



PELIGRO Y RIESGO SÍSMICO APLICADO A PROYECTOS MINEROS

Patricio Pineda Nalli

Santiago, 13 de Agosto de 2015

TEMAS

- **Definiciones**
- **Tipos de Estudios**
- **NCh2369.Of2003**
- **Comportamiento Sísmico en Interior de Cavernas**
- **Conclusiones**

An aerial photograph of a large-scale open-pit mine. The mine is characterized by numerous terraced levels or benches, showing the extensive excavation. In the foreground, a yellow haul truck is driving on a dirt road that winds through the site. The background features rugged, snow-dusted mountains under a clear blue sky. The overall scene depicts a major industrial mining operation in a high-altitude environment.

DEFINICIONES

Aspectos Principales

Amenaza/Peligro Sísmico (H): Probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de cierta magnitud para un sitio en estudio, durante un período de tiempo específico.

Riesgo (Rs): Probabilidad de que se produzcan daños por un sismo de magnitud dada, en un período de tiempo específico.

Aspectos Principales

Vulnerabilidad (V): Conjunto de parámetros utilizados para predecir el tipo de daño estructural para un sismo determinado, modos de falla y resistencia:

$$R_s = H \times V$$

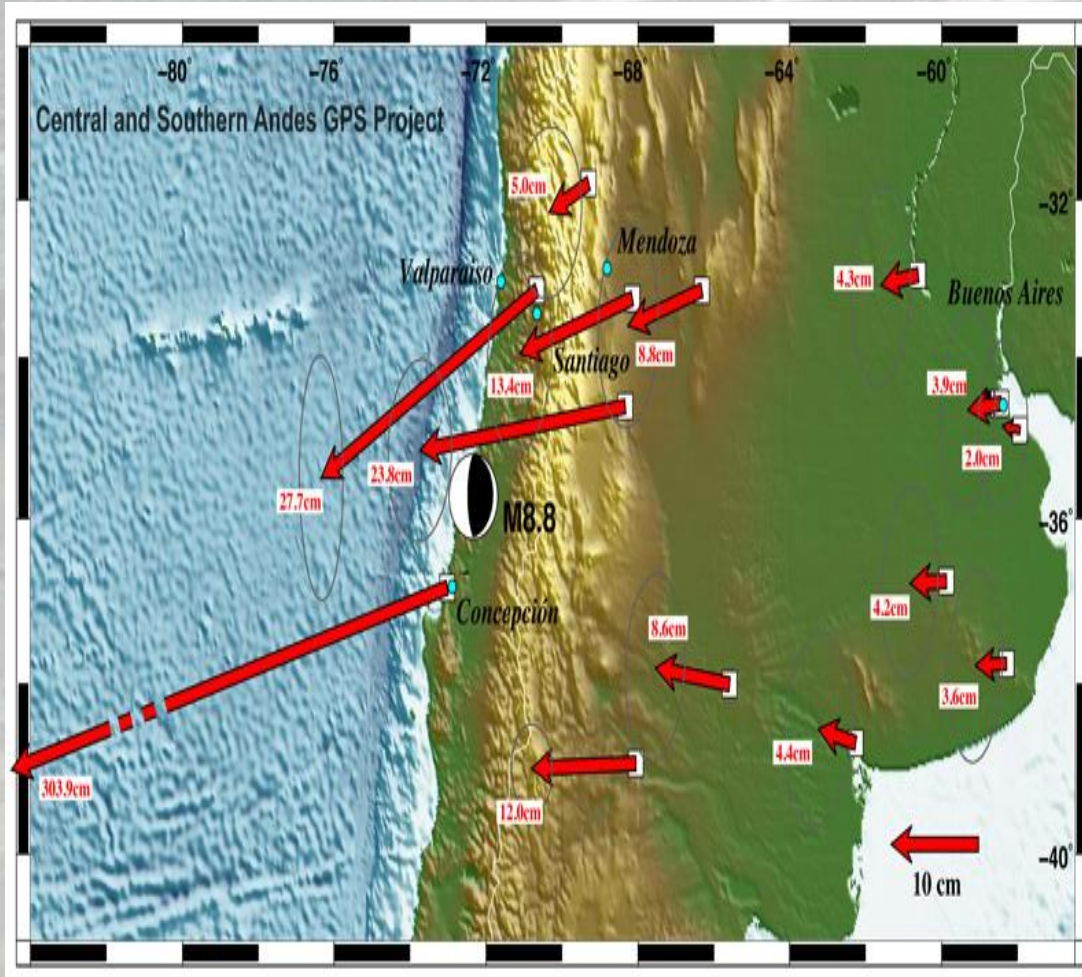
Aspectos Principales

Probabilidad de Excedencia: Probabilidad de que un sismo sea excedido durante un período de tiempo dado.

Período de Retorno: Tiempo medio entre dos sismos de magnitud mayor que un cierto valor. Recíproco de la probabilidad anual de excedencia.

Asperezas

Área de contacto entre placas tectónicas o fallas geológicas en donde su desplazamiento relativo se encuentra temporalmente



Gran liberación de energía

Desplazamientos de (304cm)

Mediciones con GPS

Leyes de Atenuación

Disminución de la aceleración máxima del suelo (velocidades, desplazamientos, potencial destructivo) en el interior y superficie de la tierra:

$$a := \frac{525 e^{1.2 M_s}}{R^2}$$

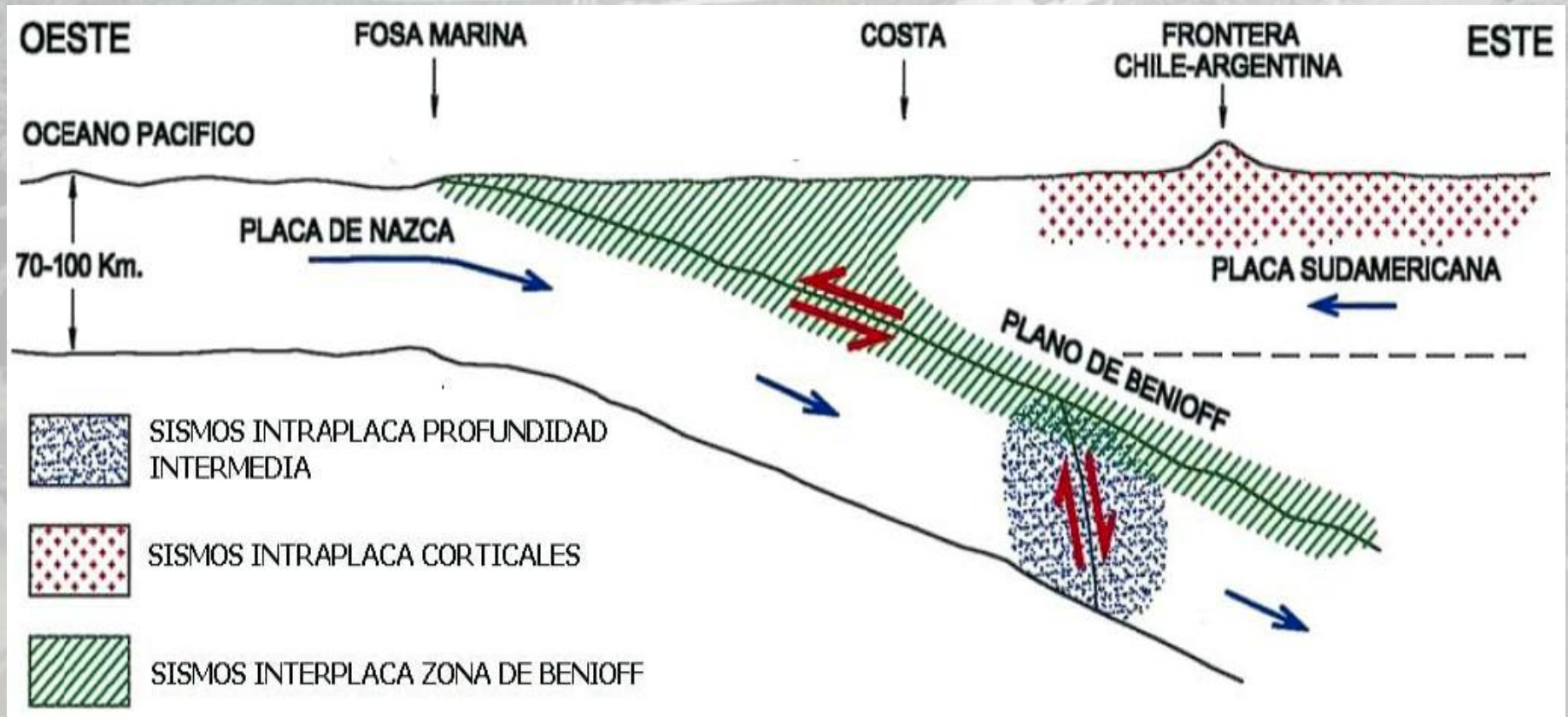
M_s : magnitud

R : distancia hipocentral

Dependen de la fuente sísmica y material geotécnico

Fuentes Sísmicas

Zona de la litósfera capaz de generar sismos.
Características: frecuencia de actividad y magnitud.



TIPOS DE ESTUDIOS

Niveles de Amenaza Sísmica

Sismo de Operación/Servicio:

Alta probabilidad de ocurrencia durante la vida útil. Sin daños, estructuras y equipos operativos → continuidad de la operación.

Sismo de Diseño:

Baja probabilidad de ocurrencia durante la vida útil. Se aceptan daños, instalaciones operativas en corto tiempo.

Niveles de Amenaza Sísmica

Sismo Máximo Creíble:

Las infraestructuras no deben colapsar. Se aceptan daños que acepten operatividad, evacuación segura. Riesgo de graves consecuencias al entorno: depósitos de lastre, relaves, etc.

Criterio de Diseño Sísmico/Infraestructuras Especiales:

No se acepta el colapso. Obras de gran envergadura cuyas fallas generan catástrofes en la población o medio ambiente. Plantas Nucleares, estanques GNL.

Disposiciones de Codelco



VICEPRESIDENCIA DE PROYECTOS
GERENCIA TÉCNICA / GERENCIA DE INGENIERÍA

SISTEMA DE GESTIÓN DE PROYECTOS

GUIA PARA PREPARACIÓN DE ESTUDIOS
PROBABILÍSTICOS DE AMENAZA SÍSMICA
DCVP-000-VPGT-00000-GUIIS04-0000-001

Desarrollado por:	Firma	Área
P. Pineda N.		Gerencia Técnica
A. Urzúa M.		Experto Geotécnico - Prototype
Revisado por:		
Sergio Barrientos		Director Servicio Sismológico Nacional
Ramón Montecinos		Revisor Sísmico
Rafael Riddell		Jefe Depto. Ing. Estructural y Geotécnica PUC

Validado por:	Firma	Área
J. Beniscelli T.		Gerencia Técnica
B. Lértora D.		Gerencia de Ingeniería

Aprobado por:	Cargo	Firma	Fecha
Sergio Fuentes S.	Vicepresidente de Proyectos		22/11/10

Niveles de Amenaza Sísmica

P : Probabilidad de excedencia durante la vida útil

t : Vida útil en años (50 años)

T_s: Período de Retorno en años

P (%)	T _s (años)	Tipo Sismo
10	475	Sismo de Operación
5	975	Sismo de Diseño
2	2475	Sismo Máximo Creíble
1 – 0.5	4975 – 9975	Criterio de Diseño Sísmico para Infraestructuras Especiales

Niveles de Amenaza Sísmica

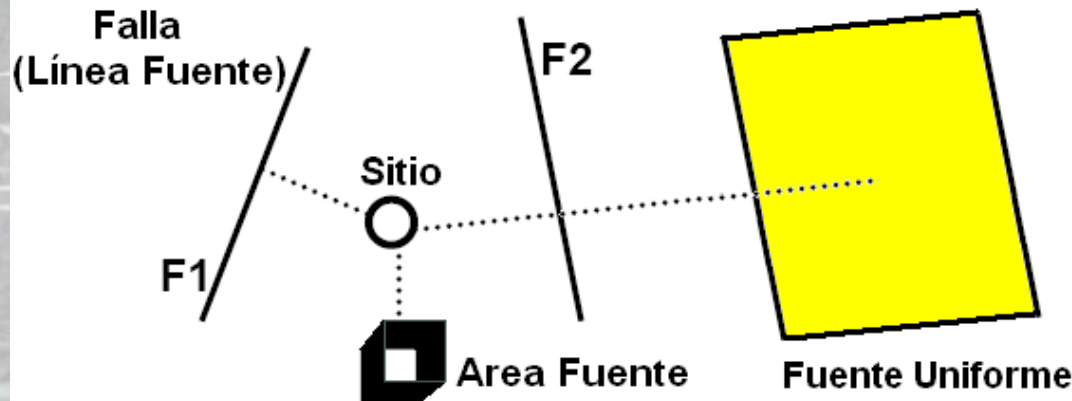
P : Probabilidad de excedencia durante la vida útil (10%)

t : Vida útil en años

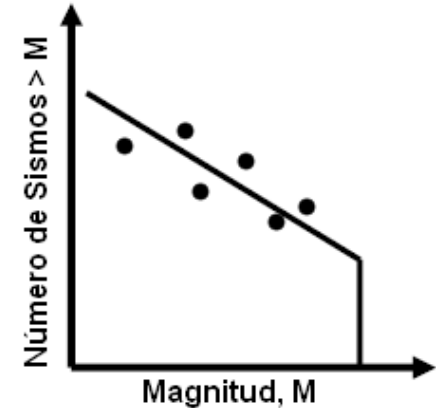
T_s : Período de Retorno en años

t (años)	T _s (años)
10	95
15	143
25	238
50	475

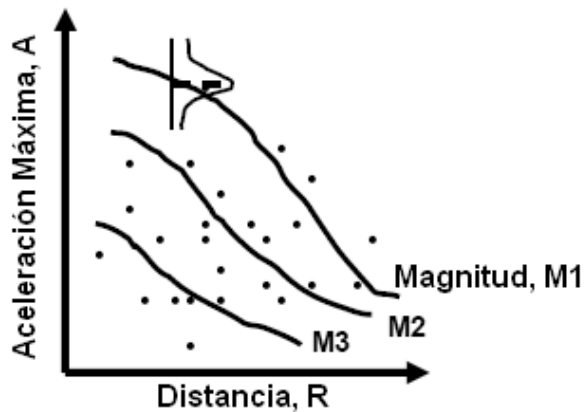
Probabilístico



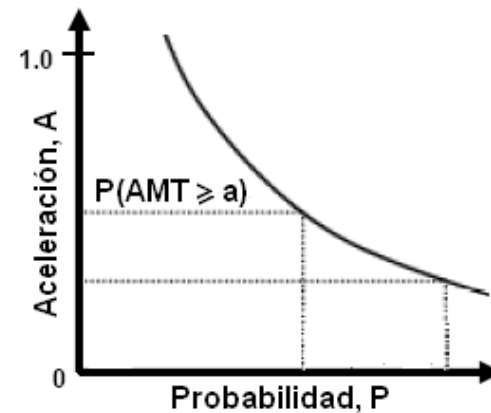
ETAPA 1 - FUENTES SÍSMICAS



ETAPA 2 - LEY DE RECURRENCIA (GUTENBERG & RICHTER)



ETAPA 3 - LEYES DE ATENUACIÓN (INCLUYENDO INCERTEZA)



ETAPA 4 - PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA PARA UN PERÍODO DE TIEMPO DETERMINADO

Determinístico (Ministro Hales)

Caracterización de Fuentes Sísmicas (terremotos históricos)

Leyes de Atenuación (Suelo Duro)

Interplaca Subductivo Thrust
(M=8.8 : R=150km)

$$a = \frac{2 \cdot e^{1.28 \cdot M_s}}{(R + 30)^{1.09}} = 542.9 \text{ cm/seg}^2$$

$a_{\max} = 0.55 \text{ g}$

Intraplaca Profundidad Intermedia
(M=8.0 : R=100km)

$$a = \frac{565898 \cdot e^{1.29 \cdot M_s}}{(R + 80)^{3.24}} = 846 \text{ cm/seg}^2$$

$a_{\max} = 0.86 \text{ g}$

Intraplaca Profundidad
Intermedia (M=6.5 : R=50km)

$$\ln(y) = -1.274 + 1.1 \cdot M - 2.1 \cdot \ln(\text{dist} + e^{-0.48451 + 0.524 \cdot M})$$

$a_{\max} = 0.05 \text{ g}$

Determinístico (Ministro Hales)

Potencial Destructivo

$$P_D = \frac{\pi}{2g} \cdot \frac{\int_0^{t_0} a^2(t) \cdot dt}{v_0^2}$$

$a(t)$: aceleración del suelo

t_0 : duración total del acelerograma

v_0 : intensidad de cruces por cero por segundo

g : aceleración de gravedad

En función de la magnitud y distancia hipocentral

$$P_D = \frac{3.02 \cdot 10^{-3} \cdot e^{2M_s} \cdot e^{-0.001 \cdot R}}{(R + 60)^{1.39}} \quad [10^{-4} \cdot g \cdot s^3]$$

Proyecto El Morro

se mantienen en tanto que los acelerogramas correspondientes a un terremoto subductivo interplaca tipo thrust $M_W = 8.8$ similar al del Maule del 27 de Febrero de 2010, no superaría el potencial destructivo del terremoto subductivo intraplaca de profundidad intermedia $M_W = 8.0$ considerando como terremoto máximo creíble (MCE)

Espectro de Diseño OBE

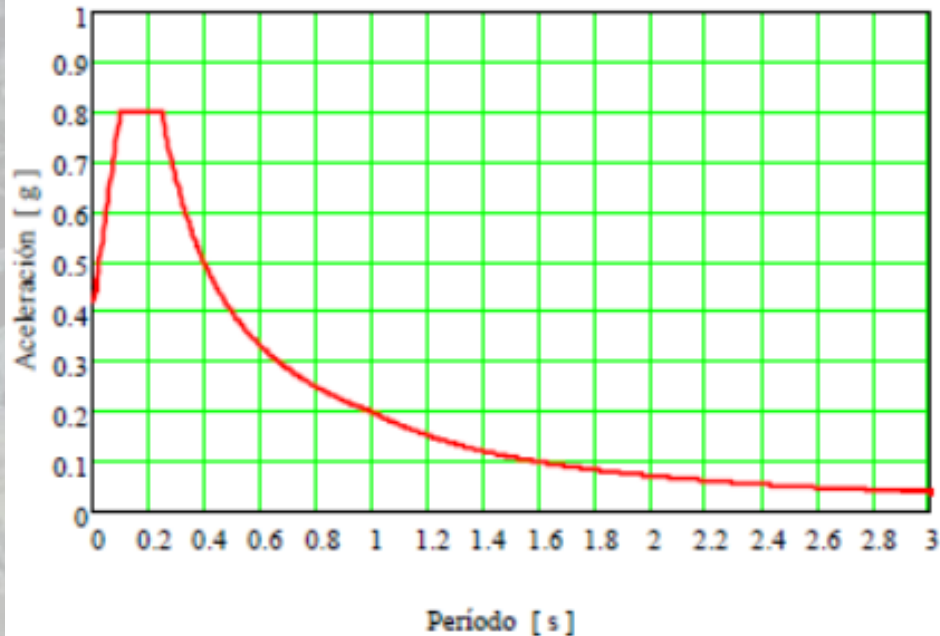


Figura 5.1: Espectro de diseño para el nivel de servicio OBE.
(Operating Basis Earthquake).

Espectro de Diseño MCE

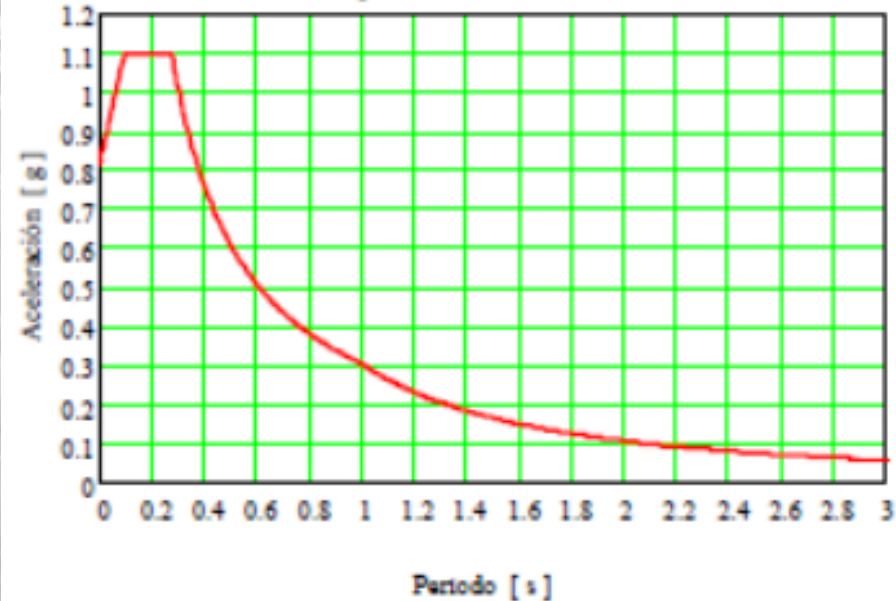


Figura 5.2: Espectro de diseño para el nivel de servicio MCE.
(Maximum Credible Earthquake).



NCh2369.Of2003

**DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS E
INSTALACIONES INDUSTRIALES**

Aspectos Relevantes

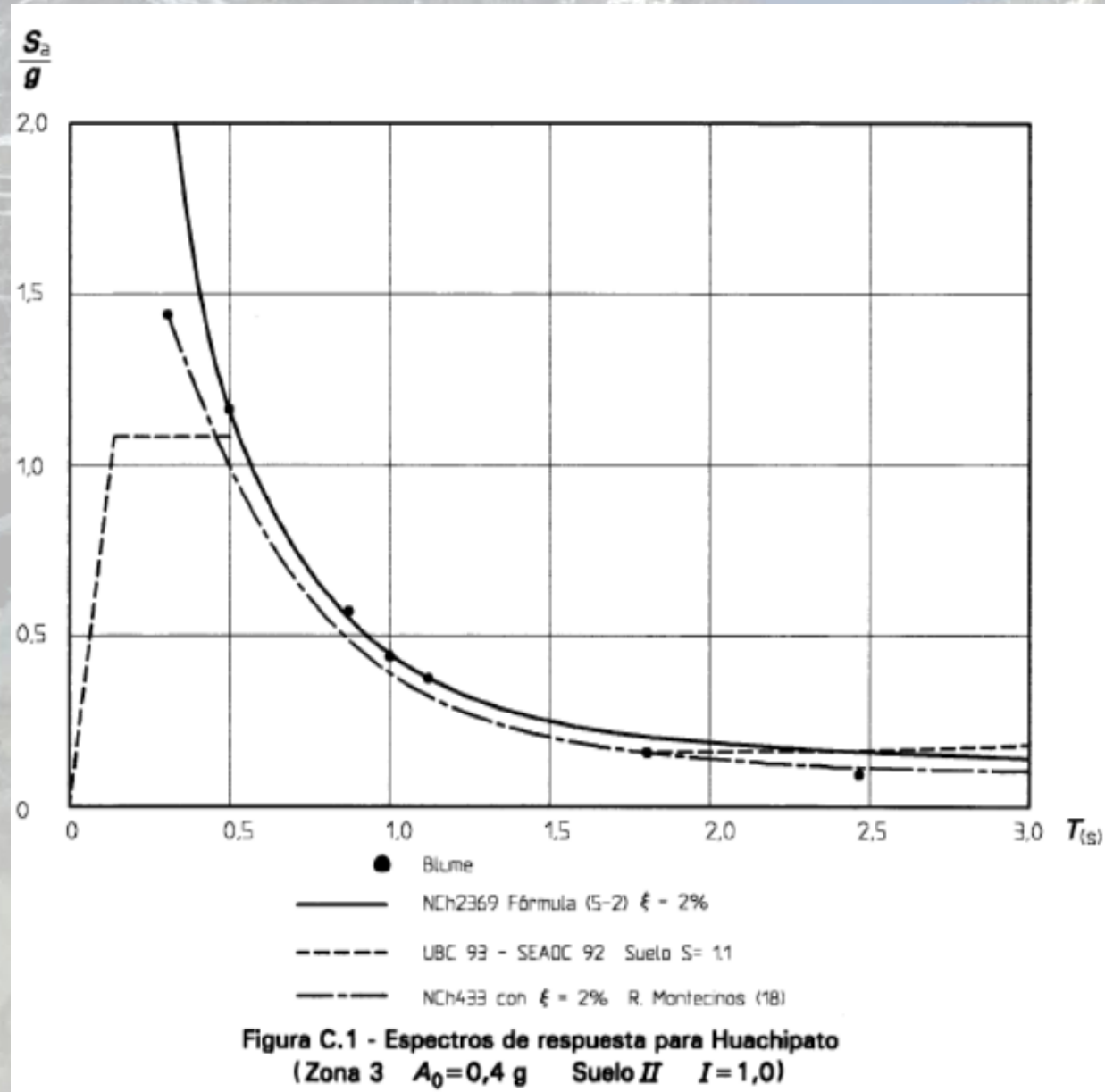
- **Edificios: Seguridad de vida de las Personas**
- **Industriales: Continuidad de la Operación**
- **J.A. Blume**

Terremoto de Chile en 1960, $M=9.5$ (Planta de Huachipato)

Espectro empírico de la respuesta sísmica para análisis de 16 estructuras (daños menores)

Chimeneas de acero, estanques elevados y recipientes de proceso

Aspectos Relevantes



J.A Blume:
Backward Analysis

Zona 3,
suelo tipo II

Coincidencia
satisfactoria

No es necesario
modificar espectros

Párrafo 5.8.1 “Análisis Espectrales”

Espectros especiales:

- **Características e importancia de las obras**
- **Condiciones geotécnicas del sitio**
- **Distancia a fuentes sismogénicas**
- **Efecto de la topografía del lugar**
- **Configuración del subsuelo**

Espectros de Diseño

- **Valores máximos de aceleraciones, velocidades y desplazamientos**
- **Para diferentes amortiguamientos (Tabla 5.5)**
- **Antecedentes históricos o determinísticos relacionados con el sitio en estudio**
- **Complemento con valores probabilísticos con sismos de $T_s=100$ años??**

Aspectos Relevantes

Limitaciones de Diseño:

$$75\% > Q_0 \text{ (Corte Basal)} > 125\%$$

Valores obtenidos de párrafo 5.4

Considerando suelos tipo I al IV

Si no cumple lo anterior, considerar efectos de amplificación dinámica: grandes rellenos de material geotécnico

An aerial photograph of a large-scale open-pit mine. The mine is characterized by numerous terraced levels of rock, creating a stepped appearance. In the foreground, a large yellow haul truck is visible on a dirt road. The background features rugged, snow-capped mountains under a clear blue sky. The entire image has a semi-transparent overlay.

COMPORTAMIENTO SÍSMICO EN INTERIOR DE CAVERNAS

Aspectos Generales

- 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

Aspectos Generales

Proyecto

Andina Fase II

Nuevo Nivel Mina

**Mina Chuquicamata
Subterránea**

Túneles

50km

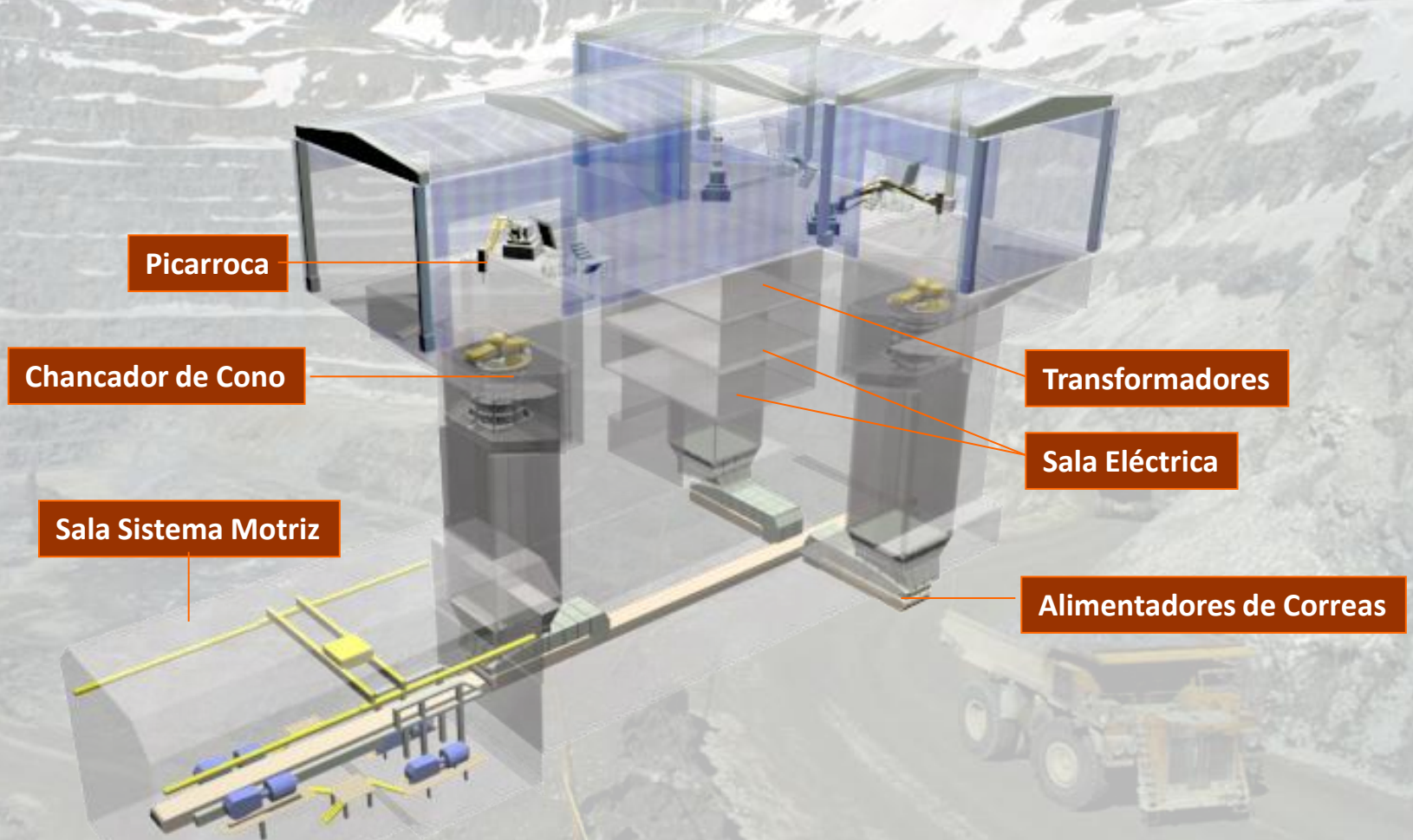
2 x 9km

1.020km al año 2060

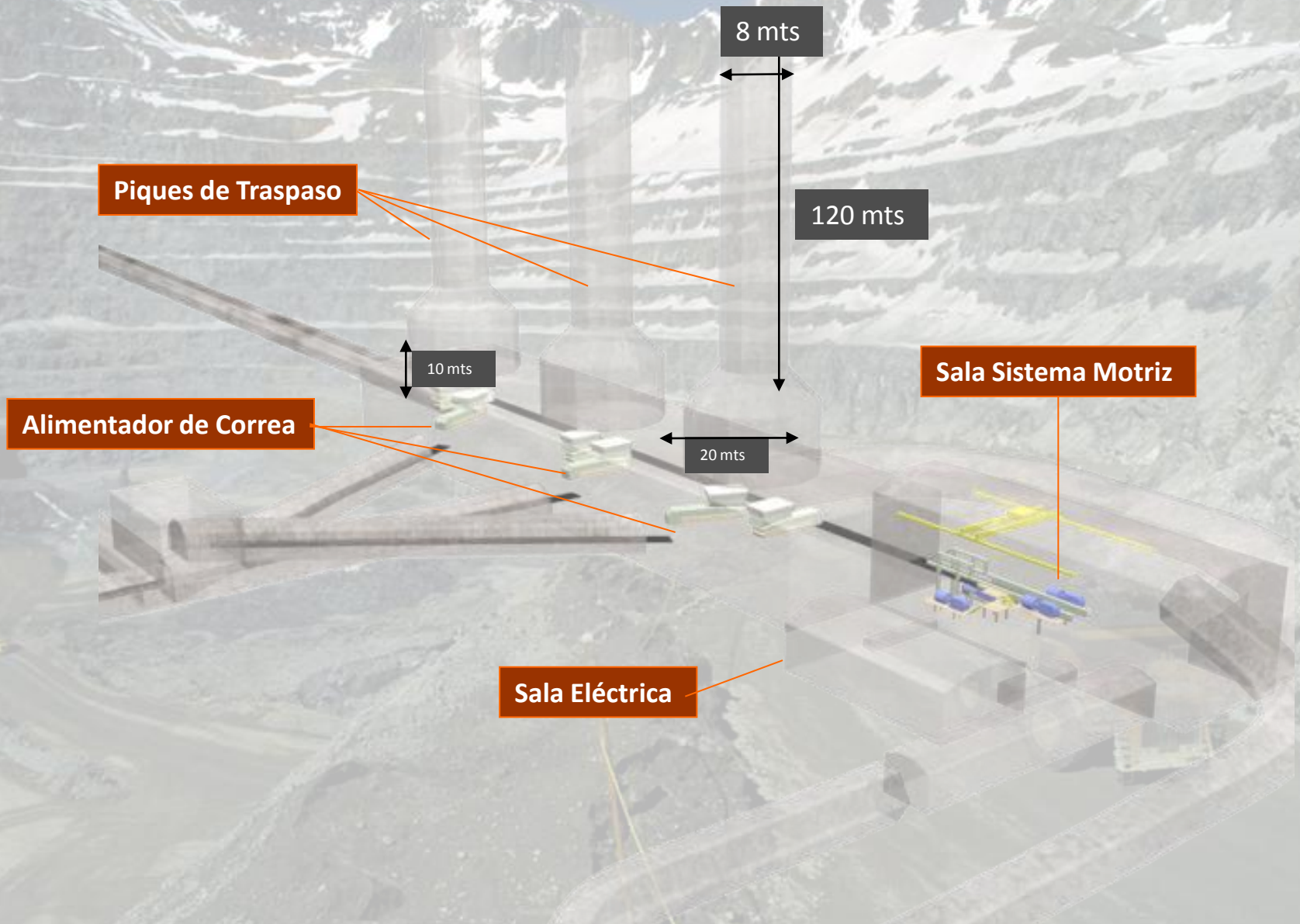
**“1.200 km de túneles
en los próximos 5 años
(Codelco)”**



Chancado Primario



Piques de Traspaso de Mineral



Área de Chancado



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?”

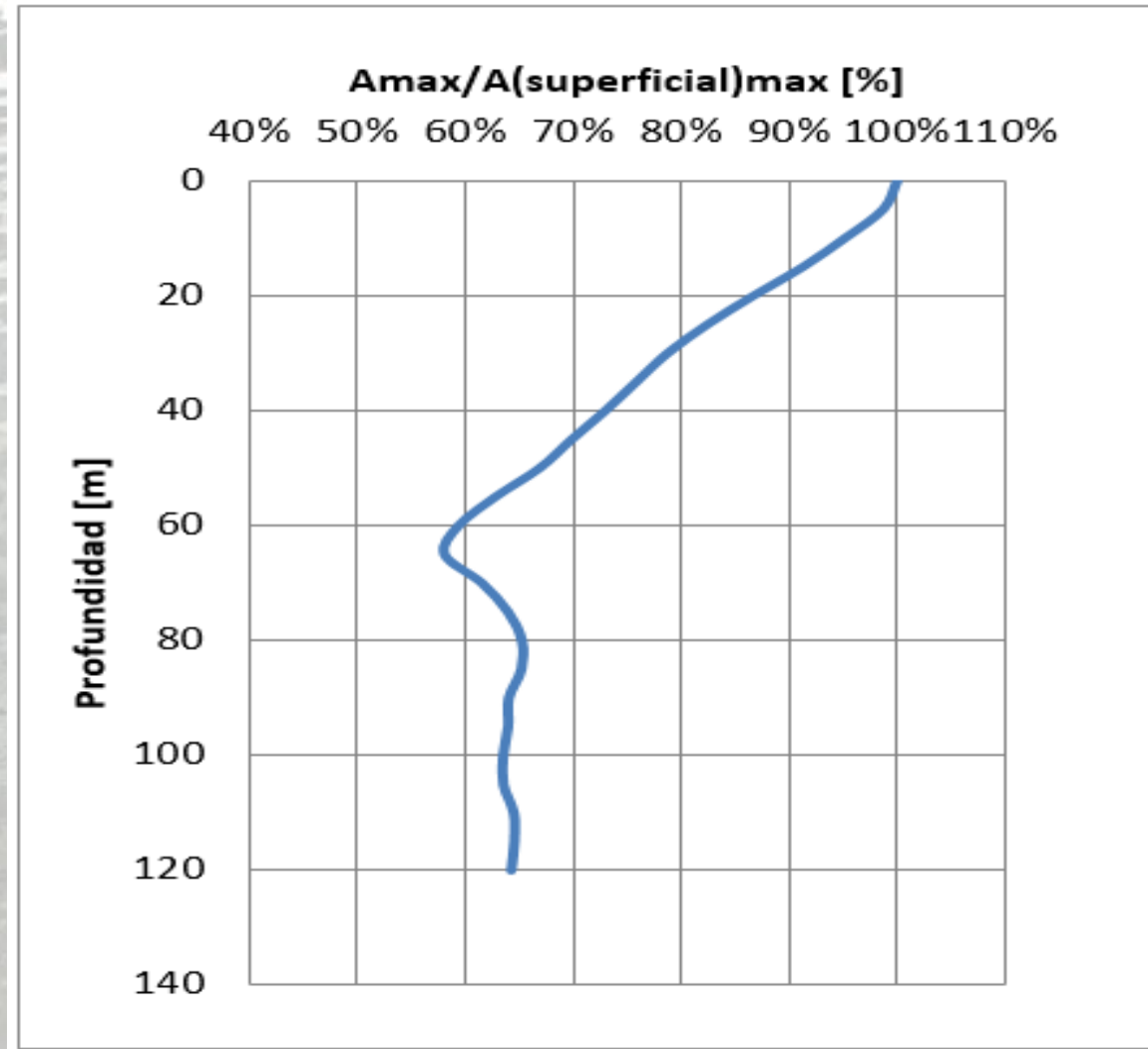
Diseño Actual en Cavernas

- **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.**
- **Diseño sísmico en cavernas es menos exigente.**

Conclusiones

- Hay una reducción de aceleraciones a mayor profundidad.

Reducciones de Aceleraciones del orden de 30% (superficie) a 60m de profundidad.



Diseño Actual en Cavernas

- **Reducción de aceleraciones:**
75% (NCh2369 - 5.8.1) < parámetro estudio
- **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”

An aerial photograph of a large-scale open-pit mine. The mine is characterized by numerous terraced levels, creating a stepped appearance. The surrounding landscape is rugged and mountainous, with patches of snow or light-colored rock visible on the slopes. In the lower right foreground, a large yellow haul truck is driving on a dirt road. The overall scene depicts a major industrial mining operation in a high-altitude or mountainous region.

CONCLUSIONES

▪ **ERS versus NCh2369.Of2003**

Geotécnia, sismología → diferencias importantes

- **No combinar Estudios - valores espectrales máximos (ejemplo):**

Caso A (Tranque):

Determinístico: $a_{\text{máx}}=0.74\text{g}$

Caso B (Tranque, Planta, Puerto):

Determinístico: $a_{\text{máx}}=1.37\text{g}$

Probabilístico: $a_{\text{máx}}=1.02\text{g}$

- **Se deben desarrollar ERS para instalaciones y obras de retención por separado**

Agrega valor al proyecto, previo a la ingeniería:

- **Geotécnia, sondajes, estudios de amplificación dinámica**
- **Definir criterios y parámetros sísmicos con el cliente y revisor**



GRACIAS POR SU ATENCIÓN

ppineda@hatch.com / ppinedan@gmail.com

 **HATCH™**