

Análisis unidimensional de la respuesta sísmica local de suelos blandos en la ciudad de Huaraz

Reynaldo REYES^{a,1}

^a*Facultad de Ingeniería Civil UNASAM, Docente Investigador*

Resumen. En la presente investigación del tipo cuantitativo se ha realizado el análisis unidimensional de la respuesta sísmica local en la zona céntrica urbana de la ciudad de Huaraz, donde existe la presencia de suelos blandos. La investigación se propone debido a que estos suelos especiales presentan condiciones desfavorables para la cimentación de las edificaciones, así como producen una amplificación sísmica por efecto de sitio, además que el lugar de estudio se encuentra en una zona de alta sismicidad. Se ha analizado la respuesta sísmica local utilizando el modelo constitutivo de análisis lineal equivalente, donde las características de rigidez y amortiguamiento del suelo son consideradas lineales inicialmente y luego ajustadas iterando hasta que sean compatibles con los niveles de deformación inducidos por el sismo de diseño en el terreno (sismo del 31-05-1970). Se ha realizado el análisis para un modelo geológico-geotécnico obtenido en el estudio; y con la calibración, procesamiento de datos y análisis del modelo se ha logrado mediante un análisis unidimensional (1D) utilizando el software Quake/W, que modela el perfil estratigráfico del terreno utilizando el método de los elementos finitos. De los resultados del análisis de la respuesta sísmica local, se obtienen que los suelos blandos producen amplificación sísmica muy alta, comparándose con el espectro del sismo de diseño que propone la norma E.030-2018. Las edificaciones construidas actualmente en la zona céntrica urbana de la ciudad de Huaraz, tendrían un daño catastrófico ante un sismo severo, por el efecto de la alta amplificación sísmica que presenta esta área.

Palabras Clave. Análisis unidimensional, respuesta sísmica local, suelos blandos, análisis lineal equivalente, amplificación sísmica.

1. Introducción

La concentración de la actividad humana en núcleos de población urbana implica una concentración de los elementos en riesgo, por lo que se hace necesario realizar estudios de peligro sísmico más detallados con estudios específicos que tengan en cuenta los efectos de sitio mediante análisis de amplificación sísmica, para así disminuir la incertidumbre en la predicción del peligro sísmico. La evaluación precisa de la peligrosidad sísmica a escala urbana exige la realización de estudios especializados a detalle en los que se tenga en cuenta la influencia del efecto de comportamiento dinámico del suelo. Por ello, el objetivo último de esta investigación ha sido el determinar el grado de respuesta sísmica local en la zona céntrica urbana de la ciudad de Huaraz. En la

¹ Doctor en Ingeniería Civil, Docente de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú, ing.reynaldo.reyes@hotmail.com

actualidad existen diferentes disciplinas encargadas del análisis de diversos aspectos de la actividad sísmica; entre ellas se encuentra la ingeniería geotécnica sísmica, cuyo objetivo es el estudio de la influencia de los sismos en la sociedad y su medio; y el desarrollo de métodos para reducir sus efectos negativos.

El análisis requiere de modelos calibrados, por lo que un análisis lineal equivalente se puede aplicar a modelos geológicos y geotécnicos adecuados que sinteticen todas las propiedades físicas, propiedades de resistencia y propiedades dinámicas que caractericen el comportamiento sísmico de los perfiles estratigráficos ante la aplicación de un sismo de diseño. Con la aplicación de software de mayor uso actual y aceptados a nivel internacional en el ámbito de la ingeniería geotécnica sísmica como el Quake/W que realiza análisis unidimensional (1D); y aplicando la información de campo y laboratorio, la teoría investigada y utilizando la normatividad vigente nacional e internacional; se ha obtenido los resultados para la evaluación de la respuesta sísmica local de los suelos blandos en la zona céntrica urbana de la Ciudad de Huaraz.

2. Objetivos

Determinar el grado de respuesta sísmica local debido a la presencia de suelos blandos en la zona urbana de la ciudad de Huaraz mediante el análisis unidimensional.

3. Teorías Generalizadas Relacionadas al Tema

3.1. Respuesta Sísmica Local y Amplificación de Suelos

Es de vital importancia en la actualidad conocer y evaluar la respuesta sísmica de la superficie puesto que ello sirve para realizar obras civiles considerables donde tenga que entrar a actuar el concepto relación suelo-estructura donde se deban tener en cuenta consideraciones especiales aplicables a un único sitio a manera de preservar la estabilidad de las distintas construcciones durante y después de un evento sísmico. Para realizar un análisis de la respuesta sísmica se debe contar con información que se extrae de exploraciones directas e indirectas del subsuelo para conocer: El período de vibración del depósito de suelo, la amplitud del desplazamiento sísmico en la superficie del terreno, la magnitud del esfuerzo cortante inducido al suelo, la aceleración máxima del terreno y el espectro del diseño sísmico.

Kramer, S. (1996) [1], indica: “Las propiedades dinámicas del suelo dependen fundamentalmente del estado de esfuerzos del suelo y del nivel de deformación inducido; por otro lado, el fenómeno de propagación de ondas es controlado por la rigidez, el amortiguamiento, la relación de Poisson y el peso unitario del suelo”.

Kuroiwa, J. (2002) [2], publica: Los estudios de grado de daños y de distribución geográfica sobre sismos ocurridos en diferentes partes del mundo en área relativamente pequeñas y muy cercanas entre sí, han dejado establecido que las condiciones locales del suelo, geología y topografía; pueden causar diferencias sustanciales en las intensidades del sismo. Esta diferencia es suficiente para que, por ejemplo, en la zona de menos intensa, cause daños imperceptibles en débiles construcciones de adobe; y en la zona de mayor intensidad, situada a poca distancia de la anterior, provoque daños severos en modernas construcciones de concreto reforzado. A este fenómeno se le llama efecto de microzona. Además menciona en su trabajo de investigación: Estos resultados pueden

explicar lo sucedido en Huaraz en el sismo de 1970, ubicado a más de 200 km del epicentro. Mientras que en el Centro sobre el suelo fino y con agua subterránea muy cerca de la superficie, las construcciones de adobe fallaron en un 100%, en Centenario, 2 a 3 kilómetros al norte, viviendas muy vulnerables de adobe de dos pisos no sufrieron daños, debido al suelo aluvial compacto y seco, conformado por piedras redondeadas, matriz de arena gruesa. En Centenario la aceleración debe haber sido muy pequeña, pero en el Centro la amplificación fue tan grande, que causó el colapso de todas las construcciones de adobe y que las edificaciones de concreto y albañilería sufrieron serios daños.

En España, Figueras, S., y Macau, A. (2012) [3], nos indican: El movimiento del suelo durante un terremoto puede ser amplificado por las condiciones geológicas, geotécnicas y topográficas del terreno por el que se propagan las ondas sísmicas que provienen del sustrato rocoso. La modificación del movimiento del suelo en su amplitud, duración y contenido frecuencial se conoce con el nombre de efecto sísmico local y juega un papel muy importante en el grado de distribución de daños durante un terremoto. En muchos terremotos destructores la geología superficial de un área urbana ha influido notablemente en el nivel de la sacudida sísmica, sobretodo en el rango de periodos que coincide con el periodo de vibración de las estructuras. Los efectos sísmicos locales tienen que ser caracterizados en los estudios de peligrosidad sísmica a escala local, los resultados de estos estudios se presentan en forma de mapas de microzonificación sísmica y aceleraciones espectrales en distintos tipos de suelo, que serán considerados en la planificación del territorio, en el diseño antisísmico de estructuras y en la revisión de las normas de construcción sismo-resistente. Además Morales, F. (2012) [4], nos indica que la amplificación sísmica y el patrón de daño observado durante sismos de gran magnitud presentan una importante variabilidad de un lugar a otro, aun en distancias relativamente cortas, siendo esto explicado por las variaciones locales en el tipo de suelo y la topografía. Este fenómeno de amplificación local de las ondas sísmicas asociadas principalmente a las propiedades geotécnicas del subsuelo y profundidad del basamento rocoso se suele denominar "efecto de sitio" o simplemente "amplificación de suelos". De este modo, el daño causado por sismos es fuertemente dependiente de las condiciones locales del terreno y por tanto la caracterización del subsuelo es un tema de considerable interés en la ingeniería.

La amplificación del movimiento del suelo es el responsable del daño ocurrido en áreas constituidas por depósitos de sedimentos blandos y poco compactos.

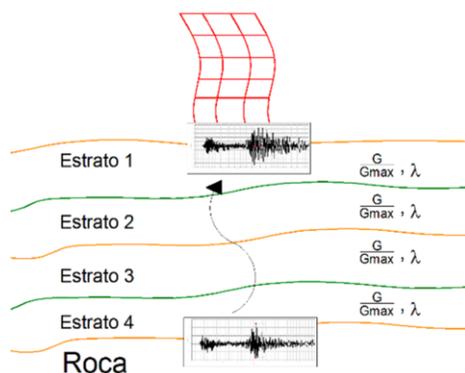


Figura 1. Esquema viaje de la onda a través de los diferentes estratos.

El estudio de la respuesta sísmica del suelo es un campo de interés en el análisis de riesgo sísmico y en el diseño sismorresistente y está siendo objeto de numerosos trabajos sobre todo tras los desastres de recientes terremotos clasificados como destructivos. En la presente investigación se estudia el efecto de sitio en lo que se refiere al análisis de valores aceleración máxima o pico, y su vinculación con las características geológicas y la composición litológica de las formaciones superficiales (propiedades geotécnicas y dinámicas de los estratos de suelo).

3.2. Modelo Lineal Equivalente

La hipótesis fundamental del método lineal equivalente, es que la respuesta no lineal puede ser aproximada de manera satisfactoria por un modelo lineal elástico amortiguado si las propiedades del modelo son escogidas apropiadamente. Las propiedades esfuerzo-deformación, son definidas por un par de curvas que representan la degradación del módulo de corte secante con la deformación y la variación del amortiguamiento con la deformación. Uno de los modelos constitutivos más sencillos y ampliamente utilizados en los métodos de modelación desacoplada es el lineal equivalente. En este la respuesta dinámica del suelo producida por las acciones sísmicas se puede evaluar mediante dos parámetros: el módulo de corte y la relación de amortiguamiento, los cuales son dependientes de la deformación cortante cíclica, γ . El módulo de corte es normalmente definido como la pendiente de la línea secante que conecta el punto extremo del ciclo de histéresis para una deformación cortante, como se muestra en la figura 2.

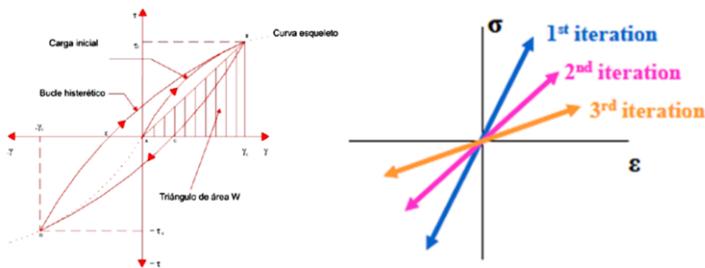


Figura 2. Histéresis Esfuerzo-Deformación para diferentes amplitudes de deformación y cambio de G respecto a cada iteración de entrada del sismo.

Para aplicar los métodos numéricos de estudios de efectos locales, es necesario: Un modelo matemático que represente el fenómeno sísmico con sus efectos de fuente y propagación a través del medio, y definir una serie de parámetros geológicos y geotécnicos del emplazamiento a estudiar.

3.3. Modelo Lineal Equivalente: Análisis Unidimensional por Elementos Finitos (1D)

En general, un análisis por elementos finitos consiste en dividir un problema (un medio continuo) en una serie de subdominios denominados elementos finitos, donde cada uno de estos elementos está definido a su vez por una serie de puntos llamados nodos. Un nodo puede pertenecer a uno o más elementos finitos y su función es describir la distribución de incógnitas dentro del elemento y conectar o unir todos los elementos dentro de un dominio, así como asegurar la compatibilidad de éstos. Al conjunto de

nodos y elementos se le conoce como malla de elementos finitos. Una vez dividido el problema se realizan ecuaciones de equilibrio, compatibilidad y relaciones constitutivas a cada elemento y se construye un sistema de ecuaciones. El sistema de ecuaciones puede ser resuelto utilizando álgebra lineal o algún método no lineal. El número de ecuaciones del sistema será proporcional al número de nodos, ya que son éstos los que contienen las incógnitas. Con el sistema de ecuaciones resuelto se tiene el comportamiento de cada elemento y se puede reconstruir el comportamiento del problema como un todo. En los análisis por elementos finitos, se busca un modelo de geometría simplificada, donde los modelos numéricos deben ser una abstracción simplificada de las condiciones reales de campo.

3.4. Análisis de Respuesta Sísmica con Quake/W

En la Figura 3, se muestra un ejemplo del uso del programa Quake/W 2012, que es parte del software GeoStudio de la compañía Geo-Slope International [6]. Este programa realiza un análisis dinámico o análisis sísmico de estructuras de tierra sometidas a terremotos, mediante un análisis unidimensional por el método de elementos finitos.

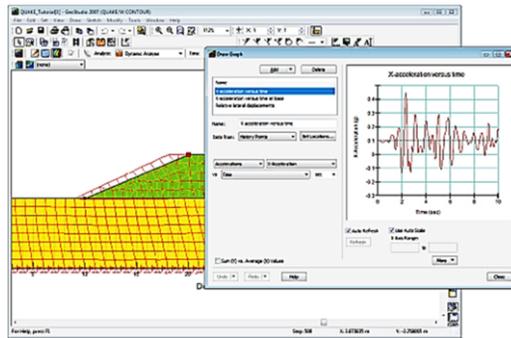


Figura 3. Ejemplo de uso del programa Quake/W 2012.

Un análisis de elementos finitos se basa en tres aspectos fundamentales, la discretización de los elementos, la definición de las propiedades de los materiales y la asignación de condiciones de frontera. La discretización se encarga de definir la geometría, áreas y volúmenes, además de construir la malla de elementos finitos.

4. Metodología

De la investigación realizada para fines de nuestro estudio, se resume en el siguiente marco lógico de actividades:

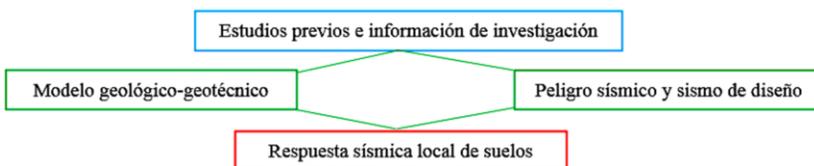


Figura 4. Marco lógico de actividades para la investigación.

4.1. Modelo Geológico-Geotécnico y Sismo de Diseño

En esta etapa se han realizado los análisis geotécnicos para concebir un modelo geológico- geotécnico de los depósitos de suelos en la zona céntrica urbana de la ciudad de Huaraz, para ello se han obtenido los mapas relacionados a este fin, para luego lograr procesar la información y facilitar así su interpretación. Los resultados obtenidos ofrecen un modelo que se resume en el perfil estratigráfico del modelo geológico-geotécnico para la respuesta sísmica, con los cuales se ha evaluado los resultados de los análisis de respuesta local. Se presenta el mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Huaraz, que nos ha permitido analizar la información geotécnica y modelar la respuesta de sitio de acuerdo a las distintas metodologías existentes.

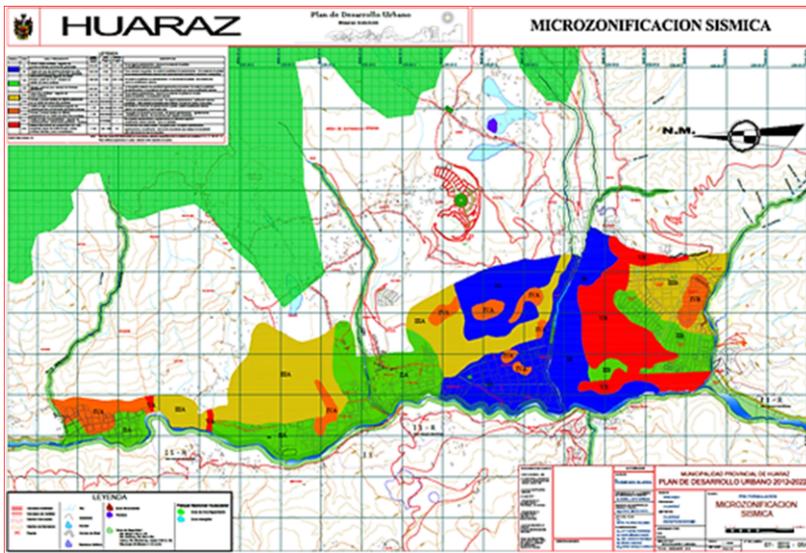


Figura 5. Mapa de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Huaraz.

Para la zona de estudio se presenta los siguientes resultados de la investigación geotécnica y geofísica realizadas:

Tabla 1. Propiedades y parámetros geotécnicos y dinámicos del perfil estratigráfico del modelo geológico-geotécnico para la zona céntrica urbana de la ciudad de Huaraz.

Estrato Espesor	Profundidad	Clasificación SUCS Descripción	Peso Unitario γ kN/m ³	Cohesión c' kPa	Ángulo de Fricción ϕ' (°)	Relación de Poisson N	Velocidad de propagación de ondas sísmicas		Módulo de Corte G kPa	Módulo de Elasticidad E KPa
							V _p m/s	V _s m/s		
Estrato 1 10 mts.	0.00 m a -10.0 m	CL Arcilla limosa y arenosa	18.0	19.6	21.0	0.33	344.0	172.0	54,416	145,109
Estrato 2 12 mts	-10.0 m a -22.0 m	SC Arena arcillosa y limosa	18.4	9.8	24.0	0.33	372.0	186.0	65,018	173,382
Estrato 3 38 mts	-22.0 m a -60.0 m	GC, Bolonería + Matriz granular arcillosa	19.2	4.9	26.0	0.33	968.0	484.0	458,985	1'123,960
Estrato 4	-60.0 m	Roca (basamento rocoso)	25.1	0.0	48.0	0.25	3,928.0	2,267.8	13'161,741	32'904,352

El sismo de diseño utilizado para el modelamiento y la evaluación de respuesta sísmica local, es el acelerograma del sismo de 31-05-1970 E-O, registrado en la Estación del Parque de La Reserva-Lima, la cual ha sido escalado convenientemente de acuerdo a los estudios de peligro sísmico de la zona. Como resultado para el modelamiento numérico se tiene el siguiente perfil estratigráfico para el análisis unidimensional 1D:

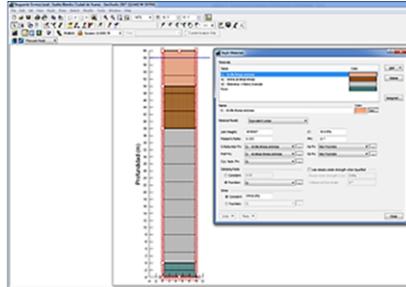


Figura 6. Perfil estratigráfico obtenido para el modelo geológico-geotécnico 1D.

5. Resultados

Es de vital importancia en la actualidad conocer y evaluar la respuesta sísmica de la superficie. A continuación se presentan los resultados de la investigación realizada para el perfil estratigráfico del modelo geológico-geotécnico y sismo de diseño obtenidos en la evaluación de la respuesta sísmica local de suelos blandos en la zona céntrica urbana de la ciudad de Huaraz:

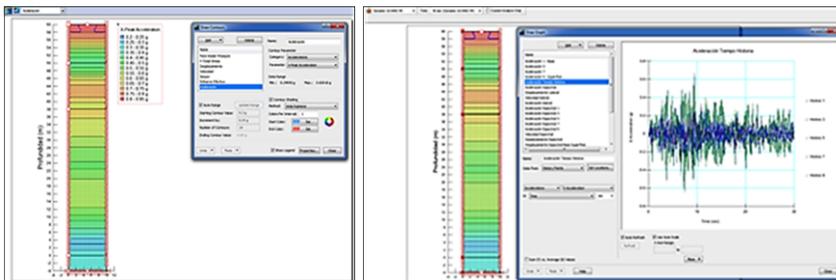


Figura 7. Resultados para la aceleración pico y aceleración tiempo historia.

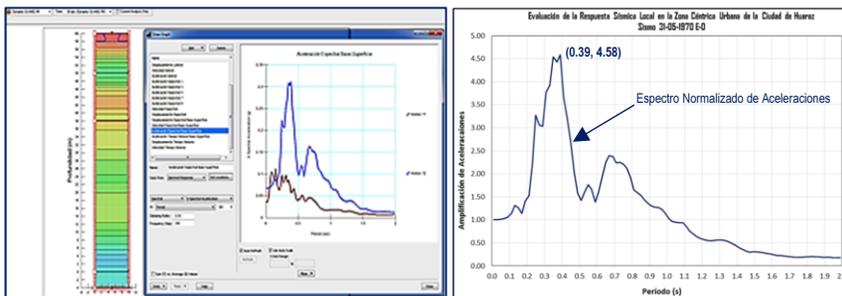


Figura 8. Resultados para la aceleración espectral entre la base y superficie, y la amplificación sísmica.

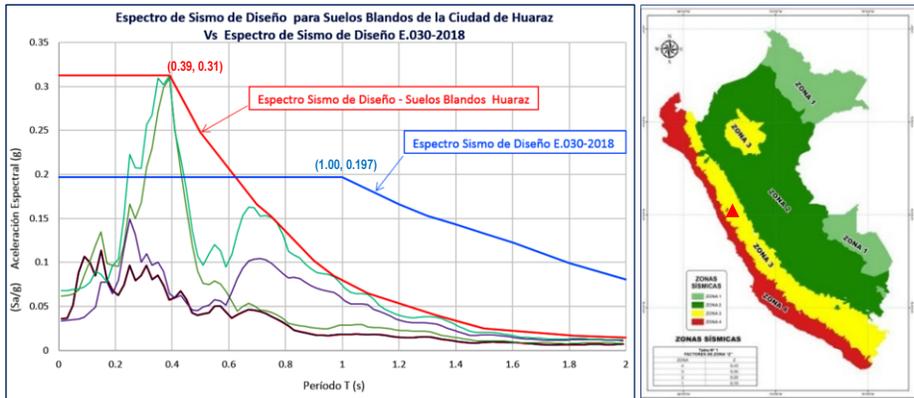


Figura 9. Resultados de la comparación del espectro de sismo de diseño para suelos blandos de la ciudad de Huaraz, versus el espectro de sismo de diseño de la norma E.030-2018 de Diseño Sismorresistente.

6. Conclusiones

- De la evaluación realizada, se concluye que la zona céntrica urbana de la ciudad de Huaraz, presenta una amplificación sísmica considerable y muy alta debido a la aplicación del sismo de diseño al modelo geológico-geotécnico obtenido para el perfil estratigráfico del terreno. La amplificación sísmica muy alta se produce debido a la respuesta sísmica local de los suelos blandos y ocurre en periodos bajos, lo cual incide directamente en el comportamiento sismorresistente de las edificaciones construidas actualmente, las cuales tendrían un daño catastrófico ante un sismo severo, por el efecto de la alta amplificación sísmica de esta área.
- El análisis unidimensional (1D) aplicado al modelo geológico-geotécnico, caracteriza adecuadamente el comportamiento sísmico de terreno, y por lo tanto se logra resultados más confiables y realistas para la evaluación de la respuesta sísmica local, al aplicarse en este modelo el análisis lineal equivalente mediante el uso del método de elementos finitos. Las altas amplificaciones que se producen en la zona céntrica urbana de la ciudad de Huaraz, lo convierte en un área de vulnerabilidad y riesgo alto, donde es necesario para el diseño de nuevas edificaciones sismorresistentes en esta zona hacer uso del espectro del sismo de diseño obtenido en la investigación.

Referencias

- [1] Kramer, S., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, USA, 1996.
- [2] Kuroiwa, J., *Reducción de Desastres*. Lima, Perú, 2002.
- [3] Figueras, S. y Macau, A., *Caracterización de efectos sísmicos locales en la ciudad de Lorca*, Instituto Geológico de Catalunya, Barcelona, España, 2012.
- [4] Morales, F., *Respuesta sísmica local en puntos de la ciudad de Granada*, Tesis de Maestría, Universidad de Granada, España, 2012.
- [5] Coral, H., *Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de zonas urbanizadas en Andorra*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2003.
- [6] Geo-Slope International Ltd., *Dynamic modeling with QUAKE/W 2012*. Calgary, Alberta, Canada, www.geo-slope.com, Edición Octubre 2014.