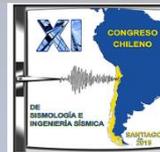




ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA



COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE INSTALACIONES EN EL INTERIOR DE CAVERNAS

Patricio Pineda Nalli

PPN INGENIERÍA

Santiago de Chile – 18 al 20 de Marzo

XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica – ACHISINA 2015

PPN
Ingeniería

MOTIVACIÓN

- Chile país con mega proyectos mineros y gran cantidad de instalaciones en cavernas

<u>Proyecto</u>	<u>Producción⁽¹⁾</u>	<u>Inversión</u>
Andina Fase II	680 ktpa	US\$6.808
Nuevo Nivel Mina	434 ktpa	US\$3.424
Mina Chuquicamata Subterránea	320 ktpa	US\$4.200

(1) Toneladas de cobre fino al año

MOTIVACIÓN



Proyecto

Andina Fase II

Nuevo Nivel Mina

**Mina Chuquicamata
Subterránea**

Túneles

50km

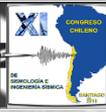
2 x 9km

1.020km al año 2060

**“1.200 km de túneles
en los próximos 5
años (Codelco)”**



ALCANCES

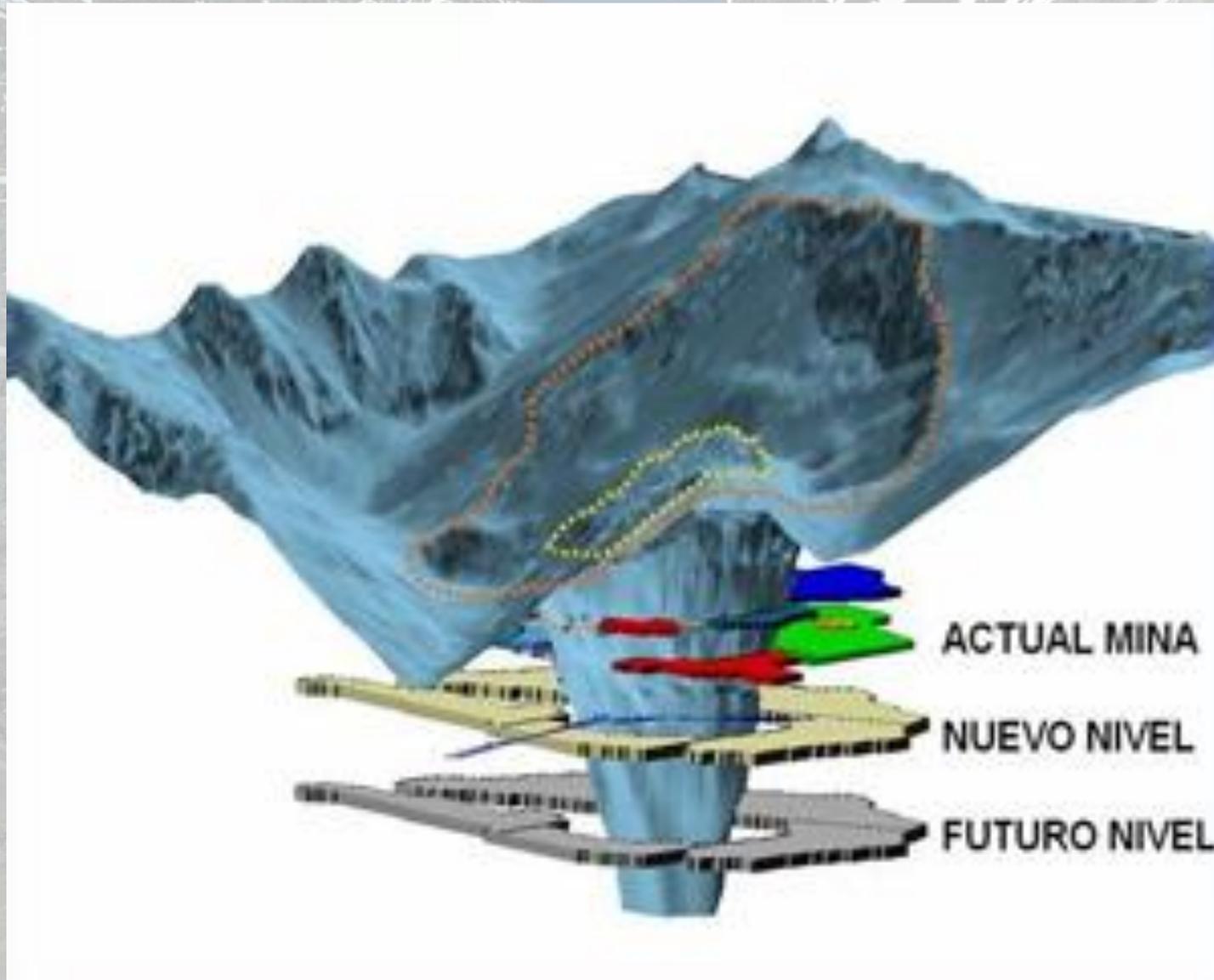


- **Conocer las instalaciones en cavernas**
- **Planteamiento del Tema**
- **Metodología de análisis**
- **Evaluar comportamiento sísmico en cavernas versus superficie.**
- **Conclusiones y recomendaciones**

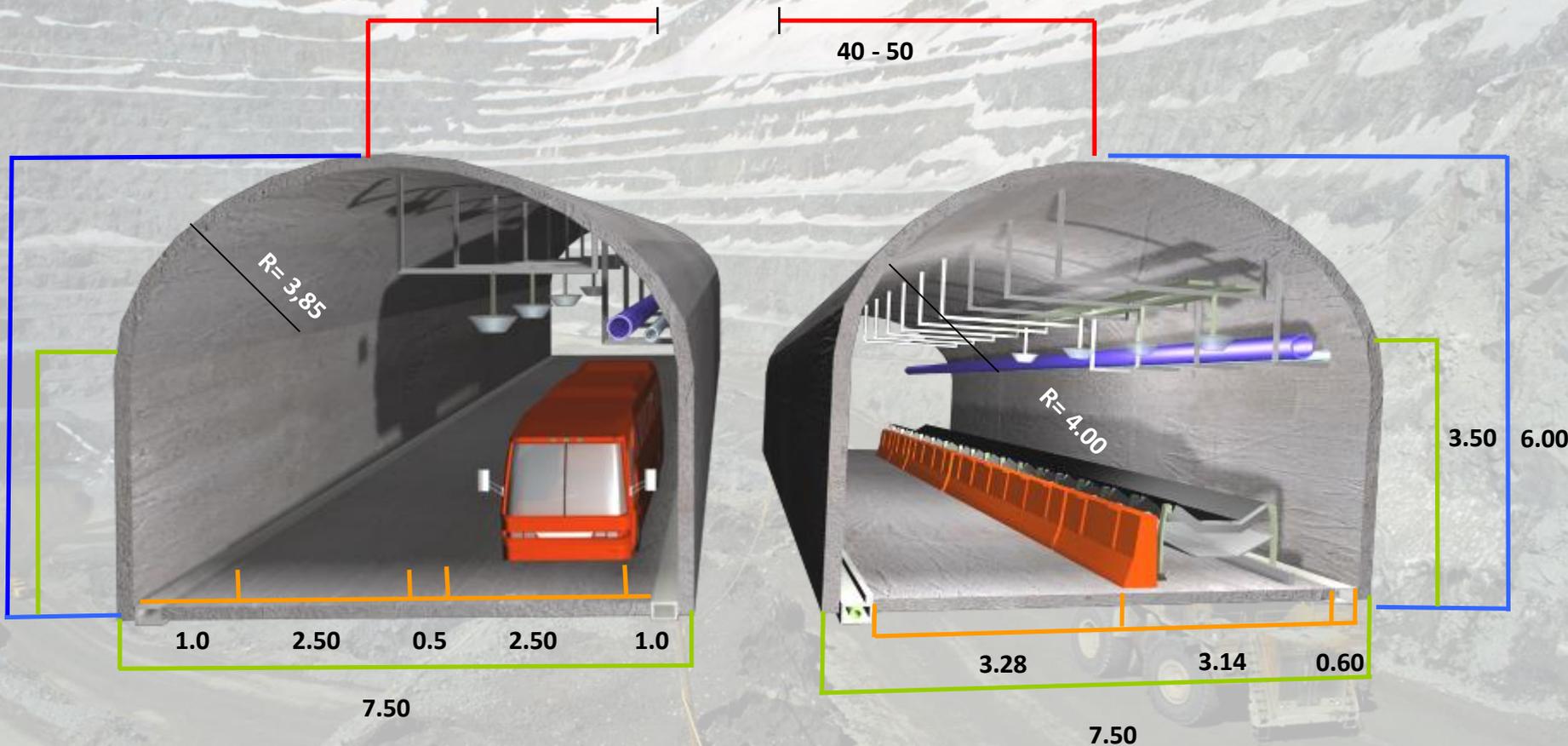
Fuera del Alcance

Túneles y cavernas (macizo rocoso)

NIVELES DE EXPLOTACIÓN



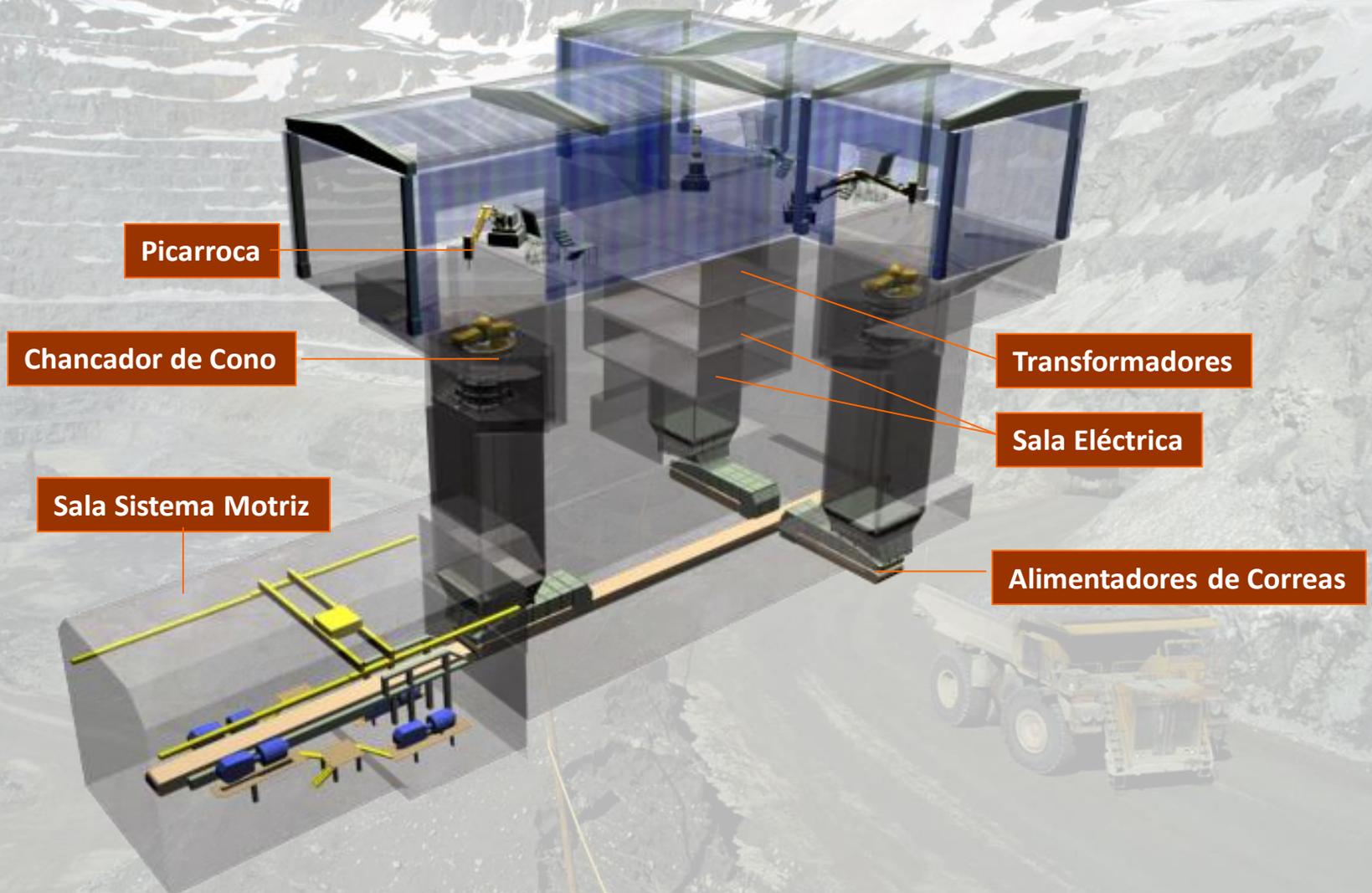
ACCESOS PRINCIPALES



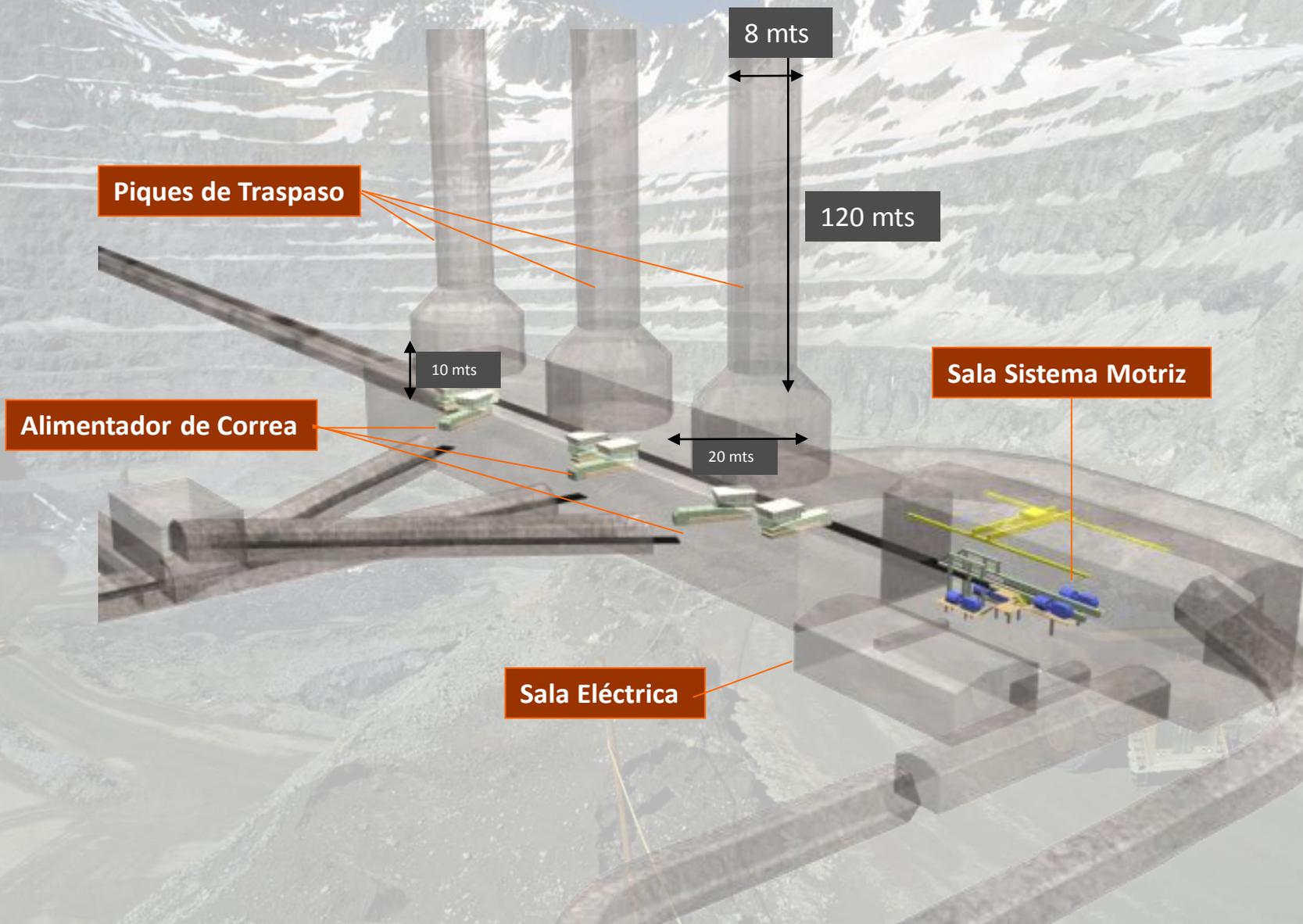
Personal

Correas

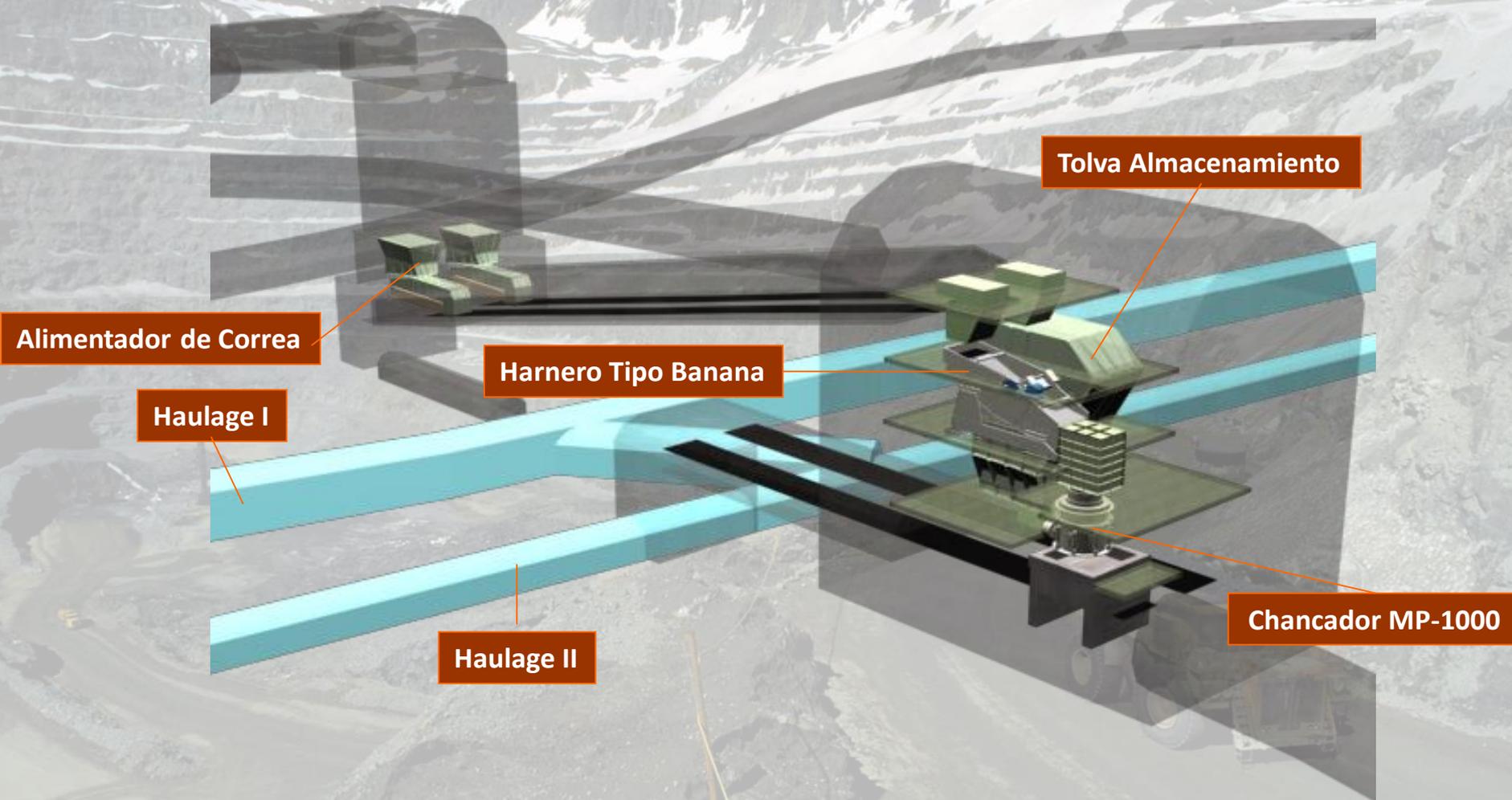
CHANCADO PRIMARIO



PIQUES DE TRASPASO DE MINERAL



CHANCADO SECUNDARIO



CORREAS TRANSPORTADORAS



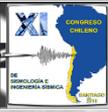
ÁREA DE CHANCADO



MOLINO UNITARIO



INSTALACIONES EN CAVERNAS



Estructuras metálicas

Áreas de chancado: primario-secundario

Correas transportadoras

Molinos

Plantas de hormigón

Salas eléctricas

Sistemas de soportes de cañerías

Barrios cívicos: casinos, comedores, habitaciones

CLASIFICACIÓN DE OBRAS SUBT.



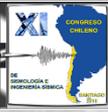
- Superficiales: $H < 3D$ (Hoek, Carranza, Corkum, 2002)
- Profundas: $H > 100\text{m}$ (Sharam y Judd, 1991)
- Intermedias

H: profundidad

D: diámetro caverna



ORIGEN DEL TEMA



Preguntas de proyectos:

“¿Se usa NCh2369 o Estudio de Riesgo sísmico?”

“¿Hay norma que aborde el comportamiento de infraestructuras subterráneas?”

“¿Hay información suficiente disponible?”

“¿Hay amplificación de suelos?”



DISEÑO ACTUAL EN CAVERNAS



Paso 1: Definición del Ambiente Sísmico

Estudio de Riesgo Sísmico

Definición del Terremoto de Diseño

Parámetros del suelo (Movimiento)

Paso 2: Evaluación de la Respuesta Dinámica del Suelo

Fallas del Suelo

Dinámica de Suelos y Deformaciones

Paso 3: Evaluación de la Respuesta Dinámica de la Estructura

Combinaciones de Cargas

Respuesta de la Estructura a Deformaciones de Suelo

Diseño Sísmico Especial

DISEÑO ACTUAL EN CAVERNAS



- **En Chile, no existe una norma que aborde el comportamiento de infraestructuras subterráneas.**
- **Diseños se realizan con NCh2369.Of2003.**
- **Uso de registros y espectros en superficie.**
- **Consideran efectos dinámicos de superficie y de sitio.**

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS



- **Análisis teórico de propagación de ondas**
- **Uso de modelos simplificados, consideraciones especiales para cada proyecto**
- **Métodos geofísicos y geotécnicos más sofisticados (fuera de este alcance)**
- **Incorporación de registros sísmicos**
- **Registros de aceleraciones del sismo de Chile en 1985 (UTFSM, roca)**
- **Se consideran estratos rocosos con $v_s=1500\text{m/s}$ (promedio).**

MARCO TEÓRICO

- **Sismología:**

Ondas de cuerpo: P (compresión) y S (corte)

Ondas superficiales: amplitud decrece exponencialmente en profundidad

- **Propagación de una onda tridimensional**

Relación tensión-deformación:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= C_{11}\epsilon_{xx} + C_{12}\epsilon_{yy} + C_{13}\epsilon_{zz} + C_{14}\epsilon_{xy} + C_{15}\epsilon_{yz} + C_{16}\epsilon_{zx} \\ \sigma_{yy} &= C_{21}\epsilon_{xx} + C_{22}\epsilon_{yy} + C_{23}\epsilon_{zz} + C_{24}\epsilon_{xy} + C_{25}\epsilon_{yz} + C_{26}\epsilon_{zx} \\ \sigma_{zz} &= C_{31}\epsilon_{xx} + C_{32}\epsilon_{yy} + C_{33}\epsilon_{zz} + C_{34}\epsilon_{xy} + C_{35}\epsilon_{yz} + C_{36}\epsilon_{zx} \\ \sigma_{xy} &= C_{41}\epsilon_{xx} + C_{42}\epsilon_{yy} + C_{43}\epsilon_{zz} + C_{44}\epsilon_{xy} + C_{45}\epsilon_{yz} + C_{46}\epsilon_{zx} \\ \sigma_{yz} &= C_{51}\epsilon_{xx} + C_{52}\epsilon_{yy} + C_{53}\epsilon_{zz} + C_{54}\epsilon_{xy} + C_{55}\epsilon_{yz} + C_{56}\epsilon_{zx} \\ \sigma_{zx} &= C_{61}\epsilon_{xx} + C_{62}\epsilon_{yy} + C_{63}\epsilon_{zz} + C_{64}\epsilon_{xy} + C_{65}\epsilon_{yz} + C_{66}\epsilon_{zx} \end{aligned}$$

**Forma
Generalizada**

MARCO TEÓRICO

- Coeficientes C_{ij} , constantes elásticas del material
- Condición de material isotrópico:

$$\begin{aligned}
 C_{12} &= C_{21} = C_{13} = C_{31} = C_{23} = C_{32} = \lambda \\
 C_{44} &= C_{55} = C_{66} = \mu \\
 C_{11} &= C_{22} = C_{33} = \lambda + 2\mu
 \end{aligned}$$

- Finalmente, con las reducciones:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= \lambda \bar{\epsilon} + 2\mu \epsilon_{xx} & \sigma_{xy} &= \mu \epsilon_{xy} \\
 \sigma_{yy} &= \lambda \bar{\epsilon} + 2\mu \epsilon_{yy} & \sigma_{yz} &= \mu \epsilon_{yz} \\
 \sigma_{zz} &= \lambda \bar{\epsilon} + 2\mu \epsilon_{zz} & \sigma_{zx} &= \mu \epsilon_{zx}
 \end{aligned}$$

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad K = \lambda + \frac{2\mu}{3} \quad G = \mu \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

MARCO TEÓRICO

**Ecuaciones de movimiento
(sólido elástico tridimensional):**

**Relación de
Velocidades:**

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}$$

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}}$$

AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DEL SUELO



Amplitud del movimiento en el depósito:

Solución completa: $U = B_1 \cos(pz) + B_2 \operatorname{sen}(pz) + \frac{a_b}{\Omega^2}$

Condiciones de borde:

- Roca Basal

$$u(z = 0) = u_g \Rightarrow y = 0 \Rightarrow U(0) = 0$$

- Superficie

$$\tau(z = H) = 0 \Rightarrow \gamma(z = H) = 0 \Rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=H} = 0 \Rightarrow \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_{z=H} = 0$$

Amplitud absoluta:

$$U = -\frac{a_b}{\Omega^2} [\cos(pz) + \tan(pH) \operatorname{sen}(pz)] e^{i\Omega t}$$

Aceleración absoluta:

$$\ddot{U} = a_b [\cos(pz) + \tan(pH) \operatorname{sen}(pz)] e^{i\Omega t}$$

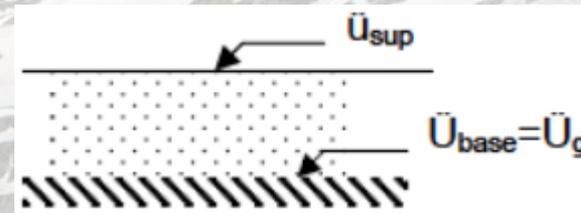
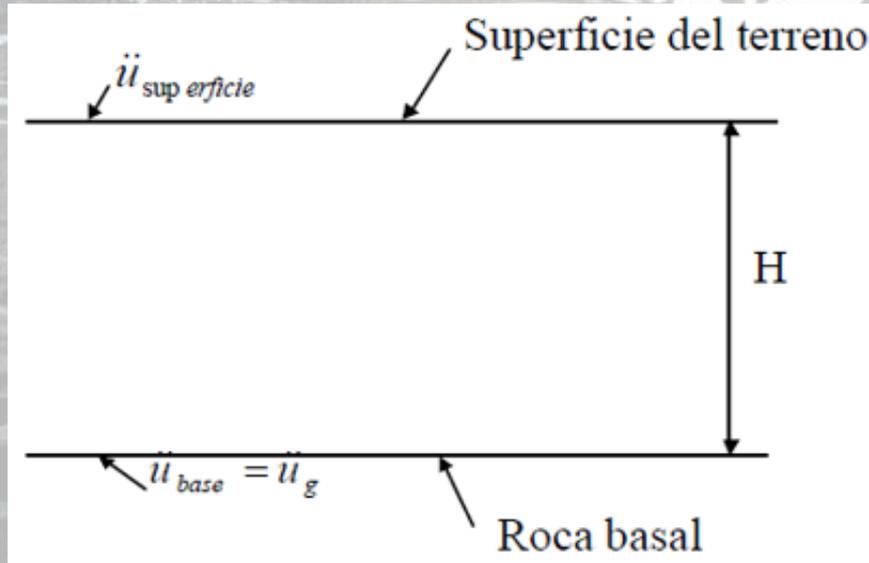
Aceleración en superficie:

$$\ddot{u}(z = H) = \ddot{u}_{\text{sup}} = \frac{a_b}{\cos(pH)} e^{i\Omega t}$$

AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DEL SUELO



Roca basal – superficie: Factor de amplificación:



$$A_1 = \frac{\ddot{u}_{sup}}{\ddot{u}_{base}}$$

Módulo:

$$\|A_1(\Omega)\| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2\alpha \cosh^2\beta + \sin^2\alpha \sinh^2\beta}}$$

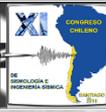
Frecuencias de resonancia:

$$\Omega = \frac{\pi V_s}{2H}, \frac{3\pi V_s}{2H}, \frac{5\pi V_s}{2H}, \frac{7\pi V_s}{2H} \dots$$

Períodos fundamentales:

$$T = \frac{4H}{V_s}, \frac{4H}{3V_s}, \frac{4H}{5V_s}, \frac{4H}{7V_s} \dots$$

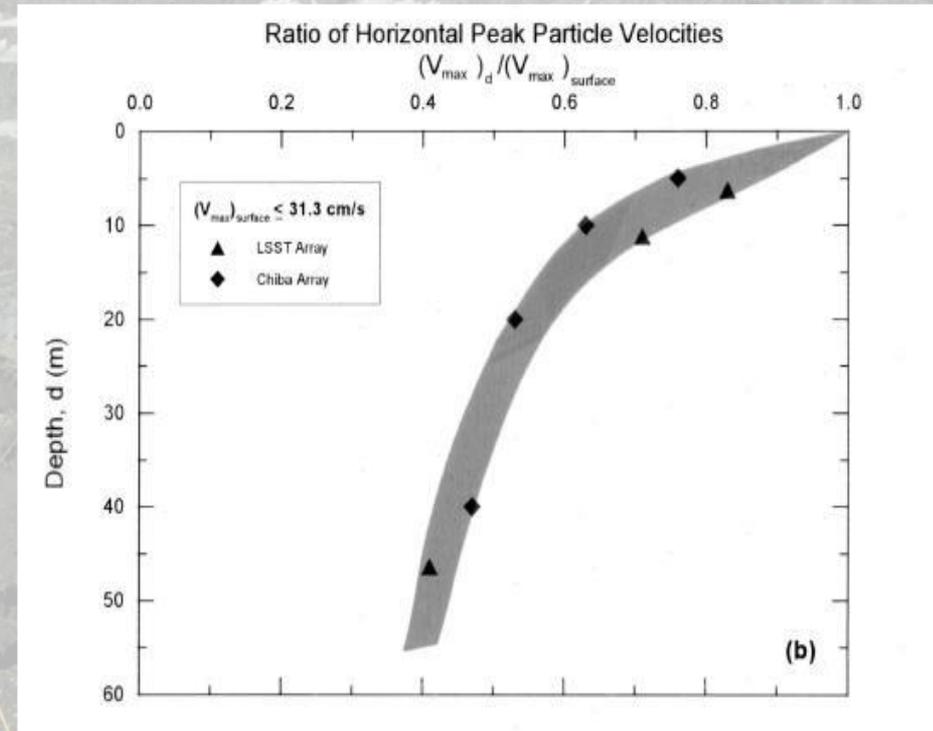
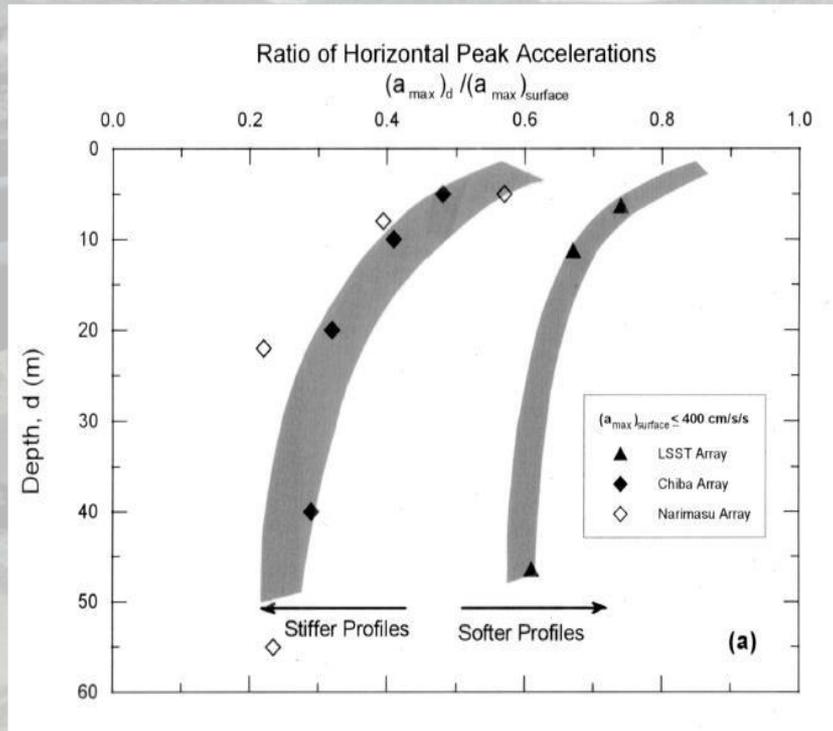
COMPORTAMIENTO EN CAVERNAS



- **Registros disponibles en superficie (normas consideran estos registros).**
- **Ondas de cuerpo (P y S) en estratos de suelos, afectas a amplificación dinámica.**
- **Ondas superficiales decaen rápidamente en profundidad.**
- **Instalaciones subterráneas afectas solo a ondas de cuerpo (Marchant and Weir, 2002).**

COMPORTAMIENTO EN CAVERNAS

- Aceleraciones y velocidades peak decaen rápidamente en profundidades (primeros 10m):
- No se analizan causas (decaimiento) en este trabajo.



- D.W. Sykora & Y. Moriwaki (1996).

MODELOS CONSIDERADOS (ANÁLISIS)

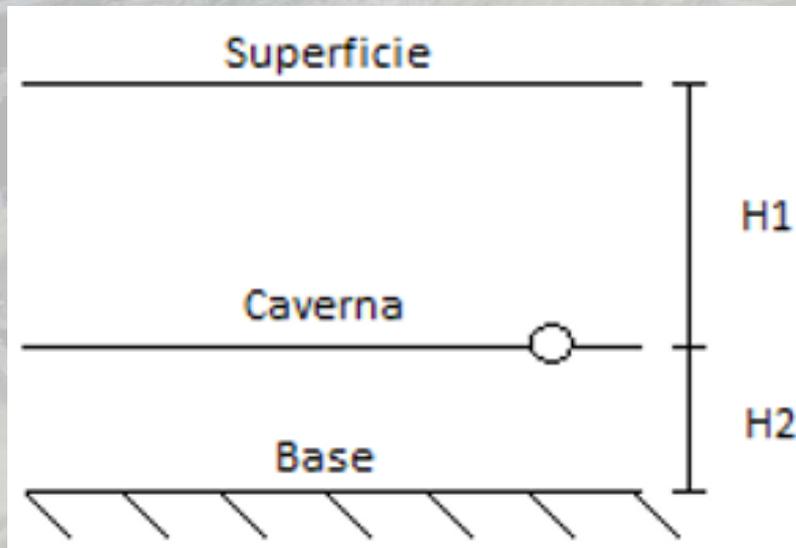


- Seis modelos con registros en roca.
- Sin degradación, amortiguamiento 2%.

Geometría

representativa:

Estratos del modelo:



Modelo	H1 [m]	H2 [m]	Total [m]
1	60	10	70
2	60	20	80
3	80	10	90
4	80	20	100
5	100	10	110
6	100	20	120

MODELOS CONSIDERADOS (ANÁLISIS)



Características de los modelos:

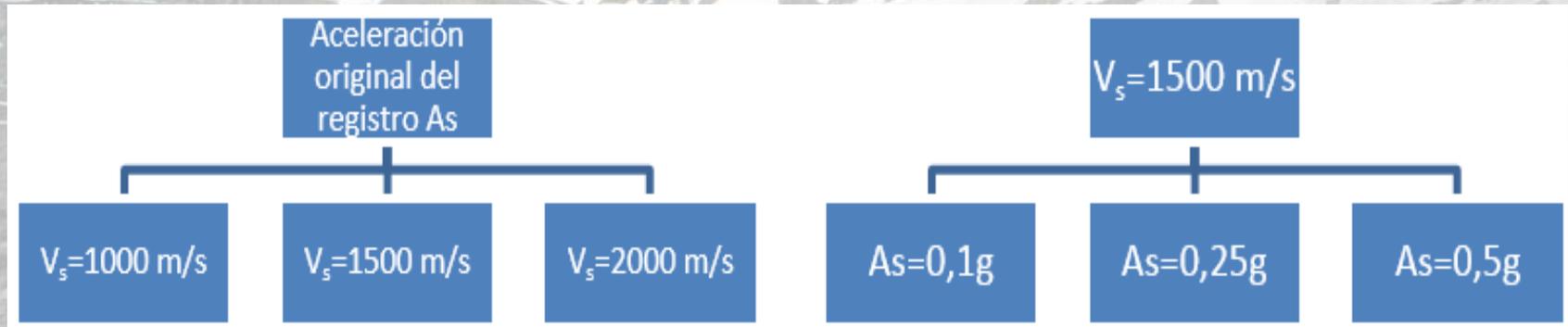
Estación	1 ^{era} Capa		2 ^{da} Capa		Tipo de Edificio	Localización del instrumento
	Espesor [m]	V_s [m/s]	Espesor [m]	V_s [m/s]		
Valparaíso (UTFSM)	1.4	312	18	1720	1 Piso	Nivel Piso
Quintay	4.5	155	31	1190	-----	Campo Libre
Las Tórtolas	1	520	13	1865	1 Piso	Sótano
Rapel	3	2130	9.5	3155	Túnel	Nivel Piso

Variantes del modelo:

- Velocidad de ondas de corte (V_s) del estrato
- Registro de aceleraciones (estaciones)
- Aceleración peak del registro

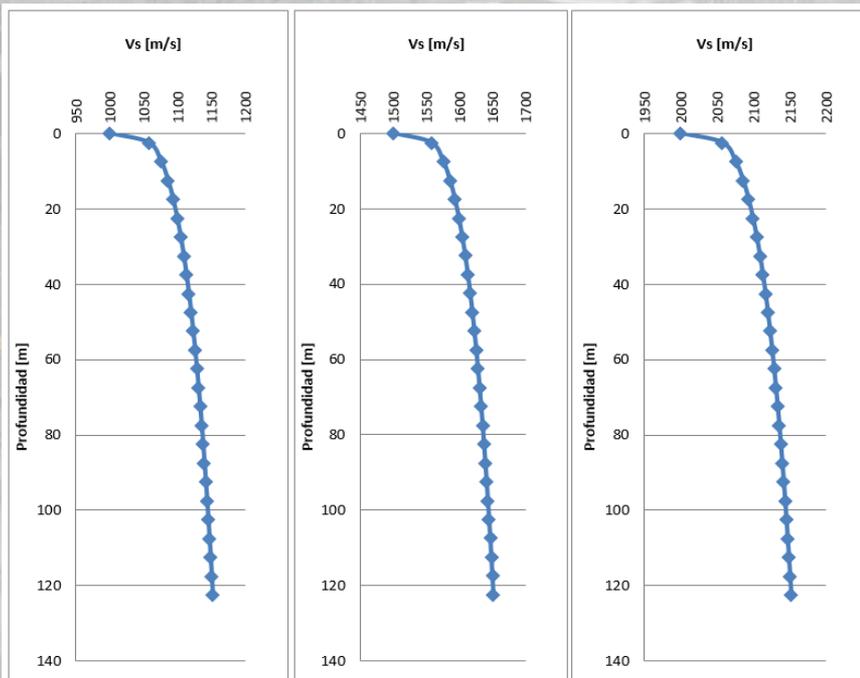
MODELOS CONSIDERADOS (ANÁLISIS)

Variantes del modelo:



Objetivos/verificaciones:

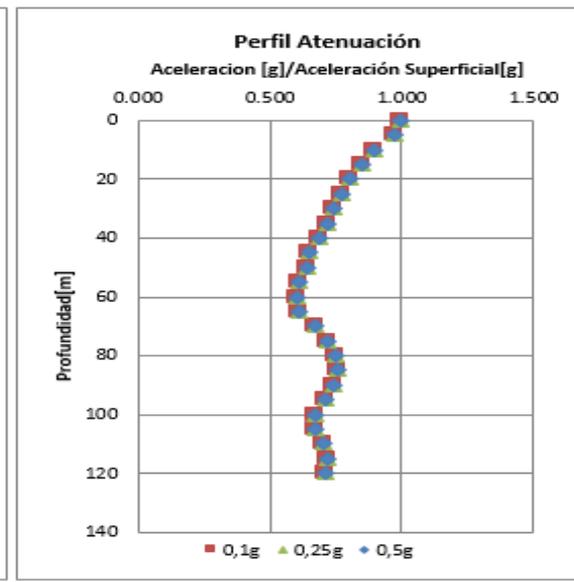
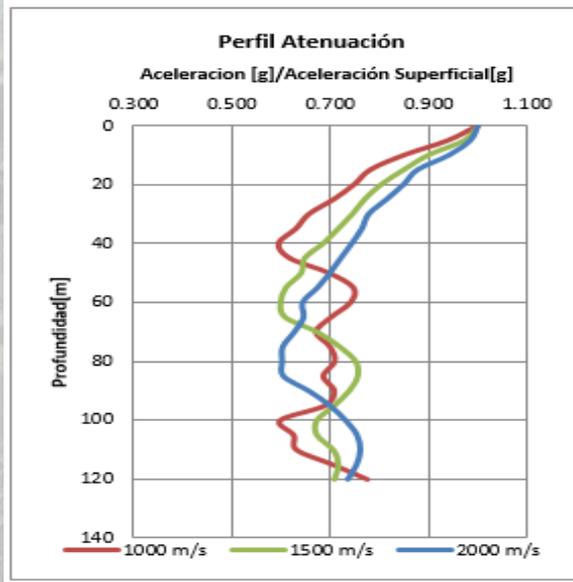
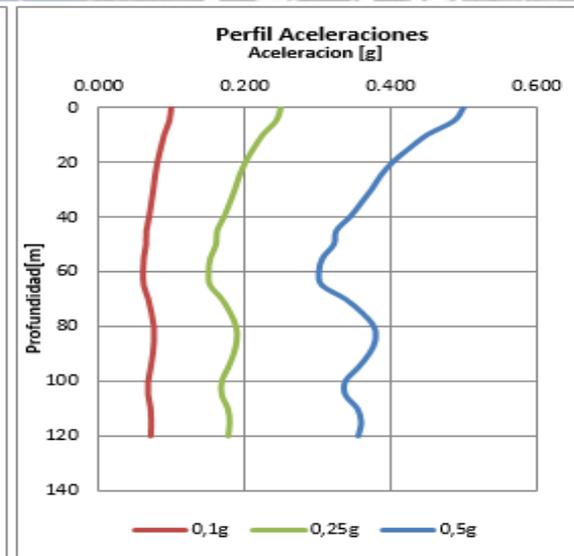
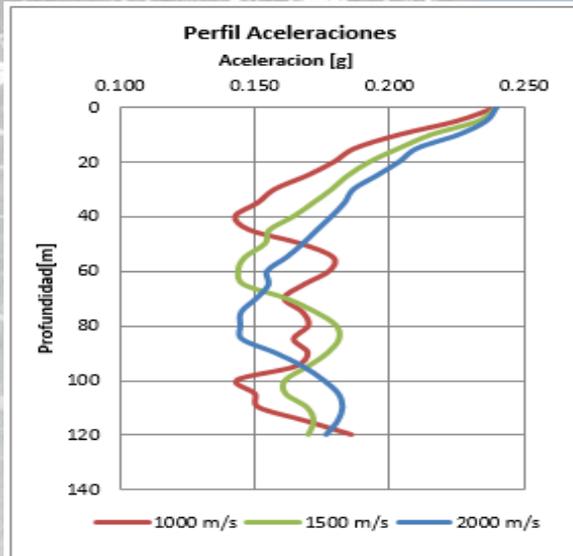
- Independencia de resultados.
- Comportamiento común para varios registros y diferentes condiciones.



Perfil de velocidades Vs considerados para 1000, 1500 y 2000 m/s

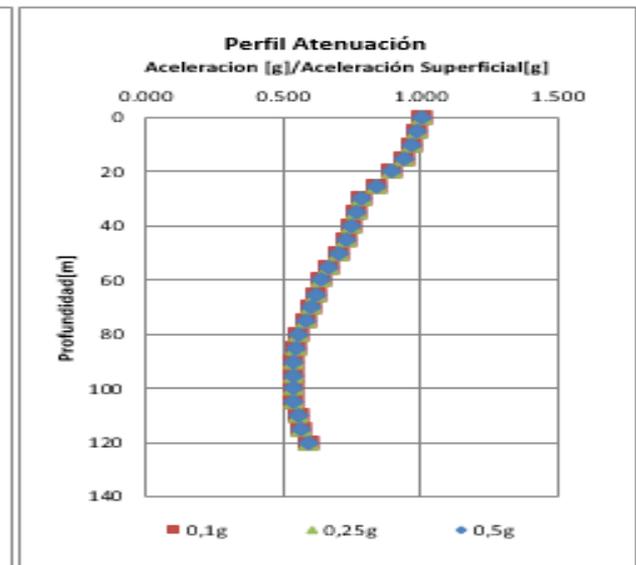
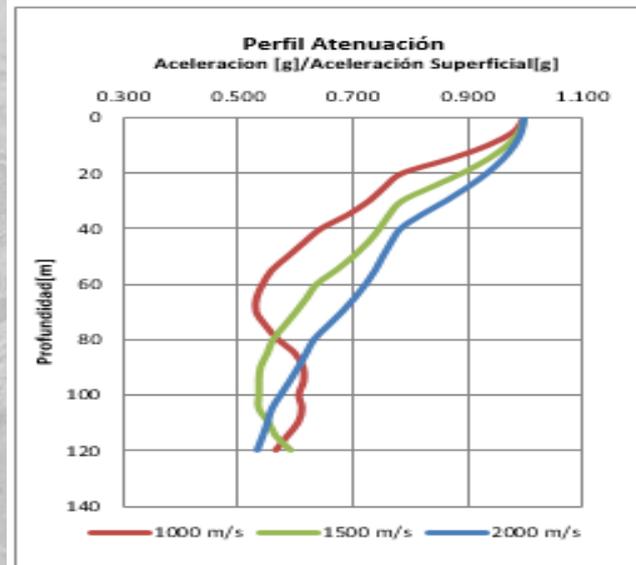
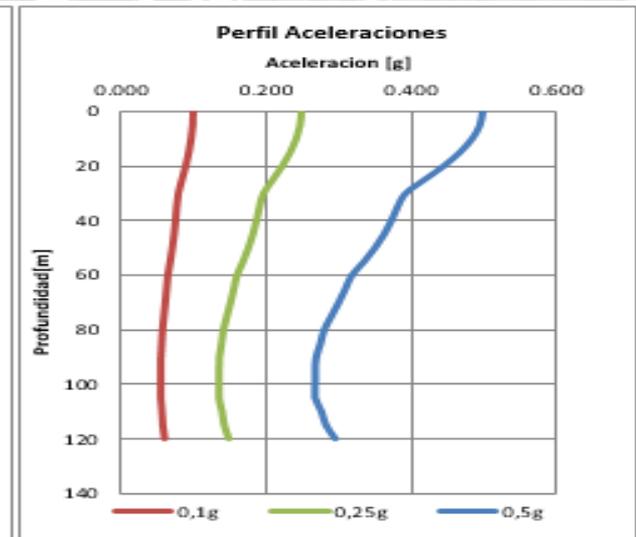
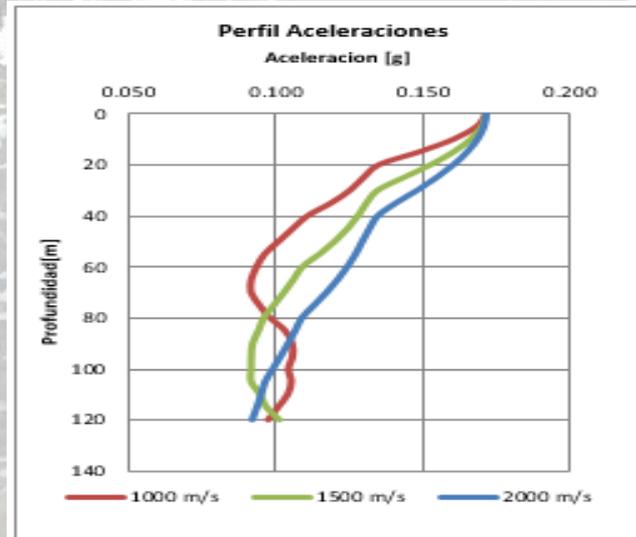
RESULTADOS DE LOS MODELOS

Quintay:



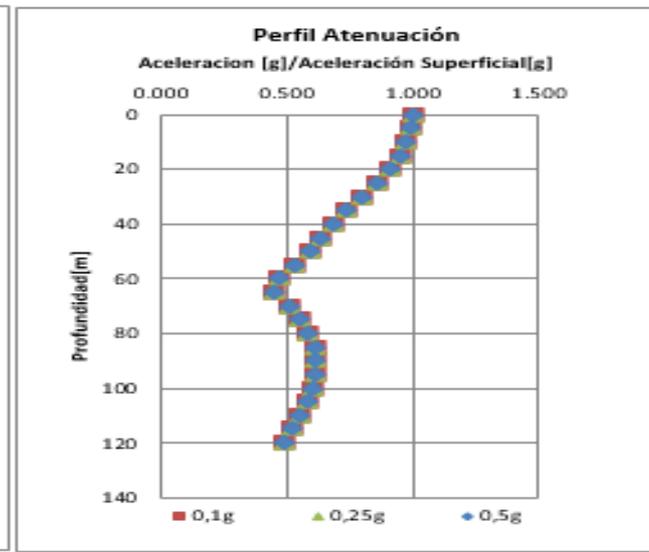
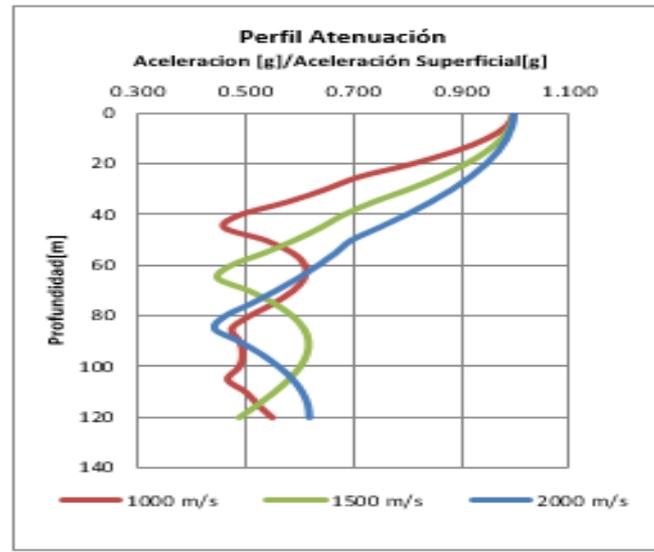
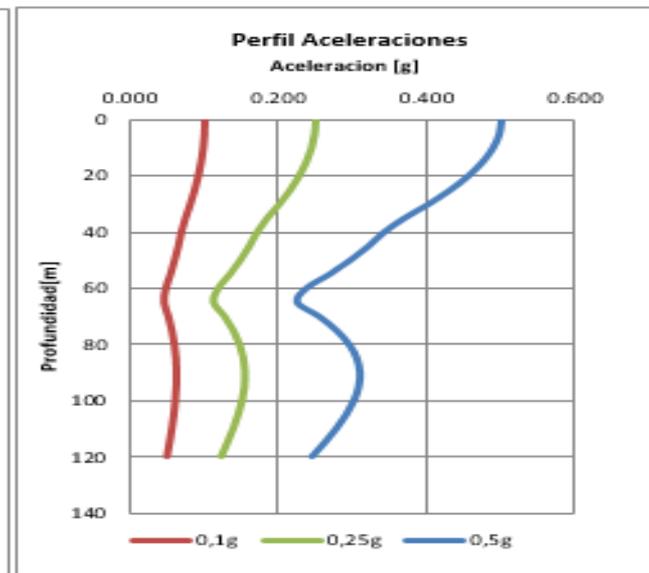
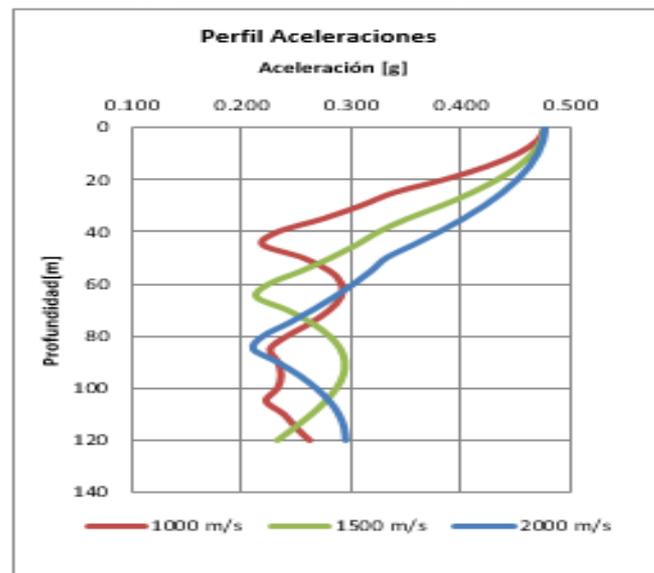
RESULTADOS DE LOS MODELOS

Las Tórtolas:



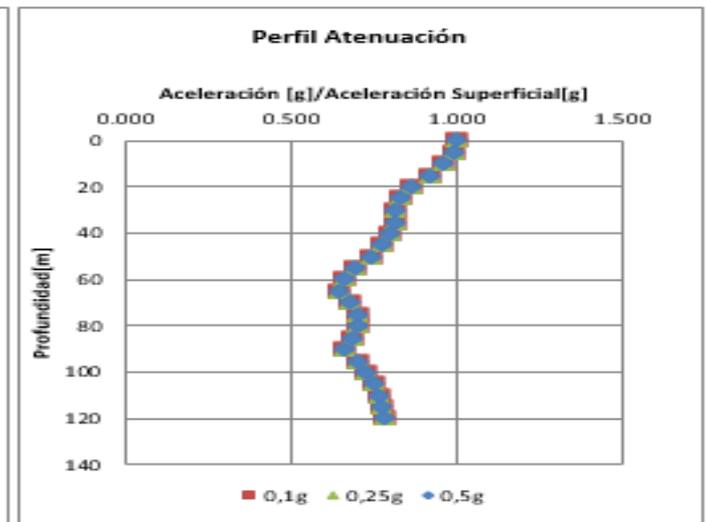
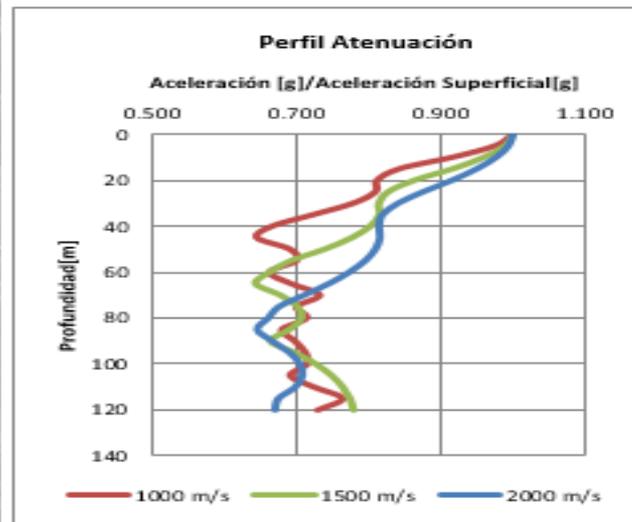
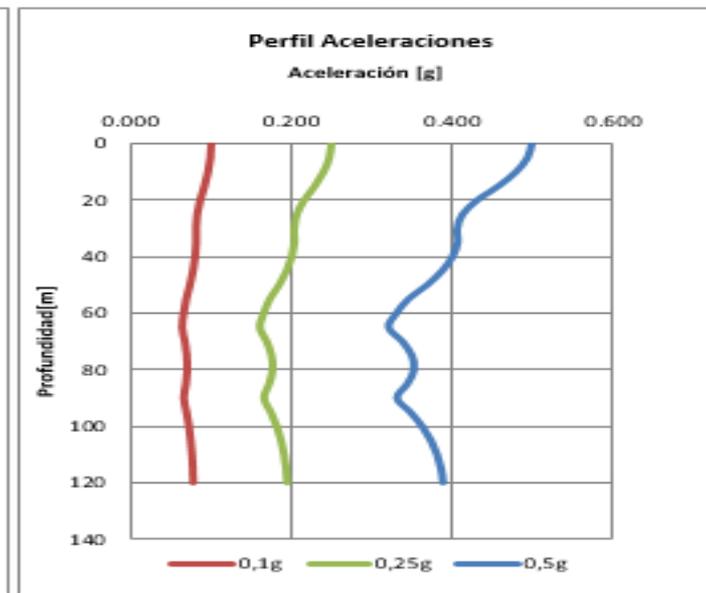
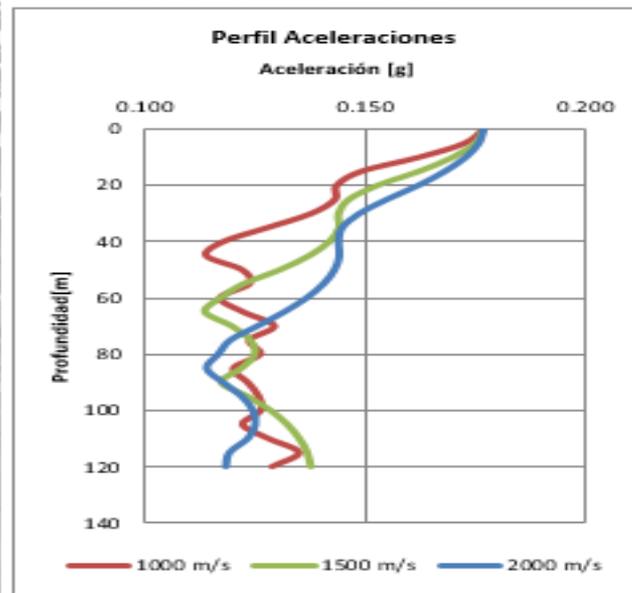
RESULTADOS DE LOS MODELOS

Rapel:

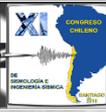


RESULTADOS DE LOS MODELOS

UTFSM:



CONCLUSIONES - MODELOS

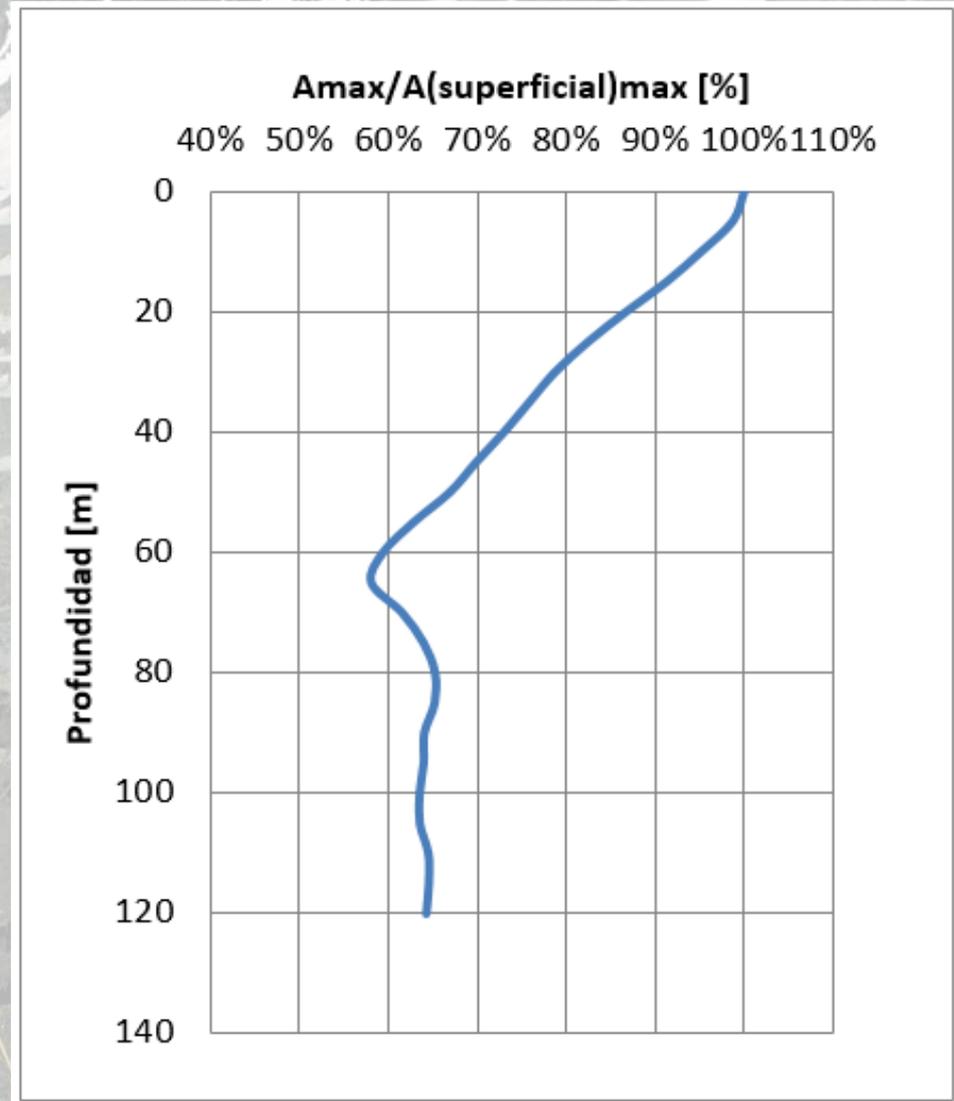


- **Diferentes registros, resultados distintos en valores, pero comportamiento similar.**
- **Hay tendencia a reducir aceleraciones máximas en profundidad.**
- **Con variación de velocidades comportamiento similar, pero decaimiento de aceleraciones mas lento.**
- **Hay una reducción de aceleraciones a mayor profundidad.**

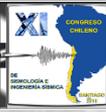
CONCLUSIONES - MODELOS



- Al variar aceleraciones peak, comportamiento es similar.
- Reducción de aceleraciones peak cercana al 30%.

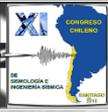


CONCLUSIONES FINALES



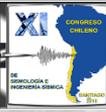
- Reducciones de aceleraciones del orden de 30% (superficie) a los 60m de profundidad.
- Aceleraciones bajo esta profundidad se mantienen constantes.
- Diseño sísmico en cavernas es menos exigente.
- Reducción de aceleraciones:
75% (NCh2369 - 5.8.1) < parámetro estudio

CONCLUSIONES FINALES

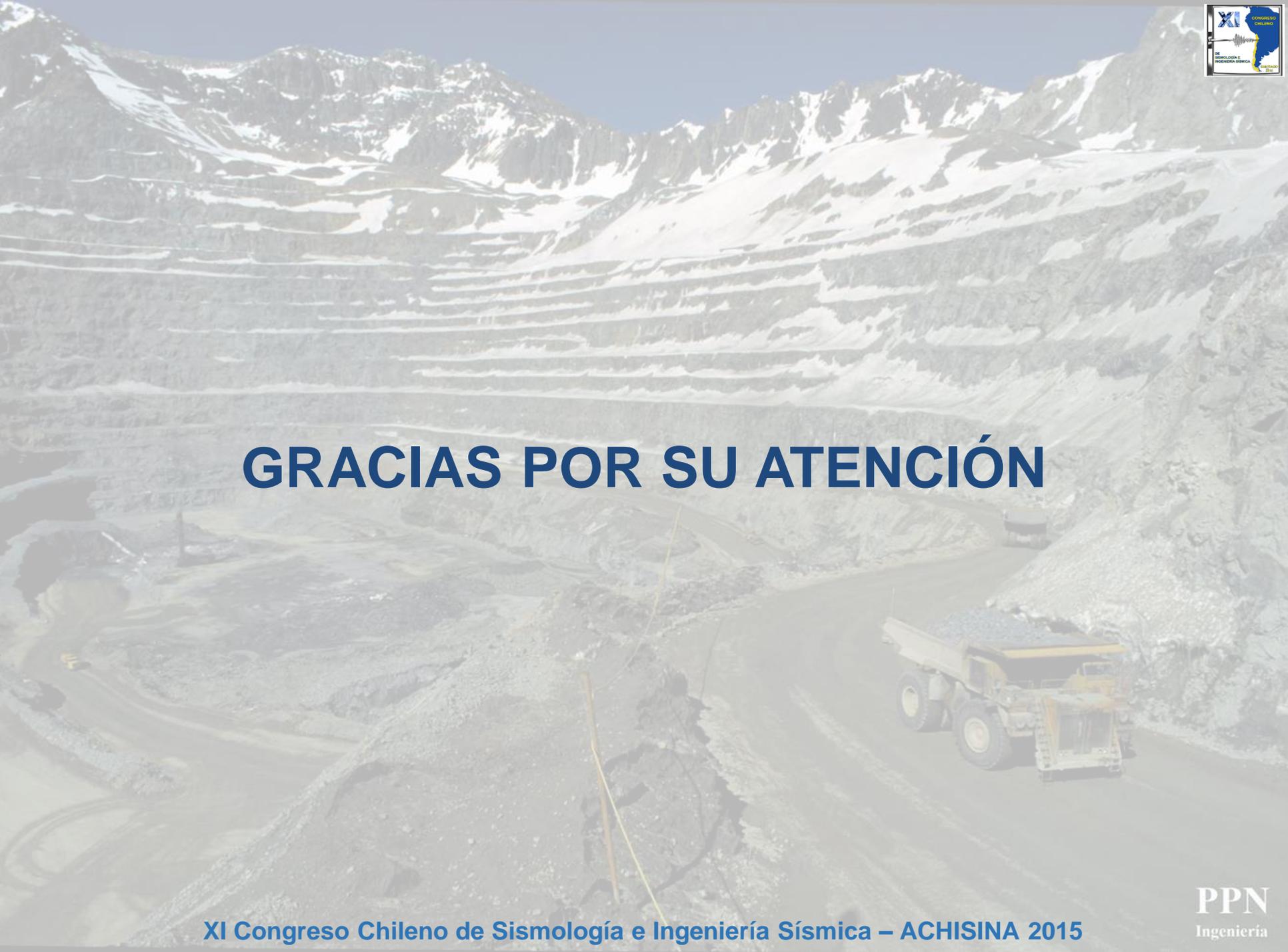


- **Alta sismicidad en Chile, tasas de daños menores que en instalaciones superficiales**
- **En algunos casos el diseño no es controlado por el sismo:**
 - “Detonaciones, evaluar distancias a la fuente y efectos”
 - “Vibraciones por operación de equipos”

RECOMENDACIONES



- Disponer de parámetros que caractericen el suelo.
- Registros sísmicos de la zona en estudio.
- Evaluar detonaciones versus sismos, en función de distancias a la fuente y efectos.
- Identificar fallas geológicas y alteraciones del macizo rocoso para evaluar efectos.



GRACIAS POR SU ATENCIÓN

INFORMACIÓN DE CONTACTO

Patricio Pineda Nalli
Consultor en Ingeniería Sísmica
M.Sc. Universidad de Chile

(+569) 7377 7963

patricio.pineda@ppning.com

ppinedan@gmail.com

www.ppning.com