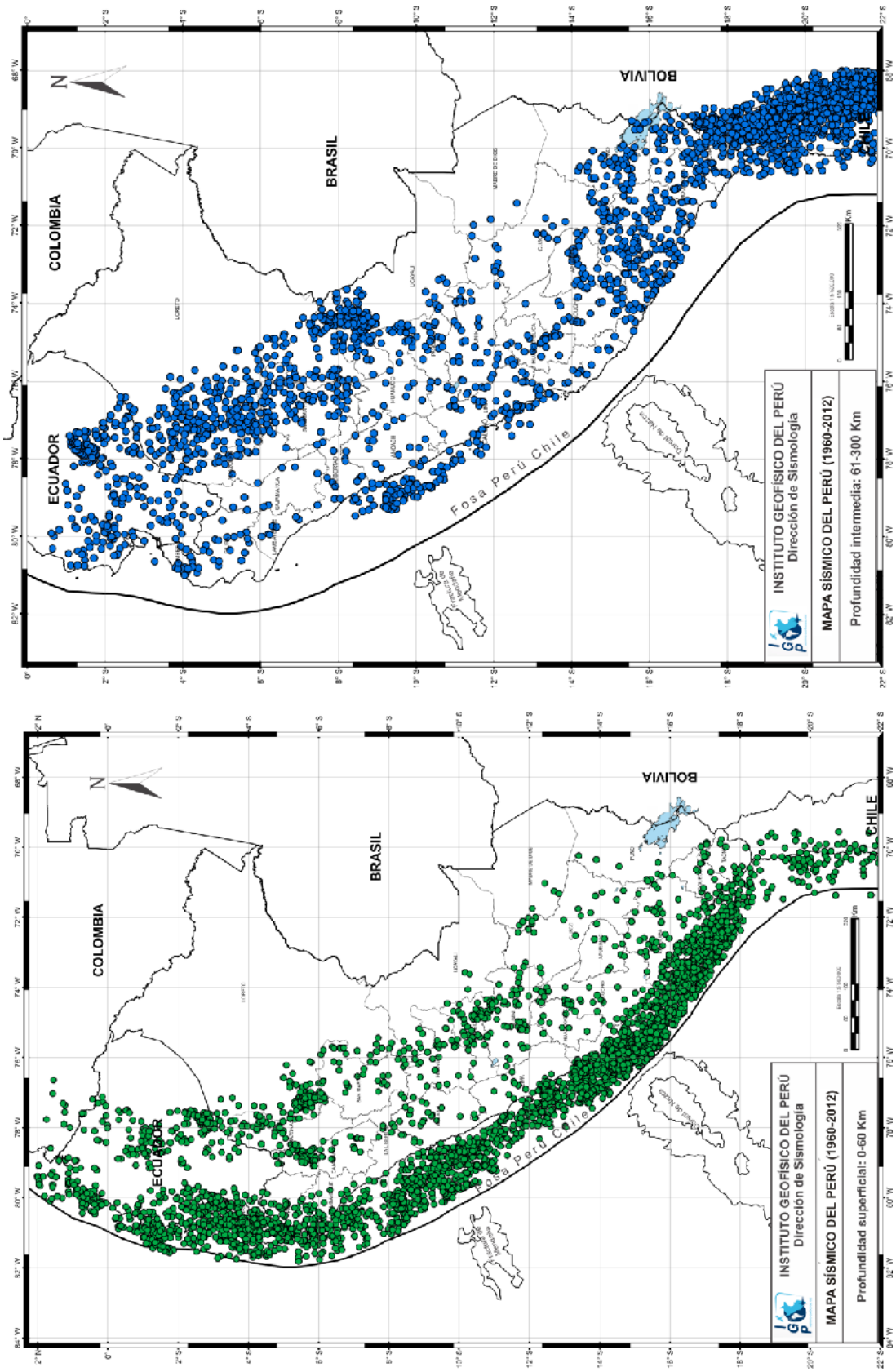


Figura 2.- Mapa de sismicidad para el Perú, periodo 1960 al 2012

Según estos autores, los terremotos de mayor magnitud ocurridos frente a la costa son el de 1586 (primer gran terremoto con documentación histórica), 1687 y 1746 que destruyeron en gran porcentaje a la ciudad de Lima, además de producir tsunamis con olas que posiblemente alcanzaron alturas de 15-20 metros. En la región sur, los terremotos más notables fueron los ocurridos en 1604, 1784 y 1868, siendo este último el mejor documentado y descrito en detalle por Montessus de Ballore (1911) y Vargas (1922). Estos eventos produjeron daños importantes en las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna; además de Arica e Iquique en Chile. El terremoto de 1868 habría generado tsunami con olas 14 metros de altura afectando a los departamentos de Tacna (Perú), Arica e Iquique (Chile).

3.2.- Sismicidad Instrumental: La información instrumental contenida en un catálogo sísmico permite identificar y evaluar las características de las fuentes sismogénicas que caracterizan a una región. Desde inicios del siglo XX, esta información cuantitativa ha sido mejorada en paralelo con la evolución de la sismometría y con el incremento del número de estaciones sísmicas. En general, se considera que a partir del año 1960 se disponía, a nivel mundial y regional de un número aceptable de estaciones sísmicas cuya información permitió reducir los errores en el cálculo de los parámetros que caracterizan a un sismo. En el caso del Perú, la base de datos sísmicos para la década de los años 60 proviene del catálogo de la red sísmica mundial (USGS) y a partir de los años 80, con el incremento de estaciones sísmicas operativas en el país permitiendo que la calidad de la información mejore considerablemente. Para el presente estudio, se considera la siguiente data sísmica:

- *Antes del año 1900: se dispone de datos históricos descriptivos de sismos destructores (Silgado, 1980; Dorbath et al, 1990).*

- *Entre 1900 y 1960: se dispone de datos instrumentales que permitieron estimar de manera aproximada los parámetros sísmicos (USGS, Engdahl y Villaseñor, 2002).*

- *Entre 1960 y 2012: se dispone de datos instrumentales más precisos y por ende, la mejora de la base de datos sísmicos (Engdahl y Villaseñor, 2002; IGP).*

Tabla 2. Parámetros de los principales terremotos históricos que ocurrieron en el Perú entre los años 1513 y 1959.

Fecha (dd-mm-aa)	Latitud	Longitud	Intensidad (MM)	Magnitud
22-01-1582	-16.3	-73.3	X	7.9
09-07-1586	-12.2	-77.7	IX	8.1
24-11-1604	-18.0	-71.5	IX	8.4
14-02-1619	-8.0	-79.2	IX	7.8
31-05-1650	-13.8	-72.0	X	7.2
13-11-1655	-12.0	-77.4	IX	7.4
12-05-1664	-14.0	-76.0	X	7.8
20-10-1687	-13.0	-77.5	IX	8.2
28-10-1746	-11.6	-77.5	X	8.4
13-05-1784	-16.5	-72.0	X	8.0
07-12-1806	-12.0	-78.0	VIII	7.5
10-07-1821	-16.0	-73.0	VIII	7.9
13-08-1868	-18.5	-71.2	X	8.6
09-05-1877	-19.5	-71.0	VIII	7.5
28-07-1913	-17.0	-73.0	IX	7.0
06-08-1913	-17.0	-74.0	X	7.7
24-05-1940	-10.5	-77.6	VIII	8.2
24-08-1942	-15.0	-76.0	IX	8.4
10-11-1946	-8.3	-77.8	X	7.2
01-11-1947	-11.0	-75.0	IX	7.5
21-05-1950	-14.4	-72.1	VII	6.0
12-12-1953	-3.6	-80.5	VIII	7.7

4.- HOMOGENIZACION DE LA BASE DE DATOS

Para evaluar la consistencia de la base de datos sísmicos a utilizarse en este estudio se hizo uso del software ZMAP V6.0 (Wiemer, 2001), llegándose a obtener data estadística y gráfica para los parámetros de tiempo, profundidad y magnitud de los eventos sísmicos. Por ejemplo, en la Figura 3 se muestra la distribución del número acumulado de eventos en función del tiempo para periodos históricos e instrumentales, llegándose a concluir que a partir del año 1960, se incrementa la capacidad de detección, lo cual mejora eficientemente el cálculo de los parámetros hipocentrales de los sismos ocurridos en Perú.

Por otro lado, en la Figura 4a se muestra el histograma de niveles de profundidad para el periodo de datos utilizados en este estudio, lográndose observar que la data es mayor para sismos con foco superficial; mientras que, en la Figura 4b, se observa que el mayor número de eventos presentan magnitudes entre 4.25 y 4.75 Mw, siendo los sismos de mayor magnitud, menor en número. En general, este tipo de análisis permitió calificar a la base de datos utilizada en este estudio.

4.1.- Homogenización

Los eventos sísmicos compilados de los catálogos antes indicados presentan valores de magnitud en escalas mb, Ms y solo para sismos mayores en la escala Mw. Para este estudio los valores de magnitud han sido normalizadas a la escala momento (Mw) y para ello se ha hecho uso de las relaciones propuestas en el proyecto piloto “Seismic Hazard assessment in the Northern Andes” (GSHAP) y las definidas por Scordilis (2006) del ISC:

$$Ms = 1.644\ mb - 3.753 \qquad mb < 5.9$$

$$Ms = 2.763\ mb - 10.301 \qquad mb > 5.9$$

$$Mw = 0.67\ Ms + 2.07 \qquad 3.0 < Ms < 6.1$$

$$Mw = 0.99\ Ms + 0.08 \qquad 6.2 < Ms < 8.2$$

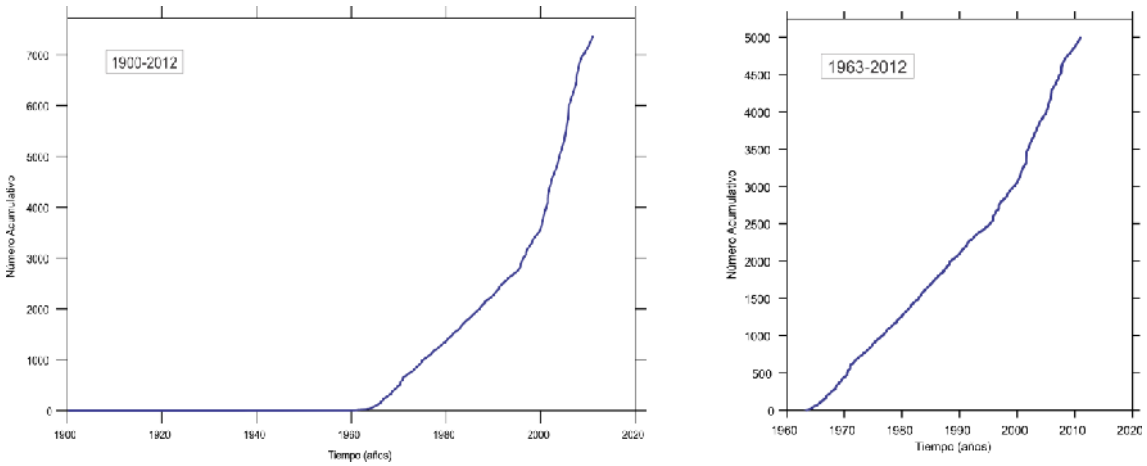


Figura 3.- Distribución temporal de eventos sísmicos considerados en el catálogo sísmico. .a.) Periodo 1586 a 2012; .b.) Periodo 1900 a 2012, y .c.) Periodo 1963 a 2012.

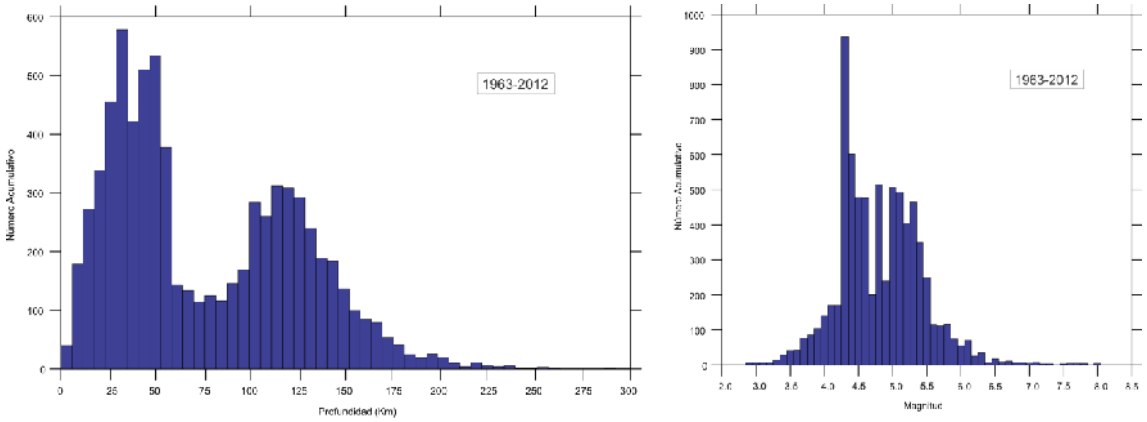


Figura 4.- .a.) Histograma de frecuencia de sismos en función de la profundidad de los focos sísmicos. .b.) Histograma de frecuencia de sismos en función de los rangos de magnitud.

4.2.- Depuración

Para que la frecuencia de los datos contenidos en el catálogo sísmico conserve una distribución de Poisson, fue necesario depurar las réplicas asociadas a eventos de gran magnitud y para ello se ha utilizado las relaciones propuestas por Utsu (1970) y Maeda (1996):

.- Considerando la distancia: $L \leq 10^{(0.5Mm - 1.8)}$

.- Considerando el tiempo: $t \leq 10^{(0.17 + 0.85(Mm - 4.0))/1.3} - 0.3$

.- Considerando la magnitud. $Ma < Mm - 1.0$

Donde, L, t, Mm y Ma indican la distancia epicentral respecto al evento principal, el tiempo en días respecto al momento de ocurrencia del sismo, la magnitud del evento principal y la magnitud de una réplica.

5.- FUENTES SISMOGÉNICAS Y PARÁMETROS SISMOLÓGICOS

La fuente sismogénica es aquella línea, área o volumen geográfico que presenta similitudes geológicas, geofísicas y sísmicas, a tal punto que puede asegurarse que su potencial sísmico es homogéneo en toda la fuente; es decir, que el (los) proceso de generación y recurrencia de sismos es espacial y temporalmente homogéneo. Definir la geometría de la fuente sismogénica es fundamental para la evaluación del peligro sísmico, debido a que proporcionan los principales parámetros físicos que controlan la sismotectónica de la región en estudio.

Para la delimitación de estas fuentes, se ha analizado y evaluado la distribución espacial de la sismicidad asociada al proceso de la subducción (sismos interface), teniendo en cuenta la ubicación geográfica de los grandes sismos y los cambios en el patrón de distribución espacial de la sismicidad de acuerdo a Tavera y Buforn (2001), Bernal y Tavera (2002), Quispe y Tavera (2003), Condori y Tavera (2010), Guardia y Tavera (2013). Para fuentes sismogénicas continentales asociadas a las deformaciones corticales, se ha considerado la distribución espacial de los diversos sistemas de fallas geológicas propuestas por Macharé et al (2003) y Bernal y Tavera (2002). En este caso, a pesar que para algunas zonas la sismicidad se encuentra dispersa, ha sido posible reagruparlas en fuentes sismogénicas de manera adecuada.

En este estudio se propone 33 nuevas fuentes sismogénicas en base a la distribución espacial de la sismicidad asociada al proceso de subducción (interface), a los principales sistemas de fallas (corticales) y a la geometría de la placa de Nazca por debajo del continente (intraplaca). Por ejemplo, a diferencia de estudios anteriores, la sismicidad intraplaca que se agrupa entorno a la ciudad de Pucallpa y que ha dado origen a sismos importantes con magnitudes de 7.2Mw con efectos secundarios en superficie (deslizamientos y licuación de suelos), ha sido considerada de manera independiente como una fuente sismogénica. Las fuentes sismogénicas se distribuyen de la siguiente manera: F-1 a F-8 para la sismicidad interface (Figura 5), F-9 a F-19 para la sismicidad asociada a la deformación cortical (Figura 5) y F-20 a F-33 para la sismicidad intraplaca (Figura 6). Las coordenadas de las fuentes sismogénicas se presentan en la Tabla 3.

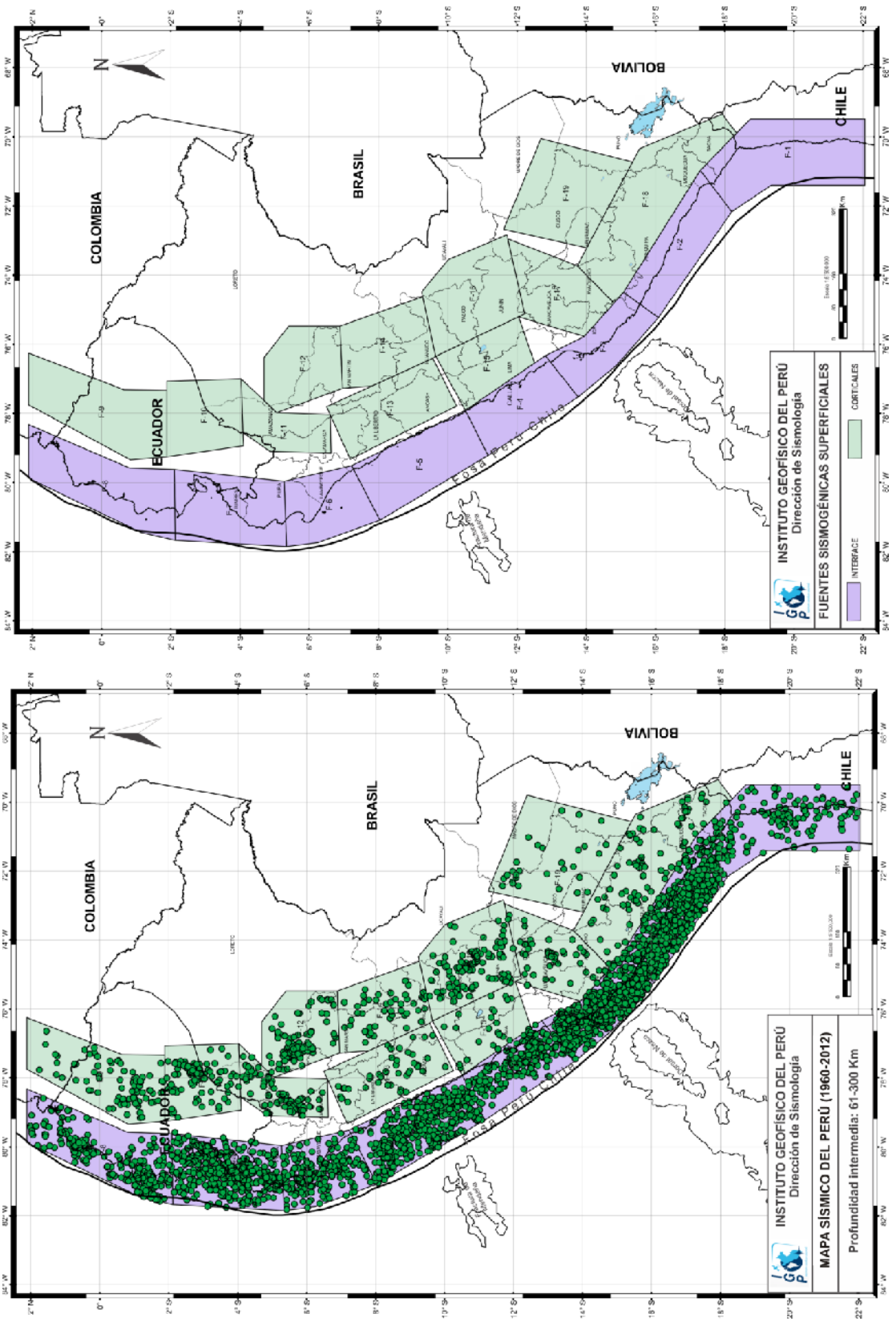


Figura 5.- Sismicidad de foco superficial y distribución y geometría de las fuentes de subducción y corticales.

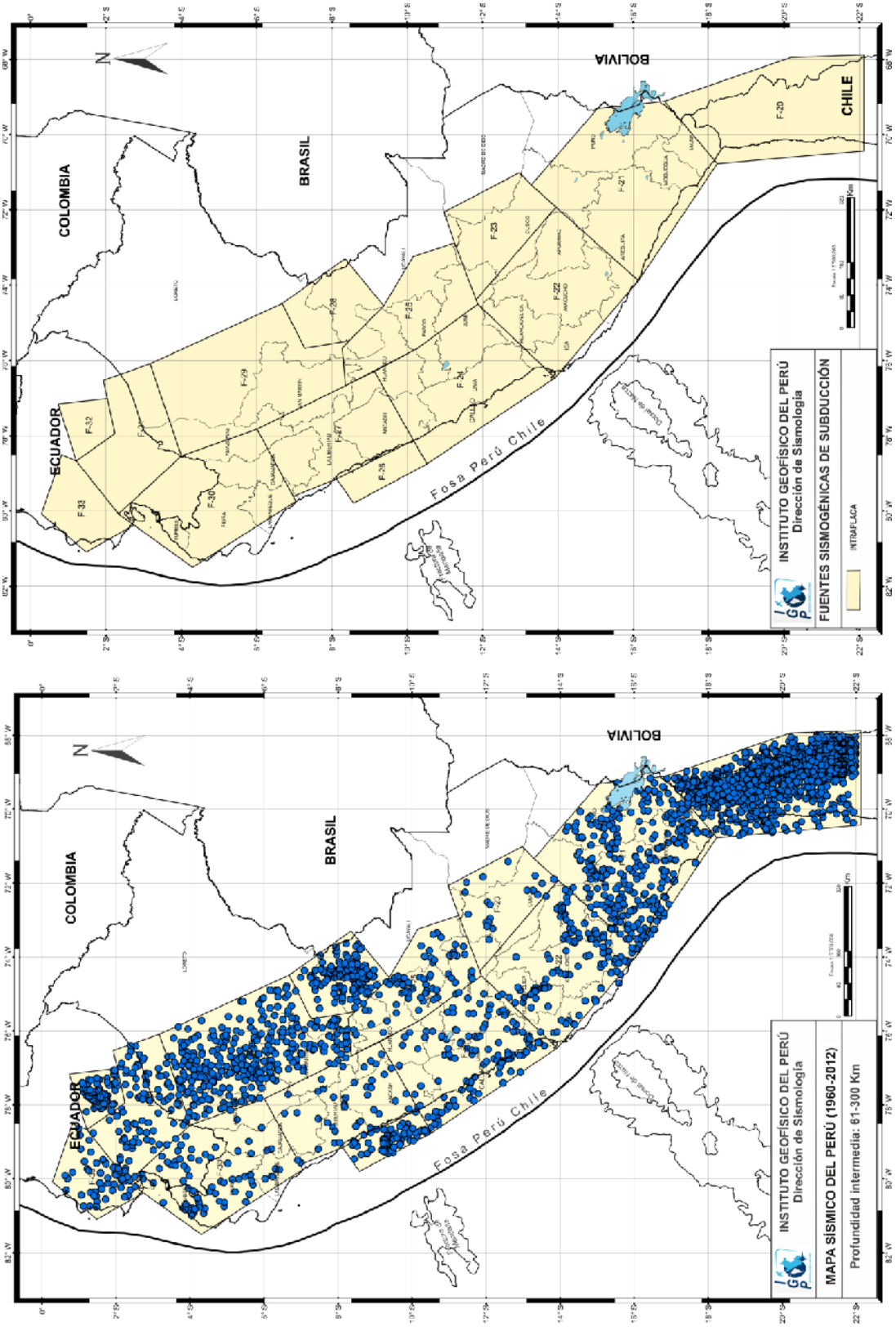


Figura 6.- Sismicidad de foco intermedio y distribución y geometría de las fuentes intraplaca

Tabla 3: Coordenadas geográficas de las fuentes de subducción (Interface)

FUENTES	COORDENAS GEOGRAFICAS		
	Longitud	Latitud	Profundidad (Km)
F-1	-71.41	-19.345	30
	-71.411	-22.049	30
	-69.498	-22.049	75
	-69.497	-18.743	75
	-70.983	-17.299	75
	-72.171	-18.202	30
F-2	-72.171	-18.202	30
	-70.983	-17.299	75
	-74.502	-15.081	75
	-75.236	-16.088	30
F-3	-76.609	-14.878	30
	-75.236	-16.088	30
	-74.502	-15.081	75
	-75.779	-13.943	75
	-76.334	-12.818	75
	-77.526	-13.767	30
F-4	-77.526	-13.767	30
	-76.334	-12.818	60
	-77.915	-10.509	60
	-79.214	-11.167	30
F-5	-79.214	-11.167	30
	-77.915	-10.509	60
	-79.509	-7.226	60
	-81.085	-8.035	30
F-6	-81.736	-6.249	30
	-81.085	-8.035	30
	-79.509	-7.226	60
	-79.961	-5.274	60
	-81.844	-5.343	30
F-7	-81.844	-5.343	30
	-79.961	-5.274	60
	-79.618	-2.098	60
	-81.671	-2.121	30
F-8	-81.442	-1.142	25
	-81.671	-2.121	25
	-79.618	-2.098	60
	-79.573	-0.806	60
	-78.325	2.111	60
	-79.873	2.111	25

Tabla 3: /// Continuación. Coordenadas geográficas de las fuentes corticales

FUENTES	COORDENAS GEOGRAFICAS		
	Longitud	Latitud	Profundidad (Km)
F-9	-79.341	-0.829	30
	-79.258	-1.884	30
	-77.334	-1.884	30
	-77.317	-0.646	30
	-76.257	2.111	30
	-77.752	2.111	30
F-10	-78.935	-4.101	30
	-78.554	-4.085	30
	-77.001	-4.032	30
	-77.072	-1.884	30
	-77.334	-1.884	30
	-79.258	-1.884	30
F-11	-79.095	-4.867	30
	-79.145	-6.625	30
	-78.038	-6.605	30
	-77.982	-5.058	30
	-77.628	-4.693	30
	-77.001	-4.032	30
	-78.554	-4.085	30
F-12	-77.982	-5.058	30
	-77.278	-6.96	30
	-75.476	-6.889	30
	-75.479	-5.407	30
	-76.383	-4.693	30
	-77.628	-4.693	30
F-13	-77.787	-10.26	30
	-76.41	-9.571	30
	-77.207	-7.813	30
	-77.805	-6.499	30
	-78.038	-6.605	30
	-79.327	-7.181	30
F-14	-77.207	-7.813	30
	-76.41	-9.571	30
	-76.346	-9.655	30
	-74.627	-9.275	30
	-75.476	-6.889	30
	-77.278	-6.96	30
F-15	-76.549	-12.512	30
	-75.205	-12.049	30
	-76.346	-9.655	30
	-77.915	-10.509	30
F-16	-75.205	-12.049	30
	-75.126	-12.226	30
	-72.954	-11.734	30
	-72.841	-11.707	30
	-73.562	-10.009	30
	-74.482	-9.247	30
	-74.627	-9.275	30

	-76.346	-9.655	30
F-17	-75.779	-13.943	30
	-74.812	-14.802	30
	-73.733	-13.741	30
	-72.954	-11.734	30
	-75.126	-12.226	30
	-75.205	-12.049	30
F-18	-74.502	-15.081	30
	-70.983	-17.299	30
	-69.904	-18.347	30
	-69.497	-18.036	30
	-69.354	-17.937	30
	-70.352	-15.541	30
	-70.575	-15.422	30
	-73.194	-14.027	30
	-73.733	-13.741	30
	-74.812	-14.802	30
F-19	-70.575	-15.422	30
	-69.801	-12.399	30
	-72.582	-11.26	30
	-73.194	-14.027	30

Tabla 3.- /// Continuación. Coordenadas geográficas de las fuentes de subducción – Intraplaca

FUENTES	COORDENAS GEOGRAFICAS		
	Longitud	Latitud	Profundidad (Km)
F-20	-70.436	-22.128	85
	-67.88	-22.128	200
	-67.951	-20.193	200
	-69.114	-16.825	200
	-70.771	-18.23	85
F-21	-70.771	-18.23	85
	-69.114	-16.825	200
	-69.31	-15.051	200
	-71.342	-13.296	200
	-71.926	-13.951	200
	-73.879	-16.142	85
F-22	-73.879	-16.142	95
	-71.926	-13.951	120
	-74.423	-11.798	120
	-74.502	-11.872	120
	-76.46	-13.924	80
F-23	-71.926	-13.951	120
	-71.342	-13.296	150
	-71.009	-12.98	150
	-72.064	-10.979	150
	-72.876	-11.261	150
	-74.423	-11.798	120
F-24	-76.46	-13.924	90
	-74.502	-11.872	120
	-75.688	-10.259	120
	-76.295	-9.127	120
	-78.118	-10.165	120
	-78.75	-10.525	80
F-25	-75.688	-10.259	120
	-74.502	-11.872	120
	-72.876	-11.261	140
	-73.243	-10.157	140
	-74.548	-9.38	140
	-75.482	-8.455	140
	-75.666	-8.275	140
	-76.674	-8.355	120
F-26	-78.75	-10.525	80
	-78.118	-10.165	100
	-79.147	-8.121	100
	-79.794	-8.578	80
F-27	-79.147	-8.121	100
	-78.118	-10.165	100
	-76.295	-9.127	120
	-76.674	-8.355	120
	-77.827	-6.009	120
	-79.613	-6.977	100
F-28	-74.548	-9.38	150

	-73.299	-8.35	180
	-74.486	-6.677	180
	-75.68	-7.275	180
	-75.482	-8.455	150
F-29	-77.827	-6.009	120
	-76.674	-8.355	120
	-75.666	-8.275	150
	-75.482	-8.455	150
	-75.68	-7.275	150
	-74.486	-6.677	150
	-76.091	-3.168	150
	-78.538	-4.004	120
F-30	-79.747	-7.047	80
	-79.613	-6.977	100
	-77.827	-6.009	120
	-78.538	-4.004	120
	-80.081	-2.332	120
	-80.375	-2.741	120
	-81.496	-4.303	80
F-31	-78.538	-4.004	120
	-76.091	-3.168	150
	-76.531	-1.928	150
	-77.011	-2.034	150
	-77.941	-2.242	150
	-78.67	-1.212	150
	-80.081	-2.332	120
F-32	-77.941	-2.242	150
	-77.011	-2.034	150
	-77.157	-0.734	150
	-78.67	-1.212	150
F-33	-80.375	-2.741	80
	-80.081	-2.332	120
	-78.67	-1.212	120
	-78.509	-0.823	120
	-80.077	-0.286	120
	-81.089	-1.48	80

5.1.- Recurrencia Sísmica

La recurrencia sísmica en una fuente, Log N = ***a*** – ***b***M, cuantifica al número de eventos mayores o iguales a una determina magnitud, definida por la pendiente (b) de la curva (Gutemberg y Richter, 1956). La relación permite conocer la tasa media anual de actividad sísmica (λ_o) y la magnitud mínima y máxima (M_o, M_{max}). Considerando estas constantes, la relación de recurrencia sísmica puede ser expresada como sigue:

$$N = \Gamma'_o \, e^{-\beta M}$$

.donde, $\Gamma'_o = 10^a$, número de sismos x unidad de tiempo con M>0

$\beta = b. \, Ln \, 10$

Para las curvas de recurrencia sísmica, la base de datos para sismos históricos de magnitud menor, ha sido completada considerado el promedio estadístico anual de la sismicidad instrumental (Reiter, 1990; Kramer, 1996). Este procedimiento permite incorporar la información histórica a un catálogo limitado y no ampliar el periodo de completitud del catálogo.

Para el control del parámetro magnitud, la magnitud mínima corresponde a la mayor magnitud registrada; mientras que, el valor medio y el extremo mayor corresponden a valores mayores propuestos en base a publicaciones sobre zonas acoplamiento sísmico y probabilidad de ocurrencia de grandes sismos en el borde occidental de Peru (Chlieh et al 2011; Pulido et al 2012; Condori y Tavera, 2012; Flores y Tavera, 2012). En relación a la magnitud de sismos históricos, se consideró el aporte de Dorbath et al (1990). Para definir los niveles mínimo y máximo de profundidad de cada fuente, fue necesario evaluar la distribución de la sismicidad en profundidad de acuerdo al criterio establecido por Cahill e Isacks (1990), Tavera y Bufron (2001), Condori y Tavera (2012); Guardia y Tavera, (2012). En la Tabla 4 se presenta los parámetros de recurrencia estimados para cada fuente sismogénica y en la Figura 7 un ejemplo del cálculo para las curvas de recurrencia sísmica.

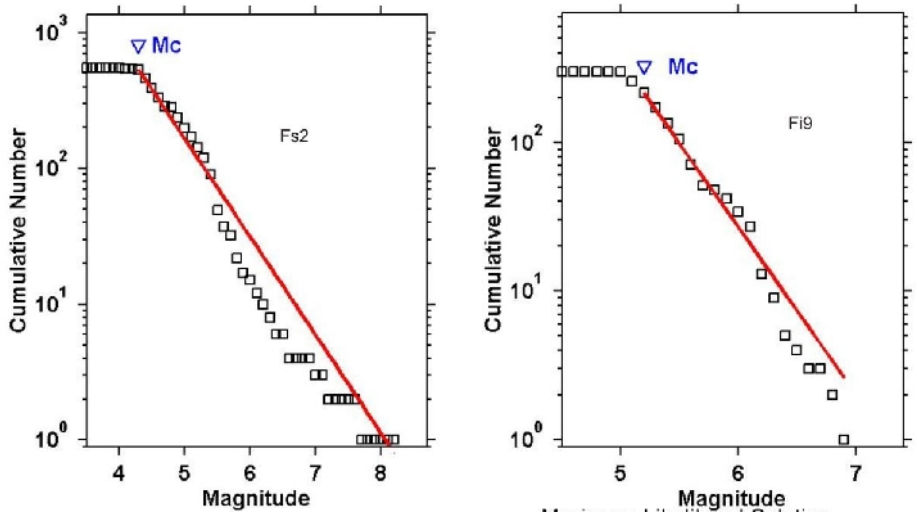


Figura 7.- Gráficos de recurrencia sísmica para fuentes superficiales e intermedios

Tabla 4. Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas definidas en el presente estudio

FUENTES	Mw			
	Mmin	Mmax	β	Tasa
F-1	5.2	8.8	1.84	2.03
F-2	4.3	8.2	1.66	11.54
F-3	4.3	8	1.78	12.83
F-4	4.3	8.6	1.69	4.24
F-5	4.3	7.7	1.60	9.09
F-6	4.3	7	2.07	4.48
F-7	4.3	7	2.35	9.16
F-8	4.3	8	1.48	4.20
F-9	4.8	6.8	1.70	1.08
F-10	5.2	6.8	2.49	0.78
F-11	4.3	5.8	2.86	1.72
F-12	5.2	6.5	2.81	1.74
F-13	4.3	7.2	1.94	0.84
F-14	4.8	5.5	2.35	0.76
F-15	4.4	5.5	4.74	0.36
F-16	5.2	5.5	2.74	1.60
F-17	5.2	5.5	4.01	0.44
F-18	4.8	5.5	2.83	1.48
F-19	5	6	2.29	0.30
F-20	4.4	7	1.88	22.14
F-21	5.2	6.8	2.60	4.32
F-22	5.1	6	2.00	2.02
F-23	4.6	6	0.95	0.18
F-24	5.2	6.8	2.37	1.06
F-25	5	6	2.79	1.38
F-26	5.3	6	3.38	0.74
F-27	4.3	6	2.06	0.86
F-28	5.1	7	2.67	3.00
F-29	4.3	7.2	1.69	6.78
F-30	5.1	7.5	3.41	1.32
F-31	5.3	7	2.62	1.14
F-32	4.3	6	2.25	0.96
F-33	4.8	6	1.94	1.60

6.- PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO

En términos de probabilidad, el Peligro Sísmico puede ser evaluado con el método propuesto por Esteva (1968), Cornell (1968) y Cornell & Van Marcke (1969). La teoría indica que el peligro sísmico corresponde a la probabilidad de que ocurra un sismo de determinada magnitud que genere, en un punto específico, una aceleración igual o mayor a un valor dado para un periodo de tiempo determinado. Considerando que la ocurrencia de sismos obedece a una distribución de Poisson, debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- *El número de eventos que ocurren en un intervalo de tiempo es independiente de los que ocurren en otro,*

- *La probabilidad de ocurrencia durante un periodo de tiempo muy corto es proporcional a la longitud del intervalo de tiempo,*

- *La probabilidad de que ocurra más de un evento sísmico durante un intervalo de tiempo muy corto es insignificante*

Por otro lado, la intensidad (I) de un sismo en un lugar determinado, es considerado como dependiente del tamaño del sismo (magnitud y/o intensidad) y de la distancia al lugar de interés. El tamaño del sismo (s) y su ubicación (r) son considerados como variables aleatorias continuas y definidas por sus funciones de densidad de probabilidad, fs(s) y fr(r), entonces el peligro sísmico definido por la probabilidad que la intensidad I sea igual o mayor que un intensidad dada, será P(I≥i) y está definida por (Esteva, 1968):

$$P(I \geq i) = \iint P\left[\left[\frac{I}{s,r}\right]\right] fs(s).fr(r) ds\, dr$$

6.2.- Leyes de Atenuación

En Perú, se han utilizado diversas leyes de atenuación y en su mayoría provenientes de otros entornos Sismotectónicos, como por ejemplo las propuestas por Casaverde y Vargas (1980), Huaco (1979), Ruiz (1999), Chavez (2009) en el caso de

leyes elaboradas con sismos ocurridos en Perú y las de McGuire (1974), Boore y Joyner (1993), Campbell (1981), Crouse et al (1987), Joyner y Boore (1988), Ordaz (1992), Idriss (1993), Sadigh et al (1993), Dahle et al (1995), Atkinson y Boore (1997), Zhao et al (1997), Sadigh et al (1997), Schmidt et al (1997), Youngs et al (1997), Abrahamson y Silva (2007) y Arroyo et al (2010) para el caso de leyes propuestas para otros países. Las leyes peruanas han sido construidas utilizando datos provenientes de estaciones acelerométricas que operaron en la ciudad de Lima y que registraron los sismos de gran magnitud ocurridos entre los años 1940 y 1974, únicamente Chavez (2010) hace uso de un mayor número de datos provenientes de registros de sismos de magnitud modera registrados en un mayor número de estaciones acelerométricas. Del resto de leyes, solo la propuesta por Young et al (1997) hace uso de datos de 11 sismos de subducción ocurridos en Perú y de otros 154 datos provenientes de las diversas zonas de subducción existentes en el mundo.

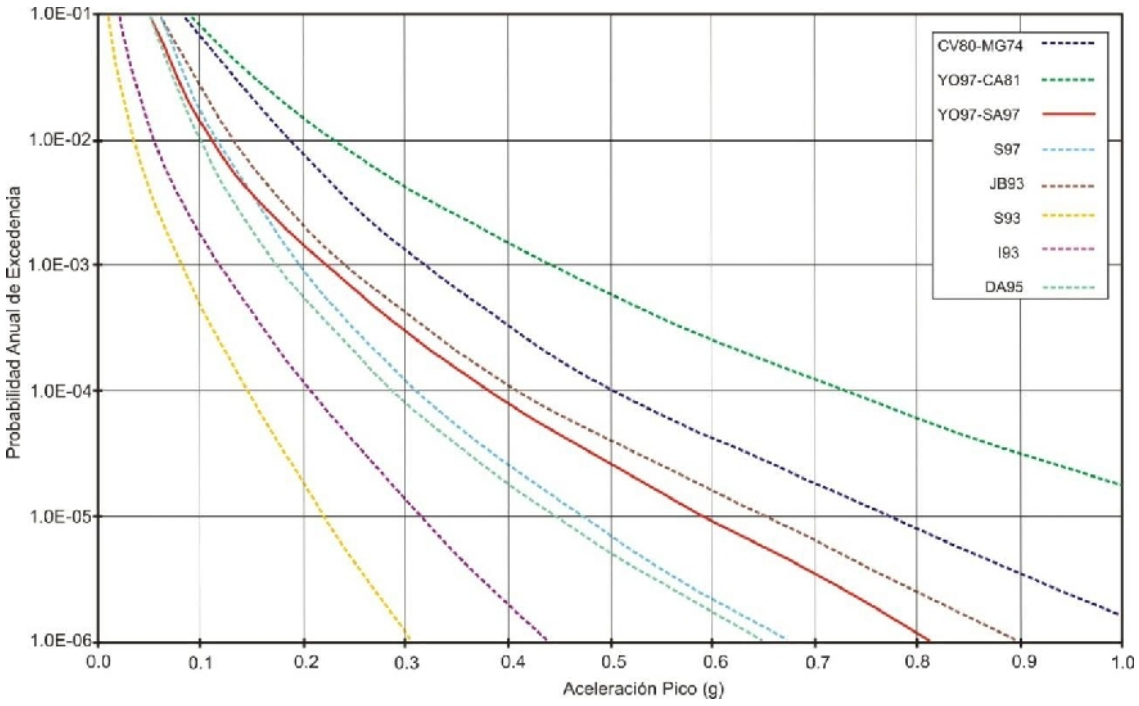


Figura 8.- Comparación y correlación entre los valores de aceleración estimados para diferentes periodos de retorno para el punto -15° y -71° (Alva, 2011).
CV80-MG74, Casaverde y Vargas (1980), McGuire (1974). YO97-CA81, Young et al (1980), Campbell (1981); YO97-SA97: Young et al (1997), Sadigh et al (1997); S97, Schmidt et al (1997); JB93, Boore et al (1993); S93, Sadigh et al (1993); I93, Idriss (1993); DA95, Dahle et al (1995).

La evaluación de estas leyes de atenuación fue realizada por Alva (2005), Alva (2011) y Aguilar (2011), y los resultados obtenidos para el punto -15°S y 71°O son mostrados en la Figura 8 y Tabla 5. El autor remarca las notables diferencias

existentes para un mismo periodo de tiempo, sobre todo cuando se trata de periodos de retorno mayores a los 100 años. Según estos resultados, con las leyes de atenuación de Young et al (1997) y Sadigh et al (1997) se obtienen valores promedios para el total de leyes de atenuación evaluadas; por lo tanto, en este estudio se procede a utilizar ambas leyes.

Tabla 5. Leyes de atenuación y valores de aceleración estimados para el punto -15° y -71° considerando diversos periodos de retorno. Obsérvese las diferencias existentes en los valores de aceleración para los mismos periodos de retorno (Alva, 2005)

LEY DE ATENUACIÓN	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	100	200	500	1000	2000	3000	5000	10000
Idriss, I. M. (1993) I 93	0.05	0.07	0.10	0.13	0.15	0.16	0.19	0.21
Sadigh, K. et al. (1993) S 93	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.11	0.14	0.15
Boore, Joyner y Fumal (1993,4): JB 93	0.23	0.29	0.38	0.46	0.53	0.57	0.66	0.76
Dahle, A. et al (1995) DA 95	0.10	0.13	0.15	0.18	0.20	0.22	0.25	0.29
Schmidt, et al. (1997): S 97	0.13	0.14	0.18	0.20	0.23	0.25	0.28	0.32
Youngs, et al, (1997) y Campbell, K. (1981) YO97 + CA81	0.13	0.16	0.20	0.24	0.29	0.31	0.36	0.41
Casaverde y Vargas(1980) y R.McGuire (1974) CV80+M74	0.19	0.22	0.27	0.32	0.37	0.39	0.44	0.50
Youngs, et al, (1997) y Sadigh,et al. (1997) YO97 + SA 97	0.11	0.14	0.18	0.23	0.27	0.31	0.33	0.38

Ley de Atenuación para aceleraciones espectrales de Young et al (1997): La ley considera relaciones espectrales de respuesta horizontal al 5% de amortiguamiento para sismos de subducción; es decir, interplaca e intraplaca. La data utilizada corresponde a registros de aceleración de sismos ocurridos en Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México, Perú e Islas Salomón. La ley permite que los movimientos máximos se incrementen con la profundidad; es decir, a los sismos de tipo intraplaca les corresponde un 50% más de sacudimiento que los sismos interplaca, ambos con la misma magnitud y distancia. Las ecuaciones que definen la ley de Young et al (1997) fueron dadas para roca y suelo:

.- Ley de Atenuación para roca:

$$Ln(y)=0.2418+1.414M+C_1+C_2(10-M)^3+C_3Ln(r_{up}+1.7818e^{0.554M})+ 0.00607H+0.3846Z_T$$

.- Ley de Atenuación para suelo:

$$Ln(y)=-0.6687+1.438M+C_1+C_2(10-M)^3+C_3Ln(R+1.097e^{0.617M})+ 0.00648H+0.3643Z_T$$

La Desviación estándar = C4+C5M (para Mw>8.0, se considera el de Mw=8.0)

.donde, **y** es la aceleración espectral (g), M la magnitud momento (Mw), r_{rup} la distancia al área de ruptura (km), H la profundidad (H) y Z_T el tipo de fuente (0 para interplaca, 1 para intraplaca).

Ley de Atenuación para aceleraciones espectrales de Sadigh et al (1997): La ley considera relaciones espectrales de respuesta horizontal al 5% de amortiguamiento para sismos corticales. La data utilizada corresponde a registros de aceleración de sismos ocurridos en California (EEUU), Gazli (Rusia, 1976), Tabas (Irán 1978), URRS e Irán. Las leyes de atenuación obtenidas son para roca y depósitos de suelos firmes profundos.

.- Ley de Atenuación para roca:

$$Ln(y) = C_1+C_2M+C_3(8.5-M)^{2.5}+C_4Ln(r_{rup}+\exp(C_5+C_6M))+C_7Ln(r_{rup}+2)$$

.- Ley de Atenuación para depósitos de suelos firmes profundos:

$$Ln(y) = C_1+C_2M-C_3Ln(r_{rup}+C_4\, e^{C_5 M})+C_6+C_7(8.5-M)^{2.5}$$

.donde, **y** es la aceleración espectral (g), M la magnitud momento (Mw) y r_{rup} la distancia más cercana al área de ruptura (km).

7.- ALGORITMO CRISIS-2007

El peligro sísmico en Perú es calculado considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sismogénicas, la distancia entre cada fuente y los puntos de interés que se van a evaluar, y para ello se hace uso del algoritmo de computo CRISIS-2007 desarrollado y actualizado por Ordaz et al (2007). Las características del algoritmo e información a utilizarse se describen a continuación:

.- *Algoritmo CRISIS*: Hace uso del método probabilístico para calcular el peligro sísmico conociendo la geometría y parámetros de cada fuente sísmica, y las leyes de atenuación. El peligro sísmico se calcula para varios puntos de una malla definida de acuerdo al área de estudio. CRISIS estima el tamaño de los futuros movimientos sísmicos.

.- ***Fuentes Sismogénicas*:** Definen áreas de geometrías determinadas que pueden presentar diversas inclinaciones para una mejor definición de la sismicidad que caracterizan a una región.

.- ***Parámetros Sísmicos*:** Consideran a los valores físicos que caracterizan a una fuente sismogénica, todos definidos a partir de la curva de recurrencia sísmica de cada fuente sismogénica (Gutemberg y Richter, 1956) de acuerdo al proceso de Poisson.

.- *Ley de Atenuación*: Se requiere construir y/o disponer de una o varias leyes de atenuación de la aceleración en función de la distancia. Esta será utilizada para calcular las aceleraciones probabilísticas para diversos periodos de retorno. Las leyes de atenuación pueden ser construidas considerando espectros de respuesta.

.- *Grillado*: El cálculo de la aceleración probabilística es para cada nodo de un grillado construido sobre el área de estudio. La densidad de la grilla dependerá de los objetivos del estudio, a mayor grillado, mayor tiempo de cálculo.

.- *Aceleraciones*: La intensidad del sacudimiento del suelo se calcula en términos de aceleración con un espectro de respuesta para el 5% del amortiguamiento crítico.

CRISIS-2007 cuenta con entorno gráfico, que con ayuda de ventanas de dialogo, facilita el procesamiento de los datos y el cálculo del peligro sísmico. Como resultados, CRISIS-2007 proporciona los siguientes archivos en formato ASCII:

*.- Archivo *.res: contiene la información de los datos utilizados para el cálculo del peligro sísmico.*

*.- Archivo *.gra: contiene las tasas de excedencia totales de las aceleraciones para punto y para cada periodo estructural.*

*.- Archivo *.map: contiene las aceleraciones para periodos de retorno fijos para cada sitio y cada periodo estructural.*

*.- archivo *.fue: contiene las tasas de excedencia de las aceleraciones debidas a cada fuente sísmica, punto y periodo estructural.*

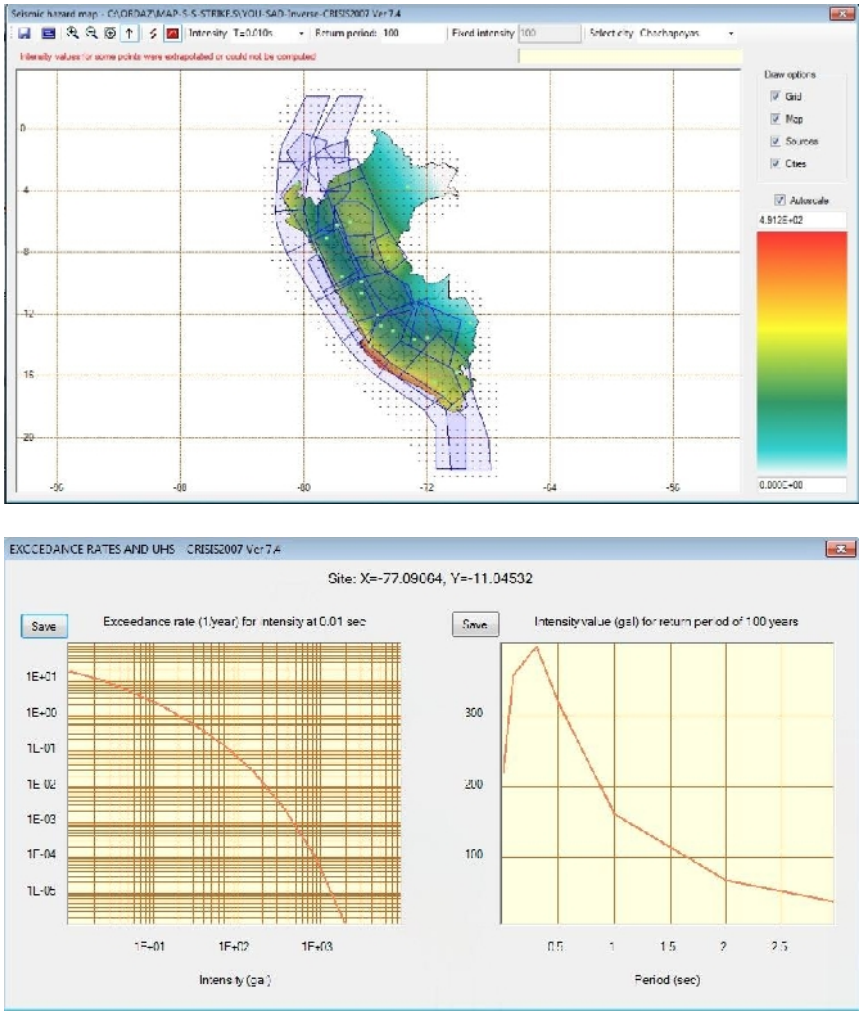


Figura 9.- Pantalla de CRISIS-2007 que muestra el mapa de peligro sísmico para el Perú; además de la curva de la tasa de excedencia y espectro uniforme para un punto cualquiera

Para el Perú, CRISIS-2007 ha permitido obtener mapas de peligro sísmico que muestran las aceleraciones esperadas para diferentes periodos de retorno y periodos estructurales, así como distintos espectros de peligro uniforme, tal como se muestra en la Figura 9. Los valores de aceleración estimados para cada capital de departamento de Perú (referencia, Plaza de Armas) se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de máximas aceleraciones esperadas (PGA) para las capitales de departamento de Perú

Ciudad	Coordenadas Geograficas		Aceleraciones Maximas PGA (gals) por periodo de retorno en años Tr			
	Latitud	Longitud	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 475	Tr = 975
Tumbes	-3.56	-80.45	181.72	228.43	409.05	494.84
Piura	-5.2	-80.63	181.32	228.89	412.19	499.87
Chiclayo	-6.77	-79.84	166.02	201.69	366.46	437.97
Trujillo	-8.11	-79.03	181.79	230.20	413.56	498.62
Huaraz	-9.53	-77.53	102.48	158.22	253.80	312.68
Lima	-12.05	-77.05	188.66	246.28	444.23	541.15
Ica	-14.07	-75.73	206.92	279.28	473.32	569.62
Arequipa	-16.4	-71.54	175.97	218.77	382.99	452.52
Moquegua	-16.93	-70.98	188.69	238.96	426.17	499.97
Tacna	-17.99	-70.24	198.93	260.60	445.10	543.08
Cajamarca	-7.17	-78.52	88.29	120.23	214.97	265.05
Chachapoyas	-6.21	-77.85	101.34	155.27	249.55	314.96
Moyobamba	-6.05	-76.97	160.98	192.42	321.88	399.27
Huanuco	-9.93	-76.24	94.63	135.73	228.31	283.42
C. Pasco	-10.43	-75.15	97.65	145.38	242.28	305.37
Huancayo	-12.07	-75.23	100.84	153.50	244.94	306.88
Huancavelica	-12.76	-74.98	108.30	164.01	255.14	318.98
Ayacucho	-13.16	-74.22	99.17	149.89	235.34	292.69
Abancay	-13.63	-72.88	92.59	129.96	222.82	271.12
Puno	-15.83	-70.03	109.45	164.54	250.60	309.96
Cusco	-13.52	-71.98	84.89	111.43	196.00	238.01
P. Maldonado	-12.61	-69.18	33.11	41.72	75.39	91.40
Pucallpa	-8.38	-74.54	136.61	180.17	285.73	360.72
Iquitos	-3.75	-73.25	25.37	34.18	57.95	74.68

***.- Frecuencia Anual de Excedencia*:** Las curvas de peligro sísmico son obtenidas de la evaluación de la frecuencia anual de excedencia para diferentes niveles de aceleración (PGA), siendo combinada con la curva de Poisson para estimar la probabilidad de excedencia anual en intervalos de tiempo finitos (Kramer, 1996; Gamarra, 2009).

La probabilidad de excedencia de una determinada aceleración “y” para un periodo de tiempo “T” puede ser definido como:

$$P[Y_T > y] = 1 - e^{-\lambda y T}$$

.donde λy es la frecuencia anual de excedencia

En el Anexo 1 se presenta la frecuencia anual de excedencia correspondiente a los puntos indicados en la Tabla 6.

8.- ISOACELERACIONES EN EL PERÚ

El mapa de peligro sísmico o iso-aceleraciones para el Perú corresponde a las máximas horizontales del suelo o PGA obtenidos utilizando los parámetros definidos en anteriores capítulos, una malla de nodos espaciados cada 0.1° y el algoritmo CRISIS-2007 (Ordaz et al, 2007). Los valores de PGA para periodos de 50 y 100 años con un 10% de probabilidad de excedencia se muestran en la Figura 10. En general, las curvas de iso-aceleraciones siguen las mismas tendencias observadas en estudios realizados por Castillo y Alva (1993) y Gamarra y Aguilar (2009), siendo sus características más resaltantes las siguientes:

.- Las curvas de iso-aceleraciones máximas se distribuyen paralelas a la línea de costa coincidiendo con la dirección en la cual se produce el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana.

.- Los valores de aceleración disminuyen paulatinamente conforme se tiende hacia el interior del país.

.-Los valores de aceleración, próximos a la línea de costa, son menores en la región norte para ir incrementándose hacia la región sur, coherente con las zonas de mayor ocurrencia de sismos, tanto en frecuencia como de los grandes sismos ocurridos en el pasado. Por ejemplo, los altos valores observados en Ica y Arequipa tienen relación con los sismos ocurridos en los años 1942 (8.0Mw), 1996 (7.7Mw), 2001 (8.0Mw) y 2007 (8.0Mw).

.- En la región nor-oriental, las curvas de iso-aceleraciones se concentran en la región del Alto Mayo (departamento de San Martin) y es debido a la presencia del sistema de fallas Rioja-Moyobamba y que dieron origen a los sismos de 1990 (6.2Mw) y 1991 (6.5Mw).

.- Las curvas de iso-acleraciones se concentran en el extremo norte del departamento de Ucayali y corresponden al nido de sismicidad intermedia que se produce por debajo de la ciudad de Pucallpa a niveles de 100-150 km de profundidad. Los valores de aceleración están asociados a sismos con

magnitudes de hasta 7.2Mw ocurridos en esta zona, por ejemplo el sismo de Contamaná del 2011 (7.0Mw), (Tavera, 2012).

.- En todo el territorio peruano se observa que los valores de aceleración son menores a lo largo de la Cordillera de los Andes, coincidiendo con el índice o frecuencia de sismos; es decir, menor número de sismos y sobretodo de magnitudes moderadas (<6.0Mw). Similar situación se presenta en la zona del llano amazónico, departamento de Loreto, en donde los valores de aceleración disminuyen considerablemente al igual que la frecuencia de sismicidad.

.- Los valores de aceleraciones máximas deben ser considerados como valores medios esperados en suelo firme (PGA), sin considerar los efectos de sitio y la interacción suelo-estructura.

.- Para estudios puntuales, en los cuales se consideran obras de gran importancia, es recomendable realizar estudios específicos para el peligro sísmico a fin de que sean representativos de la envergadura y los altos costos de las obras.

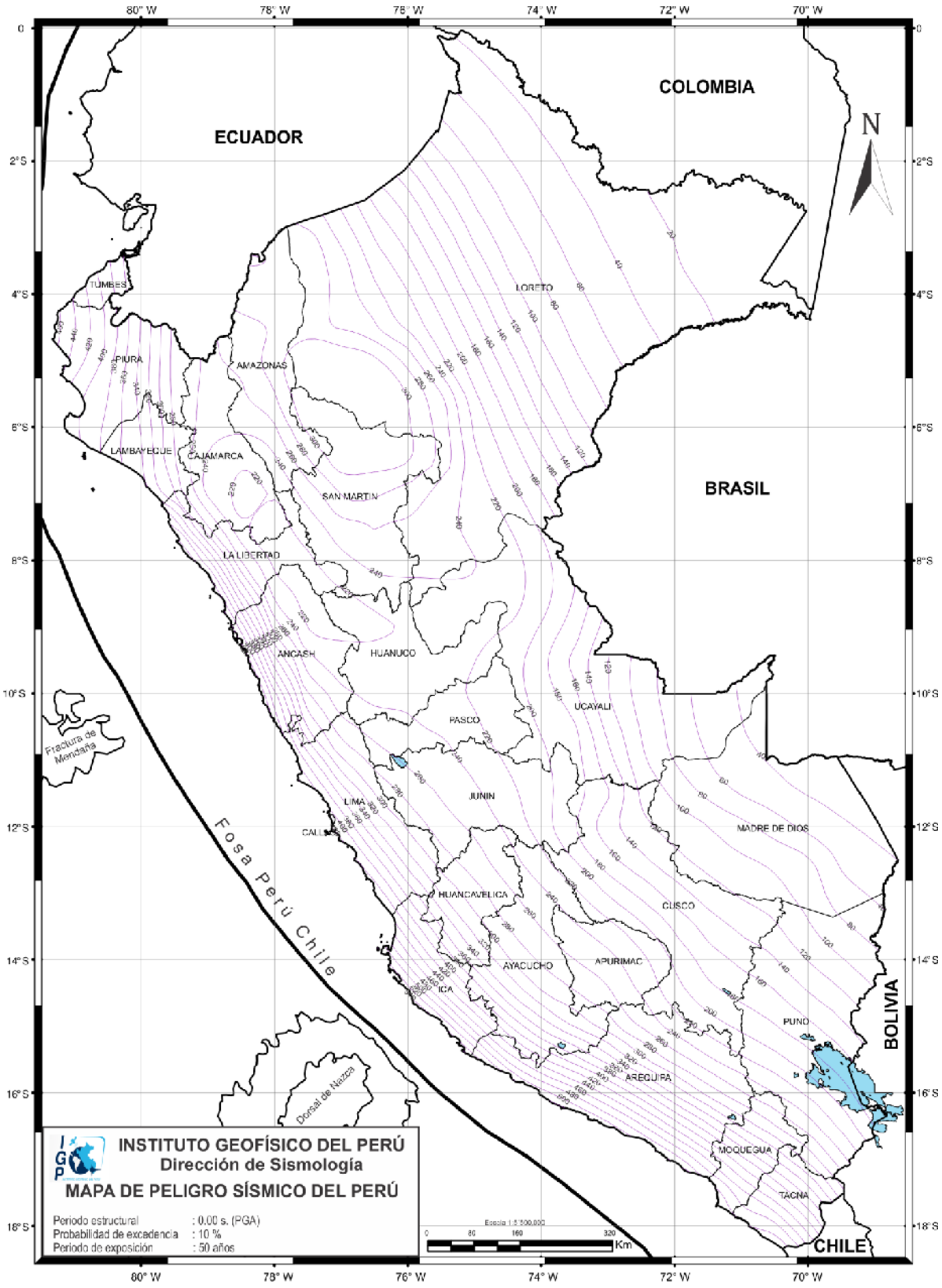


Figura 10.- Mapa de peligro sísmico para el Perú considerando un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia. Los valores de aceleración están expresados en unidades de gals.

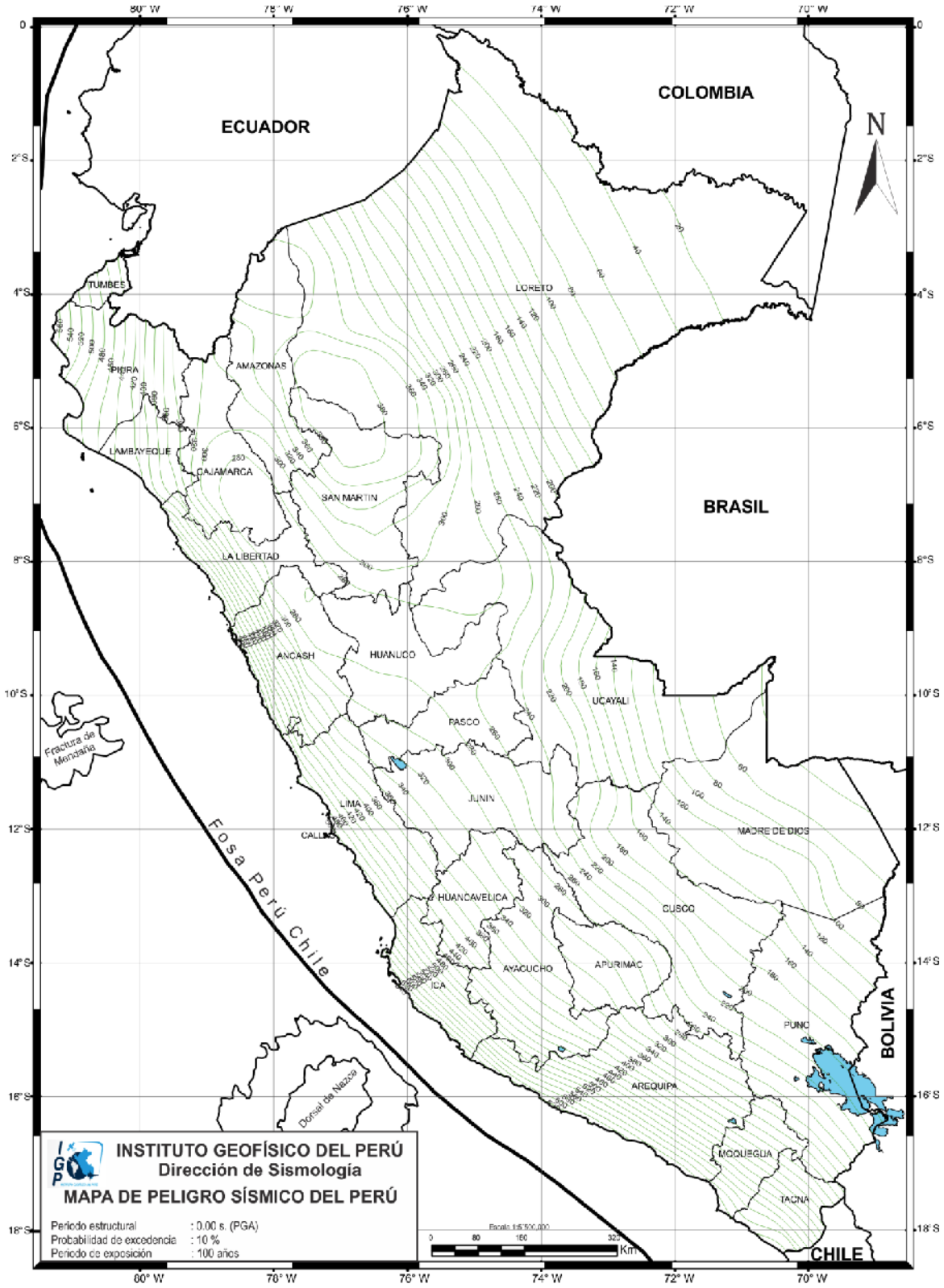


Figura 10.- /// Continuación. Mapa de peligro sísmico para el Perú considerando un periodo de retorno de 100 años con el 10% de excedencia. Los valores de aceleración están expresados en unidades de gals.

9.- ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME

El espectro de peligro uniforme define al espectro que posee la misma probabilidad de ser excedida en un periodo dado en todo el rango de ordenadas espectrales. Este espectro toma en cuenta las posibles combinaciones entre la magnitud y la distancia del sismo al punto de interés; por lo tanto, puede ser usado en un análisis espectral de respuesta estructural. Asimismo, los espectros explican el desarrollo de los movimientos tiempo-historia del suelo a partir de las amplitudes del movimiento del suelo y posiblemente también con el contenido de frecuencias, ambos parámetros escalados de modo que el espectro del movimiento se ajuste al espectro de peligro uniforme.

Para el Perú, los espectros de peligro uniforme fueron elaborados considerando una serie de curvas de peligro sísmico para un rango de diversos periodos espectrales (0.0 PGA, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 1.0, 2.0, 3.0, etc.), todos con valores de aceleración obtenidos para una misma probabilidad de excedencia para un mismo periodo dado. En el Anexo 2 se presenta los espectros de peligro uniforme obtenidos para cada capital de departamento considerando un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

.- El análisis y evaluación de las diversas fuentes de datos sísmicos existentes para el Perú, ha permitido construir una base de datos sísmico homogénea en cuanto al umbral mínimo de magnitud y escala de magnitud Mw.

.- El análisis espacial de la sismicidad y la evaluación sismotectónica del Perú, han permitido identificar y definir el número y la geometría de 33 fuentes sismogénicas asociadas a la sismicidad interface, deformación cortical y sismicidad intraplaca. Para estas fuentes, los parámetros sismológicos han sido determinados a partir de la curva de recurrencia sísmica.

.- Para la evaluación de las diversas leyes de atenuación se ha seguido el procedimiento de Alva (2005). Finalmente, se hace de las leyes propuestas por Young et al (1997) y Sadigh et al (1997).

.- Para el cálculo del peligro sísmico se hace uso del algoritmo CRISIS-2007, comentado y discutido con el Dr. Mario Ordaz.

.- Los mapas de peligro sísmico (PGA) propuestos en este estudio pueden ser considerados como insumo base para la elaboración de proyectos de ingeniería y/ obras de gran envergadura.

.- Los espectros de peligro uniforme deben ser integrados de manera adecuada en los procesos del diseño estructural.

Recomendaciones:

.- Se debe buscar procedimientos prácticos para integrar los espectros de peligro uniforme en el proceso de diseño estructural, debido a que estos contienen información consistente que permite una mejor descripción del problema sísmico.

.- Deben realizarse estudios de microzonificación de las principales ciudades del país a fin de lograr mayor comprensión de este tema en zonas ampliamente pobladas.

.- En el Perú, la mayor población e industrias se encuentra ubicadas en zonas de peligro sísmico alta a intermedia, entonces es de importancia hacer uso de estudios de peligro sísmico para realizar las evaluaciones del riesgo de desastre con fines de reducción del mismo. Se entiende que el peligro puede ser constante en el tiempo, pero la exposición y la vulnerabilidad de la población están en continuo aumento.

.- Deben realizarse esfuerzos para lograr integrar a los profesionales de ciencias de la tierra, la ingeniería y la política para incrementar y mejorar la información disponible y necesaria para incrementar y mejorar los estudios de gestión de riesgos.

BIBLIOGRAFIA

Abrahamson, N. y J. Silva (2007): Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes, Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, 94-127.

Aguilar, Z. (2011): Evaluación del peligro sísmico. I Simposio Internacional, ACI, Tacna.

Alva, J. (2005): Actualización de los parámetros sismológicos en la evaluación del peligro sísmico en el Perú. Revista Ingeniería Sísmica, N-3.

Alva, J. (2011): Actualización de los parámetros sismológicos en la evaluación del pelígro sísmico en el Perú. I Simposio Internacional ACI, Tacna.

Atkinson, M. y D. Boore (1997): Some comparisons between recent ground-motion relations, *Seismol. Research Letters* **68**, pp.24-40

Bernal, I., Tavera, H. (2002): Geodinámica, sismicidad y energía sísmica en Perú, Monografía IGP, CNDG, pp64.

Bolaños y Monroy (2004): Espectros de Peligro Sísmico Uniforme – programa MRiesgo, Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil, PUCP, Lima, Perú.

Boore, D. y W. Joyner (1993): Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: an Interim Report. U.S.G.S. Open File Report 93-509.

Cahill, T. and Isacks, B. (1992): Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate, J. Geophys. Res. P7, 17.503-17.529.

Casaverde L. y Vargas J. (1980): Zonificación Sísmica del Perú, II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismorresistente, OEA y PUCP Lima, Perú.

Campbell, K. (1981): Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 2039–2070.

Campbell, K. (1997): Empirical near-source attenuation relationship for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity and pseudo-absolute acceleration response spectra. Seism. Res. Lett., V-68, N-1, pp. 154-179.

Castillo, J. y J. Alva (1993): peligro Sísmico en el Perú. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil – UNI, Lima, Perú.

Castillo, P. y P. Lonsdale (2004): A Geochemistry of Alvarado and Samaniego ridge suggests widespread Galapagos plume-upper Mantle interaction in the Mioceno Eastern Pacific, American Geophysical Union, Fall Meeting 2004, V33G-03.

Chavez, J. (2006). Leyes de atenuación para aceleraciones espectrales en el Peru. Tesis de grado UNI, Lima, Perú.

Condori y Tavera (2010). Evaluación del parámetro “b” en el borde occidental del Perú. Boletín de la Soc. Geol. Perú.

Cornell, A. (1968): Engineering Seismic Risk Analysis. Bull. Of the Seismological Soiety of America., Vol-58, N°5, pp.1538-1606.

Cornell, C.A. and Van Marcke, E.H. (1969) The major influences on seismic risk: in Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, v. A-1, p. 69-93.

Crouse, C. B., Vyas, Y. K., & Schell, B. A. 1988. Ground motion from subduction-zone earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1), 1–25.

Dahle, A., Climent, A., Taylor, W., Bungum, H., Santos, P., Ciudad Real, M., Linholm, C., Strauch, W., & Segura, F. (1995): New spectral strong motion attenuation models for Central America. *Pages 1005–1012 of: Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation*, vol. II.

Dimaté, C., Drake, L., Yepez, H., Ocola, L. (1999): Seismic hazard assessment in the northern Andes (Pilot Project), Annali di Geofísica, V42, N6, pp1039-1055.

DeMets C., R. Gordon D.F., Argus and Stein S. (1994): Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. Geophys. Res. Lett. 21, 2191-2194.

Dorbath, L., A. Cisternas, C. Dorbath (1990): Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol-80, N°3, pp. 551-576.

Engdahl, E.R., and A. Villaseñor (2002): Global Seismicity: 1900-1999, *in* W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (editors), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology,* Part A, Chapter 41, pp. 665-690, Academic Press.

Esteva, L (1968). Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico. *Tesis doctoral*, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Gamarra. C. y Z. Aguilar (2009): Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú. CISMID, UNI, Lima, Perú.

Gamarra, C. (2009): Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú. Tesis de grado Ingeniero Civil, UNI, Lima, Perú.

Giardini, D., Dimaté, C., Hanka, W. (1999): Pilot Project for Regional Earthquake Monitoring and Seismic HAzard Assessment, Final Report, EC DGXII CII*-CT94-0103.

Guardia y Tavera (2011). Inferencias de la superficie de contacto sismogénica en el borde occidental del Perú. Bol. Soc. Geol. Perú.

Gutemberg, B. y C. Richter (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America., Vol-46, pp. 104-145.

Heras, H. (2002). Análisis de la distirbución del valor de “b” en la zona de subducción de Peru., Tesis de Grado UNSA, 115 p.

Huaco D. (1980): Análisis de los parámetros que interviene en la evaluación del Peligro Sísmico. Instituto geofísico el Perú. Lima, Perú.

Hyndman, R., M. Yamano y D. Oleskevich (1997). The seismogenic zone of subduction trust faults. The Island arc. 6:244-260.

Idriss, I. (1993): *Procedures for selecting earthquake ground motions at rock sites*. Tech. rept. NIST GCR 93-625. National Institute of Standards and Technology.

Joyner, W. y D. Boore (1988). Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion, in *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II, Proc. Am. Soc. Civil Eng. Geotech. Eng. Div. Specialty Conf.*, June 27--30, 1988, Park City, Utah, 43--102.

Krabbenhoft, A., J. Bialas, H. Koop, N. Kukowski, C. Hubscher (2004): Crustal structure of the Peruvian continental margin from wider-angle seismic studies. Geophysical Journal International, doi:10-1111/j.1365-2406x.

Kramer, S. (1996): Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall. EEUU, 653pp.

Macharé, J., M. Sebrier, D. Huaman, J. Mercier (1986): Tectónica cenozoica de la margen continental peruana. Boletín de la Sociedad Geológica del Peru. V-76, 45-77.

Macharé J., Fenton C.H., Machette M.N., Lavenu A., Costa C. & Richard L. Dart R.L. (2003).- Database and Map of Quaternary Faults and Folds in Perú and its Offshore Region. *U.S. Geological Survey Open-File Report* 03-451, 74 p.

Macharé, J. C. Benavente (2008). Síntesis descriptiva del Mapa Neotectónico 2007, INGEMMET, Lima, Perú.

Maeda, K. (1996): The use of foreshocks in probabilistic prediction along the Japan and Kuril Trenches. Bulletin of the seismological Society of America, 86(1A), 242-254.

McGuire, R. (1974): Seismic structural response Risk Analysis incorporating Peak Response Regresion on Earthquake Magnitude and Distance. MIT Report R74-51., Cambridge Mass. USA.

McGuire R. (1976): Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis, Open-File Report 76-67, U.S. Geological Survey.

McGuire, R. (2004): Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Ingineering Research Institute (EERI), Oakland CA, EEUU, EERI, 221pp.

Bolaños L. y M. Monroy (2004): Espectros de Peligro Sísmico Uniforme – programa MRiesgo, Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil, PUCP, Lima, Perú.

Montessus de Ballore, F. (1911) Historia sísmica de los Andes Meridionales, 1ra parte, 345 p., Santiago de Chile.

Norabuena, E., Dixon, T., Stein, S., Harrison, C.G.A. (1999): Decelerating Nazca–South America and Nazca–Pacific motions. Geophys. Res. Lett. 26, 3405–3408.

Ocola, L. (2010): Mapa Preliminar de Peligro Sísmico: Aceleraciones Sísmicas. Atlas de Peligros Naturales 2010, INDECI, pp210-211.

Ordaz (1992): Estimación de movimientos Fuertes ante temblores de subduccion. Tesis Doctoral, UNAM, Mexico.

Mario Ordaz. (*1994*): Sismicidad y movimientos fuertes en México: Una visión actual. Cuadernos de investigación No xx. II, UNM. Mexico.

Ordaz, M., Singh, S. K., y Arciniega, A. (1994), Bayesian Attenuation Regressions: An Application to Mexico City, Geophys. J. Int. 117(2), 335.344.

Ordaz, M., A. Aguilar, J. Arboleda (2007): Program for computing seismic hazard: CRISIS-2007 V1.1., Institute of Engineering, UNAM, Mexico.

Reiter, L. (1990): earthquake hazard analysis: Issues and insights. Columbia University Press., New York.

Robinson, D., S. Das, A. Watts (2006): Earthquake ruptures stalled by a subduction fracture zone. Science, 312: 1203-1205.

Ruiz R. (1999): La Atenuación en los Andes y la Evaluación Probabilística del Peligro Sísmico, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. U.N.F.V. Lima, Perú.

Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, R. Young (1997): Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion Data, Seis. Res. Lett., V-68, N-1, January/February.

Scordilis, E. (2006): Empirical global relations converting Ms and mb to Moment Magnitude. J. Seismol., 10, 225-236.

Shimamoto, T., T. Seno, S. Uyeda (1993): A simple rheological framework for comparative subductolog. In Akai y R. Dmowska eds. Relating Geophysical Structure and Process: The Jeffreys Volume, Geophysical Monograph series 76:39-52, AGU Washington Dc.

Silgado, E. (1978): Historia de los sismos más notables ocurridos en Perú (1513-1974). Instituto de Geología y Minería, Boletín 3, serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú.

Tavera, H. y Buforn, E. (2001). Source mechanism of earthquake in Peru, Journal of Seismology 5:519-539.

Tavera; H. (2011): Mapa Sísmico del Perú, 1960 -2011. Dirección de Sismología, Instituto Geofísico del Perú.

Utsu, T. (1970): Aftershocks and earthquakes statistic (2) – further investigation of aftershocks and other earthquakes sequences based on a new classification of earthquake sequences. J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. 7(3), 197-266 in K, .Maeda (1996).

Vargas, G. (1922): Monografía de Arica, Bol. Soc. Geog. Lima, Tomo XXXVI, Trim. 2-3, 1920, p.175, Tomo XXXIV Trim. 1-2. P.63.

Wiemer, S. (2001): A software package to analysis seismicity: Z-map. Seis. Res. Lett., V-72, N-2, 373-382.

Yamano, M., S. Uyeda (1990): Heat-Flow studies in the Peru Trench Subduction Zone., Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results., Vol-112, 653-661.

Young, R., S. Chiou, W. Silva, J. Humphrey (1997): Strong Ground Motion Attenuation Relationship for subduction zone earthquakes. Seism. Res. Lett., V-68, N-1, January/February.

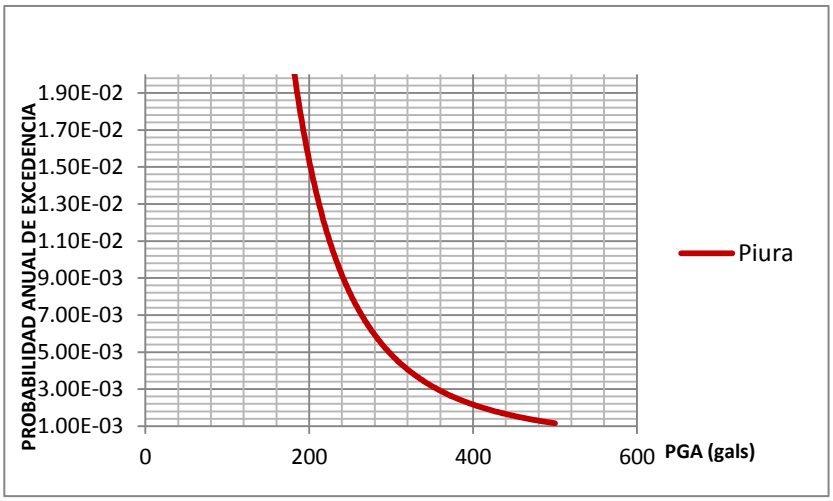
Zhao, J. X., Dowrick, D. J., & McVerry, G. H. (1997): Attenuation of peak ground acceleration in New Zealand earthquakes. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 30(2), 133–158.

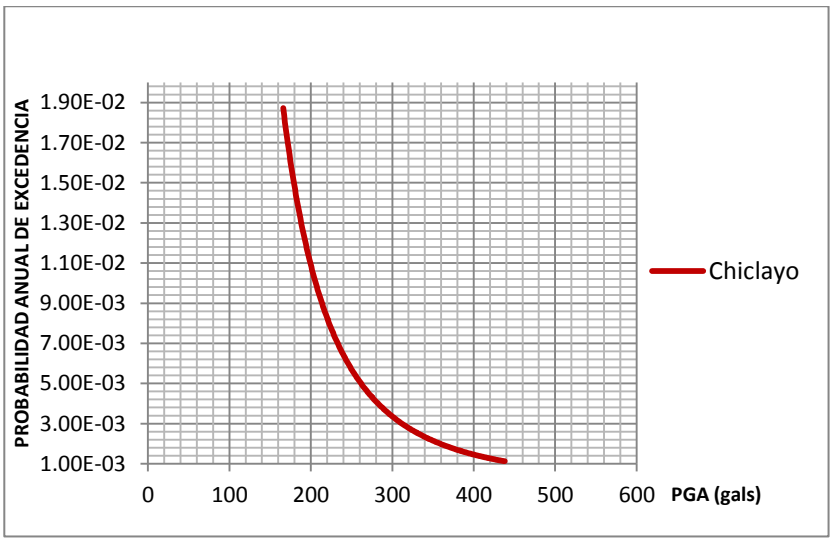
Zuñiga, F. y M. Wyss (2001): Most and least likely locations of large to great earthquakes along the Pacific coast of Mexico, estimated from local recurrence times based on b-values, Bull. Seis. Soc. of Am. V-91, N-6, pp. 1717-1728.

ANEXO 1

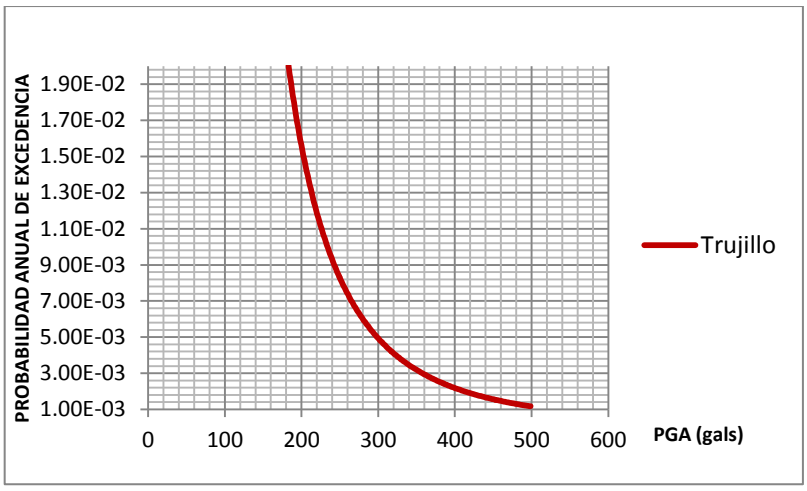
Curvas de Probabilidad de Excedencia para los puntos de la Tabla 6

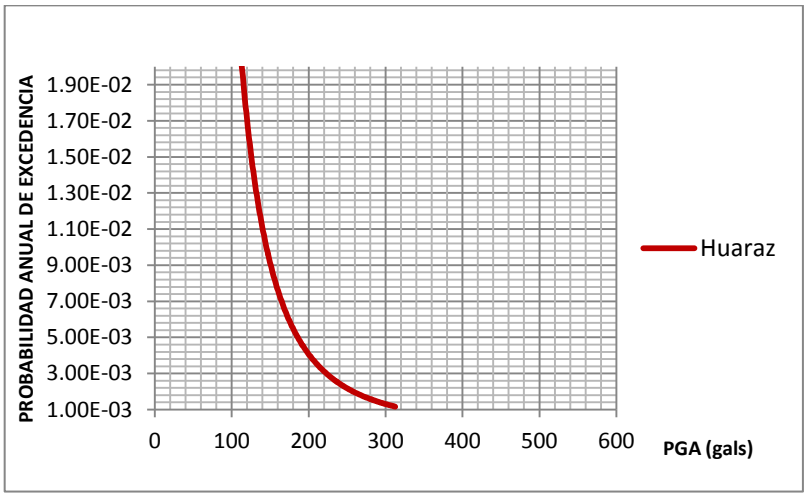


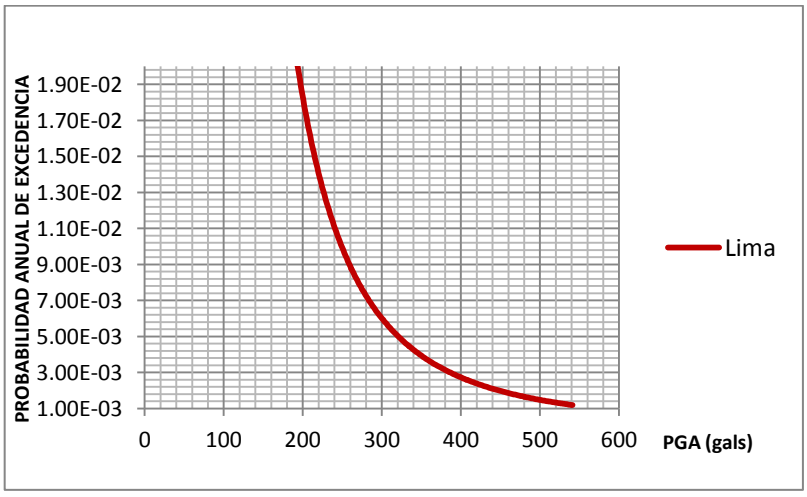




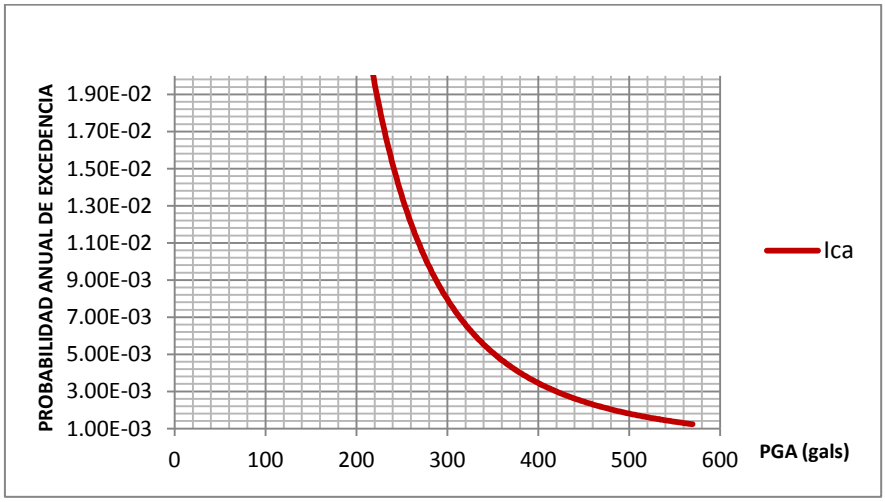
Tasa de excedencia para las ciudades de Tumbes, Piura y Chiclayo

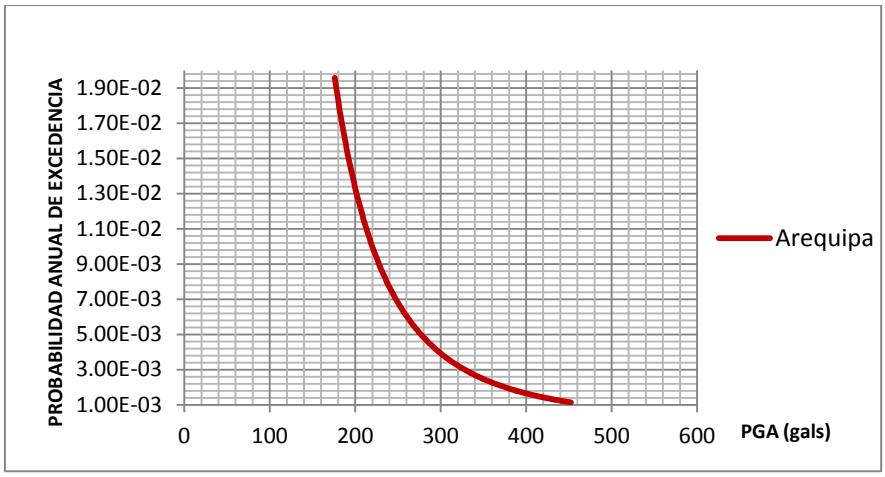


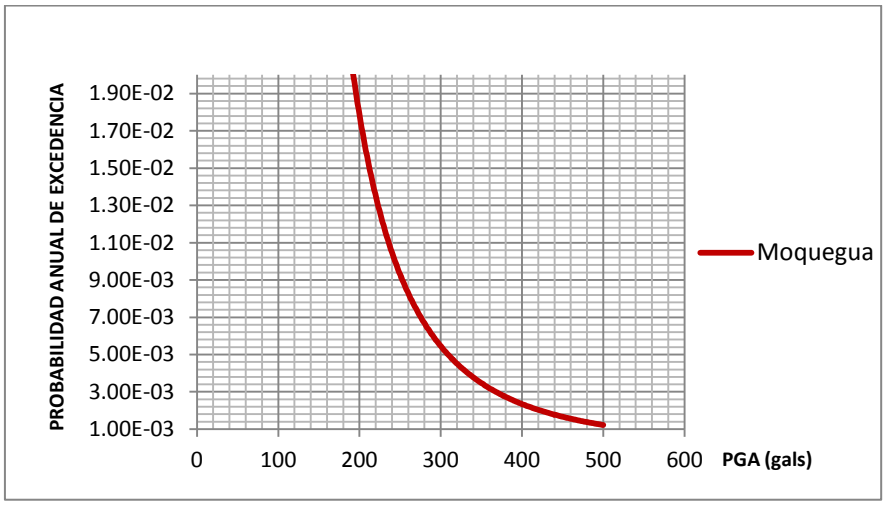




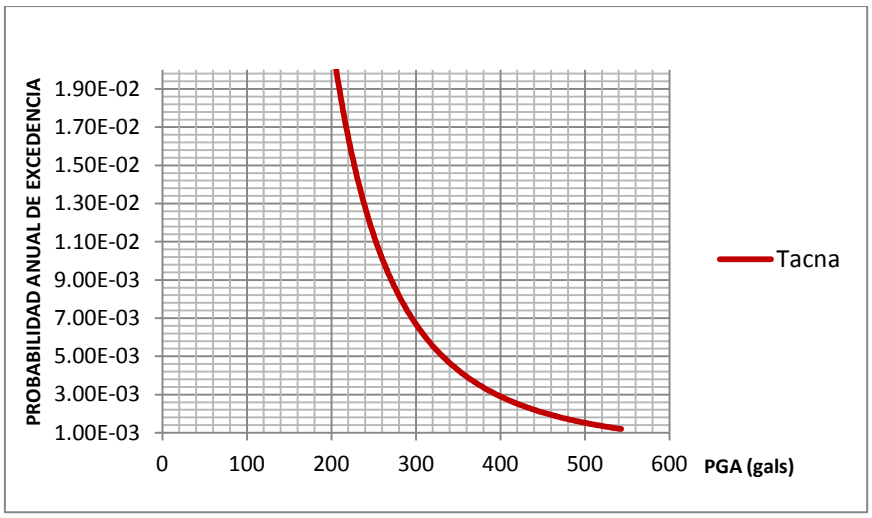
Tasa de excedencia para las ciudades de Trujillo, Huaraz y Lima

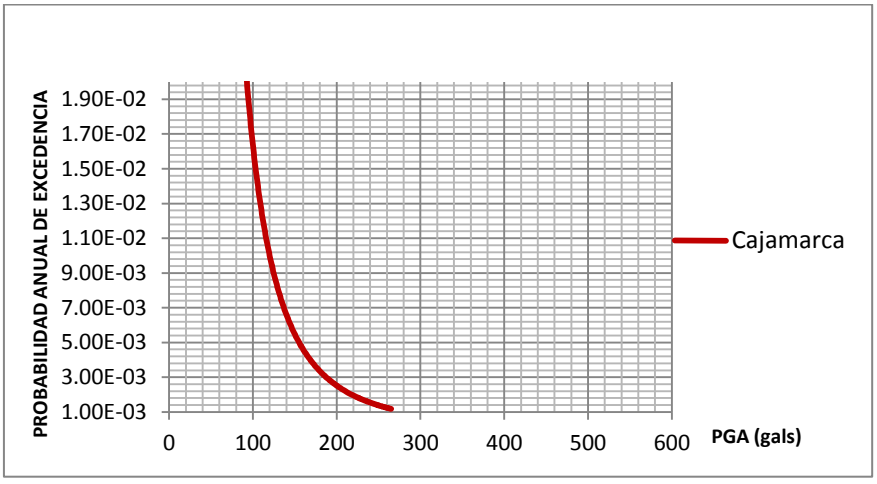


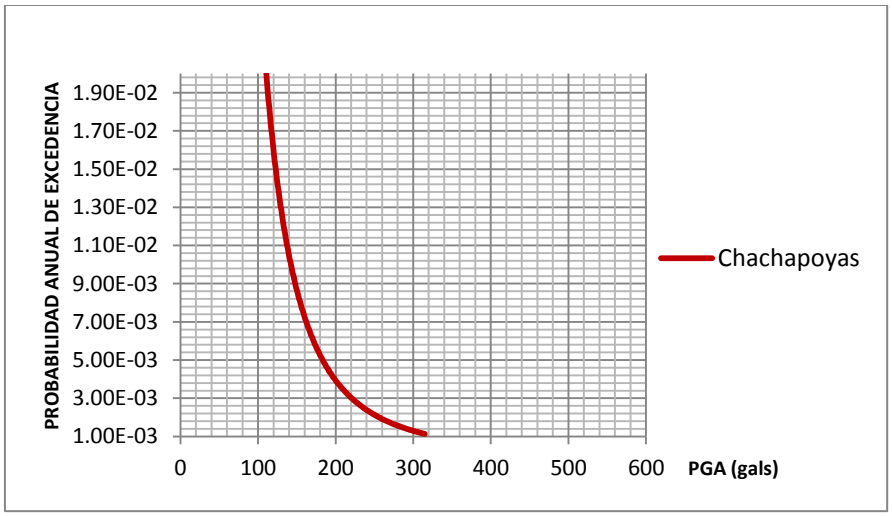




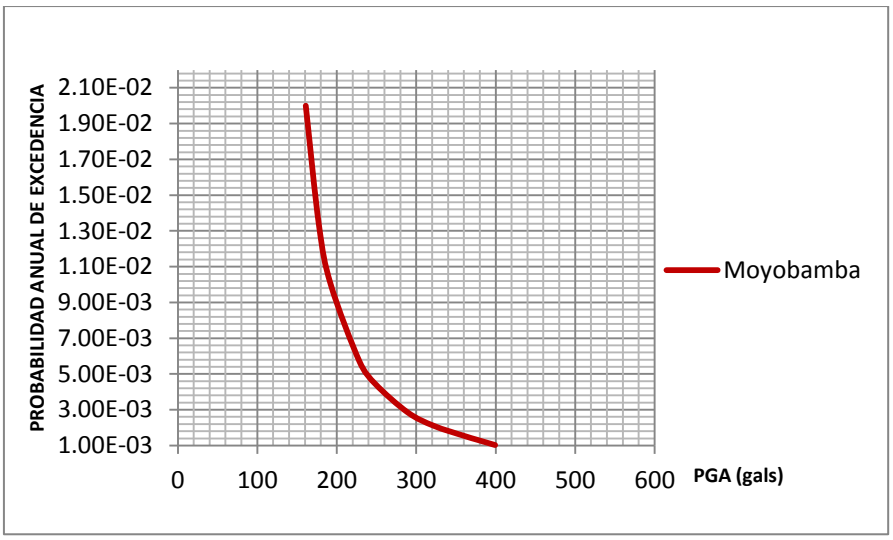
Tasa de excedencia para las ciudades de Ica, Arequipa y Moquegua

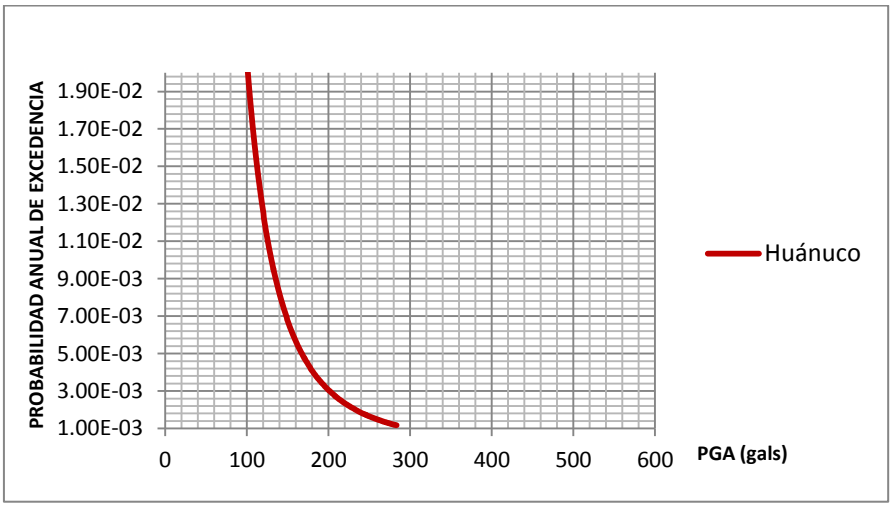


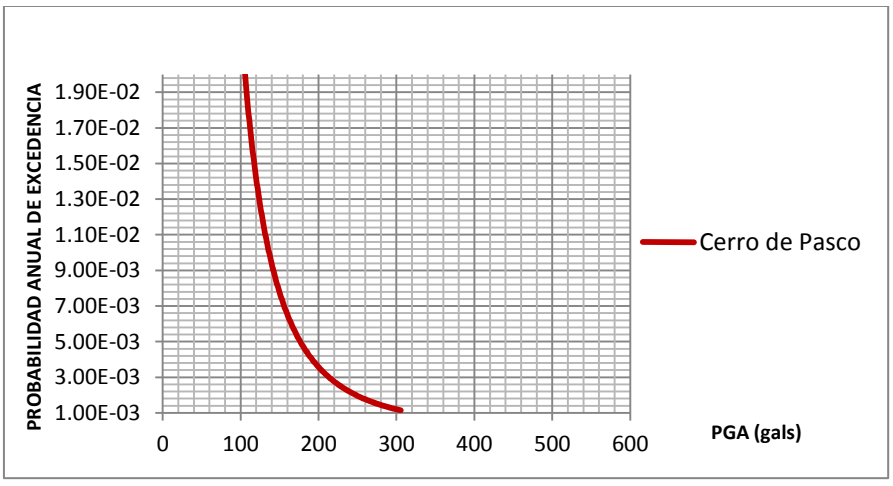




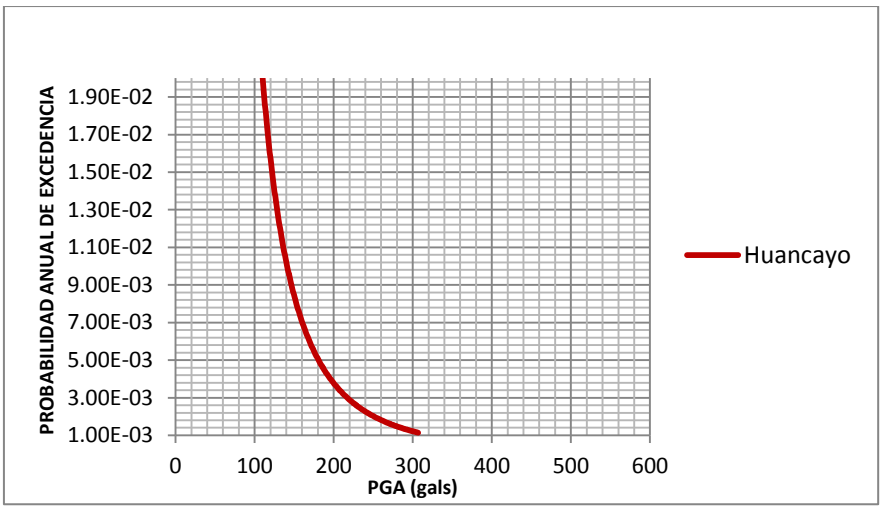
Tasa de excedencia para las ciudades de Tacna, Cajamarca y Chachapoyas

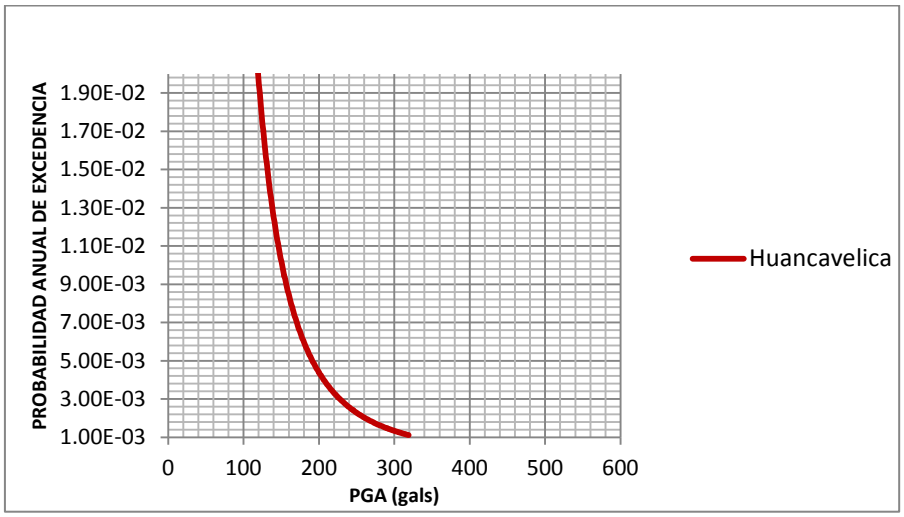


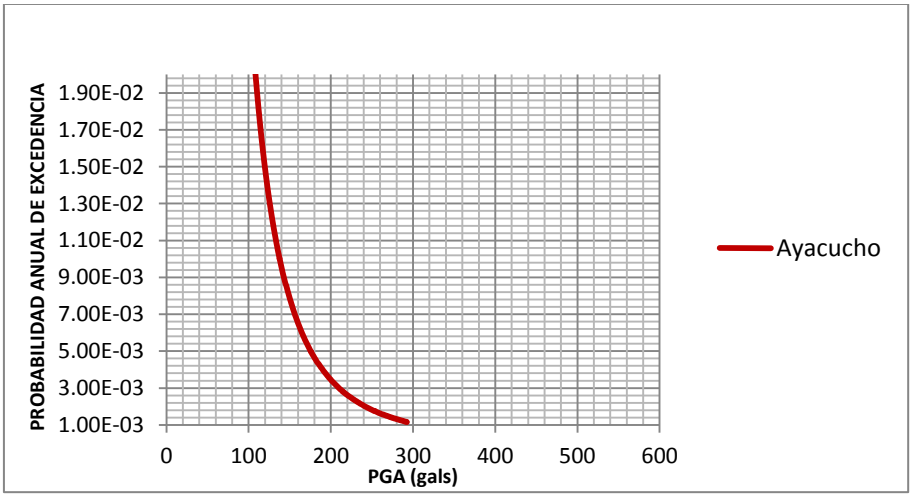




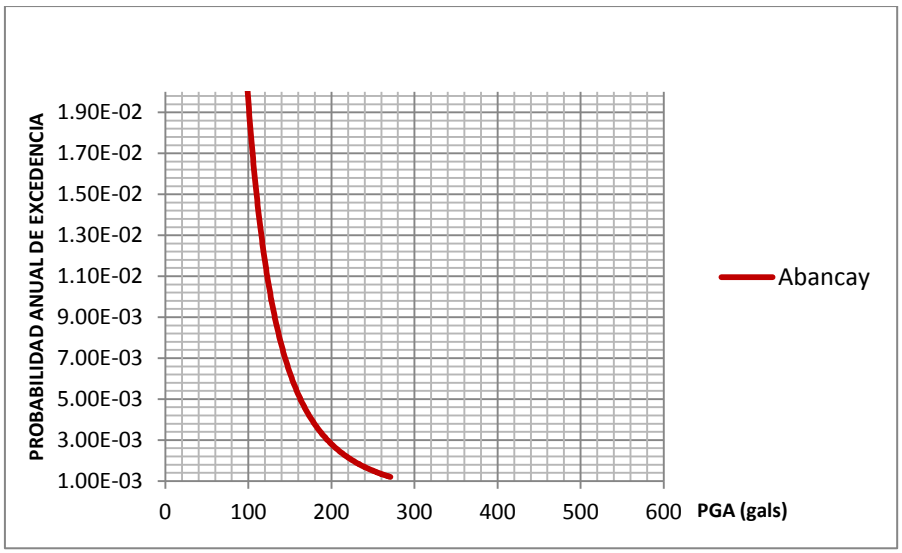
Tasa de excedencia para las ciudades de Moyobamba, Huánuco y Cerro de Pasco

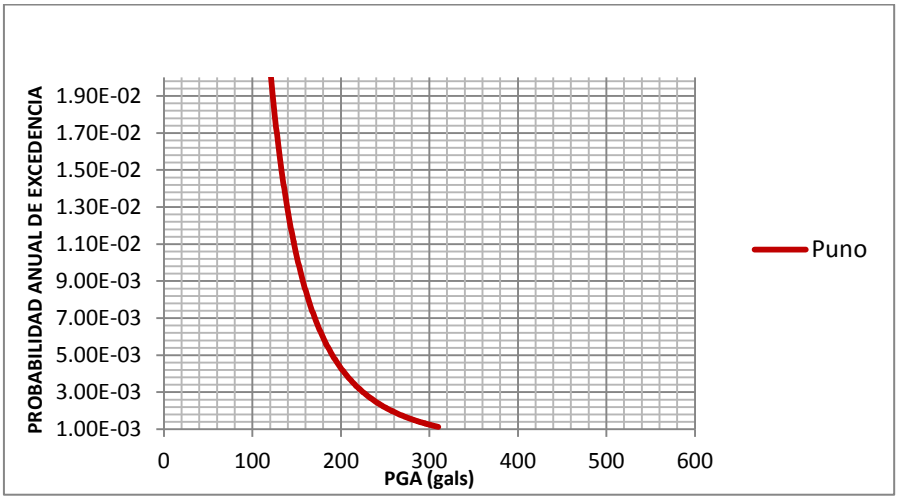


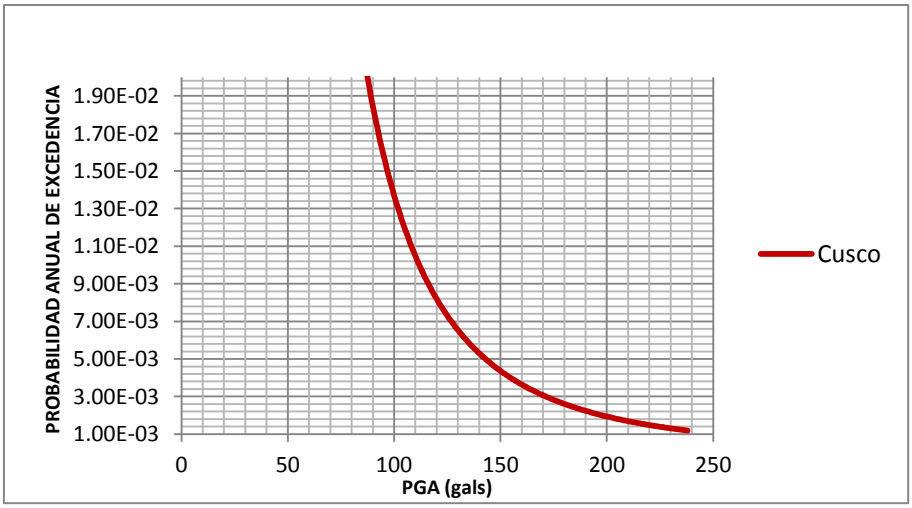




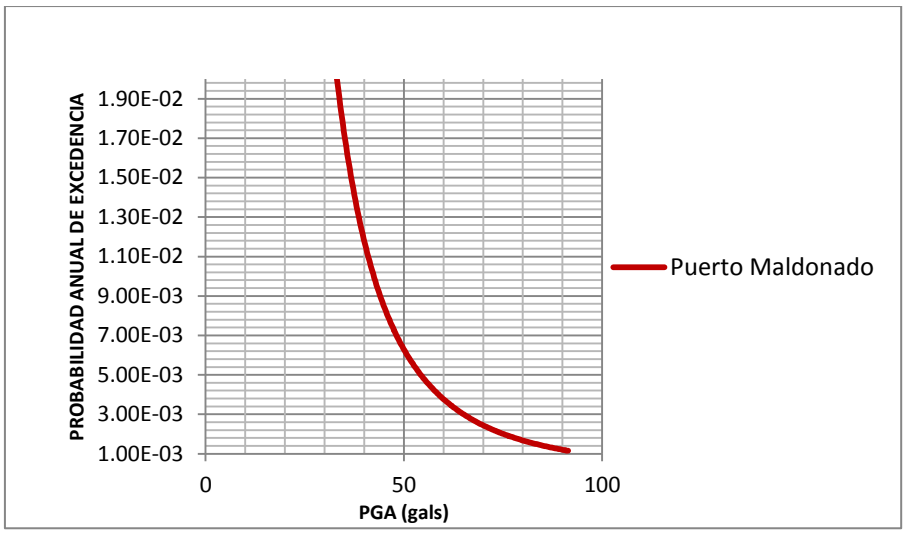
Tasa de excedencia para las ciudades de Huancayo, Huancavelica y Ayacucho

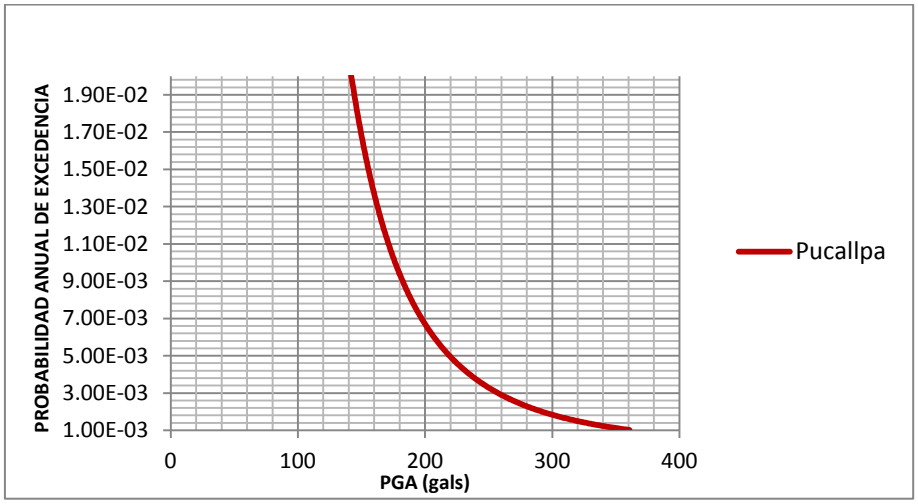


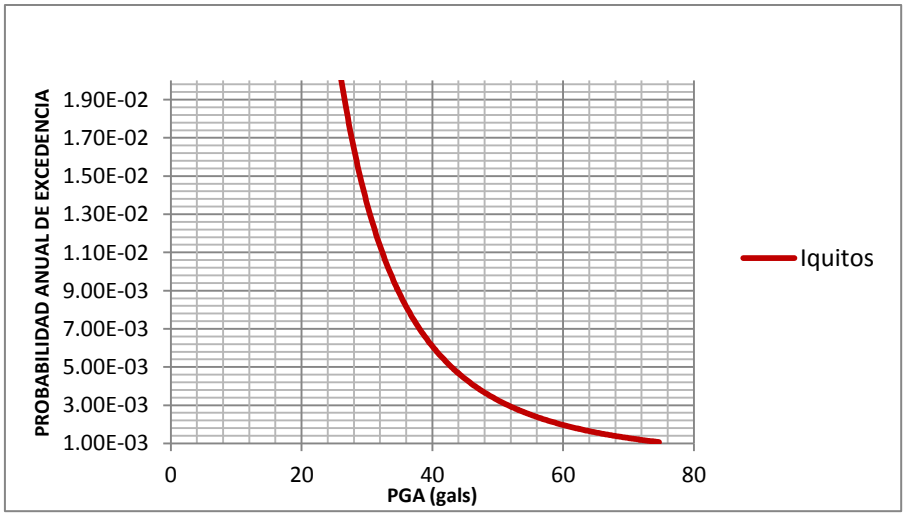




Tasa de excedencia para las ciudades de Abancay, Puno y Cusco



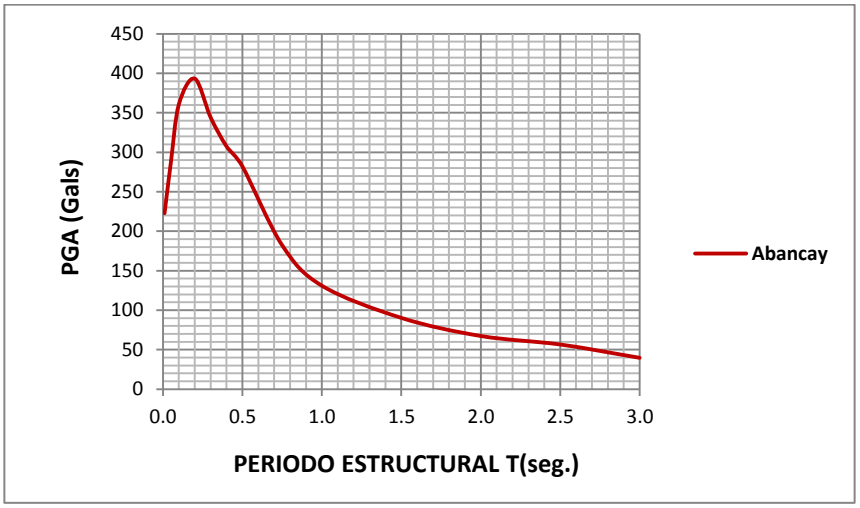


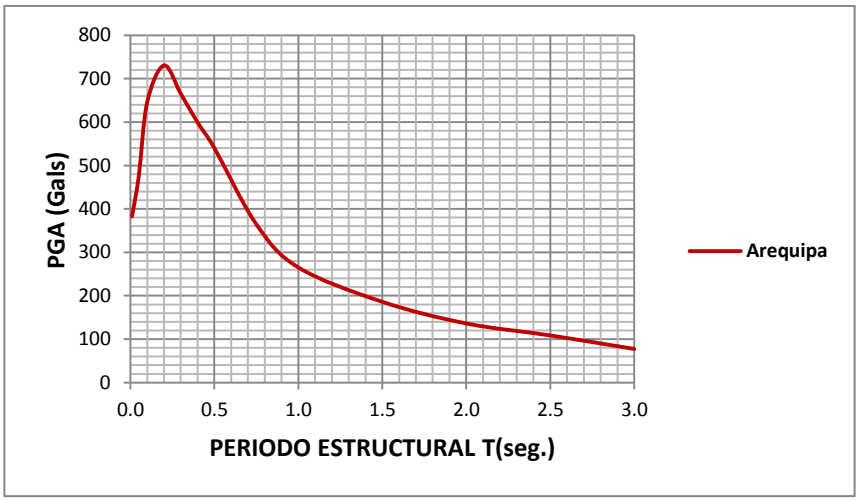


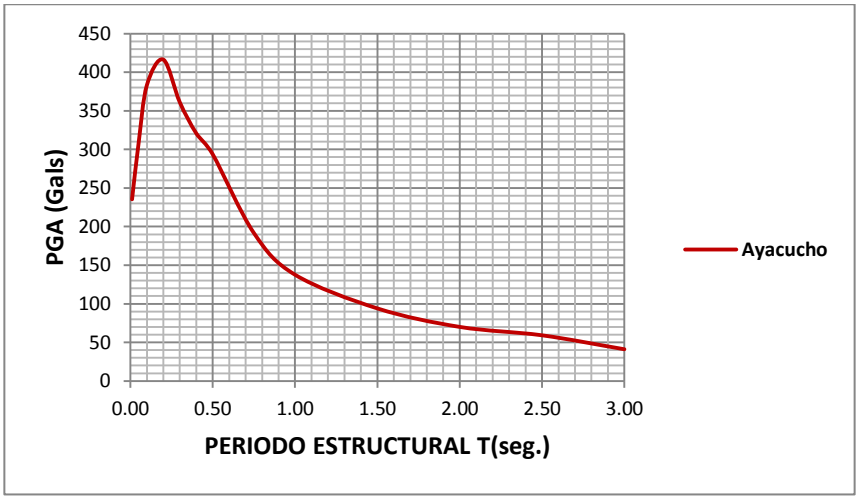
Tasa de excedencia para las ciudades de Puerto Maldonado, Pucallpa y Iquitos

ANEXO 2

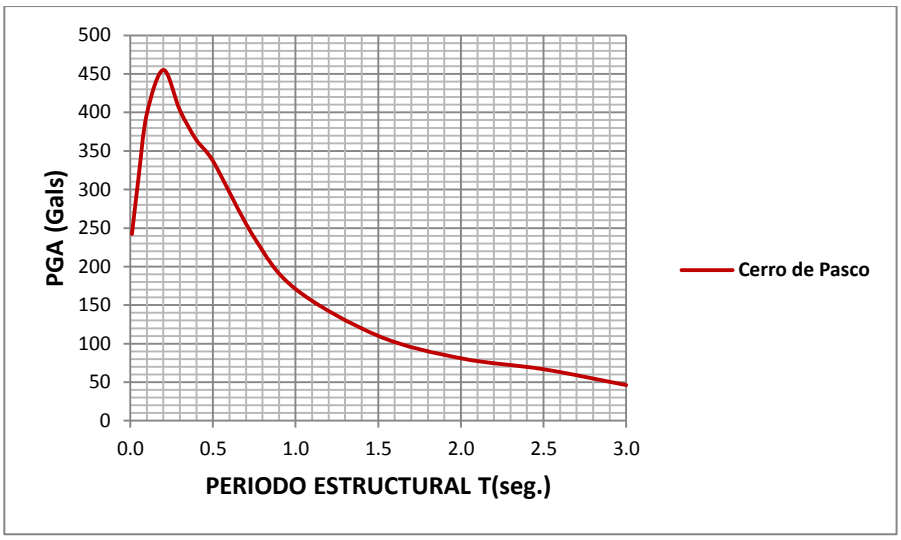
Espectros de peligro uniforme para cada capital de departamento

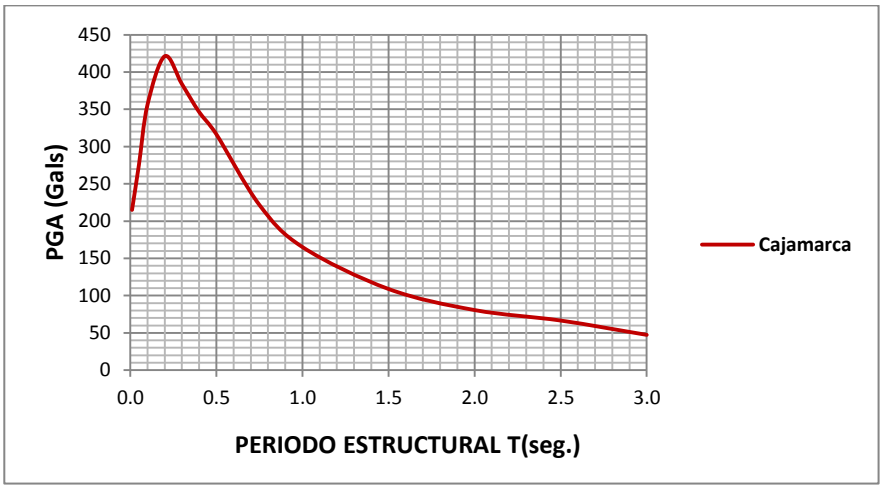


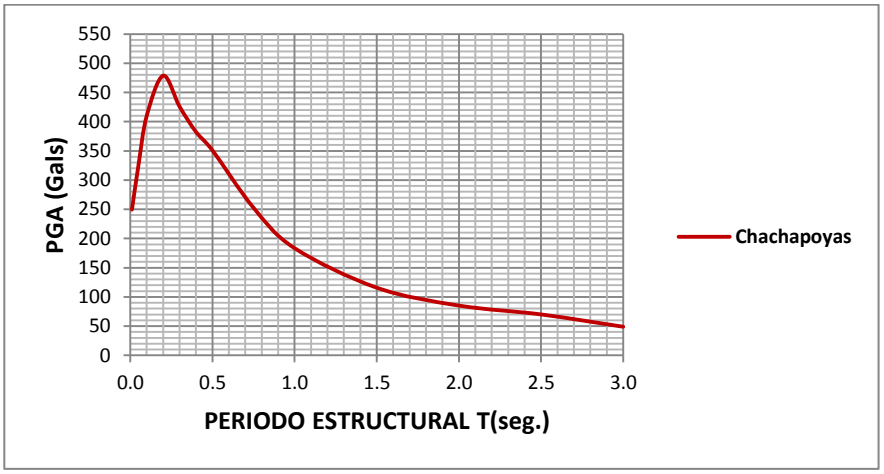




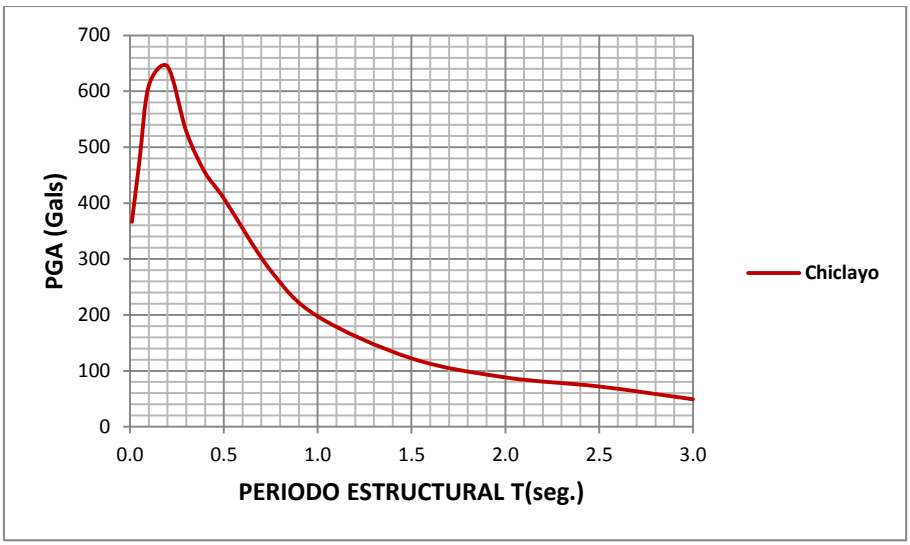
Espectros de peligro uniforme para Abancay, Arequipa y Ayacucho

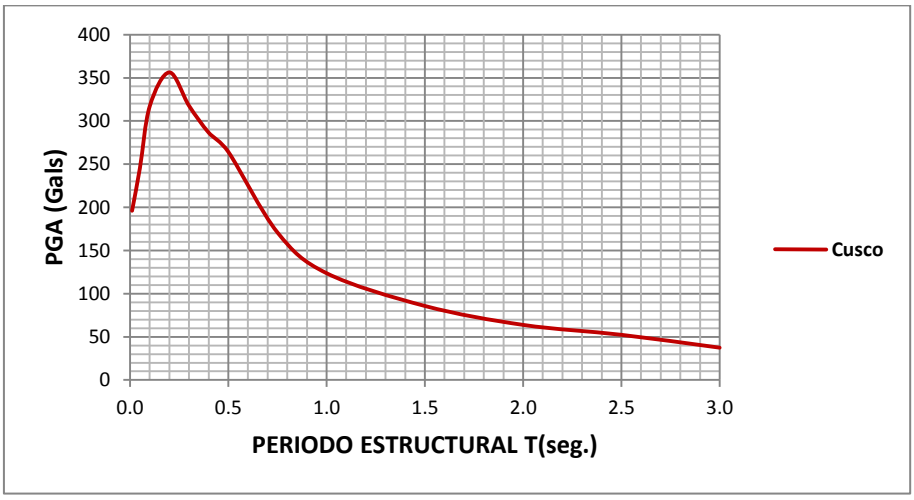


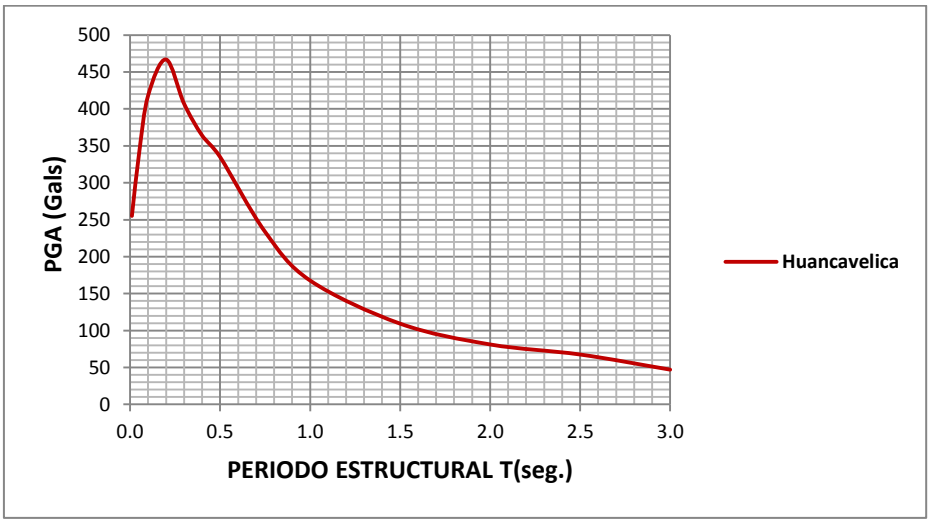




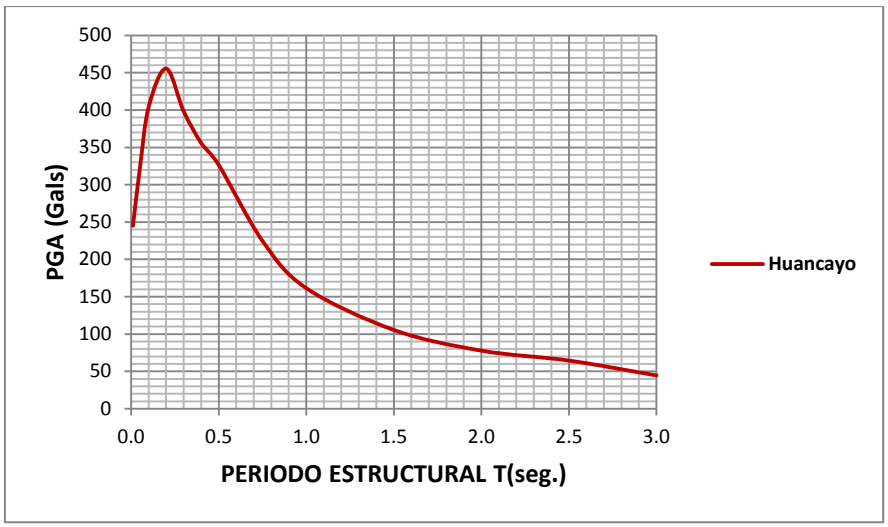
Espectros de peligro uniforme para Abancay, Arequipa y Ayacucho

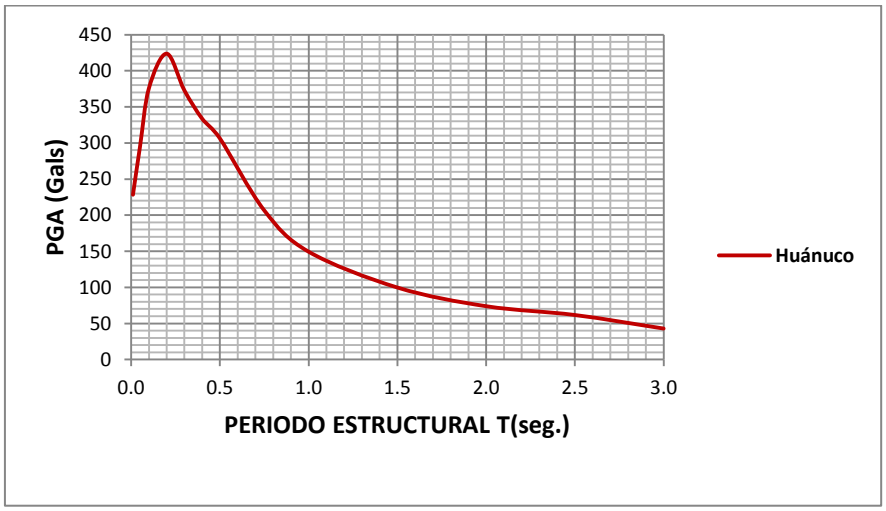


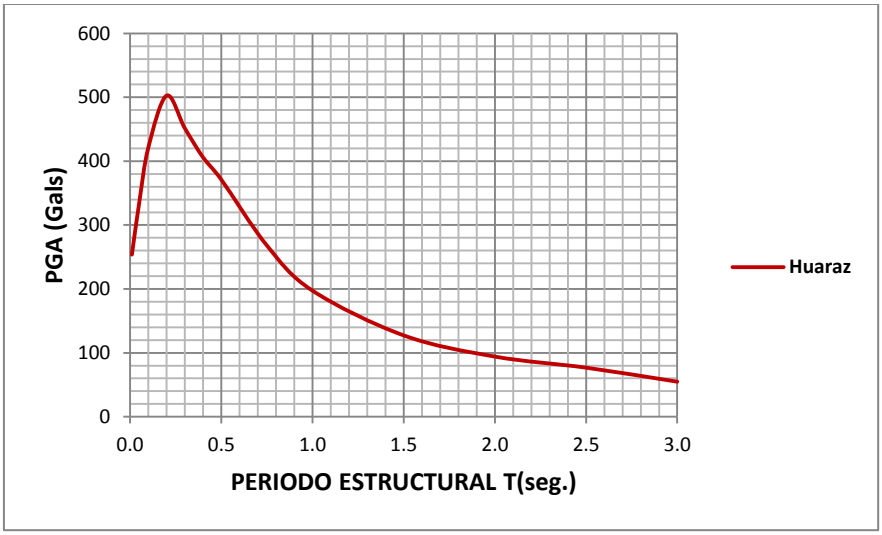




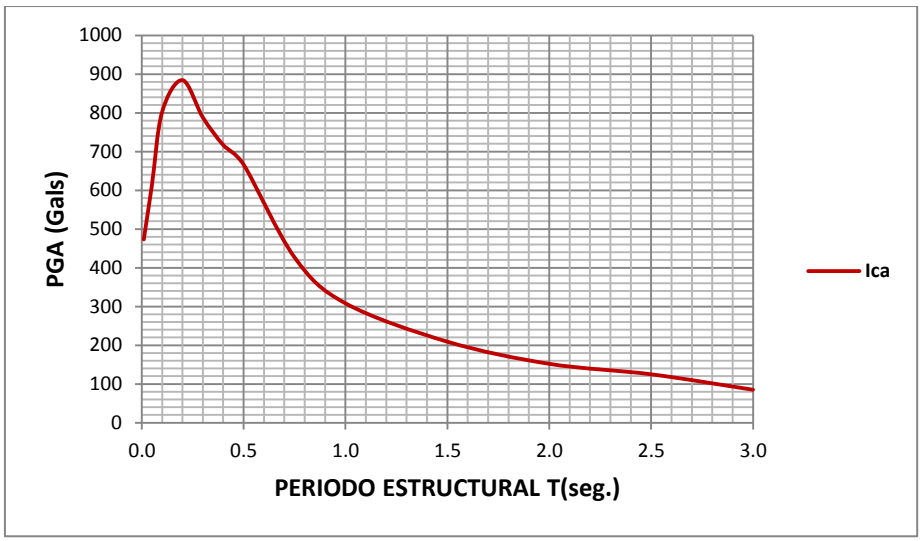
Espectros de peligro uniforme para Chiclayo, Cusco y Huancavelica

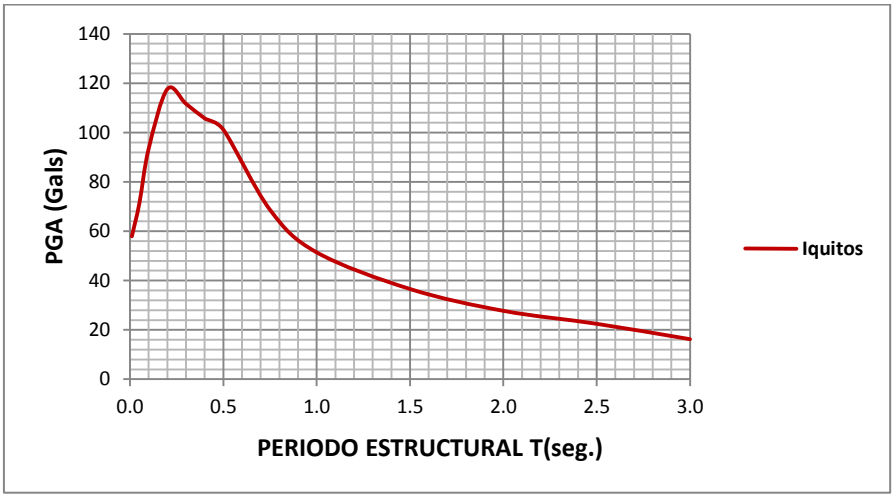


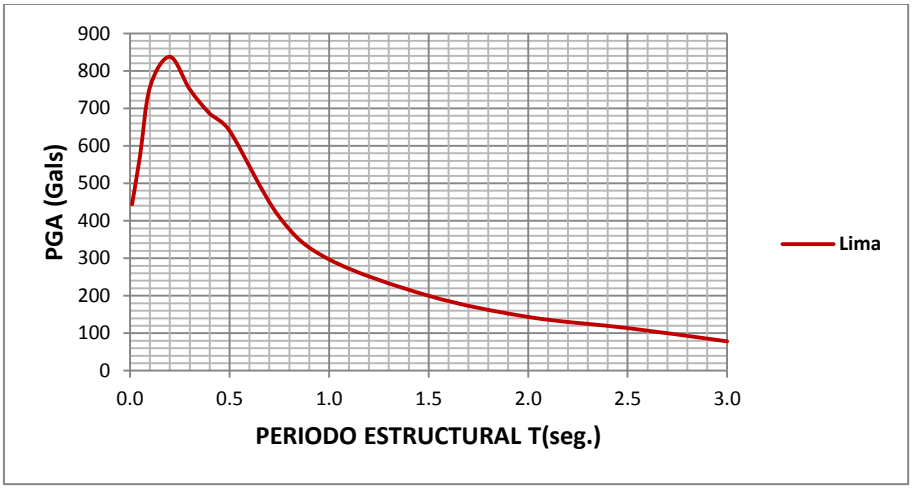




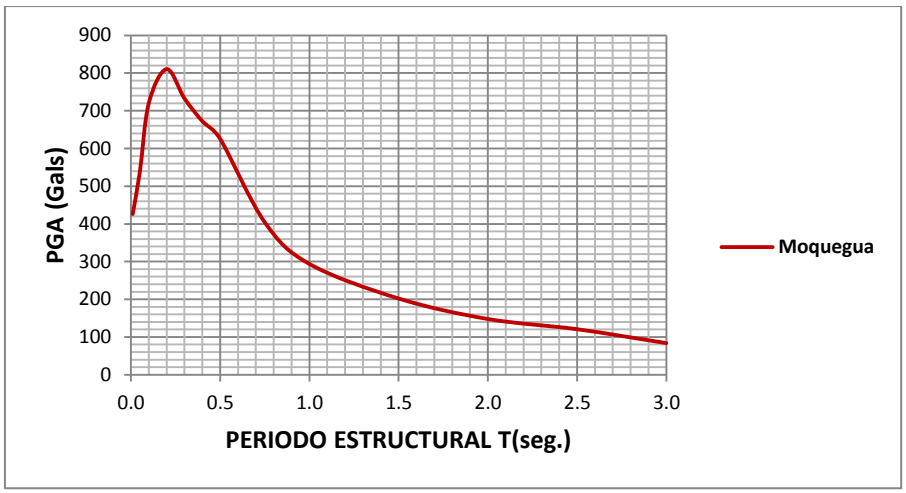
Espectros de peligro uniforme para Huancayo, Huánuco y Huaraz

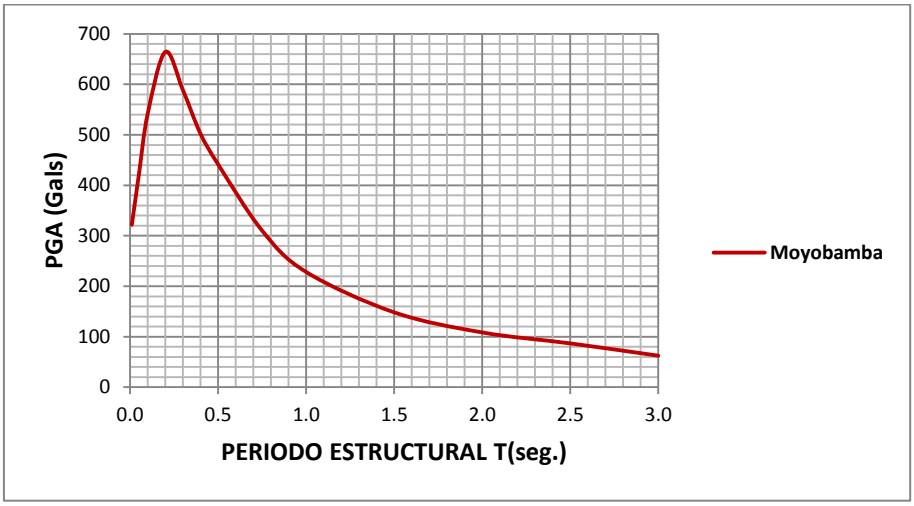


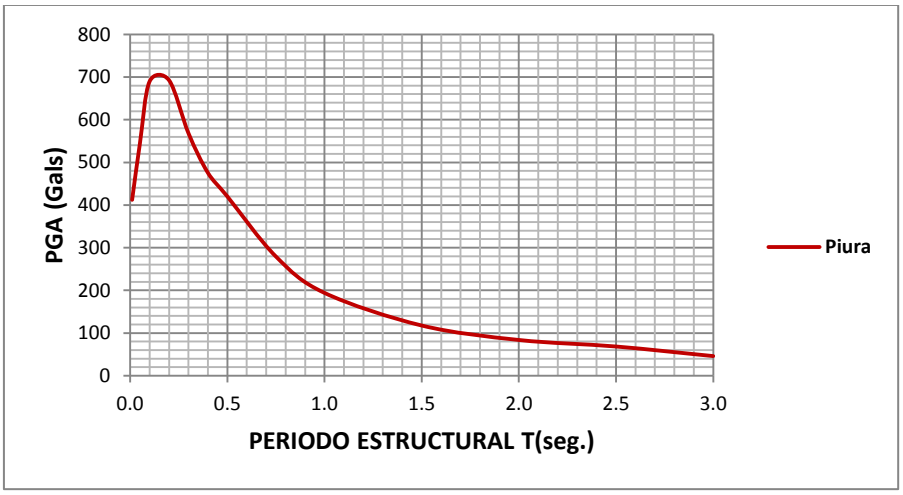




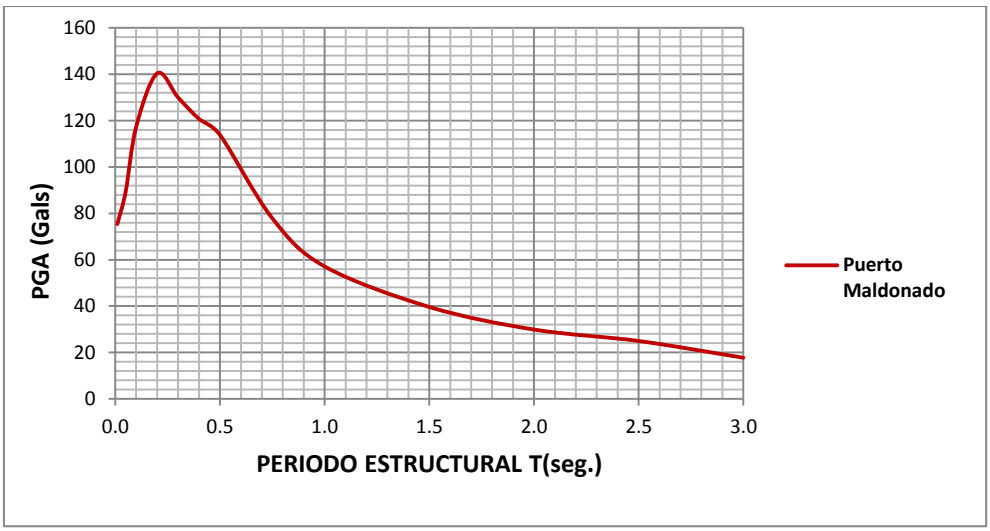
Espectros de peligro uniforme para Ica, Iquitos y Lima

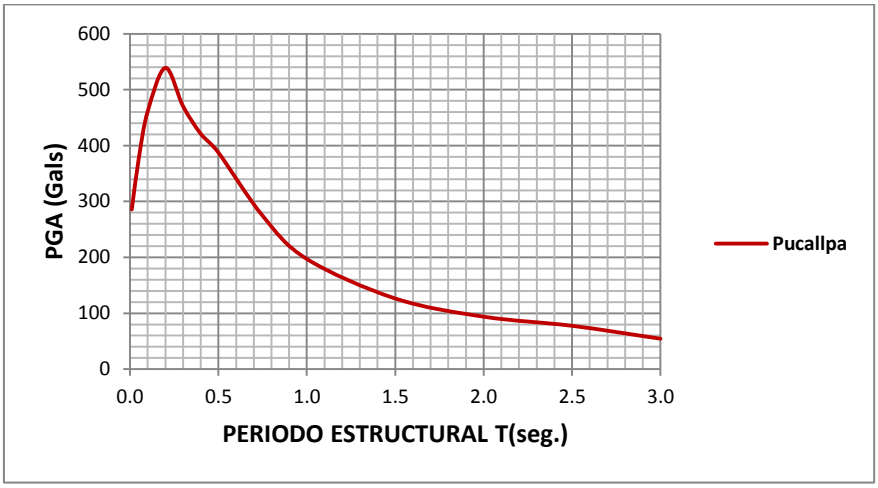


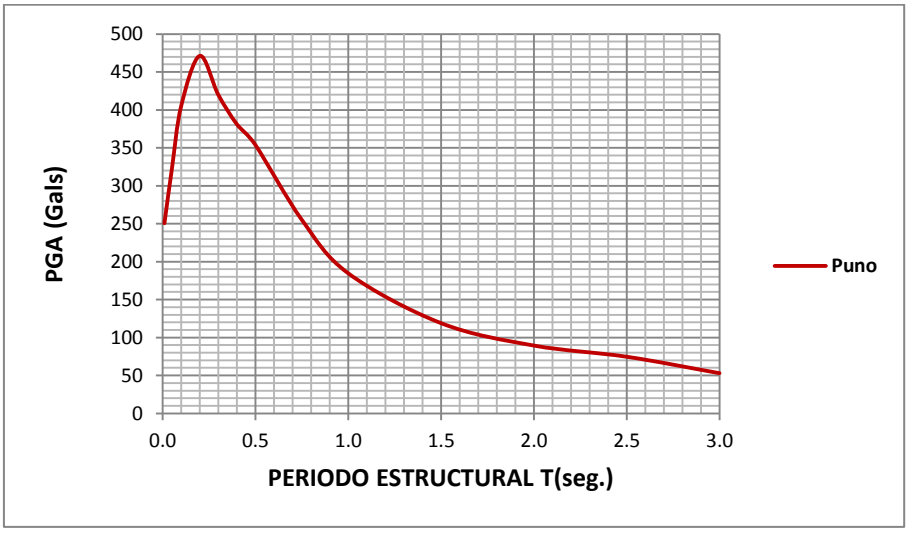




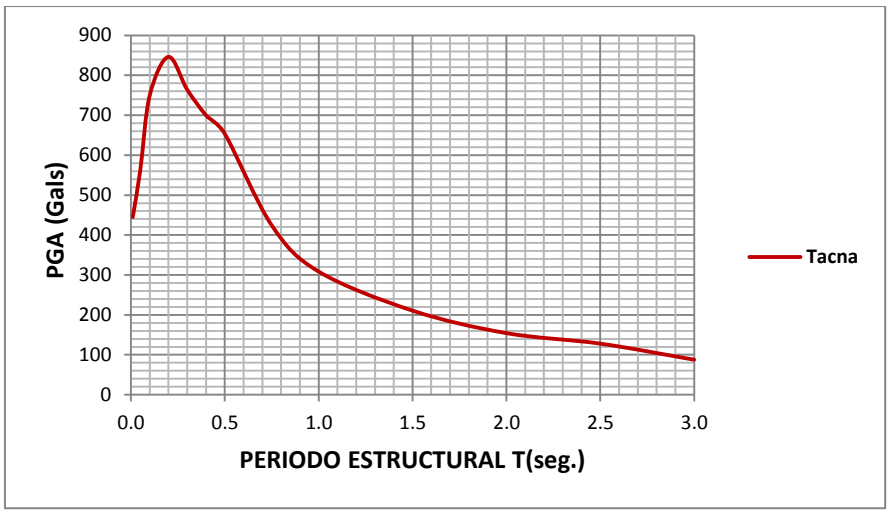
Espectros de peligro uniforme para Moquegua, Moyobamba y Piura

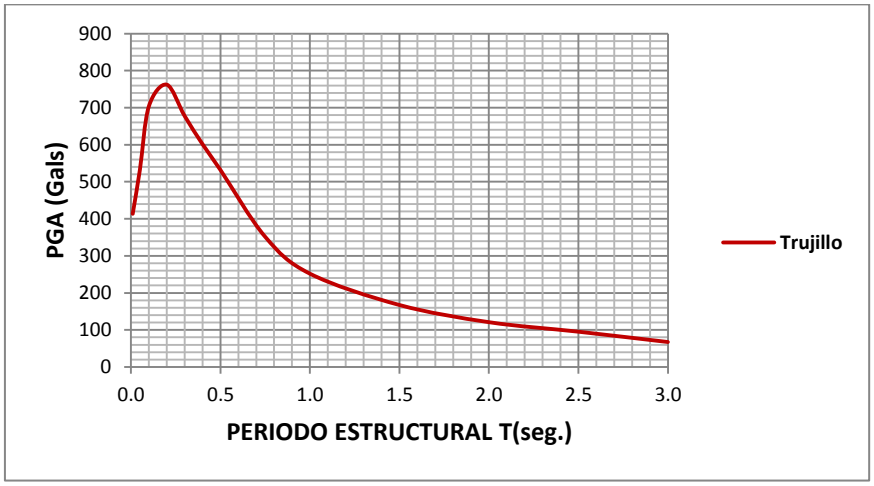


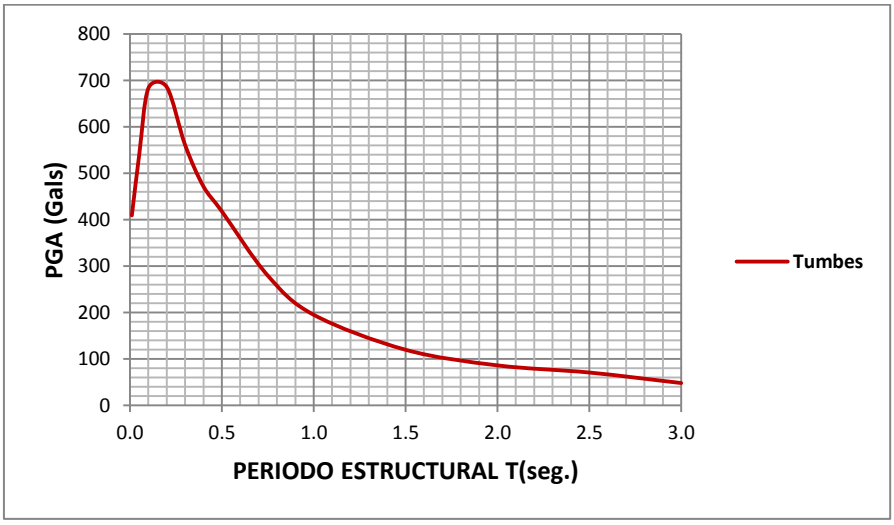




Espectros de peligro uniforme para P. Maldonado, Pucallpa y Puno



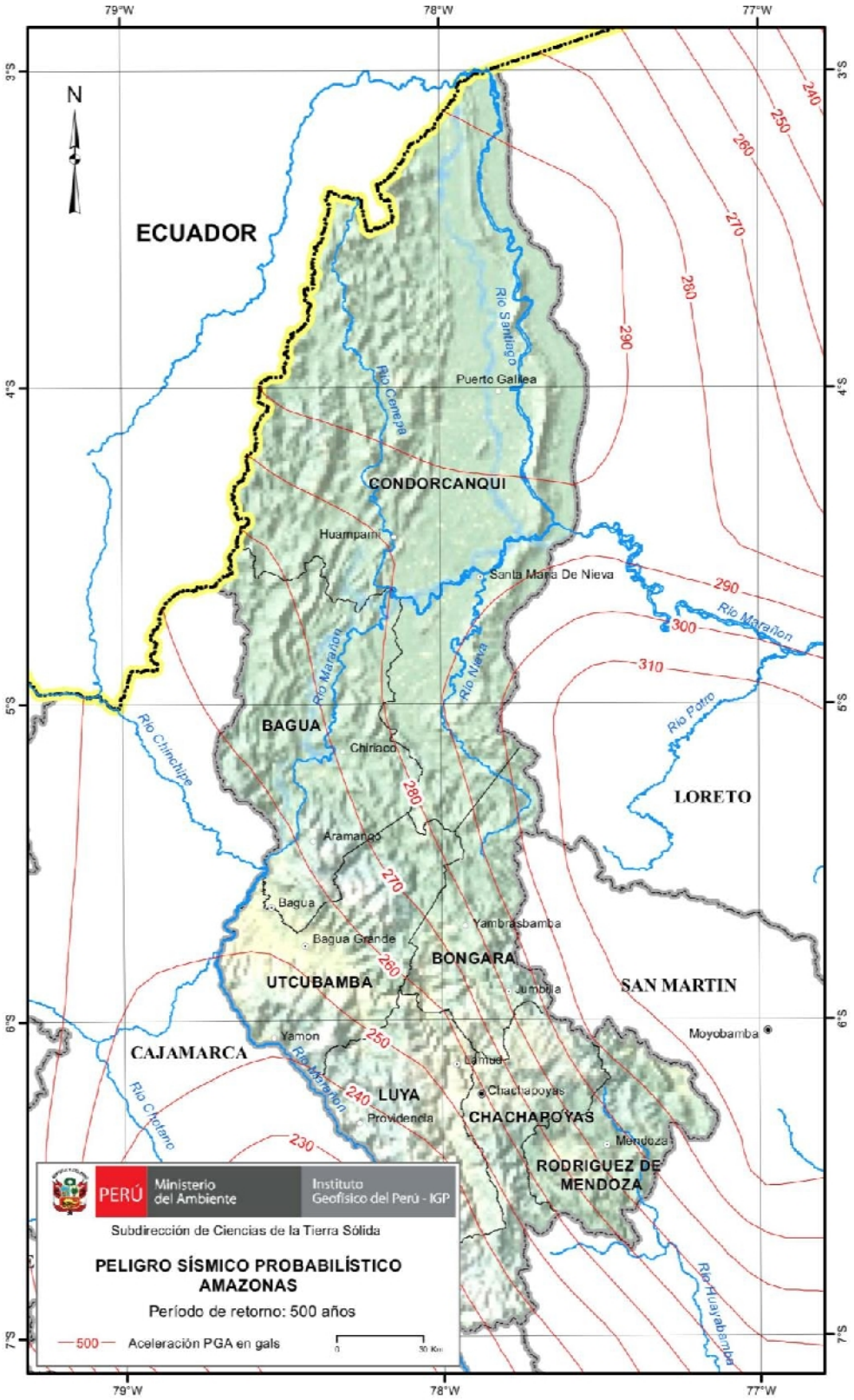




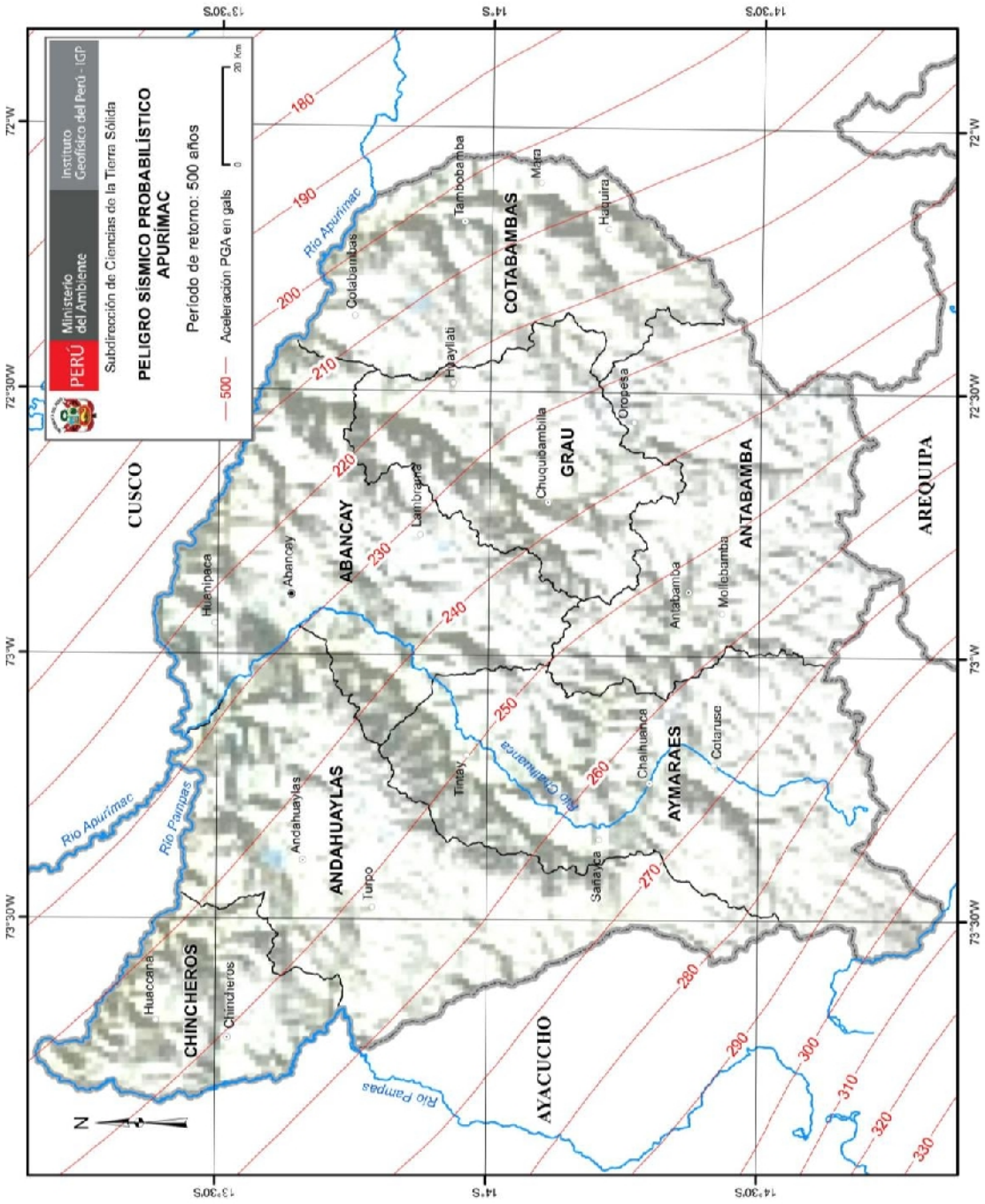
Espectros de peligro uniforme para Tacna, Trujillo y Tumbes

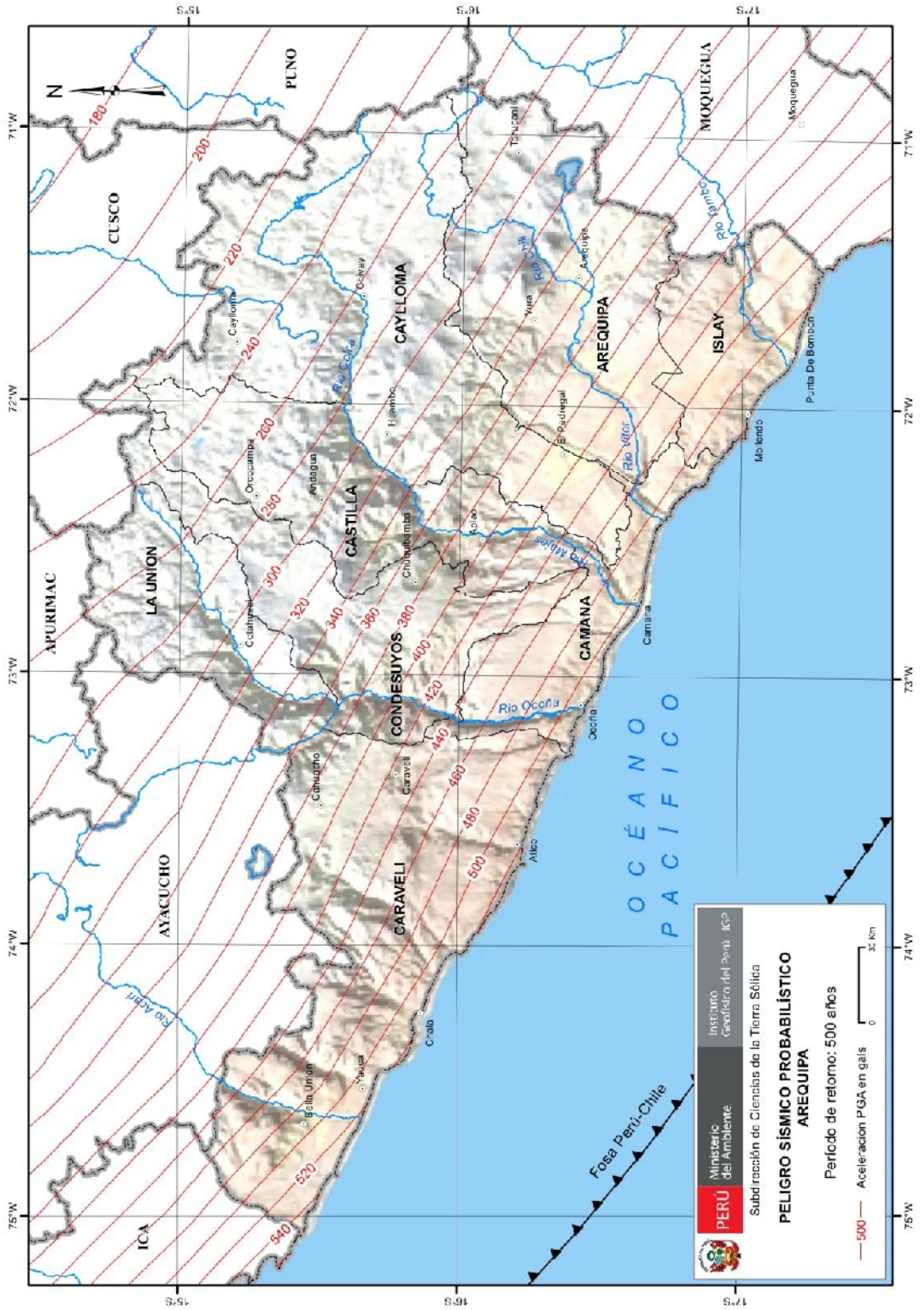
ANEXO 3

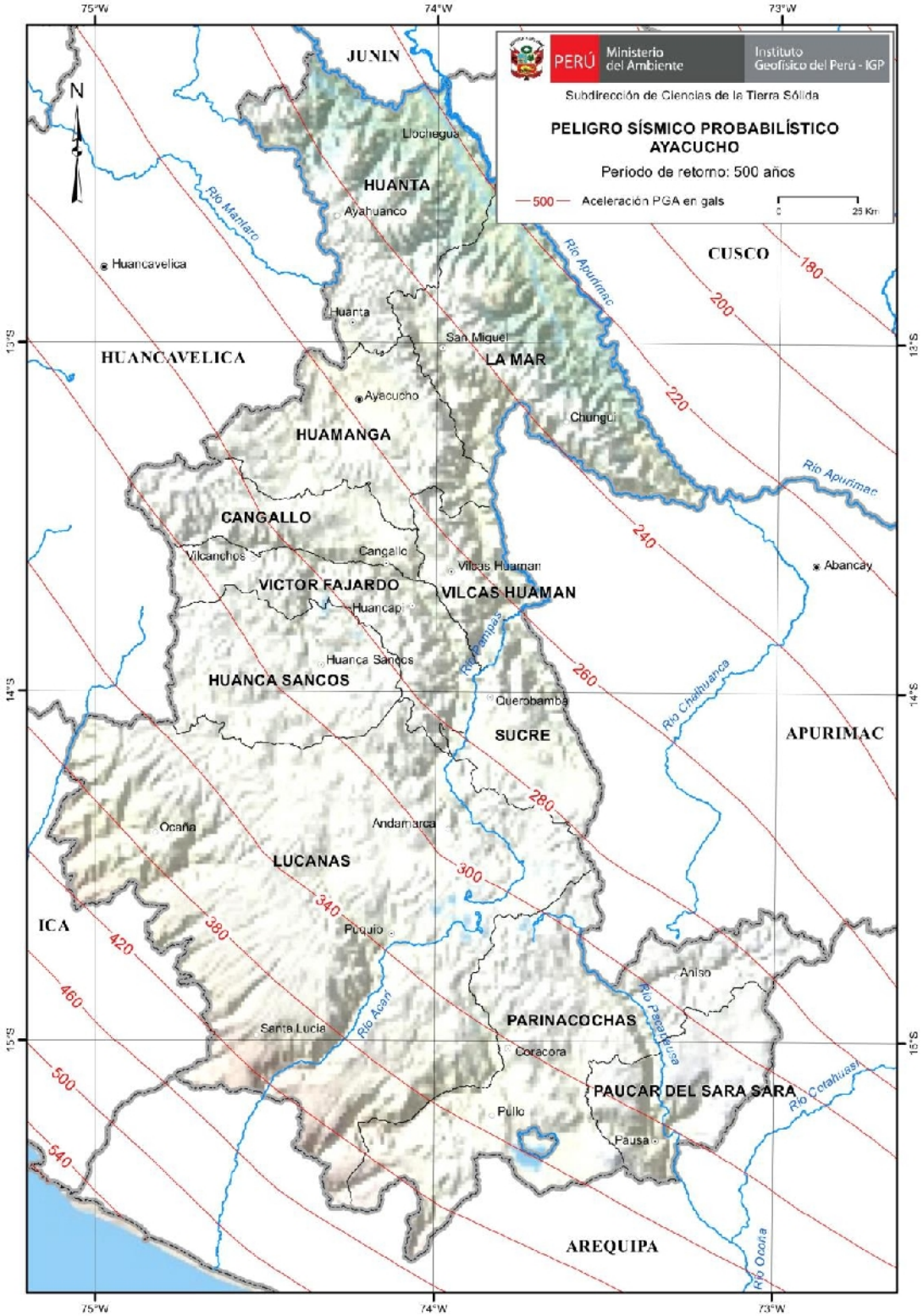
Mapas de aceleraciones para periodos de retorno de 500 años por departamento.

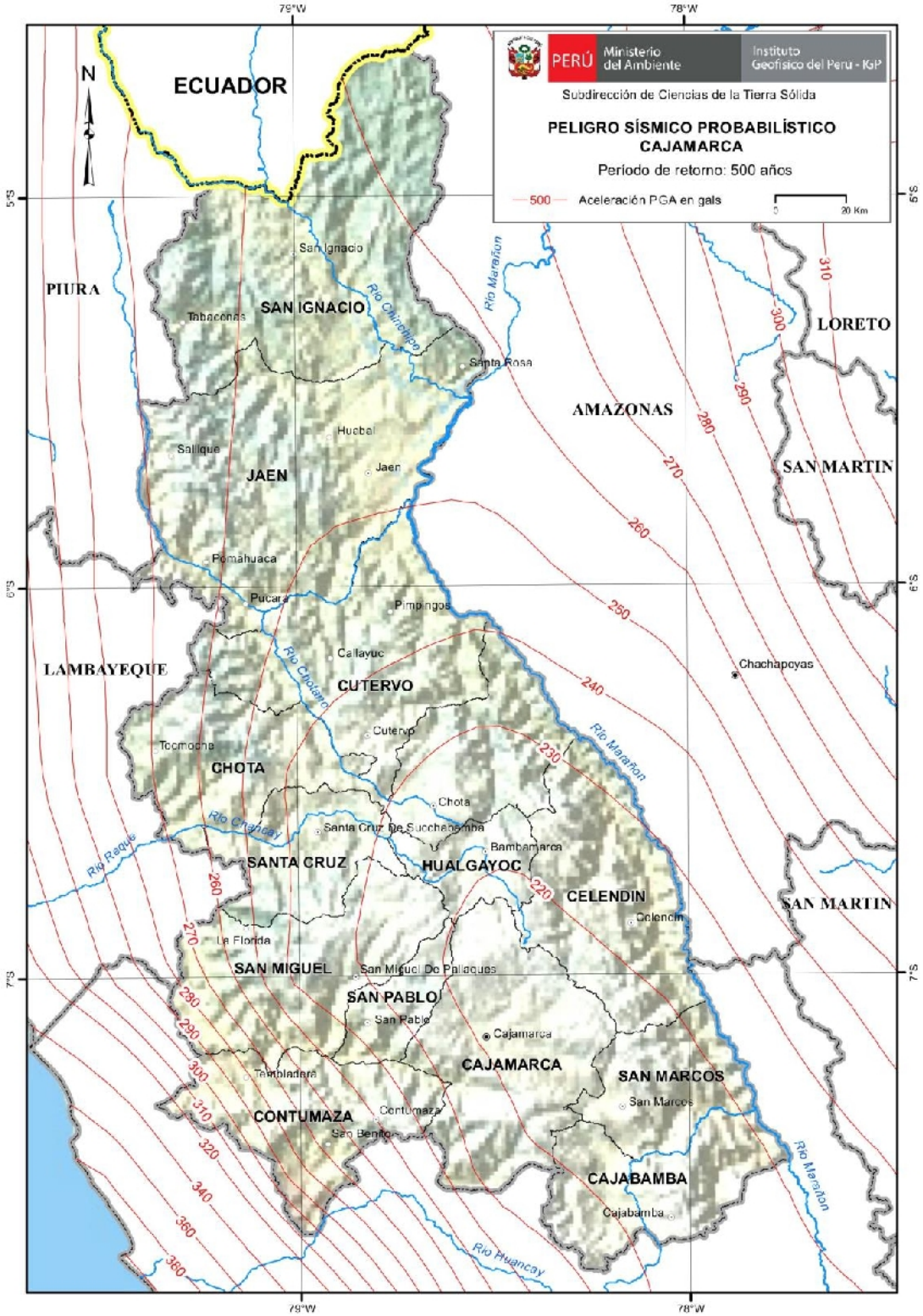

79°W
78°W
77°W
3°S
4°S
5°S
6°S
7°S
N
ECUADOR
Río Santiago
Río Canepa
Puerto Galilea
CONDORCANQUI
Huampami
Santa María De Nieva
Río Marañón
Río Nieva
Río Chinchipe
BAGUA
Chiriaco
Río Pastaza
LORETO
Aramango
Bagua
Bagua Grande
Yambrasbamba
BONGARA
UTCUBAMBA
Jumbilla
SAN MARTIN
Moyobamba
Yamon
CAJAMARCA
Río Marañón
Río Chotano
Lamud
Chachapoyas
LUYA
Providencia
CHACHAPOYAS
Mendoza
RODRIGUEZ DE MENDOZA
Río Huayabamba
240
250
260
270
280
290
300
310
230
PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
AMAZONAS
Período de retorno: 500 años
500
Aceleración PGA en gals
0
50 Km

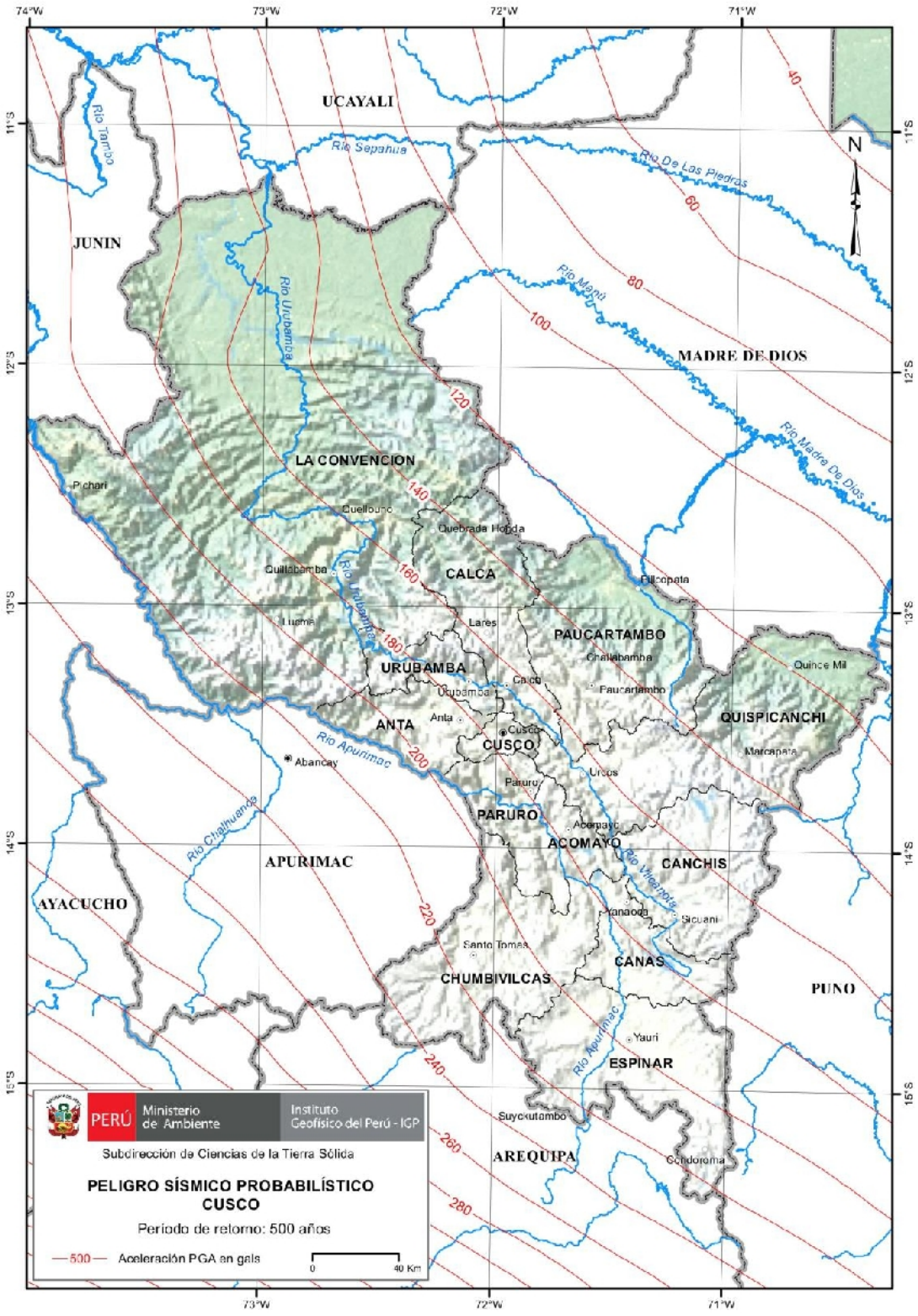

78°W
77°W
8°S
9°S
10°S
N
LA LIBERTAD
Pampas
PALLASCA
Cabana
SIHUAS
Sihuas
Corongo
CORONGO
Río Santa
Macate
POMABAMBA
Pomabamba
Piscobamba
Río Marañon
SAN MARTIN
HUAYLAS
MARISCAL LUZURIAGA
SANTA
Jimbe
Caraz
CARLOS F. FITZCARRALD
San Luis
Llamellin
Chimbote
Yungay
ANTONIO RAYMONDI
Chuccas
YUNGAY
ASUNCION
Samanco
Carhuaz
Quillo
CARHUAZ
Huari
HUARI
Casma
Río Grande
Huaraz
HUARAZ
CASMA
Chavin De Huantar
Pampas
Recuay
HUANUCO
AIJA
Aija
Río Santa
La Caleta De Culebras
RECUAY
Pararin
BOLOGNESI
Huarmey
Chiquian
HUARMEY
Río Fortaleza
Chasquitambo
Ocros
OCROS
Huanchay
Río Ocros
O C É A N O
P A C Í F I C O
LIMA
PERÚ
Ministerio de Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
ANCASH
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0
20 Km
220
230
240
250
260
270
280
300
320
340
360
380
400
420

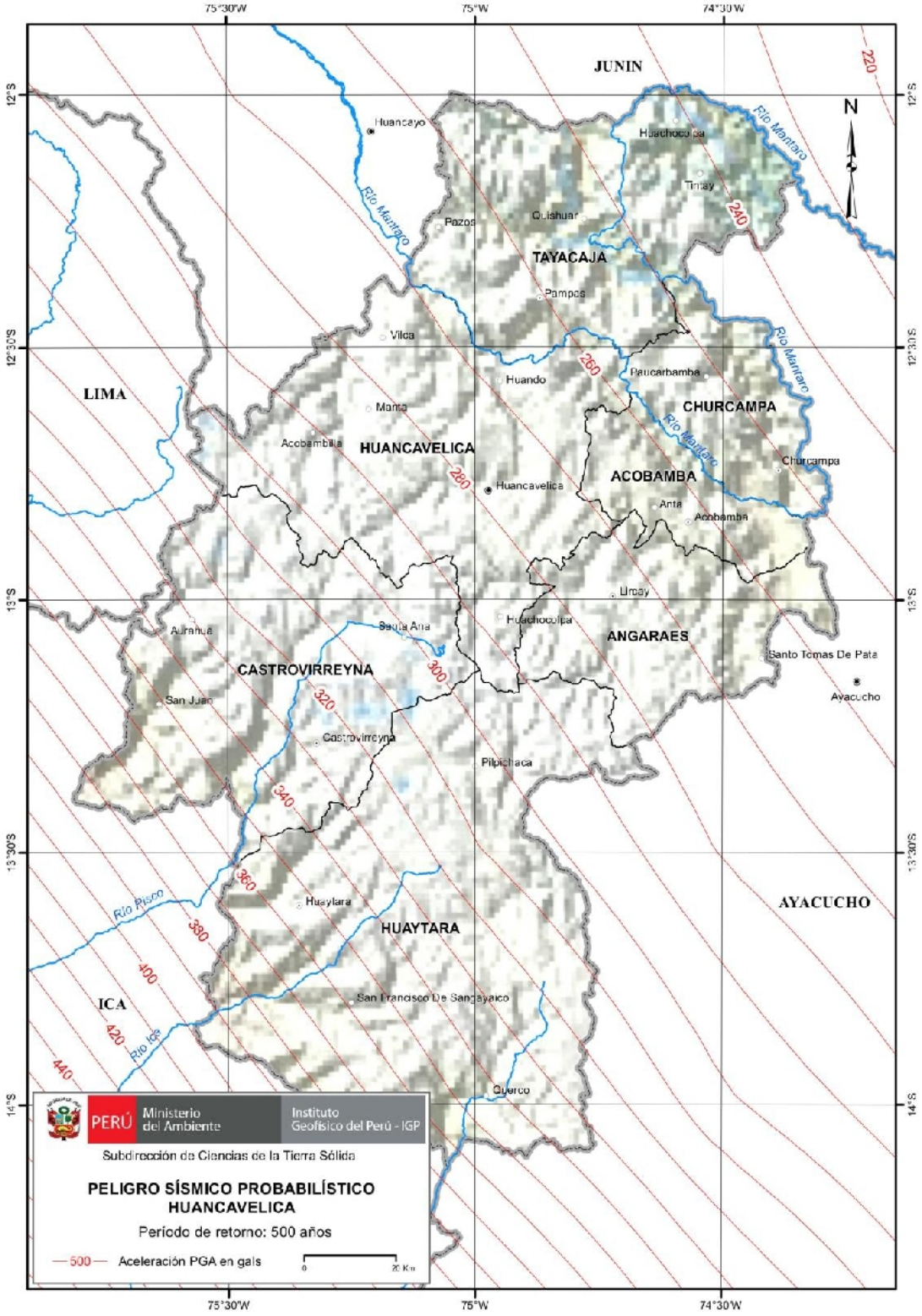

PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
APURÍMAC
Período de retorno: 500 años
500 — Aceleración PGA en gals
0
20 Km
CUSCO
ABANCAY
ANDAHUAYLAS
CHINCHEROS
COTABAMBAS
GRAU
AYMARAES
ANTABAMBA
AREQUIPA
AYACUCHO
Río Apurímac
Río Pampas
Río Chumbao
Abancay
Andahuaylas
Tambobamba
Cotabambas
Chuquibambilla
Chalhuanca
Antabamba
Santa Rosa
Tintay
Turpo
Huaccana
Chincheros
Huanipaca
Lambrama
Haquira
Mara
Challhuahuacho
Colcabamba
Oropesa
Mollebamba
Colcha
N
180
190
200
210
220
230
240
250
260
270
280
290
300
310
320
330
72°W
72°30'W
73°W
73°30'W
13°30'S
14°S
14°30'S

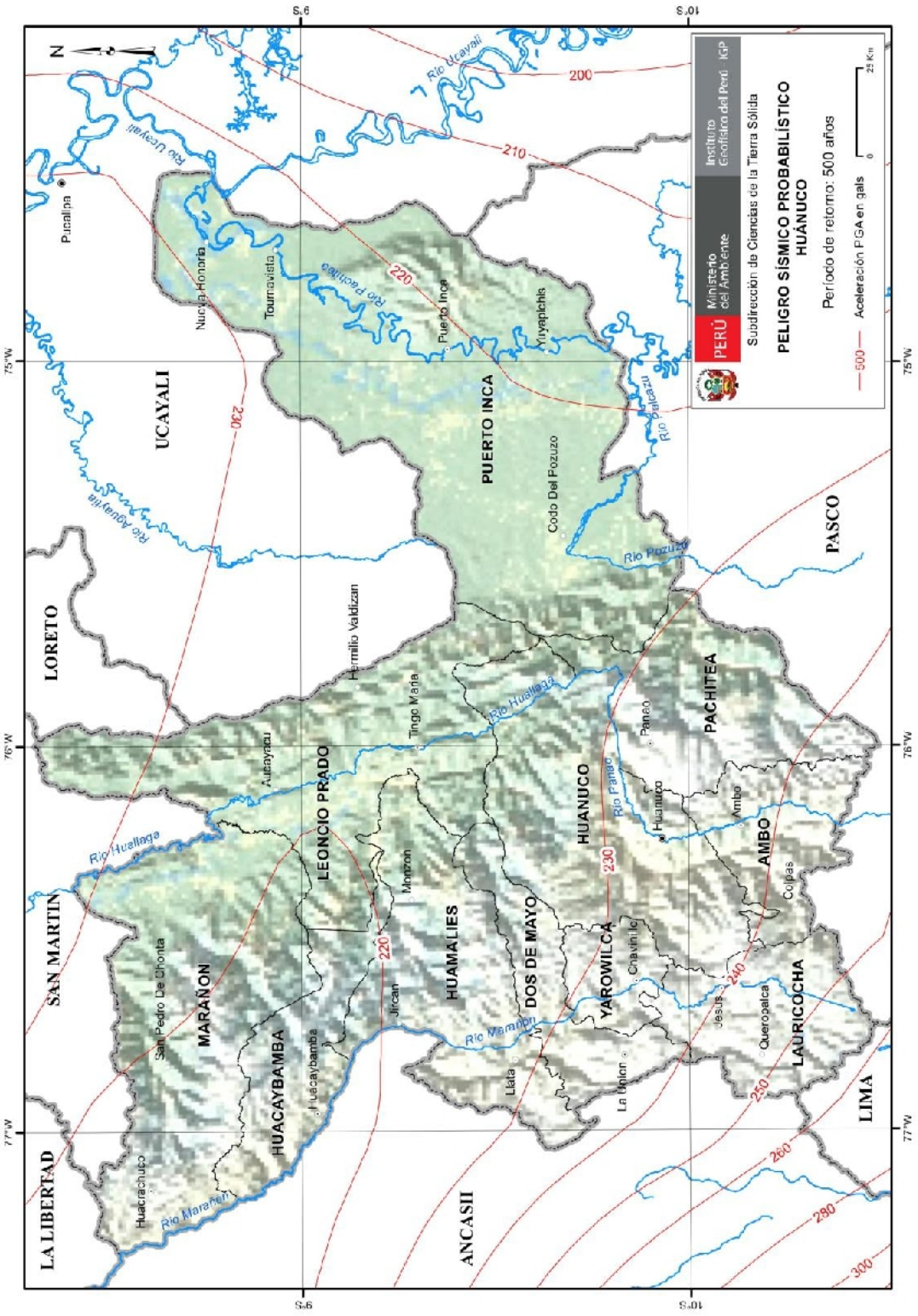

N
PUNO
CUSCO
MOQUEGUA
APURIMAC
LA UNION
CASTILLA
CAYLLOMA
AREQUIPA
ISLAY
CONDESUYOS
CAMANA
AYACUCHO
CARAVELI
ICA
OCÉANO PACÍFICO
Fosa Perú-Chile
Río Ocoña
Río Colca
Río Chili
Río Tambo
Río Yauca
Río Acari
180
200
220
240
260
280
300
320
340
360
380
400
420
440
460
480
500
520
540
PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
AREQUIPA
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0
30 Km

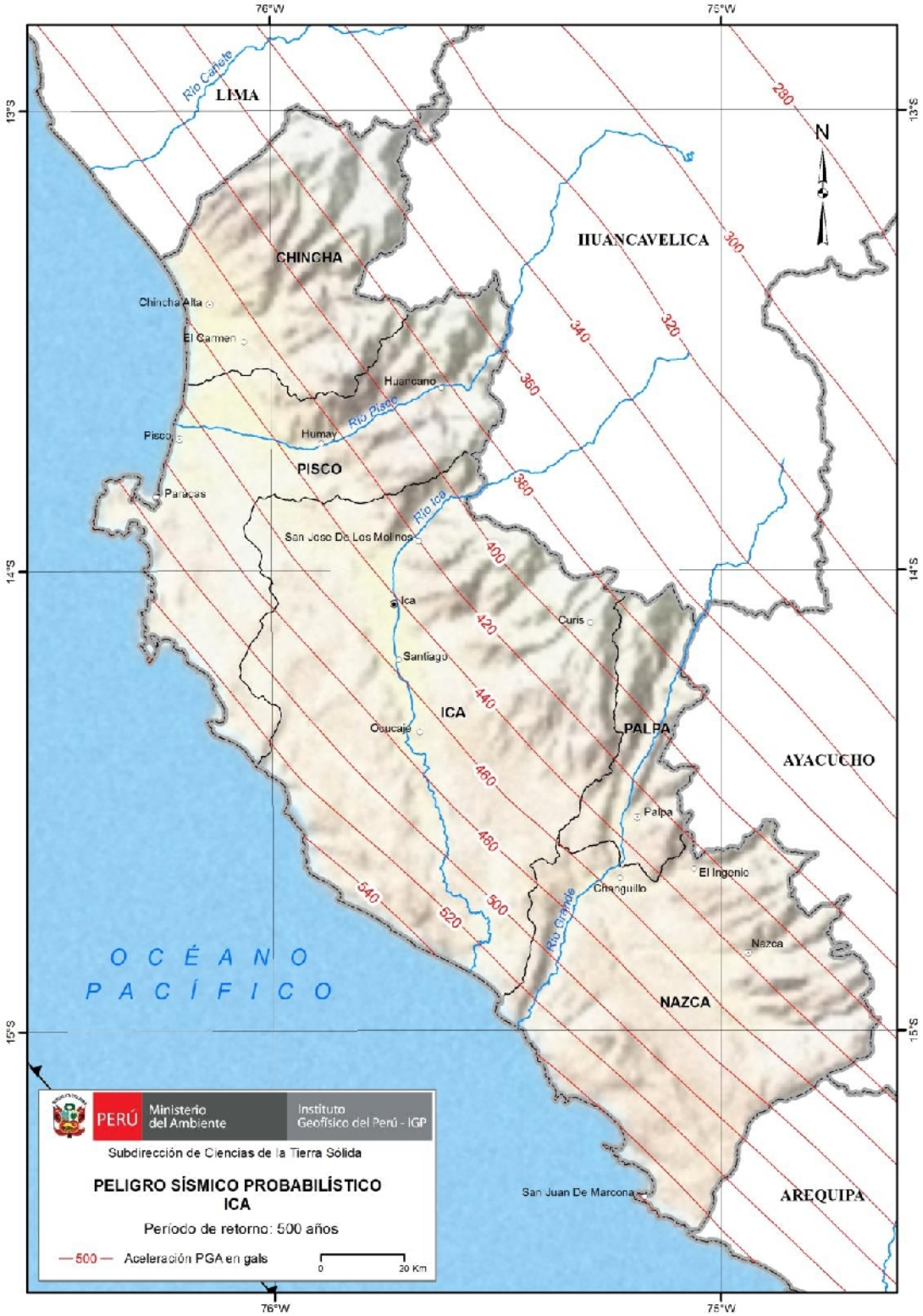

PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
AYACUCHO
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0
25 Km
N
75°W
74°W
73°W
13°S
14°S
15°S
JUNIN
HUANTA
Ayahuanco
Huanta
Llochegua
Huancavelica
HUANCAVELICA
San Miguel
LA MAR
Ayacucho
Chungui
HUAMANGA
CANGALLO
Vilcanchos
Cangallo
Vilcas Huaman
VICTOR FAJARDO
VILCAS HUAMAN
Huancapi
Huanca Sancos
HUANCA SANCOS
Querobamba
SUCRE
APURIMAC
Abancay
Andamarca
Ocaña
LUCANAS
ICA
Puquio
Santa Lucia
Aniso
PARINACOCHAS
Coracora
PAUCAR DEL SARA SARA
Pullo
Pausa
AREQUIPA
CUSCO
Río Mantaro
Río Apurimac
Río Pampas
Río Chalhuanca
Río Acari
Río Pausa-Yauca
Río Colcahuasi
Río Ocoña
180
200
220
240
260
280
300
340
380
420
460
500
540

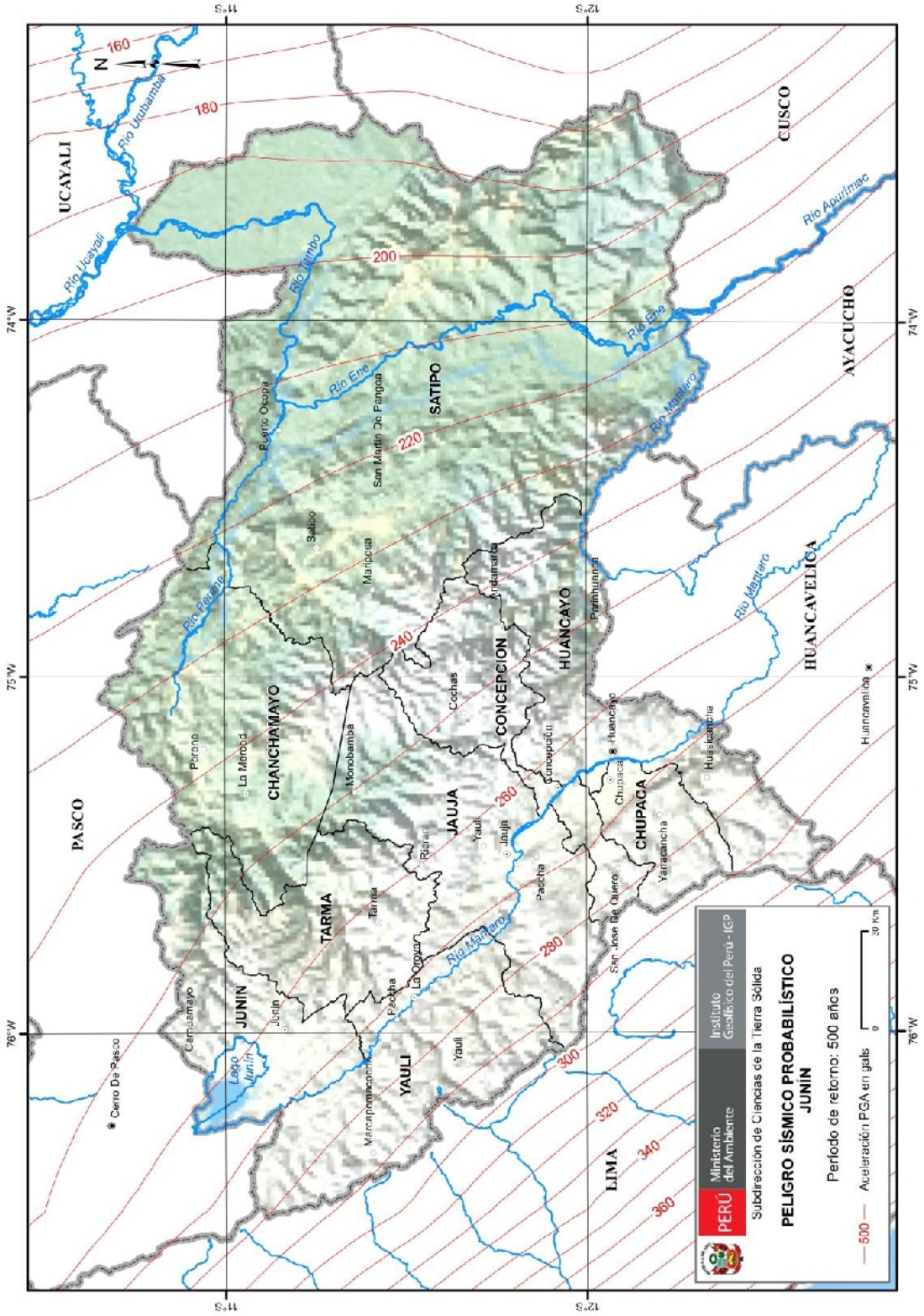

PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
CAJAMARCA
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0 20 Km
N
ECUADOR
PIURA
LAMBAYEQUE
LORETO
AMAZONAS
SAN MARTIN
SAN IGNACIO
JAEN
CUTERVO
CHOTA
SANTA CRUZ
HUALGAYOC
CELENDIN
SAN MIGUEL
SAN PABLO
CAJAMARCA
SAN MARCOS
CONTUMAZA
CAJABAMBA
San Ignacio
Tabaconas
Santa Rosa
Huabal
Sallique
Jaen
Pomahuaca
Pucara
Pimpingos
Callayuc
Cutervo
Chachapoyas
Tocmoche
Chota
Santa Cruz De Succhabamba
Bambamarca
La Florida
San Miguel De Pallaques
San Pablo
Cajamarca
Tembladera
Contumaza
San Benito
San Marcos
Celendin
Cajabamba
Río Marañon
Río Chinchipe
Río Chotano
Río Crisnejas
Río Reque
Río Huancay
310
300
290
280
270
260
250
240
230
220
260
270
280
290
300
310
320
340
360
380
79°W
78°W
5°S
6°S
7°S

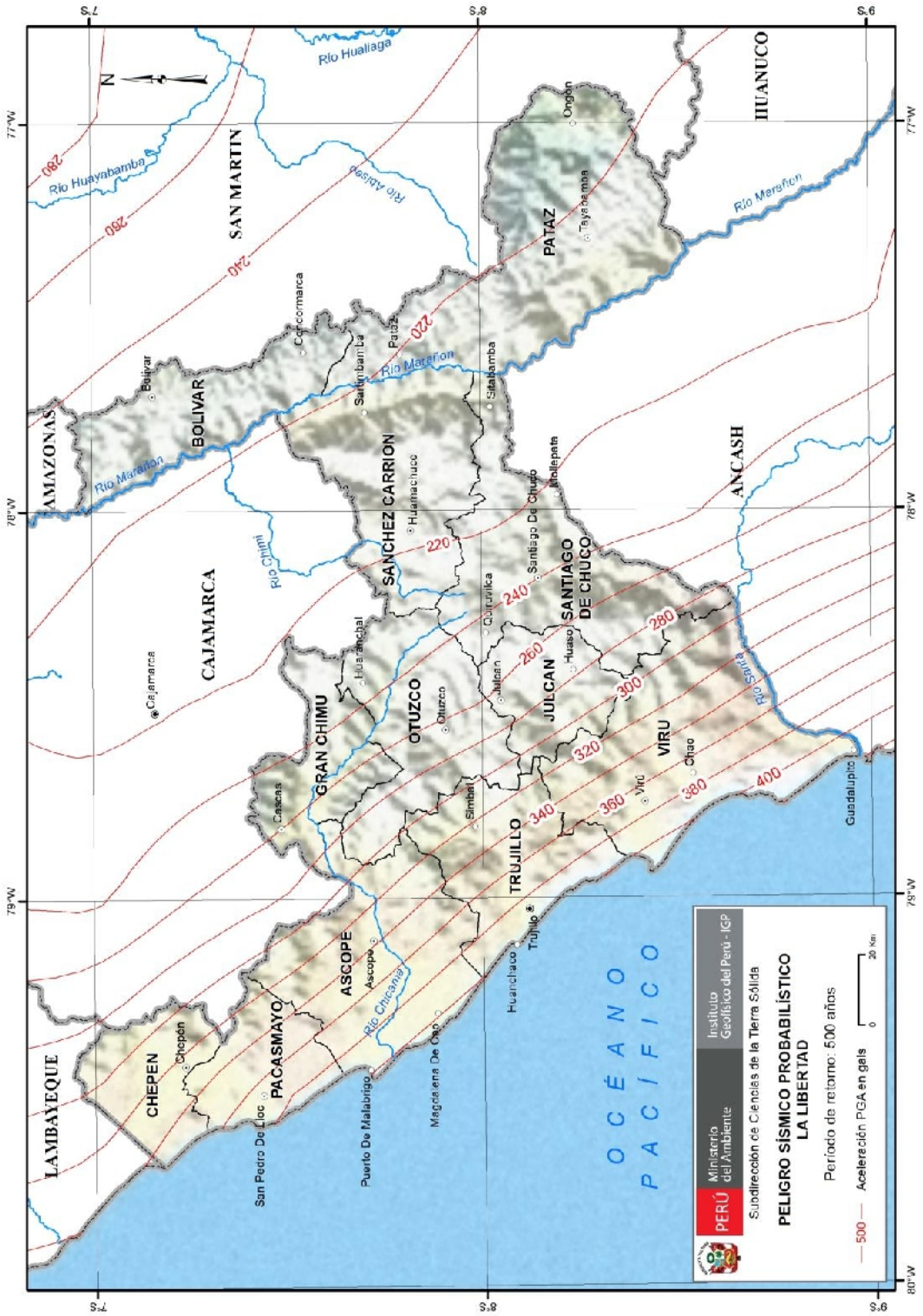

74°W
73°W
72°W
71°W
11°S
12°S
13°S
14°S
15°S
UCAYALI
JUNIN
MADRE DE DIOS
LA CONVENCION
CALCA
URUBAMBA
ANTA
CUSCO
PAUCARTAMBO
QUISPICANCHI
PARURO
ACOMAYO
CANCHIS
APURIMAC
AYACUCHO
CHUMBIVILCAS
CANAS
ESPINAR
AREQUIPA
PUNO
Río Tambo
Río Sepahua
Río De Las Piedras
Río Manú
Río Urubamba
Río Madre De Dios
Río Apurimac
Río Vilcanota
Río Challhuanca
Pichari
Quellouno
Quebrada Honda
Quillabamba
Huayllabamba
Lares
Calca
Urubamba
Anta
Cusco
Abancay
Paruro
Acomayo
Yanaoca
Sicuani
Santo Tomas
Yauri
Suyckutambo
Pillcopata
Challabamba
Paucartambo
Quince Mil
Marcapata
Urcos
Condoroma
N
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
260
280
PERÚ
Ministerio de Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
CUSCO
Período de retorno: 500 años
500
Aceleración PGA en gals
0
40 Km

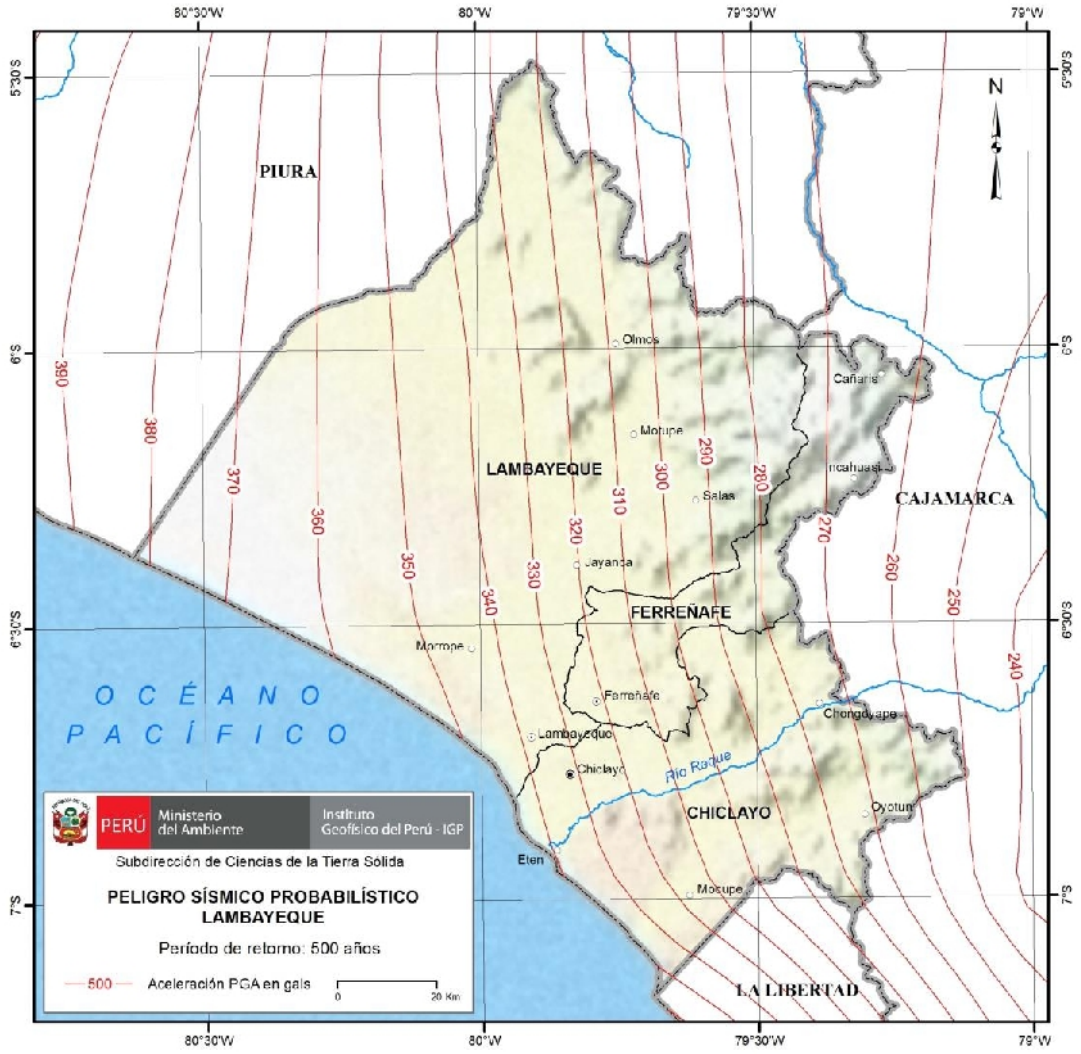

75°30'W
75°W
74°30'W
12°S
12°30'S
13°S
13°30'S
14°S
JUNIN
LIMA
ICA
AYACUCHO
HUANCAVELICA
TAYACAJA
CHURCAMPA
ACOBAMBA
ANGARAES
CASTROVIRREYNA
HUAYTARA
Huancayo
Huachocolpa
Tinkay
Pazos
Quishuar
Pampas
Vilca
Huando
Paucarbamba
Manta
Acobambilla
Huancavelica
Churcampa
Anta
Acobamba
Urcay
Huachocolpa
Santa Ana
Santo Tomas De Pata
Ayacucho
San Juan
Castrovirreyna
Pilpichaca
Huaytara
San Francisco De Sangayaico
Querco
Río Mantaro
Río Pisco
Río Ica
220
240
260
280
300
320
340
360
380
400
420
440
N
PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
HUANCAVELICA
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0
20 Km


PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
HUÁNUCO
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
25 Km
N
UCAYALI
PUERTO INCA
PASCO
LORETO
SAN MARTIN
LA LIBERTAD
HUANUCO
LEONCIO PRADO
HUAMALIES
MARAÑON
HUACAYBAMBA
DOS DE MAYO
YAROWILCA
PACHITEA
AMBO
LAURICOCHA
LIMA
ANCASH
Río Ucayali
Río Pachitea
Río Aguaytia
Río Pozuzo
Río Huallaga
Río Marañón
Río Pangoa
Río Mantaro
Río Chinchao
Río Ambo
Río Tingo
Río Jesus
Río Lauricocha
Río La Unión
Río Llata
Río Jircan
Río Huacaybamba
Río Huallaga
Río Huallaga
Río Huallaga

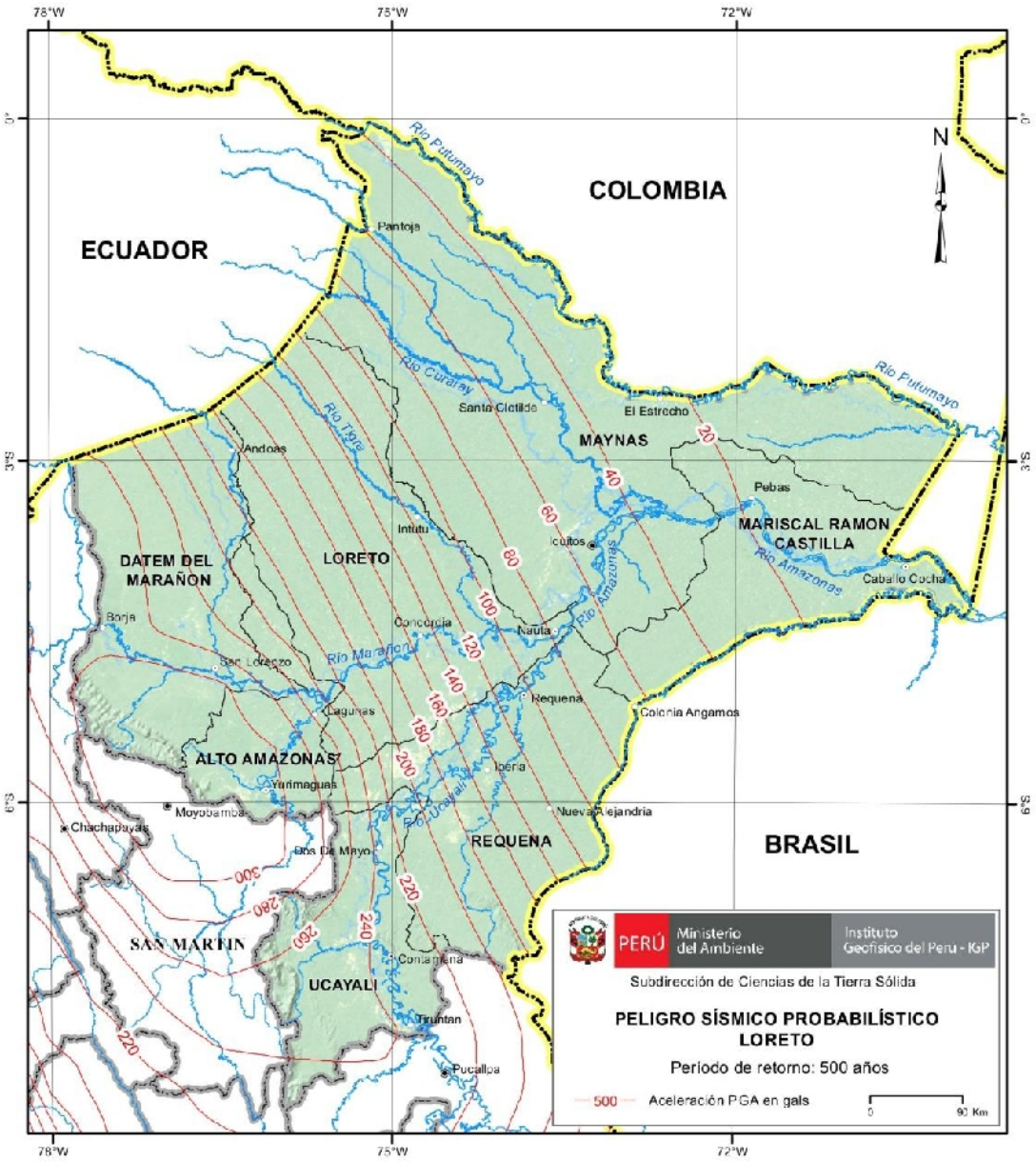

76°W
75°W
13°S
14°S
15°S
Río Cañete
LIMA
CHINCHA
Chincha Alta
El Carmen
Huancano
Río Pisco
Pisco
Humay
PISCO
Paracas
San Jose De Los Molinos
Río Ica
Ica
Santiago
Ocucaje
ICA
HUANCAVELICA
Curis
PALPA
Palpa
AYACUCHO
El Ingenio
Changuillo
Río Grande
Nazca
NAZCA
AREQUIPA
San Juan De Marcona
OCÉANO PACÍFICO
290
300
320
340
360
380
400
420
440
460
480
500
520
540
N
PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
ICA
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0
20 Km

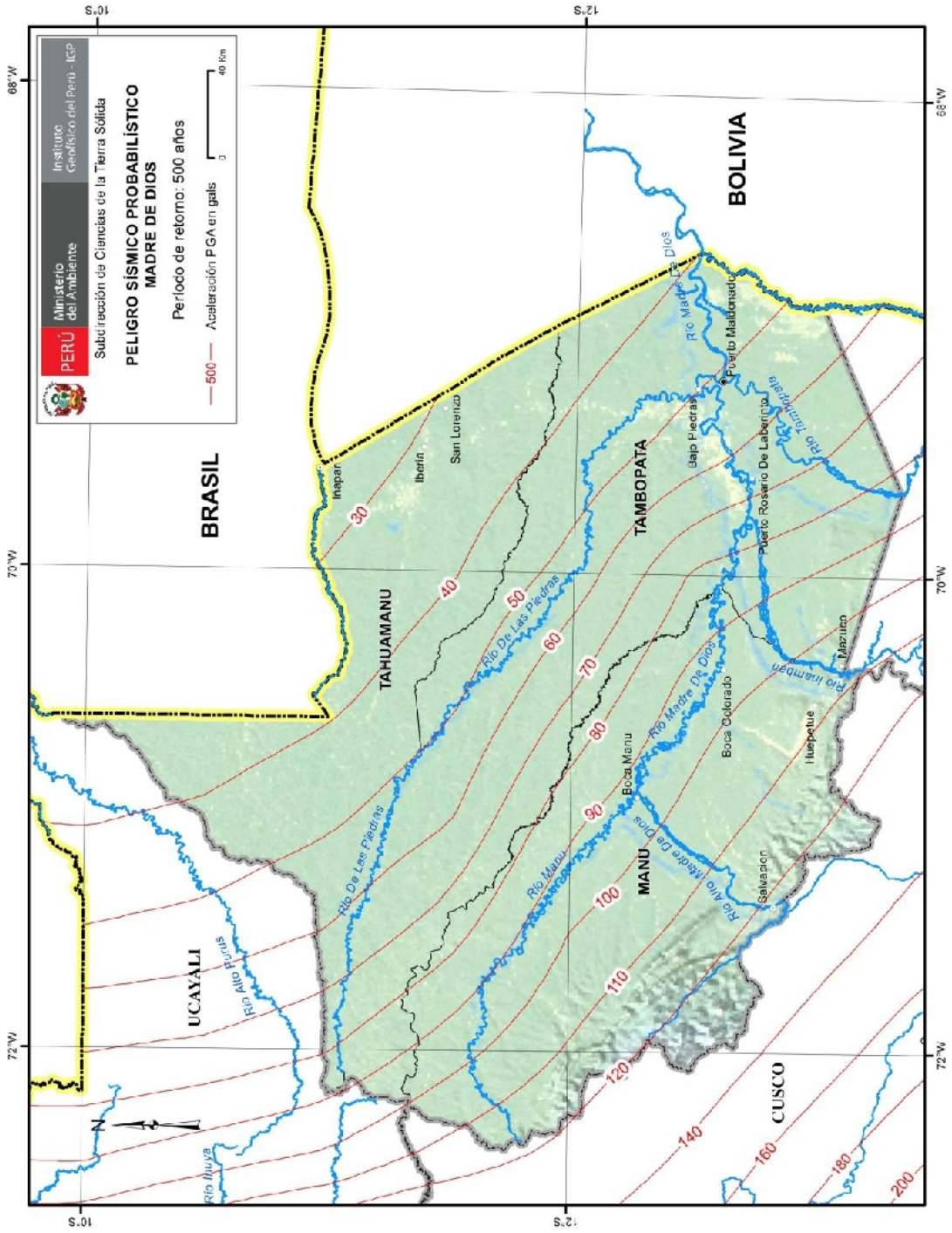

PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
JUNÍN
Período de retorno: 500 años
Aceleración PGA en gals
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
UCAYALI
CUSCO
AYACUCHO
HUANCAVELICA
LIMA
PASCO
SATIPO
CHANCHAMAYO
CONCEPCION
HUANCAYO
JAUJA
CHUPACA
TARMA
YAULI
JUNÍN
Río Urubamba
Río Ucayali
Río Tambo
Río Apurímac
Río Ene
Río Mantaro
Río Perene
Puerto Ocopa
San Martín De Pangoa
Satipo
Mariposa
Andamarca
Parihuanca
Perene
La Merced
Monobamba
Cochas
Concepción
Huancayo
Chupaca
Huaytacancha
Huancavelica
Yauli
Jauja
Paccha
Tarma
Río Mantaro
Cerro De Pasco
Lago Junín
Marcapomacocha
Pachachaca
San José De Quero
Yanacancha
160
180
200
220
240
260
280
300
320
340
360
500
0
30 Km
74°W
75°W
76°W
11°S
12°S

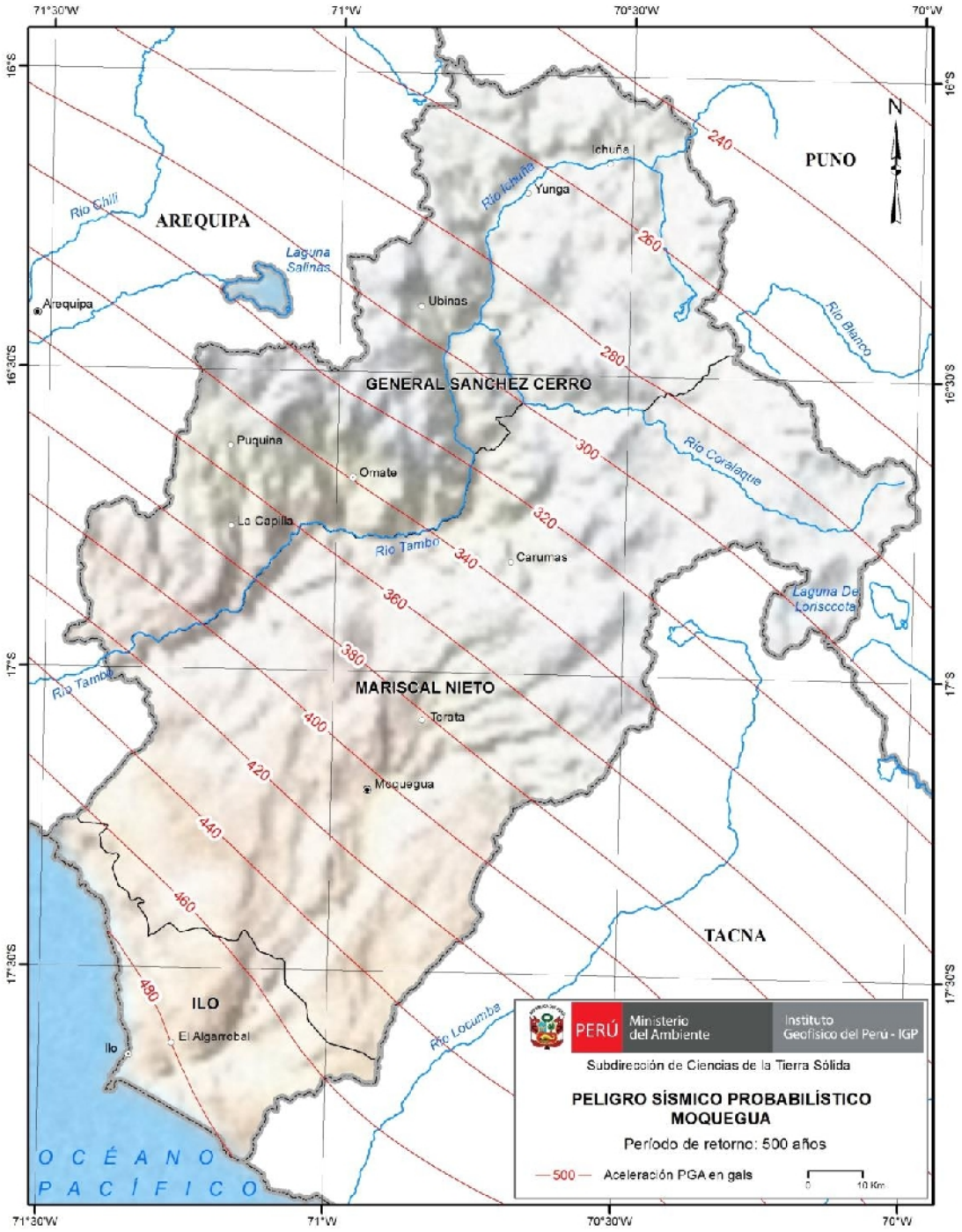

PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
LA LIBERTAD
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0 20 Km
OCÉANO PACÍFICO
LAMBAYEQUE
CHEPEN
PACASMAYO
ASCOPE
GRAN CHIMU
CAJAMARCA
OTUZCO
JULCAN
SANTIAGO DE CHUCO
TRUJILLO
VIRU
SANCHEZ CARRION
BOLIVAR
SAN MARTIN
AMAZONAS
PATAZ
HUANUCO
ANCASH
Río Marañon
Río Huallaga
Río Huayabamba
Río Chimi
Río Chicama
Río Santa
220
240
260
280
300
320
340
360
380
400

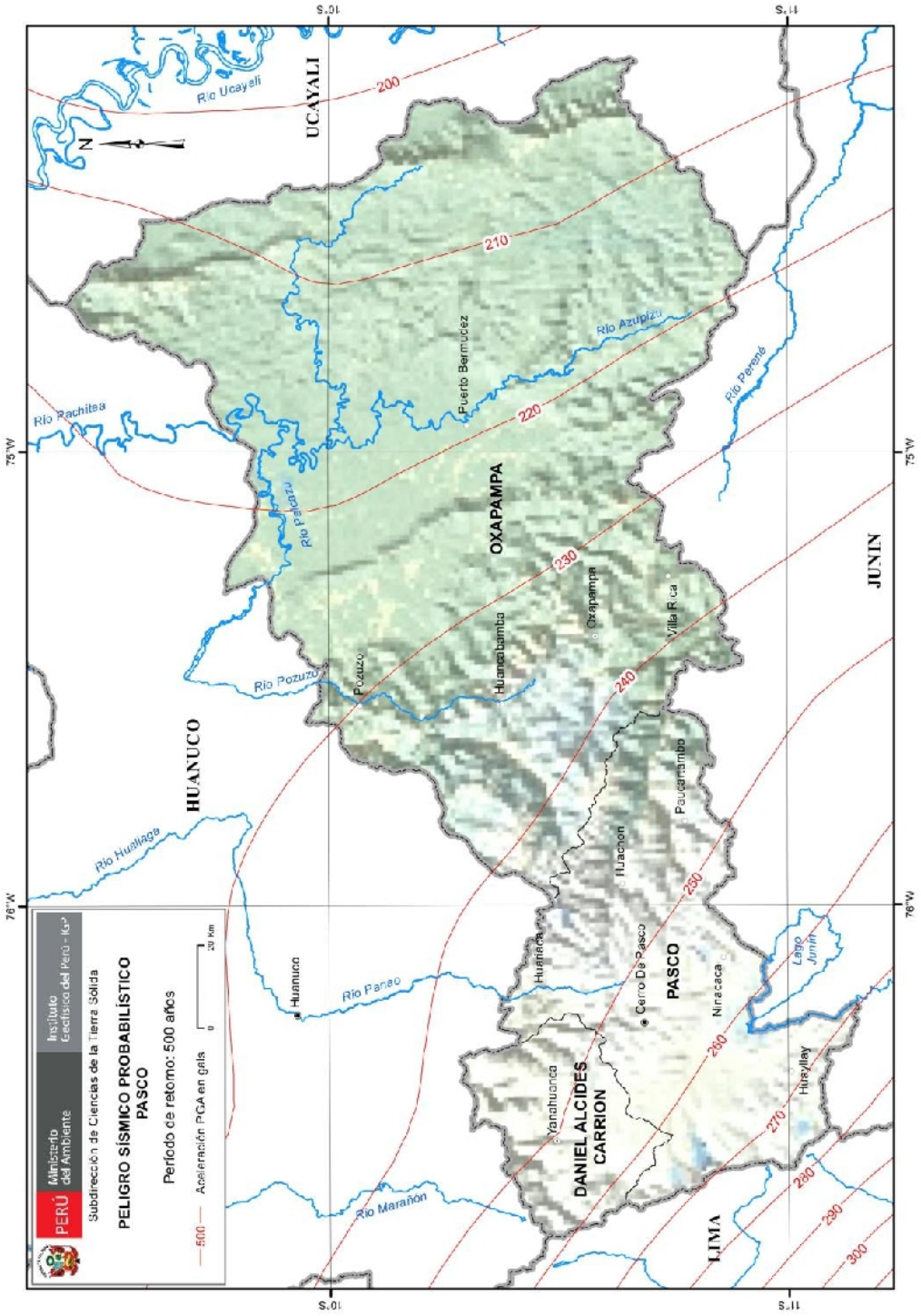

80°30'W
80°W
79°30'W
79°W
5°30'S
6°S
6°30'S
7°S
N
PIURA
LAMBAYEQUE
CAJAMARCA
FERREÑAFE
CHICLAYO
LA LIBERTAD
OCÉANO PACÍFICO
Olmos
Motupe
Salas
Jayanca
Mórrope
Ferreñafe
Lambayeque
Chiclayo
Eten
Cañaris
Incahuasi
Chongoyape
Oyotun
Río Reque
PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
LAMBAYEQUE
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0
20 Km

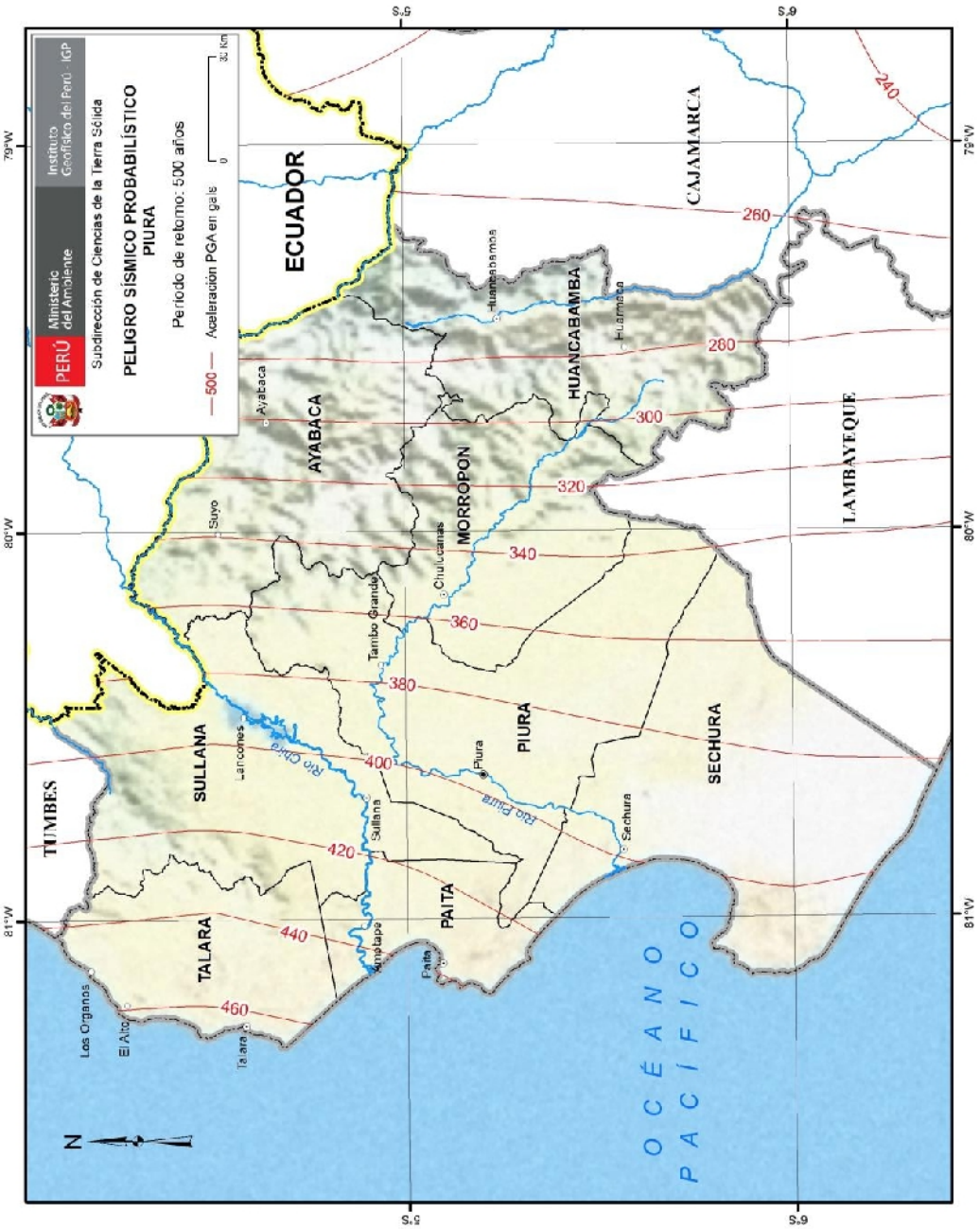

78°W
77°W
76°W
11°S
12°S
13°S
ANCASH
HUANUCO
CAJATAMBO
BARRANCA
Río Pativilca
Cajatambo
Barranca
Ambar
OYON
Oyon
Cerro De Pasco
PASCO
N
240
260
280
300
320
340
360
380
400
420
Río Huaura
Huacho
Sayan
Santa Cruz
HUAURA
Pima
Río Chancay
HUARAL
Huaral
Canta
CANTA
Yangas
Chicla
JUNIN
Río Chillón
Matucana
Río Rimac
HUAROCHIRI
Callao
Lima
LIMA
Anticcuia
Tanta
Santo Domingo De Los Olleros
Huancaya
San Bartolo
Río Mala
Omas
Yauyos
YAUYOS
Mala
Coayllo
Tupe
CAÑETE
Río Cañete
Lunahuana
San Vicente De Cañete
ICA
O C É A N O
P A C Í F I C O
PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
LIMA
Período de retorno: 500 años
500
Aceleración PGA en gals
0
25 Km

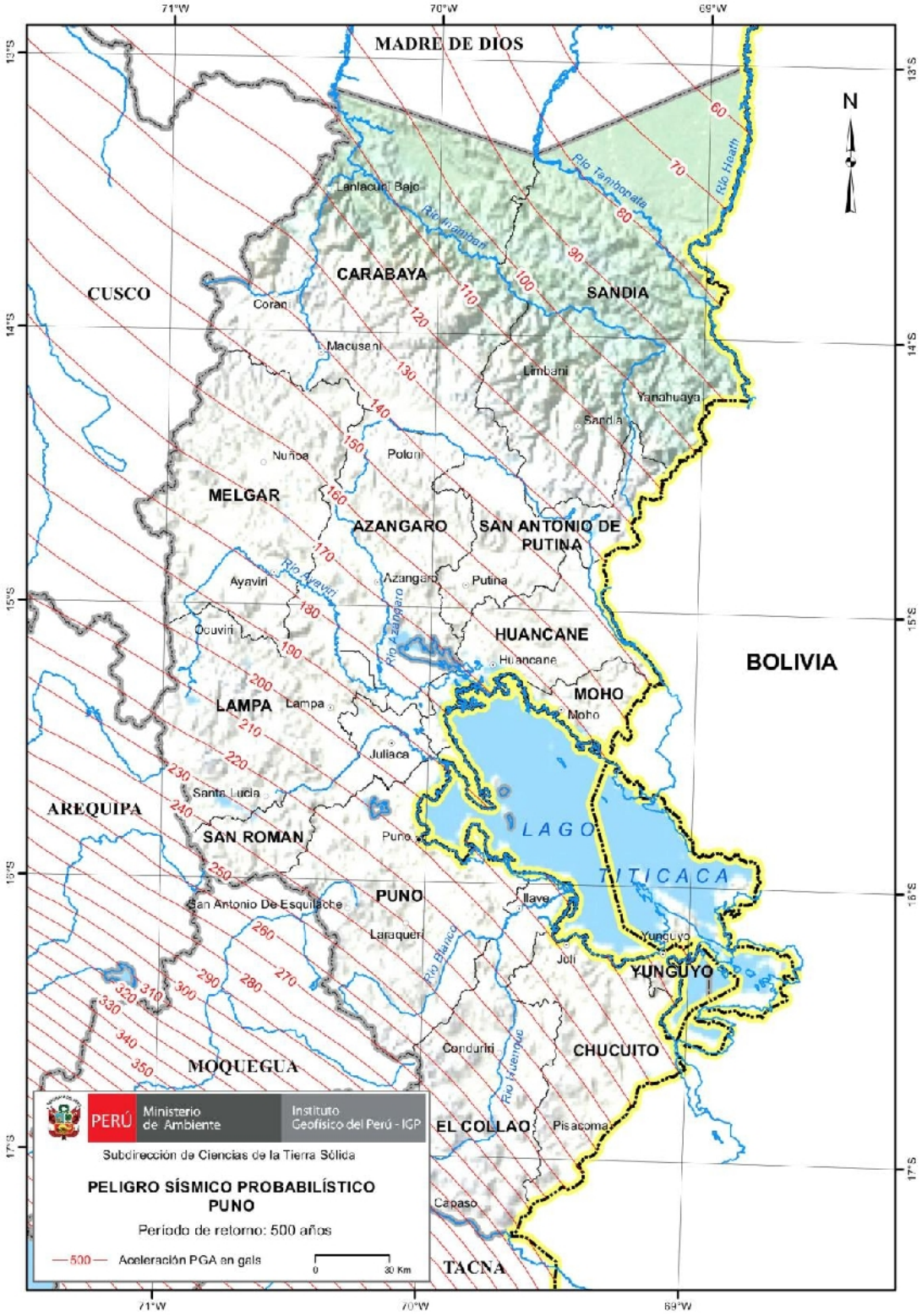

78°W
75°W
72°W
0°
3°S
6°S
N
COLOMBIA
ECUADOR
BRASIL
Río Putumayo
Pantoja
Río Curaray
Santa Clotilde
El Estrecho
MAYNAS
Río Tigre
Andoas
Pebas
Intuto
Iquitos
MARISCAL RAMON CASTILLA
DATEM DEL MARAÑON
LORETO
Río Amazonas
Caballo Cocha
Concordia
Nauta
Borja
San Lorenzo
Río Marañon
Requena
Colonia Angamos
Lagunas
ALTO AMAZONAS
Yurimaguas
Iberia
Nueva Alejandria
Moyobamba
Chachapoyas
Dos De Mayo
REQUENA
SAN MARTIN
UCAYALI
Contamana
Tiruntan
Pucallpa
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
LORETO
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0
90 Km

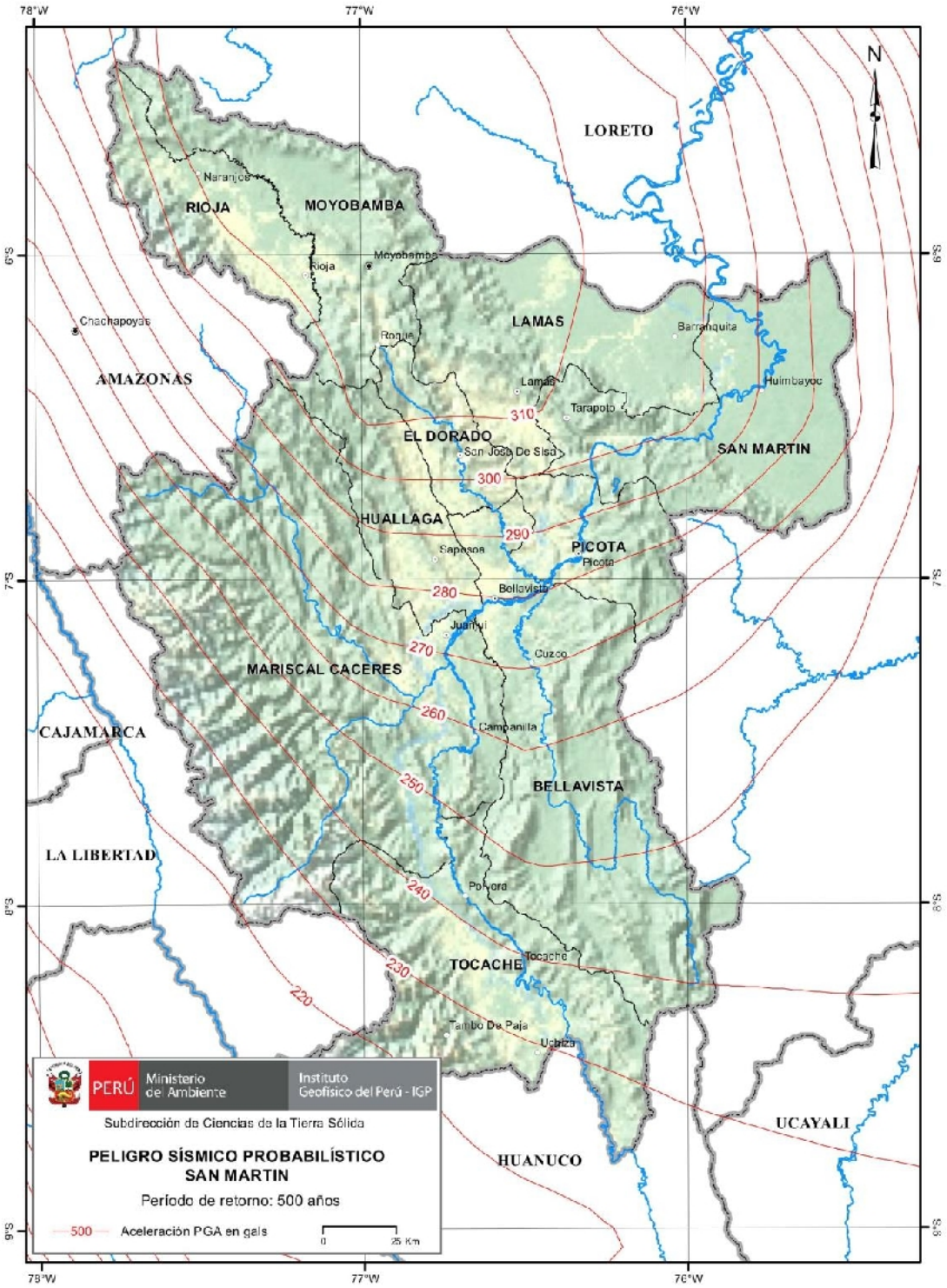

PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
MADRE DE DIOS
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0
40 Km
BRASIL
BOLIVIA
CUSCO
TAHUAMANU
TAMBOPATA
MANU
UCAYALI
Inapari
Iberia
San Lorenzo
Puerto Maldonado
Río Madre De Dios
Río Tambopata
Bajo Piedras
Puerto Rosario De Laberinto
Río De Las Piedras
Boca Manu
Boca Colorado
Río Manu
Río Alto Purus
Río Inuya
Río Alto Madre De Dios
Río Heath
Mazuko
Huepetue
Salvación
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
140
160
180
200
68°W
70°W
72°W
10°S
12°S
N

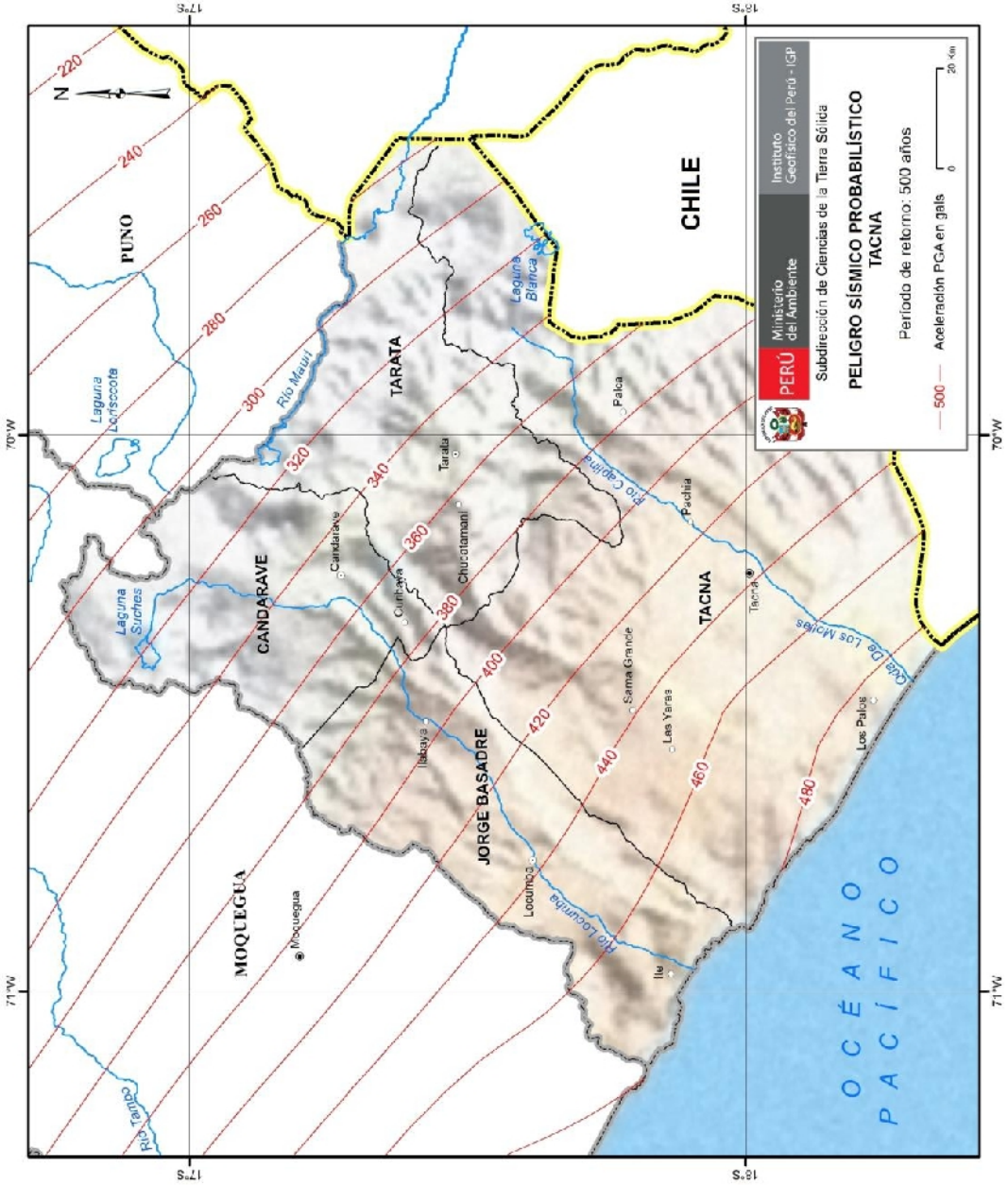

71°30'W
71°W
70°30'W
70°W
16°S
16°30'S
17°S
17°30'S
N
PUNO
AREQUIPA
GENERAL SANCHEZ CERRO
MARISCAL NIETO
ILO
TACNA
Ichuña
Yunga
Ubinas
Arequipa
Puquina
Ornate
La Capilla
Carumas
Torata
Moquegua
Ilo
El Algarrobal
Laguna Salinas
Laguna De Lonsccota
Río Chili
Río Ichuña
Río Blanco
Río Coralaque
Río Tambo
Río Locumba
240
260
280
300
320
340
360
380
400
420
440
460
480
OCÉANO PACÍFICO
PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
MOQUEGUA
Período de retorno: 500 años
500
Aceleración PGA en gals
0
10 Km

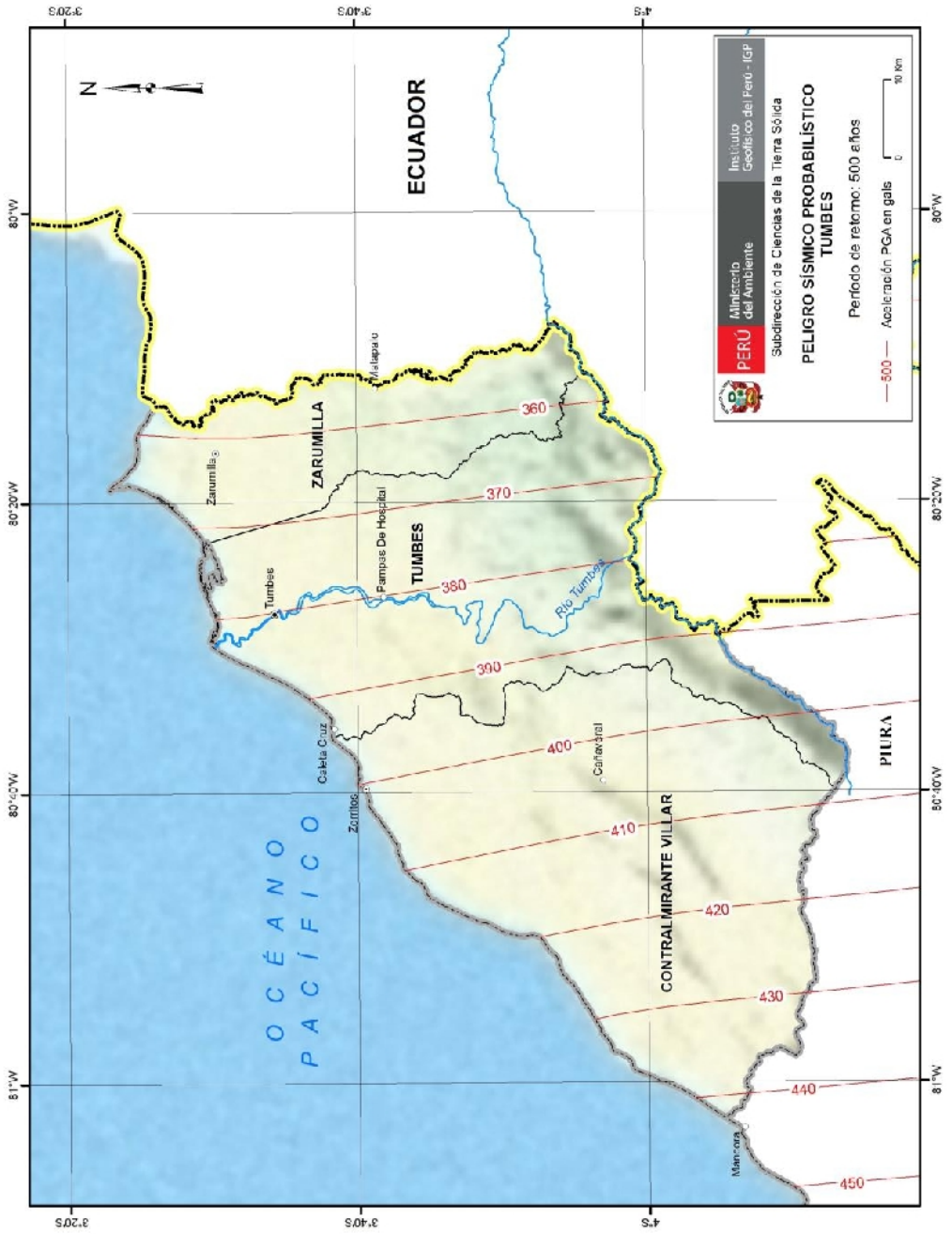

PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
PASCO
Período de retorno: 500 años
Aceleración PGA en gals
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
UCAYALI
HUANUCO
OXAPAMPA
PASCO
JUNIN
DANIEL ALCIDES CARRION
LIMA
Río Ucayali
Río Pachitea
Río Pozuzo
Río Huallaga
Río Perené
Río Azupizu
Río Pichis
Río Mantaro
Río Marañón
Río Paucartambo
Río Tulumayo
Río Huachón
Río Pariac
Río Huaricolca
Río Yanahuanca
Río Huayllay
Río Tingo
Río Huancabamba
Río Oxapampa
Río Villa Rica
Río Puerto Bermúdez
Río Cerro De Pasco
Río Huánuco
Río Lago Junín
Río Nirácaca
Río Chaupimarca
Río Yanacancha
Río Simón Bolívar
Río Ninacaca
Río Vicco
Río Huayllay
Río Tinyahuarco
Río Ticlacayán
Río Huachón
Río Paucartambo
Río Oxapampa
Río Villa Rica
Río Huancabamba
Río Puerto Bermúdez
Río Pozuzo
Río Huánuco
Río Pariac
Río Cerro De Pasco
Río Lago Junín
Río Nirácaca
Río Huayllay
Río Yanahuanca
Río Marañón
200
210
220
230
240
250
260
270
280
290
300
500
0
20 Km
10°S
11°S
75°W
76°W

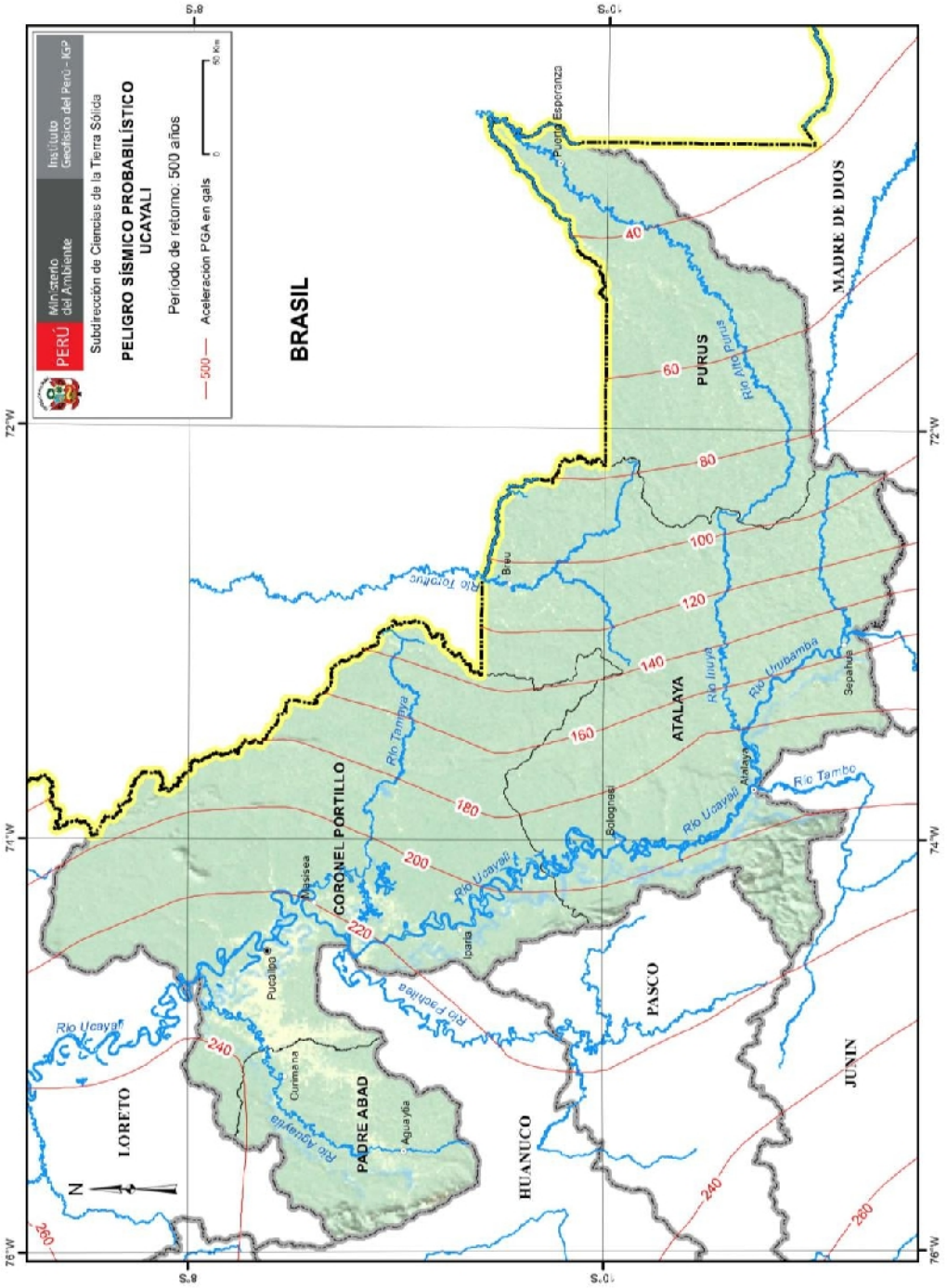

PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
PIURA
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
ECUADOR
CAJAMARCA
HUANCABAMBA
AYABACA
MORROPON
LAMBAYEQUE
PIURA
SECHURA
SULLANA
TUMBES
PAITA
TALARA
OCÉANO PACÍFICO
240
260
280
300
320
340
360
380
400
420
440
460
Ayabaca
Suyo
Huancabamba
Huarmaca
Chulucanas
Tambo Grande
Piura
Sechura
Sullana
Lancones
Paita
Talara
El Alto
Los Organos
Río Chira
Río Piura
N
79°W
80°W
81°W
5°S
6°S


MADRE DE DIOS
CUSCO
CARABAYA
SANDIA
MELGAR
AZANGARO
SAN ANTONIO DE PUTINA
HUANCANE
MOHO
LAMPA
AREQUIPA
SAN ROMAN
PUNO
MOQUEGUA
EL COLLAO
CHUCUITO
YUNGUYO
TACNA
BOLIVIA
LAGO TITICACA
Río Tambopata
Río Inambari
Río Heath
Río Ayaviri
Río Azangaro
Río Blanco
Río Ilave
Lanlacuni Bajo
Corani
Macusani
Limbani
Yanahuaya
Sandia
Nuñoa
Poloni
Ayaviri
Azangaro
Putina
Ocuviri
Huancane
Lampa
Juliaca
Santa Lucia
Puno
San Antonio De Esquilache
Ilave
Laraqueri
Juli
Yunguyo
Condurir
Pisacoma
Capaso
N
PERÚ Ministerio de Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
PUNO
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0 30 Km
71°W
70°W
69°W
13°S
14°S
15°S
16°S
17°S


78°W
77°W
76°W
N
LORETO
RIOJA
MOYOBAMBA
Naranjos
Rioja
Moyobamba
Chachapoyas
LAMAS
Barranquita
Roque
AMAZONAS
Lamas
Huimbayoc
Tarapoto
310
EL DORADO
San Jose De Sisa
SAN MARTIN
300
HUALLAGA
290
Saposoa
PICOTA
Picota
280
Bellavista
Juanjui
270
Cuzco
MARISCAL CACERES
260
Campanilla
CAJAMARCA
250
BELLAVISTA
LA LIBERTAD
Polvora
240
Tocache
TOCACHE
230
220
Tambo De Paja
Uchiza
UCAYALI
HUANUCO
PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
SAN MARTIN
Período de retorno: 500 años
500
Aceleración PGA en gals
0
25 Km
6°S
7°S
8°S
9°S


PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
TACNA
Período de retorno: 500 años
Aceleración PGA en gals
500
0
20 Km
N
CHILE
PUNO
MOQUEGUA
CANDARAVE
TARATA
JORGE BASADRE
TACNA
OCÉANO PACÍFICO
Laguna Lagunillas
Laguna Suches
Laguna Blanca
Río Maure
Río Locumba
Río Caplina
Río Tambo
Río Los Ángeles
Candarave
Cairani
Tarata
Chucatamani
Palca
Pachia
Tacna
Sama Grande
Las Yaras
Los Palos
Ilabaya
Locumba
Ilo
Moquegua
220
240
260
280
300
320
340
360
380
400
420
440
460
480
17°S
18°S
70°W
71°W


ECUADOR
ZARUMILLA
TUMBES
PIURA
CONTRALMIRANTE VILLAR
OCÉANO PACÍFICO
Zarumilla
Matapalo
Tumbes
Pampas De Hospital
Río Tumbes
Cabeza Cruz
Zorritos
Cañaveral
Mancora
360
370
380
390
400
410
420
430
440
450
N
PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
TUMBES
Período de retorno: 500 años
500 Aceleración PGA en gals
0
10 Km
80°W
80°20'W
80°40'W
81°W
3°20'S
3°40'S
4°S


PERÚ
Ministerio del Ambiente
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
UCAYALI
Período de retorno: 500 años
500 — Aceleración PGA en gals
BRASIL
MADRE DE DIOS
PURUS
ATALAYA
CORONEL PORTILLO
PADRE ABAD
HUANUCO
PASCO
JUNIN
LORETO
Río Ucayali
Río Tambo
Río Pachitea
Río Aguaytía
Río Purus
Río Inuya
Río Urubamba
Río Tamaya
Río Yaquerana
Río Breu
Río Sepahua
Río Bolognesi
Río Atalaya
Río Curimana
Río Aguayía
Río Icaria
Río Pucallpa
Río Masisea
Río Puerto Esperanza
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
260
N
72°W
74°W
76°W
8°S
10°S