

# DEMANDAS SISMICAS CON PELIGRO UNIFORME EN EL PERU

Mag. Ing. Manuel Monroy C.<sup>1</sup>, Ana Bolaños L.<sup>2</sup>, Alejandro Muñoz P.<sup>3</sup>, PhD Marcial Blondet S.<sup>4</sup>

## RESUMEN

Los espectros descritos en la norma de diseño sísmico Peruana están basados en escalar las ordenadas de un espectro estándar a la aceleración máxima del suelo, lo que conduce a una distribución no uniforme del peligro a lo largo del espectro y por tanto a un nivel de riesgo diferente entre edificaciones de distinta altura. Hoy en día, es posible desarrollar espectros que tengan el mismo peligro o probabilidad de excedencia en todo el rango de ordenadas espectrales. Estos espectros, denominados espectros de peligro uniforme, están siendo incluidos en códigos sísmicos como el IBC2000 de los EUA y el NBCC de Canadá.

En este trabajo, se presentan espectros de peligro uniforme para tres ciudades representativas de las regiones del Perú. Se actualizan las fuentes sísmicas propuestas en trabajos anteriores y se proponen ecuaciones para relacionar  $M_s$  y  $M_w$ . Así mismo, se comparan los espectros obtenidos en este trabajo con los especificados por la norma Peruana. Se incluye además la distribución de ordenadas espectrales obtenidas para el Perú correspondientes a periodos estructurales de 0.0seg (aceleración del suelo), 0.2 y 1.0seg para un periodo de retorno de 475 años con 5% de amortiguamiento.

Los resultados muestran que las aceleraciones obtenidas presentan valores inferiores a los obtenidos en 1993 por Castillo y Alva hasta en 10%, salvo en la zona de Piura y Tumbes donde los valores son menores hasta en 30%. Respecto a los valores del factor de amplificación espectral, se encontró que para 0.2seg existen diferencias pequeñas a lo largo del territorio de hasta 3%, mientras que para 1.0seg los valores aumentan de oeste a este de manera significativa (35% en Iquitos). Se recomienda estudiar la incorporación en el código sísmico Peruano de mapas de ordenadas espectrales como los obtenidos en este trabajo. Esto hará posible tener formas espectrales propias de cada región asociadas a la misma probabilidad de excedencia.

## INTRODUCCIÓN

El Perú se encuentra en una zona de gran actividad sísmica, por lo que es importante contar con procedimientos confiables para la estimación de las demandas sísmicas sobre las estructuras. Las demandas que las estructuras puedan experimentar durante su vida útil pueden obtenerse de la forma y valores de los espectros de diseño especificados en códigos o de análisis sísmicos específicos en el sitio.

La forma y valores del espectro de diseño proporcionado por el código sísmico Peruano se basa en escalar una forma espectral estándar a la aceleración máxima del suelo (el único valor con probabilidad de excedencia), lo que conduce a una distribución no uniforme del peligro en el rango de periodos estructurales. La derivación de la forma espectral a partir de la aceleración máxima del suelo esta basada en la metodología propuesta por Newmark y Hall [1], donde la forma espectral fue obtenida aproximando curvas de respuesta para eventos de magnitudes en el rango de 6 y 7 y una distancia a la fuente de alrededor de 20 a 50 km.

Sin embargo, diversos estudios han mostrado que la forma espectral depende de la magnitud y distancia del sismo al sitio (Anderson, Trifunac M.D. [2,3]; Boore D., Joyner W. [4,5]), por lo que es necesario tener espectros que tengan en cuenta sus posibles combinaciones para la misma probabilidad de excedencia. El espectro de peligro uniforme esta en función de todas estas características, debido a que su forma es obtenida directamente sin escalar una forma estándar, sus valores tienen la misma probabilidad de excedencia y tiene en cuenta además la dependencia de la forma espectral con la magnitud y distancia.

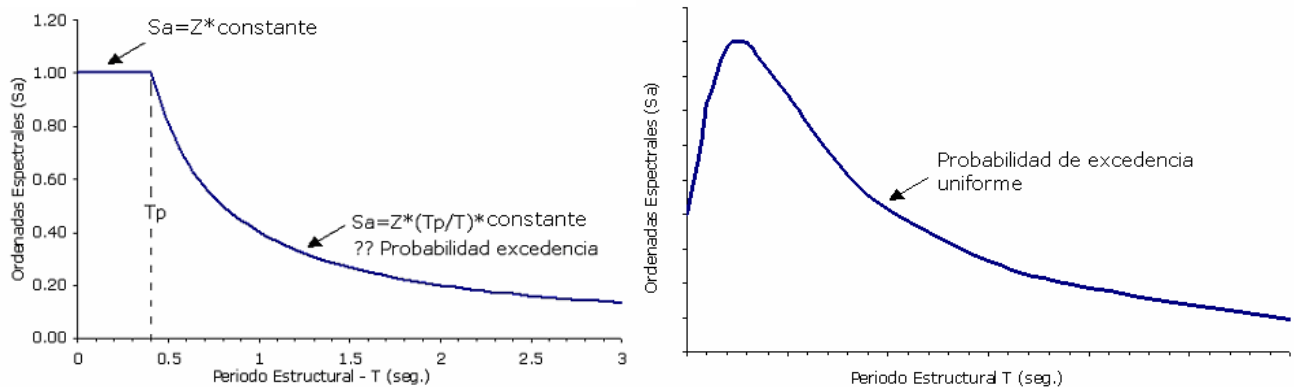
1 Magister Ing. Estructural PUCP - Docente Asistente PUCP. [monroy.om@pucp.edu.pe](mailto:monroy.om@pucp.edu.pe)

2 Magister Ing. Estructural PUCP - Docente U. Católica de Santa María – AQP. [bolanos.am@pucp.edu.pe](mailto:bolanos.am@pucp.edu.pe)

3 Magister Ing. Estructural PUCP - Profesor Principal PUCP. [amunoz@pucp.edu.pe](mailto:amunoz@pucp.edu.pe)

4 Doctor en Ingeniería - Profesor Principal PUCP. [mblondet@pucp.edu.pe](mailto:mblondet@pucp.edu.pe)

La figura 1 muestra la forma del espectro estándar proporcionado por el código sísmico Peruano donde el peligro asociado a la ordenada espectral  $S_a$  resulta igual al peligro de la aceleración del suelo solo para periodos cortos ya que esta zona esta gobernada por las aceleraciones. La figura muestra también la forma típica de un espectro de peligro uniforme donde cada ordenada espectral es obtenida mediante un análisis de peligro sísmico para una probabilidad de excedencia, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de sismos moderados cercanos al sitio y sismos grandes alejados del sitio.



**Figura 1.-** Forma espectral obtenida de la norma sísmica Peruana y la que se obtiene del espectro de peligro uniforme.

El trabajo empieza mostrando las características de la sismotectónica del Perú, luego se presentan las fuentes, la evaluación del tamaño de los eventos y las leyes de atenuación usadas para analizar el peligro sísmico representado por valores de ordenadas espectrales. Finalmente se presentan los espectros de peligro uniforme, mapas de ordenadas espectrales y las conclusiones del trabajo.

## SISMOTECTÓNICA DEL PERÚ

### Tectónica del Perú

La actividad sísmica en el Perú esta gobernada por la interacción de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, así como de los reajustes que se producen en la corteza terrestre. La alta convergencia entre las placas ha producido la subducción de la placa de Nazca debajo la Sudamericana a una razón de 8-10 cm/año (Jarrard [6]) hasta profundidades de por lo menos 200 km en el Perú Central (Barazangi and Isacks [7]).

El proceso de subducción de la placa de Nazca presenta tres rasgos tectónicos importantes, cada uno con características distintas con respecto a los eventos sísmicos que producen y las fallas que presentan. Estos rasgos tectónicos son:

- a. La zona de subducción de interface poca profunda.
- b. La zona de subducción de intraplaca profunda.
- c. La zona de corteza continental de la placa Sudamericana.

La zona de subducción de interface poco profunda esta caracterizada por el acoplamiento de las placas de Nazca y Sudamericana y posee mecanismos que obedecen a procesos compresivos. La mayor parte de los sismos a nivel mundial ocurren en esta zona y se presentan entre los 40 y 50 km de profundidad aproximadamente, pudiendo llegar hasta inclusive Mw 9.0 (Heaton y Kanamori [8]). La zona de subducción de intraplaca esta caracterizada por eventos tensionales que ocurren en la zona descendente de la placa de Nazca, donde los sismos serán ahora por fallas normales, presentándose magnitudes hasta Mw 8.0. La zona de corteza continental de la placa Sudamericana esta sujeta a esfuerzos tectónicos compresionales debido a la convergencia existente entre la placa de Nazca y Sudamericana.

### **Sismicidad Instrumental**

El catálogo sísmico utilizado en este trabajo corresponde al del proyecto SISRA (Sismicidad de la región Andina) con eventos sísmicos a partir del año 1900 y actualizado hasta el año 2000. Los datos de este catálogo fueron verificados por el Instituto Geofísico del Perú y el ISC (Internacional Seismological Center) en el año 2001. Sin embargo, la distribución de sismos es homogénea únicamente a partir de 1963, utilizando por tanto, una base de datos a partir de este año que contó con 5100 eventos principales e independientes.

Las escalas encontradas en el catálogo sísmico para medir el tamaño del evento son variadas. El catálogo del proyecto SISRA posee eventos con magnitudes mb, Ms y en algunos casos Mw, por lo que fue necesario homogenizar la base de datos para realizar el análisis. Se eligió la magnitud momento Mw como la escala de trabajo por ser la única escala de magnitud que no se satura, debido a que no está basada en cantidades empíricas medidas en la base de las características del movimiento del suelo.

Para relacionar mb y Ms se utilizó la relación propuesta por Castillo y Alva [9]. La relación entre Ms y Mw se obtuvo utilizando el método de mínimos cuadrados en una muestra de eventos registrados en Perú y Chile y que reportaron tanto Ms como Mw. La relación propuesta está dividida en tres rangos:

$$\begin{aligned} Mw &= 0.740 \cdot Ms + 1.742 & Ms &\leq 6; \\ Mw &= 0.683 \cdot Ms + 2.039 & 6 < Ms < 8; \\ Mw &= 1.093 \cdot Ms - 0.593 & Ms &\geq 8. \end{aligned} \quad (1)$$

Las relaciones anteriores están limitadas al número de eventos de la muestra, a medida que se incrementen eventos registrados con magnitudes Ms y Mw se podrá obtener relaciones cada vez más precisas.

### **EVALUACION DEL PELIGRO SISMICO**

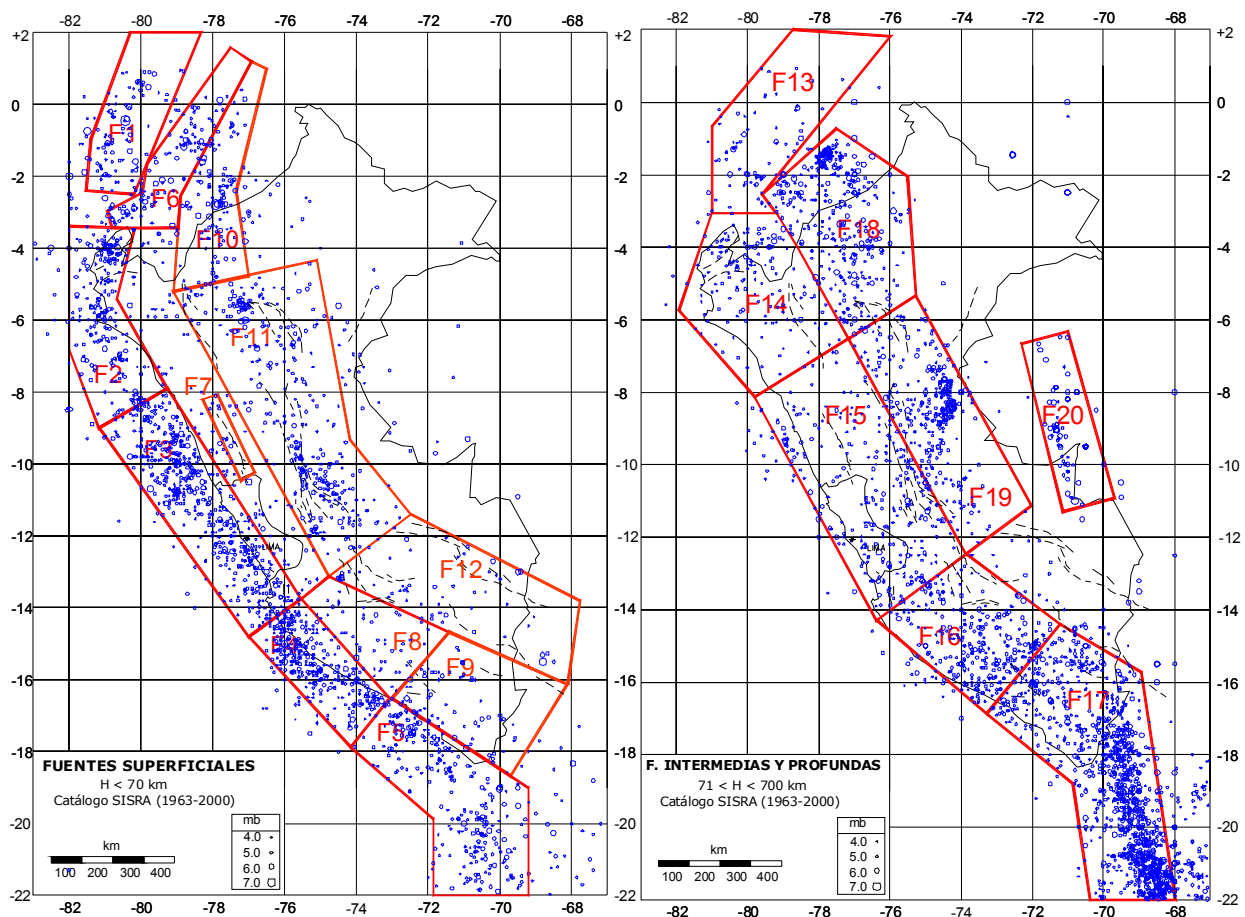
La amplitud de las ordenadas espectrales esperadas en un lugar específico está en función de la distribución del tamaño de los eventos sísmicos en las fuentes y la ley de atenuación usada. Las incertidumbres en cuanto al tamaño, ubicación y nivel de respuesta estructural son consideradas mediante funciones de distribución de probabilidades.

La información de las fuentes, leyes de atenuación y funciones de distribución pueden ser luego combinadas con la ayuda de programas de computadora para obtener probabilidades de excedencia de ordenadas espectrales en un determinado periodo de tiempo. La evaluación del peligro sísmico para las ordenadas espectrales desarrollada en este trabajo fue realizada en el programa MRiesgo (Monroy [10]). Las fuentes, el método de evaluación del tamaño del evento en las fuentes y las leyes de atenuación usadas se describen a continuación.

#### **Fuentes sismogénicas**

Las fuentes sismogénicas utilizadas para representar la sismicidad del País corresponden a una actualización a las propuestas en 1993 por Castillo y Alva [9]. Castillo y Alva basados en la distribución espacial de la sismicidad y en los aspectos neotectónicos del Perú definieron 20 fuentes sismogénicas con características particulares.

Las fuentes que representan la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana son las fuentes de subducción superficial (0-70 km), fuentes con profundidad intermedia (71-300 km) y fuentes que representan la sismicidad profunda (500 - 700 km). Las fuentes que representan la subducción superficial son las fuentes 1 a la 5 ubicadas a lo largo de la costa. Las fuentes que representan la profundidad intermedia son las fuentes 13 a la 19. La sismicidad profunda la representa la fuente 20. Las fuentes de corteza están representadas por las fuentes 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. La figura 2 muestra la distribución de las 20 fuentes sismogénicas utilizadas en este trabajo.



**Figura 2.-** Distribución de las fuentes sísmicas de subducción de interfase, intraplaca y fuentes de corteza utilizadas en este trabajo. Las fuentes actualizadas corresponden a las fuentes F3, F4 y F8.

### Evaluación del tamaño de los eventos

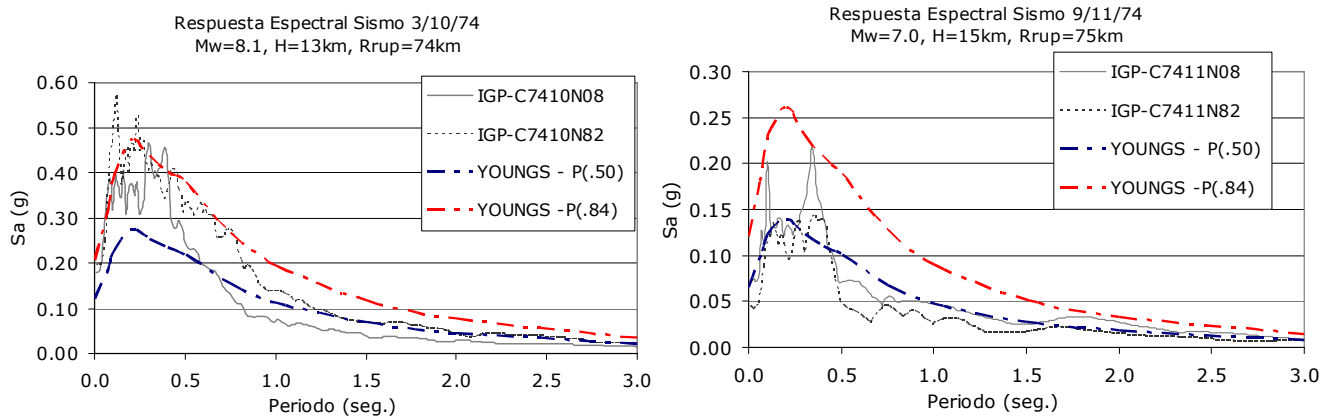
Para evaluar la variación en el tamaño del evento que cada fuente sísmica pueda generar es necesario conocer la recurrencia sísmica de la fuente. La recurrencia sísmica esta representa por el número de eventos mayores o iguales a alguna magnitud dentro de la fuente y esta descrita por la pendiente de la relación de recurrencia de Gutenberg y Richter (b), la razón media anual de actividad sísmica ( $\nu$ ), la magnitud mínima y la magnitud máxima.

La pendiente (b) fue determinada usando el método de máxima verosimilitud (Utsu [11]) y la magnitud mínima fue determinada usando el punto de máxima curvatura de la distribución de la frecuencia de magnitudes (Wiemer and Katsumata [12]). La magnitud máxima (Mmax) fue definida como el evento más grande que pueda ocurrir en la fuente sísmica (McGuire [13]).

### Leyes de atenuación

Para estimar la respuesta estructural que un sismo de una magnitud y distancia específica pueda inducir a diferentes edificaciones se utilizaron modelos de atenuación para ordenadas espectrales en función de periodos de vibración estructural específicos. Los modelos de atenuación usados corresponden a los propuestos por Youngs et al. [14] para sismos de subducción de interfase e intraplaca y el modelo de Sadigh et al. [15] para los sismos de corteza. Las relaciones de atenuación propuestas por ambos investigadores corresponden a roca con un amortiguamiento de 5%.

La figura 3 muestra la respuesta estructural obtenida con la ley de atenuación de Youngs para el valor medio P(.50) y el valor medio más la desviación estándar P(.84) correspondientes a los sismos de 1974. Asimismo se muestran los espectros de respuesta para las dos componentes horizontales registradas de los sismos.



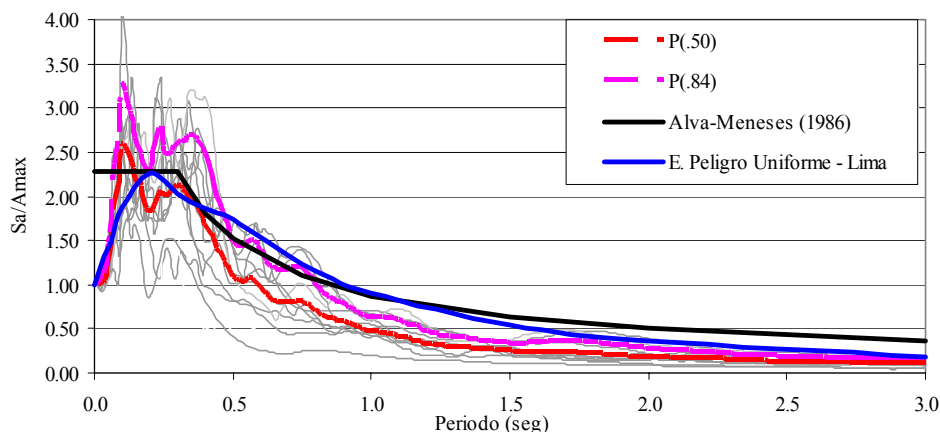
**Figura 3.-** Espectros de respuesta para el sismo de Lima del 3/10/74 y el 9/11/74 registrados en el parque de la Reserva (Lima) vs. el espectro obtenido con el modelo de Youngs para el valor medio  $P(.50)$  y el valor medio más la desviación estándar  $P(.84)$

### ESTIMACION DE LAS DEMANDAS SISMICAS

#### Espectros de peligro uniforme

Se han desarrollado espectros de peligro uniforme para tres ciudades representativas de las distintas regiones del Perú, las ciudades son Lima, Arequipa e Iquitos. Los espectros calculados incluyen todas las posibles combinaciones de magnitud y distancia que puedan afectar la forma espectral para un 10% de probabilidad de excedencia y 50 años de periodo de exposición (periodo de retorno de 475 años) con 5% de amortiguamiento.

La ciudad de Lima es la única que posee registros de aceleraciones, por lo que la comparación de la forma espectral obtenida en este trabajo se hará únicamente para esta ciudad. La comparación de la forma espectral se hizo calculando los espectros de respuesta de 12 componentes horizontales de registros de aceleraciones y revisando trabajos similares referentes al estudio de la forma espectral de los sismos Peruanos. Entre los trabajos que se revisaron están el de Ottazzi et al [16] y Meneses y Alva [17], este último se usó como comparación. El promedio  $P(.50)$  y el promedio más la desviación estándar  $P(.84)$  obtenido de los registros analizados se muestran en la figura 4. La figura muestra además el espectro de peligro uniforme y el espectro propuesto por Alva y Meneses basado en una forma espectral estándar. Los valores se muestran como relaciones de amplificación entre la aceleración máxima del suelo y las ordenadas espectrales.

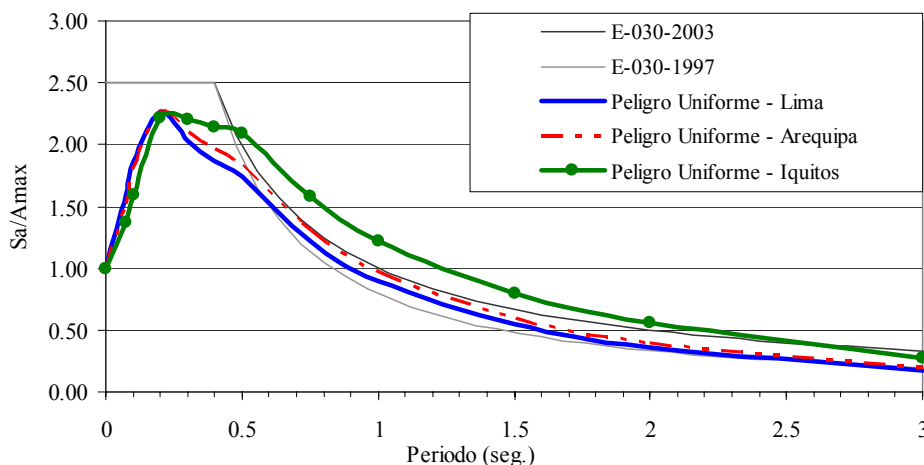


**Figura 4.-** Espectros de diseño propuestos para la ciudad de Lima. Se muestran también el promedio  $P(.50)$  y el promedio más la desviación estándar ( $P(.84)$ ) de los espectros de respuesta de 12 registros sísmicos obtenidos en Lima.

En la figura 4 se aprecia que la forma espectral obtenida por Alva et al. y este trabajo es muy similar a la forma espectral obtenida de los espectros de respuesta de los registros de Lima. La comparación en cuanto a los coeficientes de amplificación, sin embargo, se hizo solamente entre los espectros de diseño debido a que los espectros de respuesta por su forma irregular no pueden utilizarse para especificar la demanda sísmica de diseño.

La comparación entre los coeficientes de amplificación puede ser dividida en dos zonas, una correspondiente a los periodos cortos y otra a los periodos medios y largos. El factor de amplificación obtenido por Alva y Meneses en la zona de periodos cortos coincide satisfactoriamente con el factor de amplificación obtenido en este trabajo. Sin embargo, los valores en la zona de periodos medios y largos son totalmente diferentes. Esta variación se debe a la diferencia en los métodos usados para determinar los espectros de diseño. Mientras que el de peligro uniforme toma en cuenta la influencia de todos las posibles magnitudes y distancias que pueden afectar a distintas estructuras, el espectro tradicional planteado por Alva y Meneses, incluye solo algunos eventos registrados en el pasado y fue determinado únicamente en base a trabajos estadísticos. Esta diferencia muestra también la diferente probabilidad de falla que tienen las edificaciones de periodos medios y largos que están basadas en un espectro que escala su forma a la aceleración del suelo. Como evidencia de esto se observa un grupo de estructuras con periodos entre 0.5seg y 1.0seg en los que la demanda sísmica se estaría desestimando, mientras que para edificaciones con periodos mayores a 1.0seg la demanda estaría sobreestimada.

La figura 5 muestra la forma espectral proporcionada por los códigos sísmicos peruanos [18,19] y la forma espectral con peligro uniforme obtenida para tres ciudades del Perú. En esta figura se observa que para estructuras con periodos de 1.3seg ubicadas en la ciudad de Lima las demandas sísmicas obtenidas en este trabajo son mayores a las obtenidas con la norma sísmica E-030-1997 en 20% y menores en 11% a las obtenidas con la norma E-030-2003. Para estructuras con periodos de 1.3seg ubicadas en la ciudad de Arequipa las demandas sísmicas obtenidas en este trabajo son 24% mayores a la proporcionadas por la norma sísmica E-030-1997 y 8% menores a las obtenidas con la actual norma. Para estructuras con periodos de 1.3seg ubicadas en la ciudad de Iquitos las demandas sísmicas obtenidas en este trabajo son 64% mayores a la proporcionadas por la norma sísmica E-030-1997 y 22% mayores a la actual norma. Esta diferencia muestra además que algunas estructuras ubicadas en ciudades apartadas de la costa están gobernadas por sismos de magnitudes importantes que ocurren a grandes distancias y no por sismos que ocurren cercanos al sitio, como asume la forma proporcionada por el reglamento.



**Figura 5.-** Comparación de espectros de diseño propuestos por el código Peruano con los espectros de peligro uniforme para las ciudades de Lima, Arequipa e Iquitos, correspondientes a un periodo de retorno de 475 años y 5% de amortiguamiento. Los valores están normalizados a la aceleración máxima del suelo.

### Mapas de ordenadas espectrales

El empleo de mapas sísmicos ha sido ampliamente usado en códigos sísmicos de distintos países del mundo. En los Estados Unidos, por ejemplo, los primeros mapas estuvieron basados en los trabajos de Algermissen y Perkins [20], de los cuales se podía obtener el coeficiente de aceleración máxima efectiva ( $A_a$ ) y el coeficiente de velocidad máxima efectiva relaciona con la aceleración ( $A_v$ ), valores

que servirían para el diseño de acuerdo a las recomendaciones del NEHRP 1994 y versiones anteriores.

Actualmente, sin embargo, el código sísmico de los EUA ha incluido mapas de ordenadas espectrales debido a que los valores obtenidos de estos mapas son más apropiados para el diseño sísmico en comparación con los valores obtenidos de los coeficientes  $A_a$  y  $A_v$  usados con formas espectrales estándares. El nuevo procedimiento propuesto en los EUA para definir el espectro se basa en dos ordenadas espectrales (correspondientes a 0.2seg y 1.0seg), valores que son directamente leídos de los mapas y que proveen un ajuste razonable del espectro en base a ecuaciones simples. Los valores espectrales son luego combinados con factores de suelo para obtener el espectro de diseño.

En el Perú, no existen trabajos tan detallados como en los EUA referidos al cálculo de ordenadas espectrales que permitan caracterizar las demandas sísmicas específicas de cada región. Este trabajo se presenta como un primer esfuerzo por realizar una distribución de ordenadas espectrales en el País.

La necesidad de tener formas espectrales específicas para cada región se evidencia en los diferentes factores de amplificación dinámica ( $S_a(T_n)/A_{cel. \text{ máx.}}$ ) obtenidos principalmente en los periodos largos. Un ejemplo de esto se presenta en la selva Peruana (ciudad de Iquitos) donde el valor del factor de amplificación dinámica para 1.0seg es de 1.224, mientras que en la zona de costa es de 0.906.

La distribución de ordenadas espectrales fue calculada para tres periodos estructurales, uno correspondiente a la aceleración máxima del suelo (0.0seg), uno que represente los periodos cortos (0.2seg) y otro representativo de los periodos largos (1.0seg). El cálculo se hizo para una cuadrícula que se construyó dividiendo los ejes correspondientes a las longitudes en  $0.1^\circ$  y los ejes correspondientes a las latitudes en  $0.5^\circ$ . Los valores obtenidos para cada punto de la cuadrícula fueron luego interpolados a las ordenadas espectrales mostradas en las figuras 6, 7 y 8.

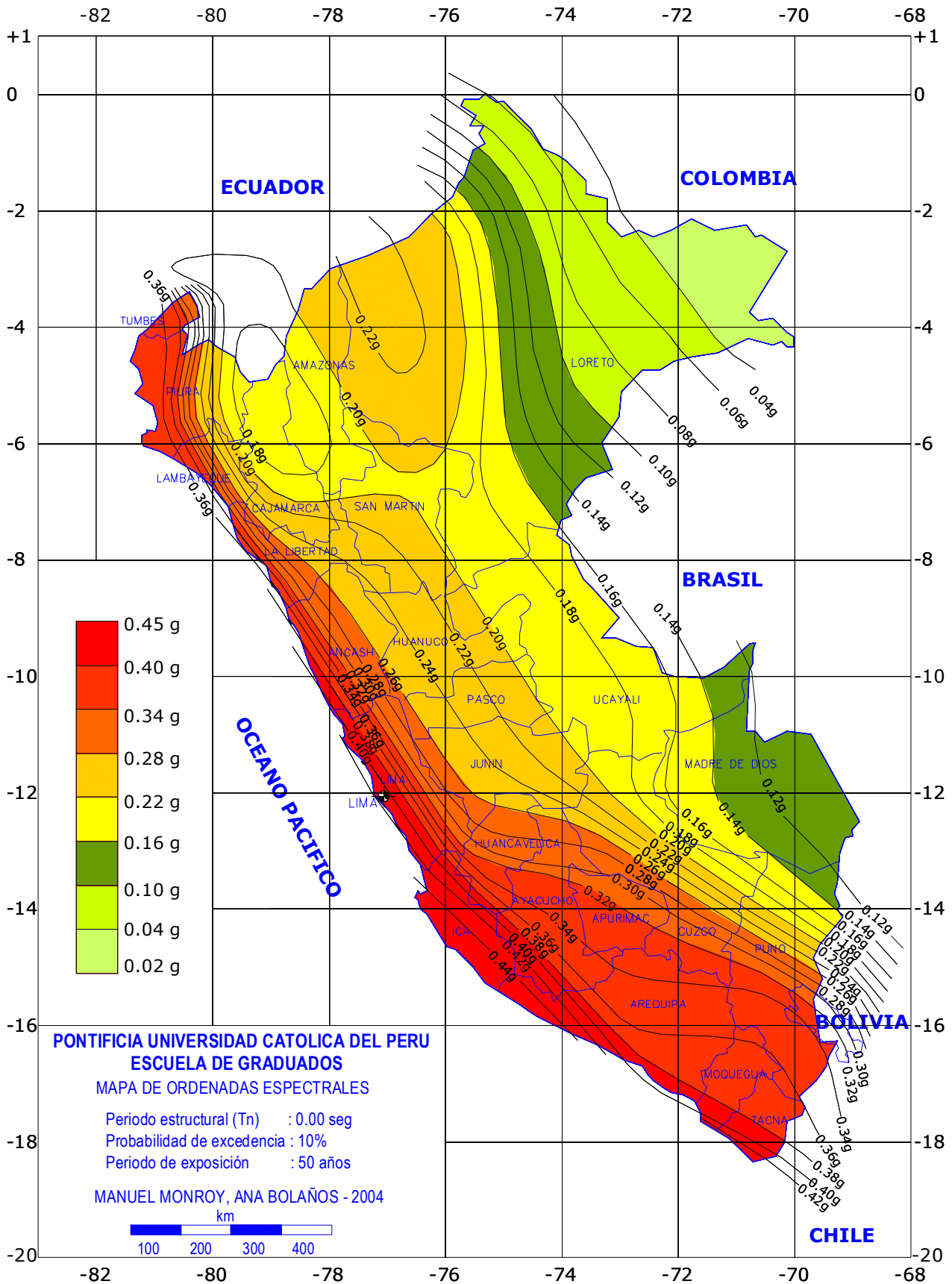
Los resultados obtenidos para la aceleración del suelo fueron comparados con el trabajo de Castillo y Alva [9], encontrándose diferencias en cuanto a la amplitud de las aceleraciones. La diferencia se debe a que en este trabajo se utilizó una base de datos de sismicidad actualizada en 10 años, se usó diferente medida del tamaño del evento (Castillo y Alva utilizaron el máximo entre  $M_b$  y  $M_s$ ) y se usó una ley de atenuación que distinga sismos de subducción de interfase e intraplaca.

La principal variación se ha encontrado en la zona norte del País, en los departamentos de Piura y Tumbes, donde los valores han disminuido en un 30% debido al poco incremento en la sismicidad de la zona. Esto se evidencia en la disminución de la razón anual de sismos presentada en la fuente F2 que disminuyó de 4.58 sismos de magnitud  $M_w$  por año presentada para el periodo entre 1963 y 1990 a 4.05 sismos de magnitud  $M_w$  por año presentada para el periodo entre 1963 y 2000. La tabla 1 muestra los valores obtenidos en este trabajo y los valores obtenidos por Castillo y Alva para algunas ciudades del País.

**Tabla 1.- Aceleraciones en suelo firme para diferentes ciudades del Perú para un periodo de retorno de 475 años.**

Lugar	Este Trabajo (g)	Castillo - Alva -1993 (g)
Lima (-77.0;-12.0)	0.40	0.43
Ica (-75.48;-14.02)	0.41	0.42
Arequipa (-71.6;-16.3)	0.36	0.38
Tacna (-70.3;-18.1)	0.39	0.41
Piura (-80.69;-6.00)	0.36	0.47





**Figura 6.-** Distribución de ordenadas espectrales para el Perú correspondientes a un periodo estructural de 0.0seg (aceleración del suelo) y periodo de retorno de 475 años.



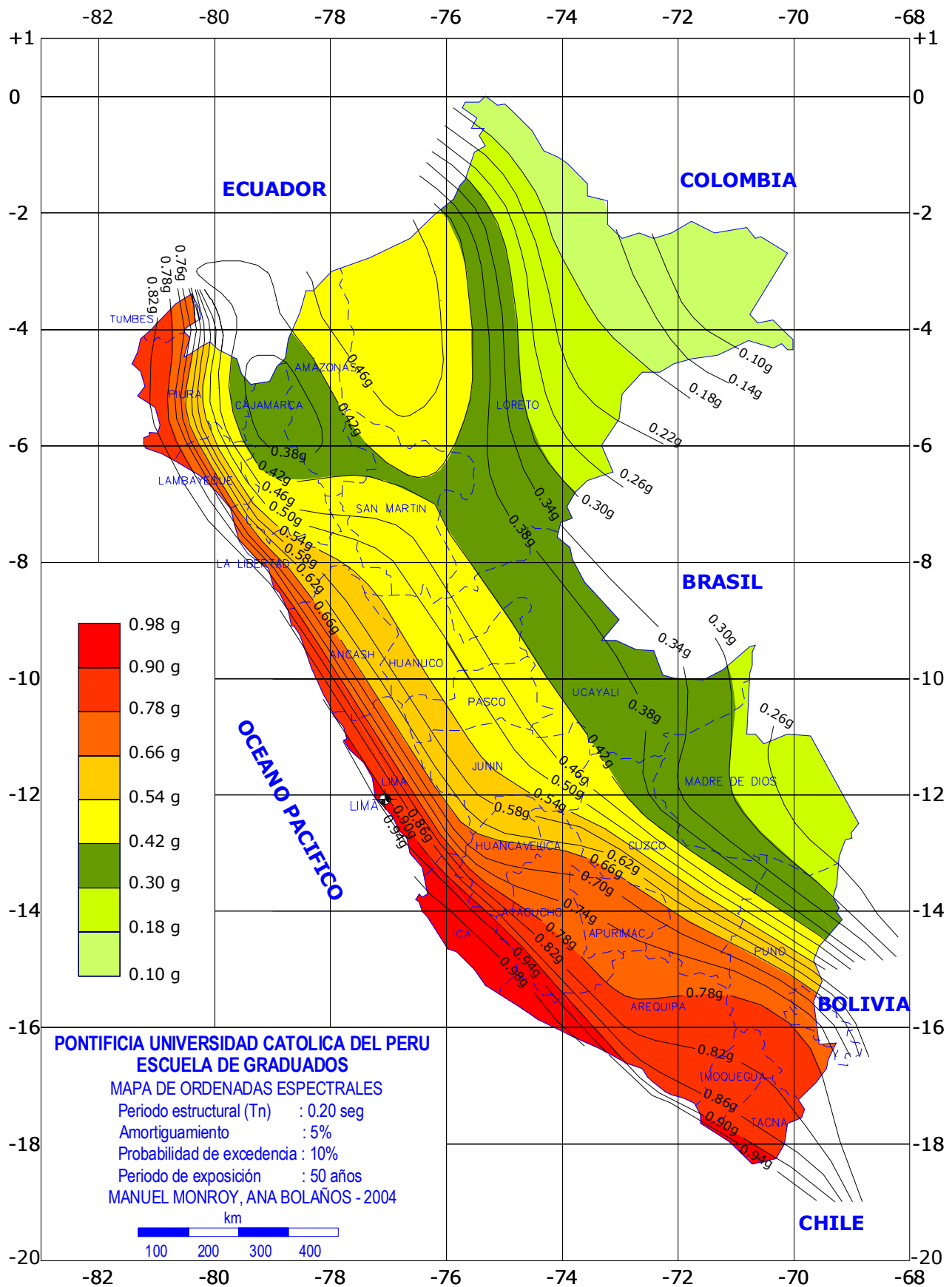
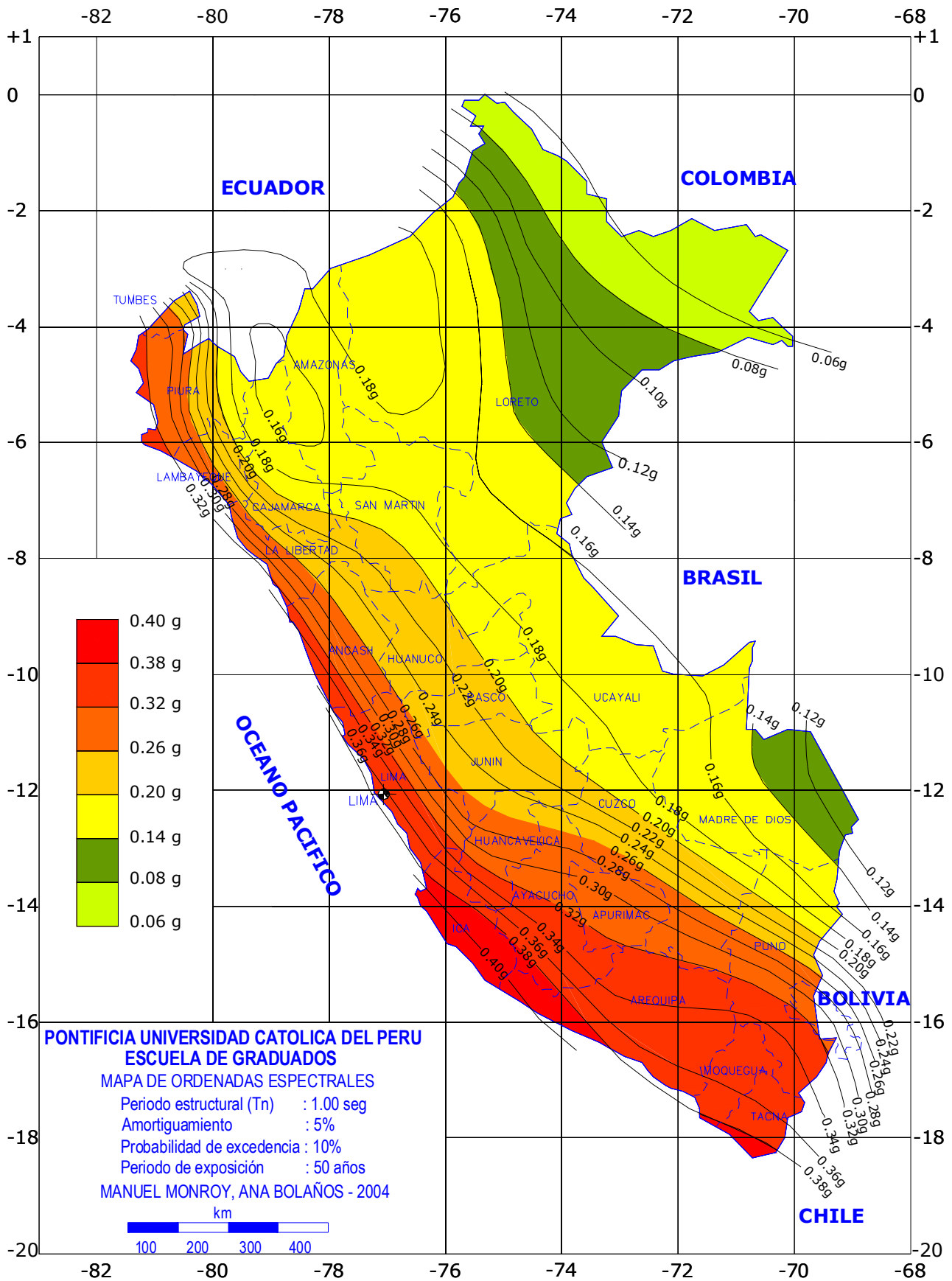


Figura 7.- Distribución de ordenadas espectrales en suelo firme para el Perú correspondientes a un periodo estructural de 0.2seg con 5% de amortiguamiento y periodo de retorno de 475 años.



**Figura 8.-** Distribución de ordenadas espectrales en suelo firme para el Perú correspondientes a un periodo estructural de 1.0seg con 5% de amortiguamiento y periodo de retorno de 475 años.

## CONCLUSIONES

1. En los trabajos antecedentes de peligro sísmico en el Perú se empleó como medida para el tamaño de los sismos las magnitudes  $m_b$  y  $M_s$  junto a la ley de atenuación propuesta por Casaverde. En este trabajo se usó la magnitud momento ( $M_w$ ) y se empleó por primera vez para todo el País una ley de atenuación que distingue sismos de subducción de interfase e intraplaca.
2. Las aceleraciones obtenidas en este trabajo para roca presentan valores inferiores hasta en 30% en la zona de Piura y Tumbes con respecto a los resultados de Castillo y Alva. Estas variaciones se deben a la disminución de la tasa anual de sismos de 4.58 a 4.05 al incluir la información de los últimos 10 años. Las aceleraciones obtenidas en roca para el resto del País presentan valores menores hasta en 10% con respecto a los obtenidos por Castillo y Alva.
3. Los valores del factor de amplificación espectral para 0.2seg, presentan diferencias pequeñas de hasta 3% aproximadamente. Sin embargo, los valores de amplificación espectral para 1.0seg aumentan de oeste a este de manera significativa (35% en la ciudad de Iquitos). Esta variación hace evidente la necesidad de contar con espectros propios de cada región.
4. La poca variación en los factores de amplificación espectral obtenidos para 0.2seg confirma que las ordenadas espectrales para periodos cortos están directamente relacionadas con la aceleración del suelo y que sus valores pueden obtenerse multiplicando una forma definida para esta zona por un factor constante.
5. El aumento en los factores de amplificación espectral encontrados en la zona este del Perú para 1.0seg, se debe a que estas ordenadas espectrales están gobernadas por ondas sísmicas de baja frecuencia generadas por sismos lejanos de magnitud importante.
6. Los espectros usados actualmente en el Perú no incluyen formas específicas para cada lugar, esto se debe a que la metodología empleada en la construcción de estos espectros está basada en escalar una forma espectral estándar a la aceleración máxima del suelo.
7. Debido a que los espectros obtenidos de la Norma Sísmica Peruana tienen una forma constante, la probabilidad de excedencia no es uniforme salvo en una zona estrecha de los periodos cortos que es igual a la probabilidad del factor  $Z$ .
8. Las demandas sísmicas obtenidas en este trabajo para estructuras con periodos de 1.3seg para las ciudades de Lima, Arequipa e Iquitos son mayores a las obtenidas con la norma sísmica E-030-1997 en 20%, 24% y 64% respectivamente. Asimismo las demandas sísmicas obtenidas para estructuras con periodos entre 0.6seg y 2.0seg son en general mayores a las propuestas por esta norma.
9. La actual norma de diseño sísmico (E-030-2003) presenta valores espectrales mayores a los obtenidos en este trabajo para las ciudades de Lima y Arequipa. Sin embargo, para estructuras con periodos de 1.3seg ubicadas en la ciudad de Iquitos los valores de la actual norma son inferiores en 22% en comparación con los valores obtenidos en este trabajo. Los valores correspondientes a periodos entre 0.6seg y 2.0seg fueron también menores.
10. Los mapas de ordenadas espectrales usados para obtener espectros de diseño vienen siendo incluidos en códigos como el IBC2000 de los Estados Unidos y el NBCC de Canadá. Se recomienda estudiar la incorporación en el Código Sísmico Peruano de mapas de ordenadas espectrales como los obtenidos en este trabajo. Esto hará posible tener formas espectrales propias de cada región asociadas a la misma probabilidad de excedencia.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección Académica de Investigaciones de la PUCP por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. El presente trabajo es parte de la Tesis "Espectros de Peligro Sísmico Uniforme".

## REFERENCIAS

1. Newmark, N.M. and Hall, W.J., 1982. "Earthquake Spectra and Design", EERI Monograph, Berkeley, California, 103 pp.
2. Anderson, J.G. & M.D. Trifunac 1977. "On uniform risk functionals which describe strong earthquake ground motion: definition, numerical estimation and an application to the Fourier amplitude of acceleration." Rep. No CE 77-02, Dept. of Civil Engng, Univ. of Southern California, Los Angeles, California.
3. Anderson, J.G. & M.D. Trifunac 1978. "Uniform risk functionals for characterization of strong earthquake ground motion." Bull. Seism. Soc. Amer. Vol. 68, pp. 205-208.
4. Boore D., Joyner W. 1982. "Prediction of Earthquake Response Spectra" U.S. Geological Survey. Open File Report 82-977.
5. Boore D., Joyner W. 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.
6. Jarrard, R.D., 1986. "Relations among subduction parameters". Rev. Geoph. 24:217-284.
7. Barazangi, M., and B. L. Isacks, 1976. "Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath America." Geology 4:686-692.
8. Heaton, T.H. and H. Kanamori, 1984. "Seismic potential associated with subduction in the northwestern United States." Bull. of the S. Soc. Amer. Vol. 74:933-941.
9. Castillo, J., Alva, J. 1993. "Peligro Sísmico en el Perú", VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima, Perú.
10. Monroy M., Bolaños L., 2004. "Espectros de Peligro Sísmico Uniforme – Programa MRiesgo". Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil – PUCP".
11. Utsu, T. 2003. "Statistical Features of Seismicity", I.H. of Earthquake & Engineering Seismology, Part A. Academic Press 1945pp.
12. Wiemer S. and Katsumata K. 1999. "Spatial variability of seismicity parameters in aftershock zones", J. Geophys. Res. 103, 13, 135-151.
13. McGuire R., 1976, "Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis", Open-File Report 76-67, U.S. Geological Survey.
14. Youngs R.R., Chiou S.J., Silva W.J., Humphrey J.R., 1997. "Strong Ground Motion Attenuation Relationship for Subduction Zone Earthquakes", Seismological Research Letters, Vol. 68, Number 1, January/February.
15. Sadigh K., Chang C., Egan J., Makdisi F., Youngs R.R. 1997. "Attenuation Relationship for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data", Seismological Research Letters, Vol. 68, Number 1, January/February.
16. Ottazzi G., Repetto P., Vargas J. y Zegarra L. 1980. "Bases para una revisión de las Normas Peruanas de Diseño Sismorresistente", II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica, OEA – PUCP.
17. Meneses, J. y Alva J. 1986. "Determinación del espectro elástico de diseño y coeficiente sísmico para Lima", VI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Cajamarca.
18. Diseño Sismorresistente. Reglamento Nacional de Construcciones. Norma Técnica de Edificación E.030. 1997.
19. Diseño Sismorresistente. Reglamento Nacional de Construcciones. Norma Técnica de Edificación E.030. SENCICO 2003.
20. Algermissen, S.T. and Perkins, D.M. 1976. "A probabilistic Estimate of Maximum Acceleration in Rock in the Contiguous United States", U.S. Geological Survey Open File Report 76-416, 45 p.