

MITIGACIÓ DEL RIESGO DE ALUDES EN LA MINA EL TENIENTE EN LOS ANDES CENTRALES DE CHILE



ACNA
ASSOCIACIÓ PEL
CONEIXEMENT DE
LA NEU I LES ALLAUS



Cicle de xerrades Assemblea ACNA

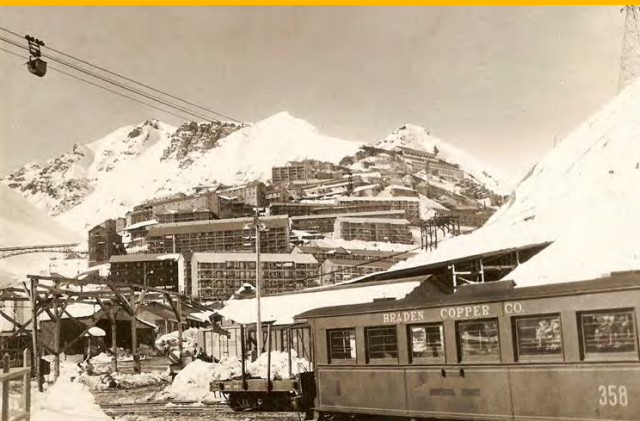
Vielha (Val d'Aran), 15 novembre 2014

Marc Janeras Casanova
Cap de la Unitat d'Enginyeria
Geològica i Risc



ICGC
Institut
Cartogràfic i Geològic
de Catalunya

Sumario



- Introducción
- Condiciones nivoclimáticas
- Actividad avalanchosa
- Retro-análisis de aludes catastróficos en Sewell
- Cálculo de la dinámica de aludes
- Estrategia de mitigación del riesgo de alud



Introducción

- En el **Área de Geotécnia y Prevención de Riesgos Geológicos** se integra el grupo de aludes de larga tradición en el estudio de la nieve y las avalanchas.
- Podemos simplificar a 3 líneas de trabajo y servicios derivados:
 - Predicción del peligro de alud (BPA)
 - Cartografía de la peligrosidad de aludes (BDAC)
 - Consultoría de mitigación del riesgo
- Desde 2007 distintos proyectos de consultoría:
 - en la Cordillera de Los Andes
 - para minería en Chile y Argentina
 - de mitigación del riesgo de aludes
 - junto con Asistencia Profesional en Materias de Montaña



Introducción

Cordillera de Los Andes

- Cordillera de Los Andes
- Tramo central de Chile y Argentina
- Latitudes 29°S a 35°S
- Caso singular: **El Teniente** (Chile)



Introducción

Explotaciones mineras

| Nombre | Titular | Coordenadas geográficas | Altitud (m) | Minería | Año de inicio | Extracción |
|--------------------|---------|--------------------------|------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|
| TENIENTE | Codelco | 34° 5'6"S 70°23'1"O | 1.500 – 3.100 | Subterránea + Exterior | 1904 | Cobre 400.000 tn |
| ANDINA | Codelco | 33°8'58"S 70°15'39"O | 2.700 – 4.200 | Exterior + Subterránea | 1970 | Cobre 190.000 tn |
| VELADERO | Barrick | 29°22'46"S 69°56'39"O | 3.800 – 4.800 | Exterior | 2005 | Oro 800.000 ozt |
| PASCUA-LAMA | Barrick | 29°19'11"S 70°0'48"O | 3.800 – 5.200 | Exterior | en construcción | Oro y plata |

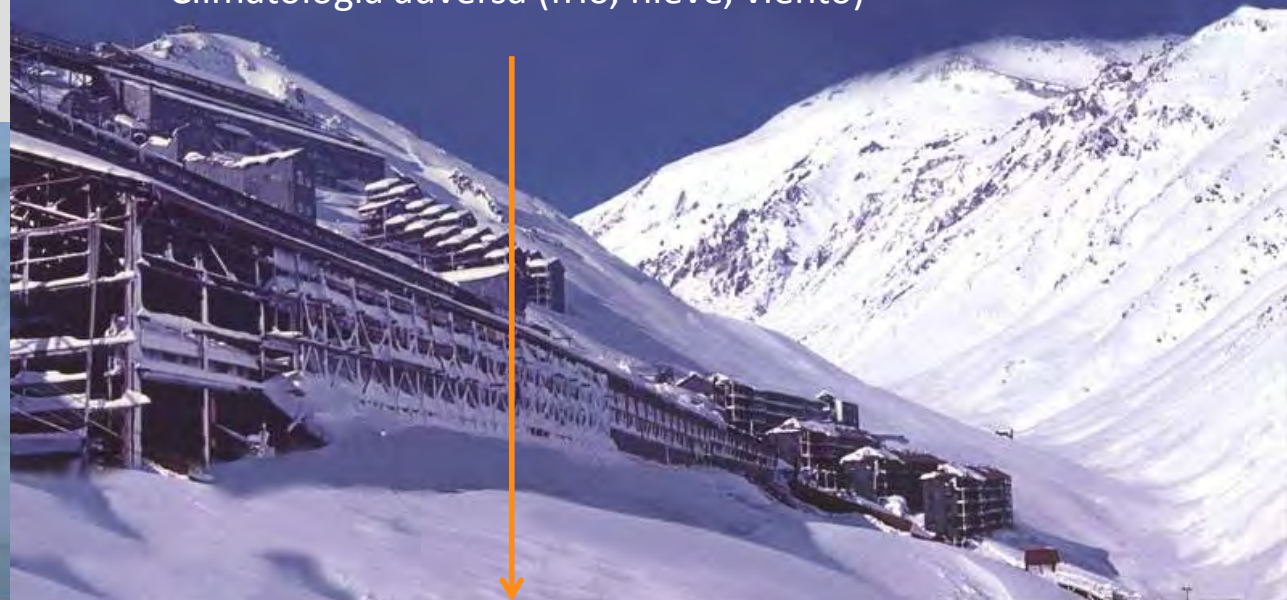


Introducción

Explotaciones mineras



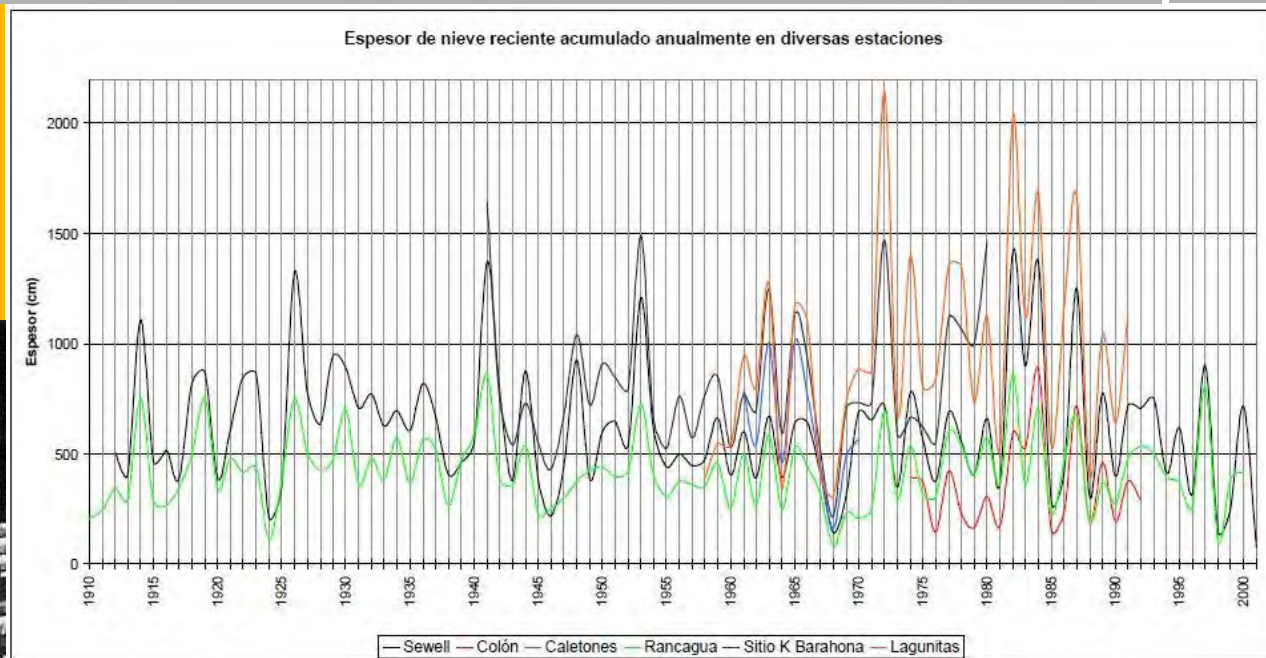
- Condicionantes funcionales:
 - Actividad permanente con mínimas paradas
- Condiciones ambientales:
 - Climatología adversa (frío, nieve, viento)



Riesgos: operativos en estas condiciones +
avalanchas



Condiciones nivoclimáticas



Factores clave de variabilidad:

- **Latitud:** precipitación creciente con la latitud
- **Vertiente CL / AR:** efecto de bloqueo orográfico en la entrada de advecciones del Pacífico (NW)
- **ENSO** (El Niño Oscilación del Sur): influencia decreciente con la latitud
- **Altitud:** habitual en montaña

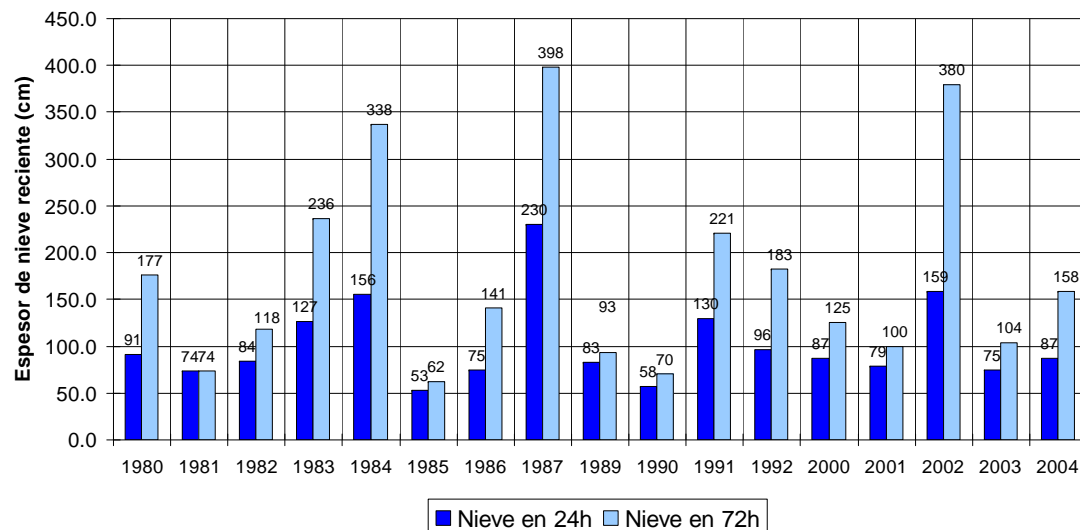


Condiciones nivoclimáticas

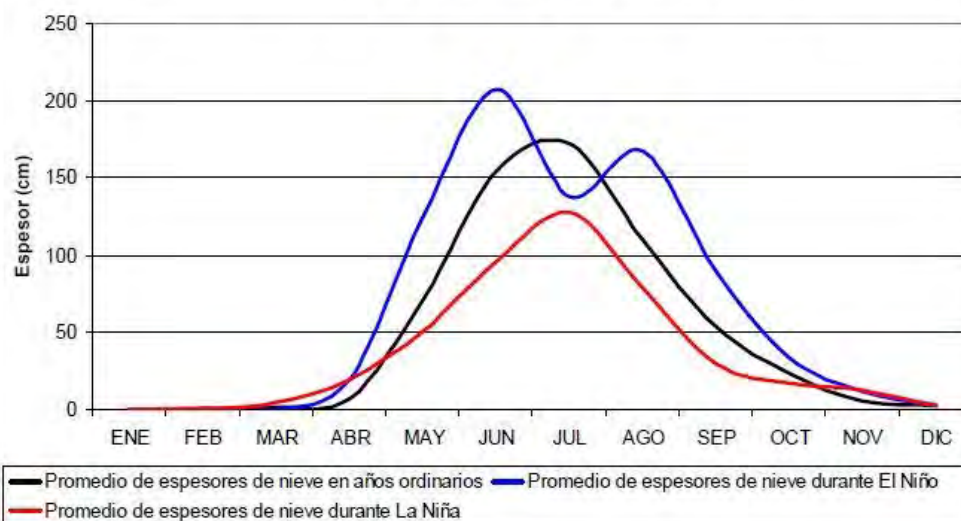
Precipitación de nieve en El Teniente

- A latitud 35°S, episodios de gran precipitación de nieve
- Criterio de precipitación acumulada en 72h como capa inestable a reconsiderar
- Posibilidad de varias avalanchas consecutivas

Espesor máximo anual de nieve reciente acumulado en 24h y 72h



Precipitación de nieve mensual en Sewell (1912-2006)



Actividad avalanchosa

- En la VI Región chilena se contabilizan 211 víctimas mortales por alud a lo largo del siglo XX.
- En esta región se sitúa la mina El Teniente que suma 193 de las víctimas mortales.
- La industria minera tiene un peso elevado en lo que refiere a la exposición a las avalanchas.



Actividad avalanchosa

Principales accidentes por avalancha en la mina El Teniente

- En la VI Región chilena se contabilizan 211 víctimas mortales por alud a lo largo del siglo XX.
- En esta región se sitúa la mina El Teniente que suma 193 de las víctimas mortales.
- La industria minera tiene un peso elevado en lo que refiere a la exposición a las avalanchas.

| Año | Víctimas mortales | Descripción de los efectos de las avalanchas singulares |
|------|-------------------|---|
| 1906 | 0 | Destrucción de postes de andarivel de Sewell |
| 1906 | 6 | Cuadrilla de apoyo en bocatoma de canal de Coya |
| 1906 | 0 | Destrucción de torres de tranvía del mineral por avalanchas con el terremoto de Valparaíso |
| 1907 | 5 | Destrucción de edificios en Pueblo Hundido, con 10 sepultados |
| 1912 | 8 | Casas de habitaciones en Sewell |
| 1912 | 9 | Hundimiento de techo en casa de habitaciones de Sewell |
| 1912 | 1 | Doble avalancha de fusión en Fortuna-3, cerca de Sewell |
| 1913 | 20 | Edificios de molino y habitaciones en Pueblo Hundido |
| 1914 | 3 | Cuadrilla de despeje de caminos y techos en Pueblo Hundido |
| 1914 | 1 | Cuadrilla de despeje de canal de agua de la fundición |
| 1914 | 20 | Cuadrilla de despeje de caminos y de rescate en Teniente |
| 1921 | 1 | Área de Teniente C |
| 1921 | 4 | Edificio en construcción a más de 3000 m, afecta 10 personas |
| 1926 | 0 | Daños al teatro La Junta, molino, puente rebolledo, canoa de relaves y ferrocarril en Sewell. Año de enorme precipitación |
| 1930 | 2 | Avalancha de aerosol sobre camarotes de edificio 2006 en Sewell |
| 1941 | 3 | Puente Rebolledo, canoa de relaves y chalets 153 y 164 en Sewell |
| 1944 | 102 | Puente Rebolledo, ferrocarril, chalets 160, 161 y 162, edificios 112, 205, 206, 240 e imprenta en Sewell |
| 1963 | 1 | Tranvía de Caletones |
| 1965 | 0 | Boca de túnel de ferrocarril, canoa de relaves en Sewell |
| 1966 | 3 | Boca de túnel de mina en Junta |
| 1982 | 0 | Canoa relaves y cobertizos entre Colón y Sewell |
| 1982 | 1 | Bocatoma de Teniente |
| 1985 | 3 | Campamento de sondajes de Cortaderal a 50km de Coya |
| 1987 | 1 | Sector Junta de Teniente |

Nieve y avalanchas, René León (2003)

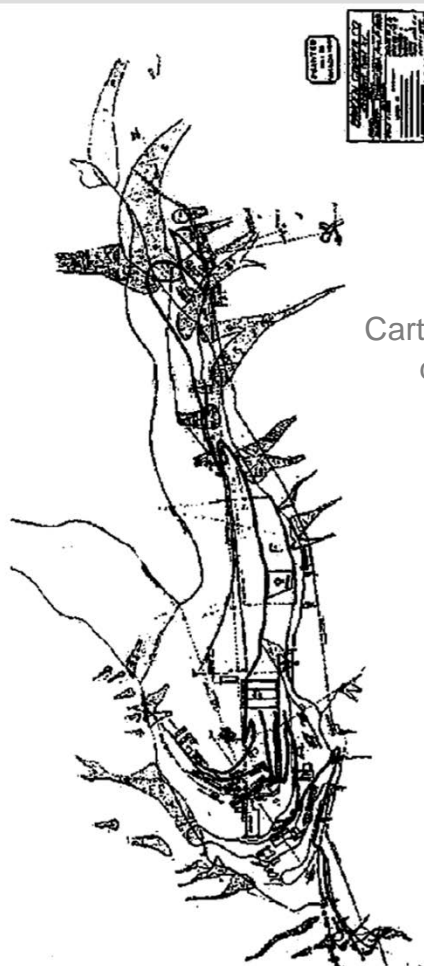
Retroanálisis de aludes catastróficos en Sewell



Retroanálisis de aludes catastróficos en Sewell

Reconstrucción de los escenarios según los datos históricos

Aludes catastróficos



Carta de aludes de 1910

| Evento | 1914 | 1926 | 1941 | 1944 |
|------------------------------------|-----------------------------|--------|---------------------------------|----------|
| Fecha | julio | agosto | 12 agosto | 8 agosto |
| Tipo de avalancha | Flujo denso de nieve húmeda | | Flujo de nieve seca con aerosol | |
| Volumen estimado (m ³) | 55.000 | 72.000 | 66.000 | <120.000 |
| Periodo de retorno tipo T (años) | 10 | 30 | 30 | 100 |



Vista de Sewell 1909



Vista de Sewell 1930

Retroanálisis de aludes catastróficos en Sewell

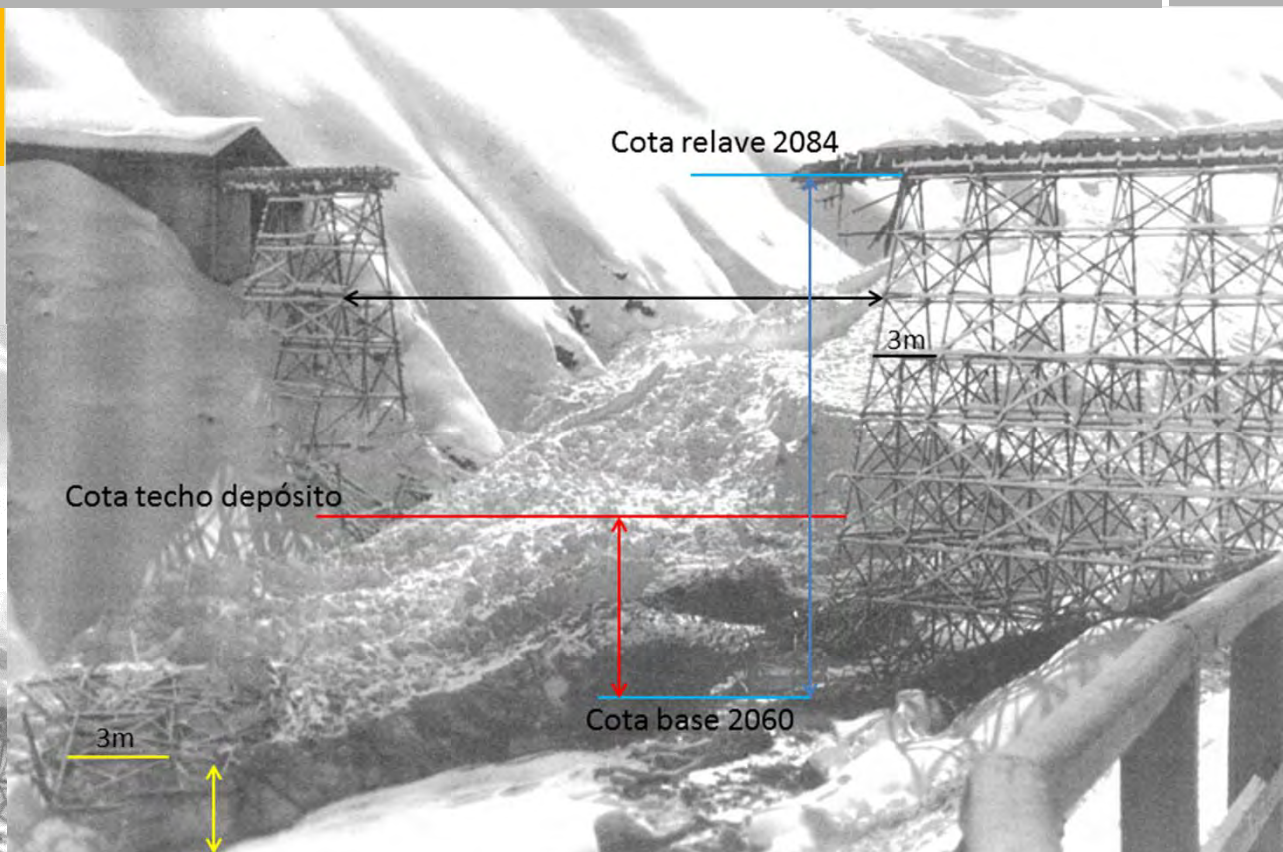
Alud de 1914

- El puente aún no existía
- Afectó al ferrocarril
- 21 víctimas (1 inicial + 20 de rescate)
- Invierno de 1107 cm de precipitación de nieve



Retroanálisis de aludes catastróficos en Sewell

Alud de 1926



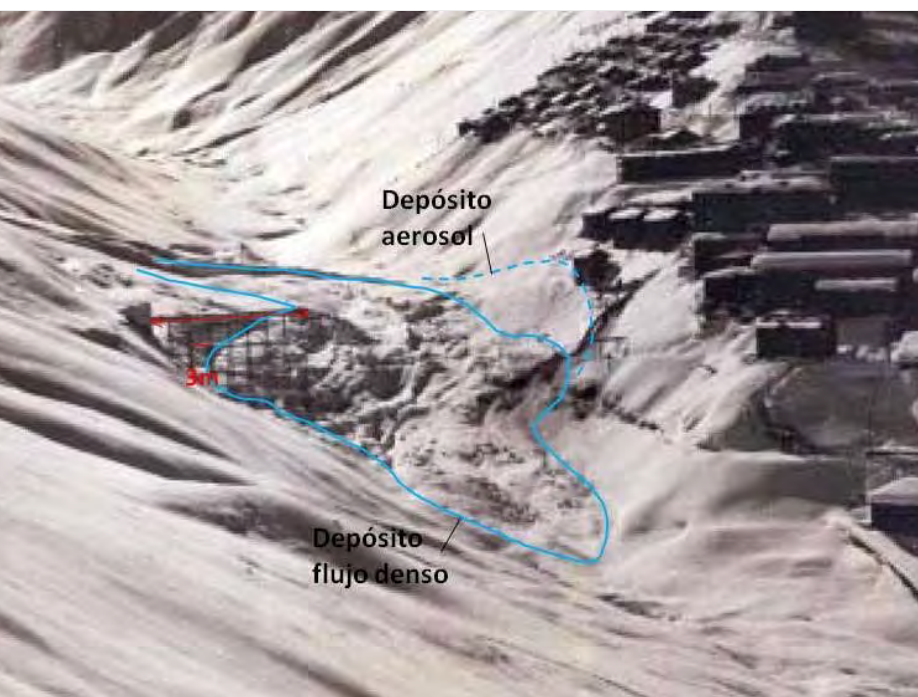
- Destruyó el puente antiguo
- Gran afectación a varias instalaciones
- Sin víctimas mortales
- Invierno de 1323 cm de precipitación de nieve



Retroanálisis de aludes catastróficos en Sewell

Alud de 1941

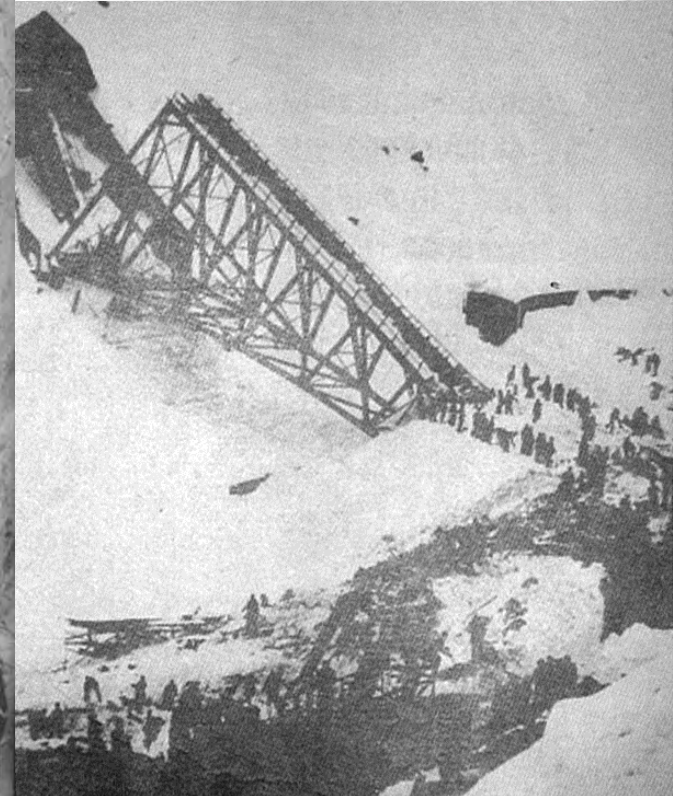
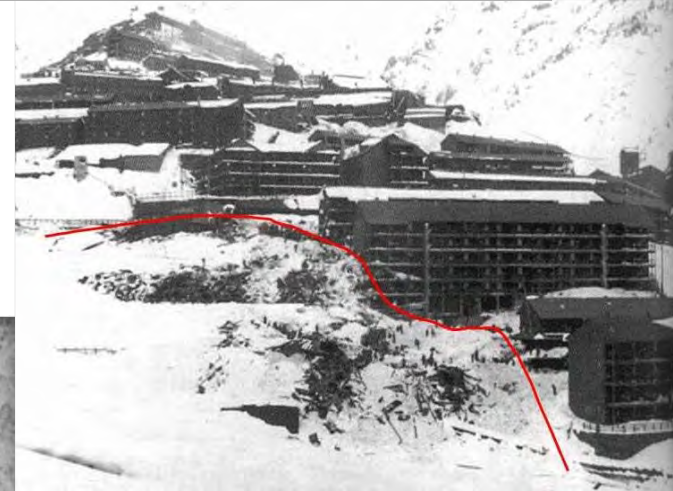
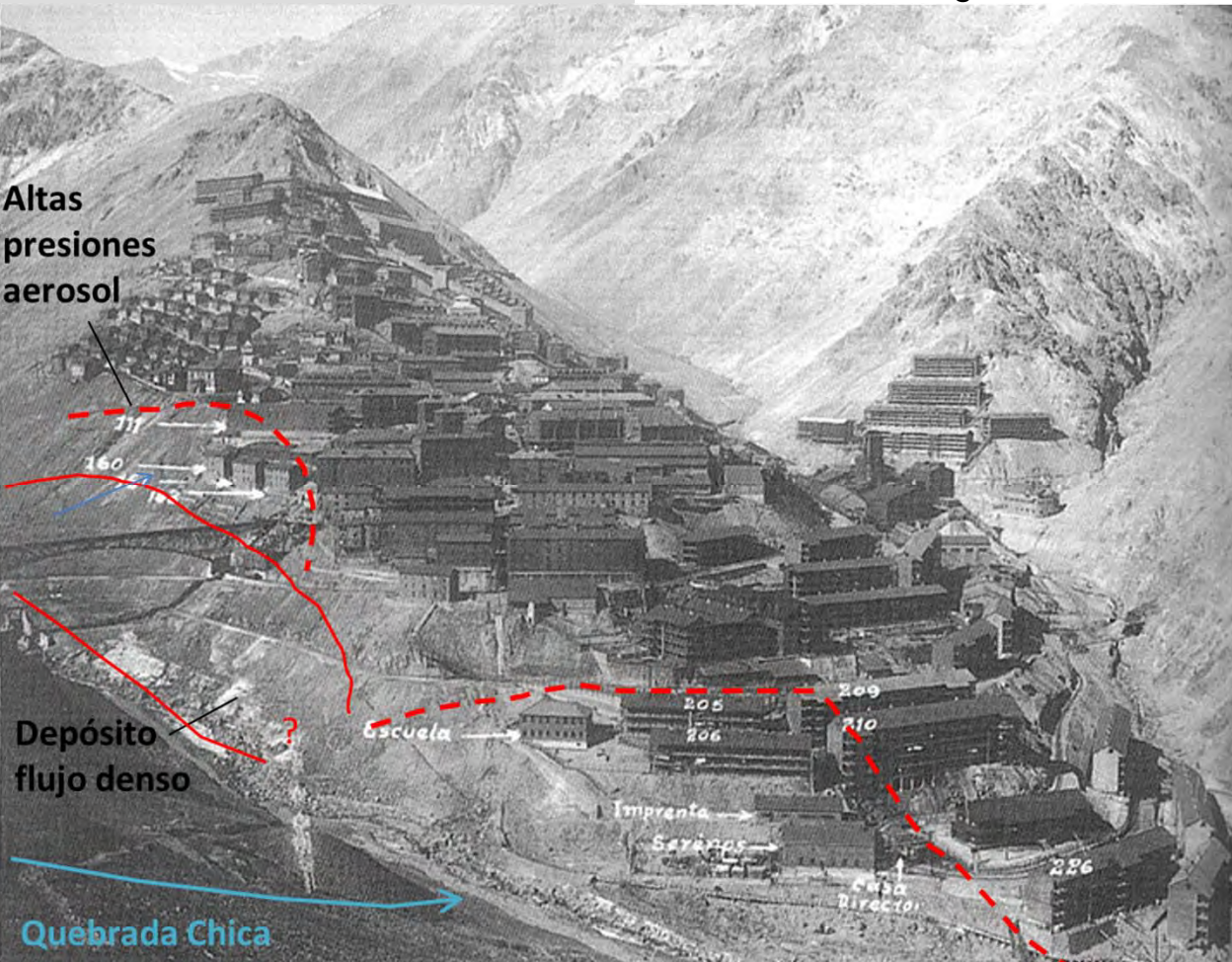
- Destruyó el puente antiguo
- Afectación a edificios
- 3 víctimas mortales
- Remonte del aerosol a la ladera opuesta



Retroanálisis de aludes catastróficos en Sewell

- Destruyó el puente nuevo
- Gran afectación a edificios
- 102 víctimas mortales
- 3 días de temporal con viento
- Precipitación de nieve de 407 cm en el mes de agosto

Alud de 1944



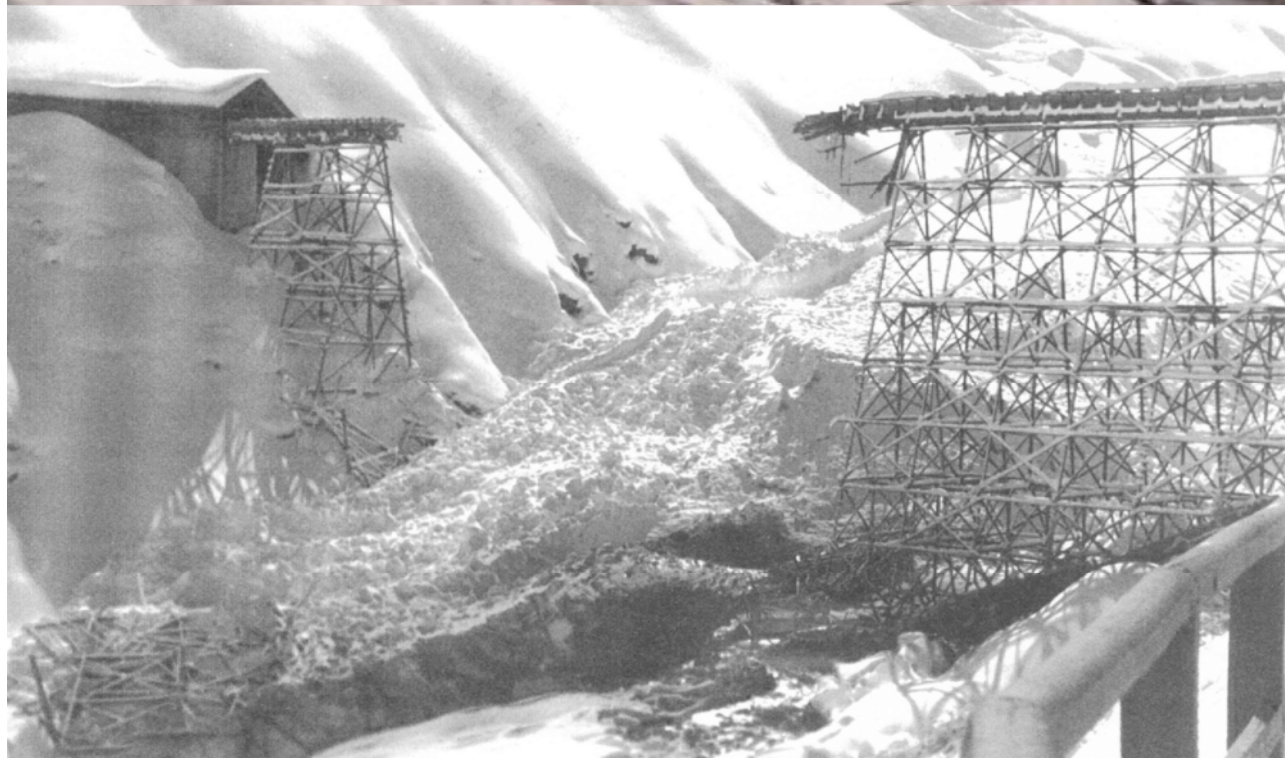
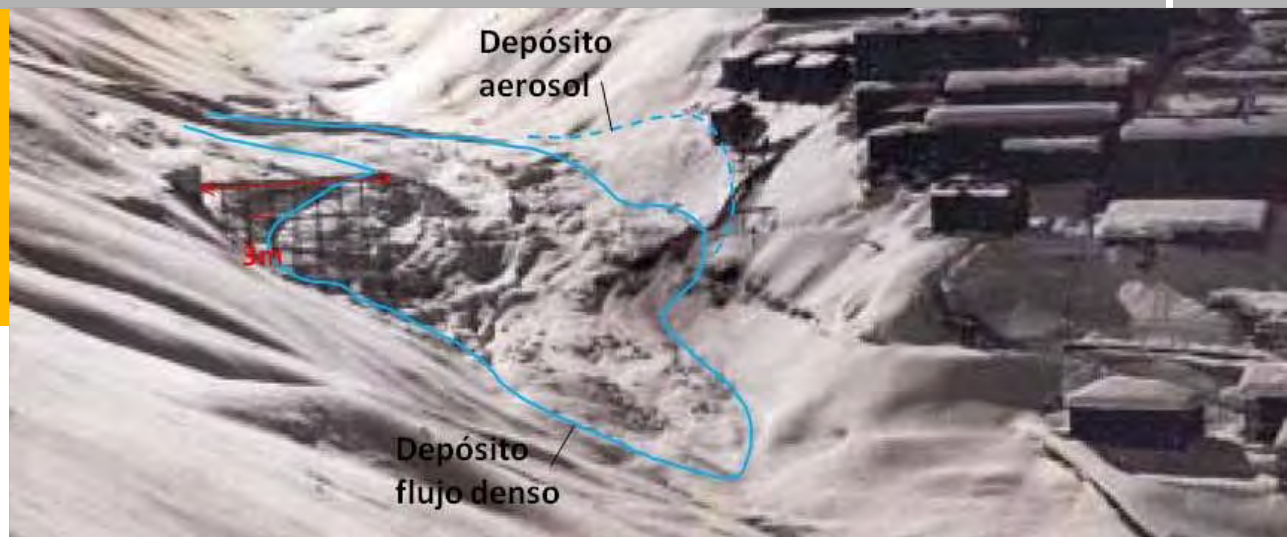
Retroanálisis de aludes catastróficos en Sewell

Sewell en la actualidad



Cálculo de dinámica de avalanchas

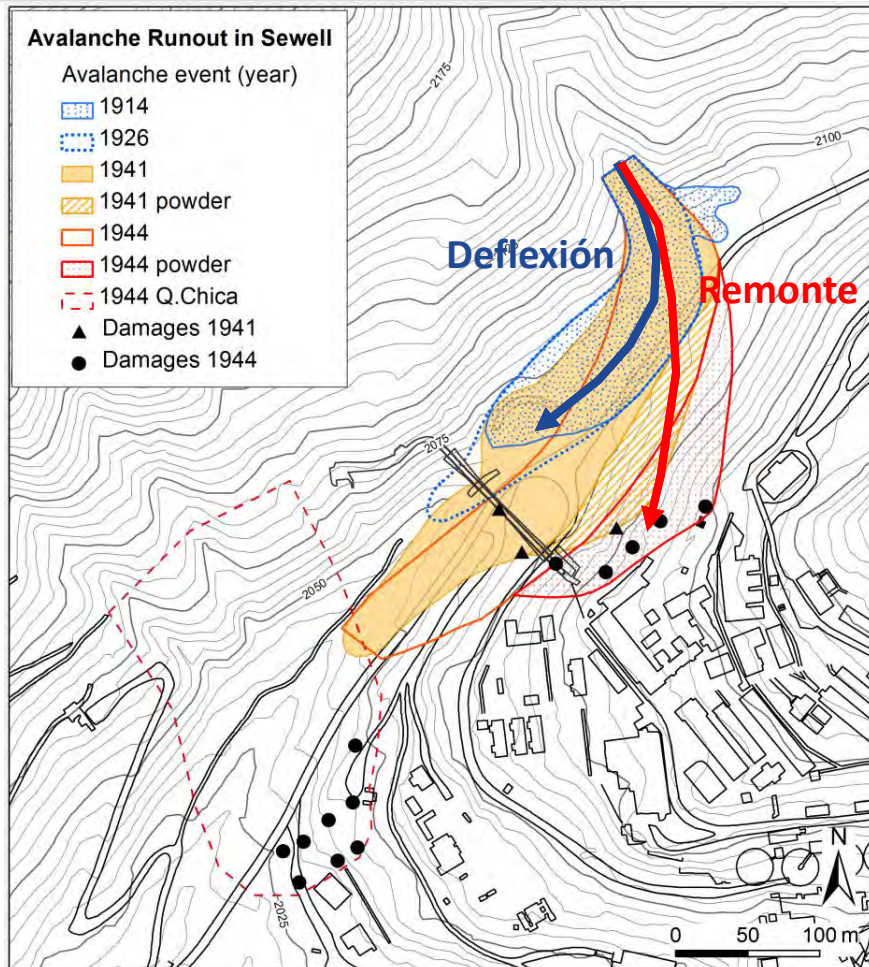
- Se plantea reproducir matemáticamente la dinámica de las avalanchas para inferir variables fundamentales de casos reales o hipotéticos (escenarios tipo por magnitud del alud):
 - Alcance global de la avalancha
 - Formación del depósito (ubicación y grosor)
 - Campo de presiones (velocidad del flujo)
 - Campo de la altura de flujo
- Distinta dinámica según el tipo de avalancha
 - Flujo denso
 - Aerosol



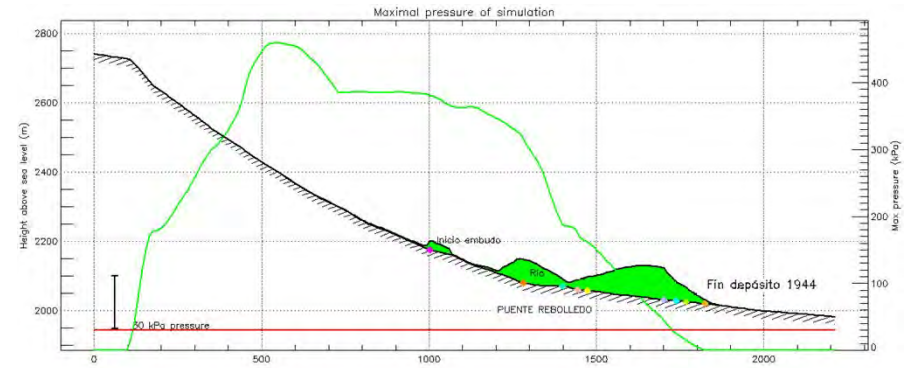
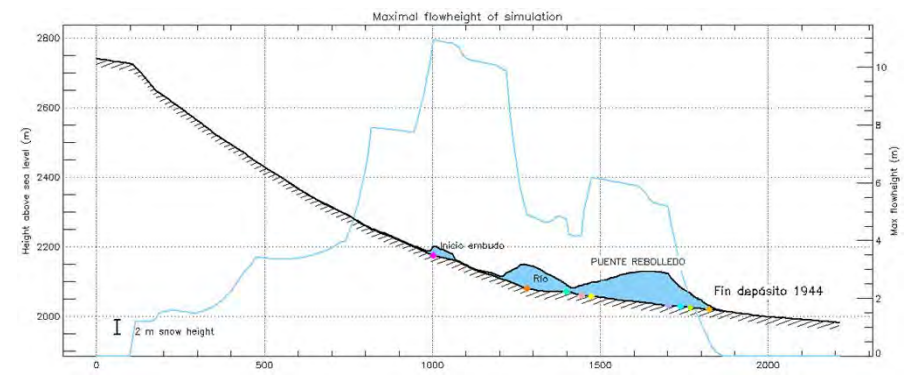
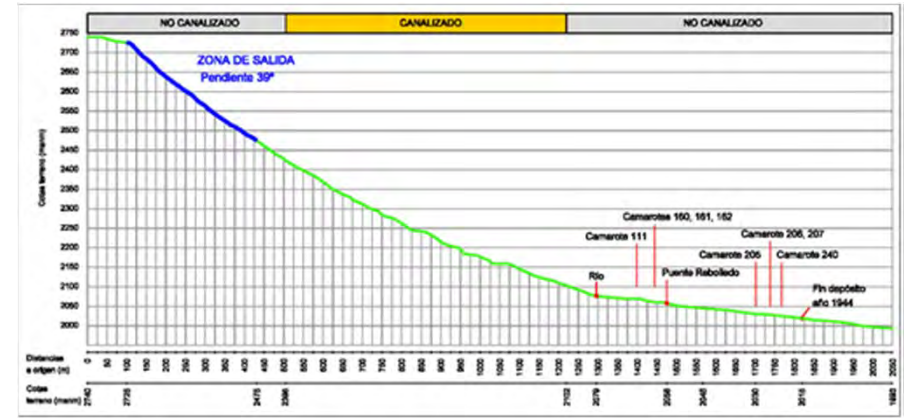
Cálculo de dinámica de avalanchas

Modelo de la dinámica de los aludes y calibración

Calibración y ajuste de modelos



Modelo AVAL-1D (Voellmy – Salm)



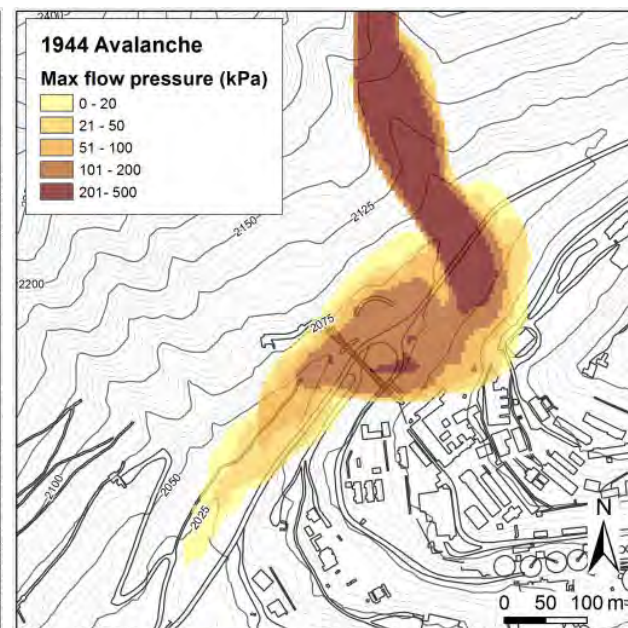
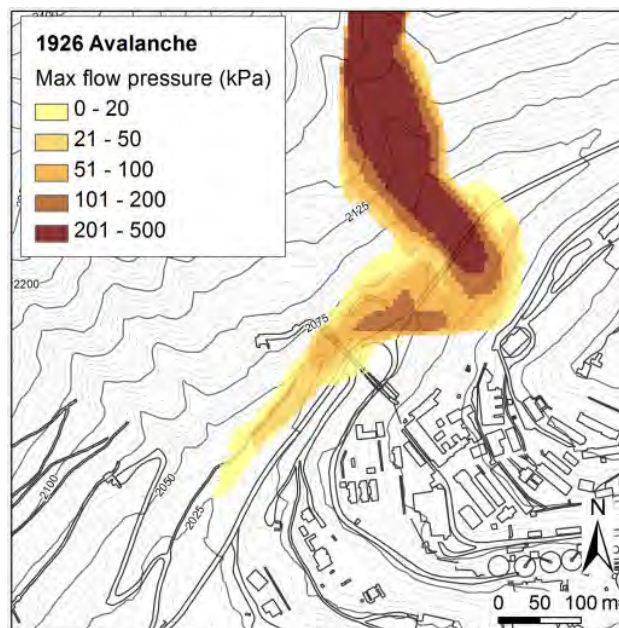
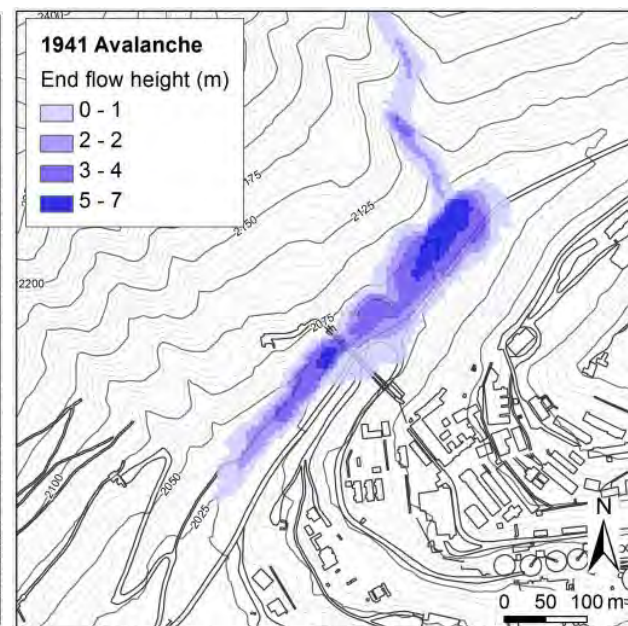
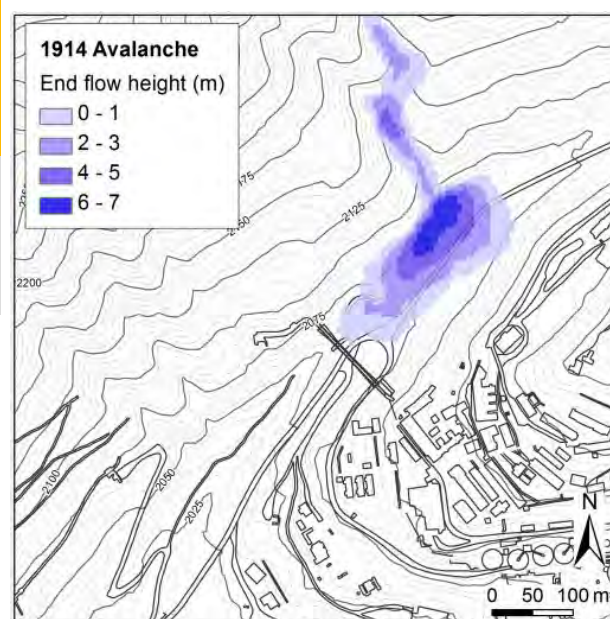
Cálculo de dinámica de avalanchas

Calibración y ajuste de modelos



Modelo **RAMMS-2D**
(Voellmy – Salm)

- Modelo basado en la formulación de Voellmy – Salm
- Cálculo 2,5D: variable integrada en profundidad, sobre MET
- Resultados como distribución en planta: ayuda a la zonificación y planificación del terreno
- Pre y post proceso integrable en SIG



Cálculo de dinámica de avalanchas

Formulación



- En la formulación de Voellmy – Salm los mecanismos resistentes al flujo están controlados por 2 parámetros:

- Fricción de Coulomb (μ)
- Fricción turbulenta (ξ)

$$S = \mu \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \cos \theta + \frac{\rho \cdot g \cdot U^2}{\xi}$$

- El ajuste de los parámetros depende de:

- La dimensión de la avalancha
- El periodo de retorno asociado
- El tipo de terreno
- Niveles altitudinales

- Parámetros de referencia fueron ajustados por el SLF en los Alpes
- En vista a los resultados del retro-análisis y experiencias de cálculo se recomienda modificar los límites altitudinales como principal adaptación a otras cordilleras:

- Andes centrales CL-AR: diferencia de +900 a +1.000m
- Pirineos: diferencia leve, menor a +200m (Oller et al, 2009)

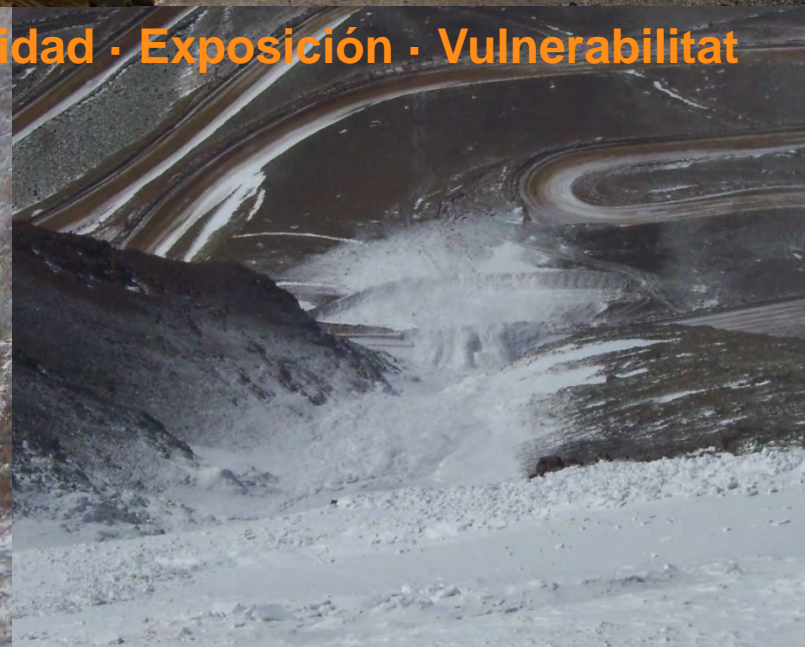
- Este criterio de traslación es compartido con SLF-Davos (Stoffel, 2012)

| Large avalanche (> 60'000 m³) | | 300-Year | | 30-Year | |
|--|---------------------|----------|-------|---------|-------|
| | Altitude (m.a.s.l.) | μ | ξ | μ | ξ |
| unchannelled | above 1500 | 0.16 | 2500 | 0.17 | 2000 |
| | 1000 - 1500 | 0.18 | 2000 | 0.19 | 1750 |
| | below 1000 | 0.20 | 1750 | 0.21 | 1500 |
| channelled | above 1500 | 0.20 | 1750 | 0.21 | 1500 |
| | 1000 - 1500 | 0.25 | 1500 | 0.26 | 1500 |
| | below 1000 | 0.30 | 1200 | 0.31 | 1200 |
| gully | above 1500 | 0.30 | 1000 | 0.31 | 800 |
| | 1000 - 1500 | 0.34 | 750 | 0.35 | 600 |
| | below 1000 | 0.38 | 500 | 0.39 | 400 |
| Mean size avalanche (25'000 - 60'000 m³) | | | | | |
| unchannelled | above 1500 | 0.20 | 2000 | 0.21 | 1750 |
| | 1000 - 1500 | 0.24 | 1500 | 0.25 | 1500 |
| | below 1000 | 0.28 | 1200 | 0.29 | 1200 |
| channelled | above 1500 | 0.26 | 1200 | 0.27 | 1200 |
| | 1000 - 1500 | 0.29 | 1200 | 0.31 | 1200 |
| | below 1000 | 0.33 | 1000 | 0.34 | 1000 |
| gully | above 1500 | 0.33 | 1000 | 0.34 | 800 |
| | 1000 - 1500 | 0.37 | 800 | 0.38 | 600 |
| | below 1000 | 0.40 | 500 | 0.41 | 400 |
| Small avalanche & wet snow avalanche (< 25'000 m³) | | | | | |
| unchannelled | above 1500 | 0.30 | 1500 | 0.31 | 1200 |
| | 1000 - 1500 | 0.32 | 1200 | 0.33 | 1200 |
| | below 1000 | 0.34 | 1200 | 0.35 | 1000 |
| channelled | above 1500 | 0.32 | 1200 | 0.33 | 1000 |
| | 1000 - 1500 | 0.34 | 1000 | 0.35 | 800 |
| | below 1000 | 0.36 | 800 | 0.37 | 600 |
| gully | above 1500 | 0.36 | 800 | 0.37 | 600 |
| | 1000 - 1500 | 0.40 | 500 | 0.41 | 400 |
| | below 1000 | 0.42 | 500 | 0.43 | 400 |

Estrategia de mitigación del riesgo



Riesgo = Peligrosidad · Exposición · Vulnerabilitat



- Instalaciones fijas (campamento / planta)
- Rajo de extracción
- Vías de comunicación

Estrategia de mitigación del riesgo

Alternativas de mitigación



| | | |
|--|---------------|---|
| Modificación de la superficie del terreno Control del efecto del viento Retención del manto de nieve | Activa | Desencadenamiento artificial |
| Permanente | | Temporal |
| Desviación, frenada y aturada Auto-adaptación Planificación espacial | Pasiva | Predicción local y regulación Detección y alerta |

| Técnicas de protección | Actúa sobre | | | |
|--|-----------------------|-----------|----------------|-----------|
| | Peligrosidad | | Vulnerabilidad | |
| | Frecuencia – magnitud | Extensión | Exposición | Debilidad |
| Modificación superficie terreno Control del efecto del viento Retención del manto de nieve | | | | |
| Desencadenamiento artificial | | | | |
| Desviación, frenada y aturada | | | | |
| Auto-adaptación Planificación espacial | | | | |
| Predicción local y regulación Detección y alerta | | | | |

Mitigar = reducir a un mínimo razonable

Estrategia = composición de técnicas (optimizada y robusta)

Estrategia de mitigación del riesgo

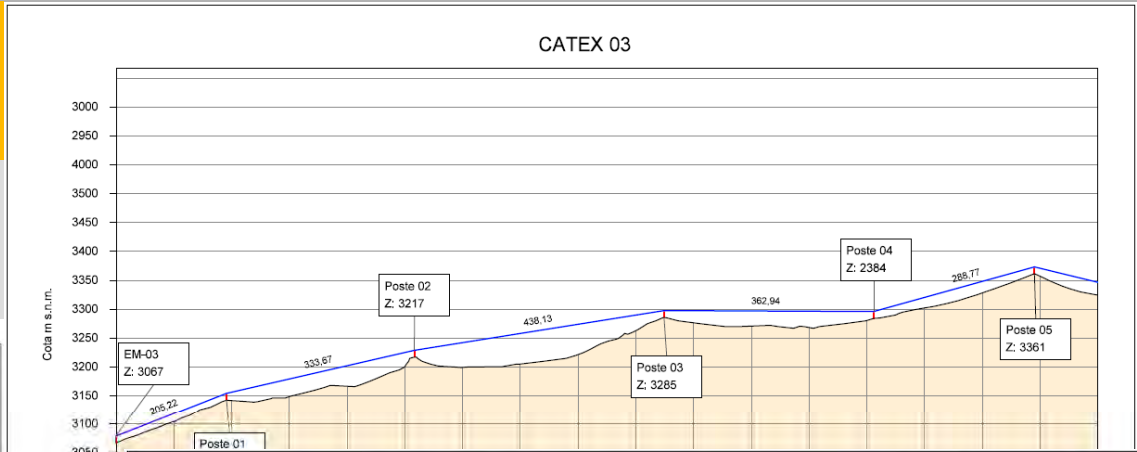
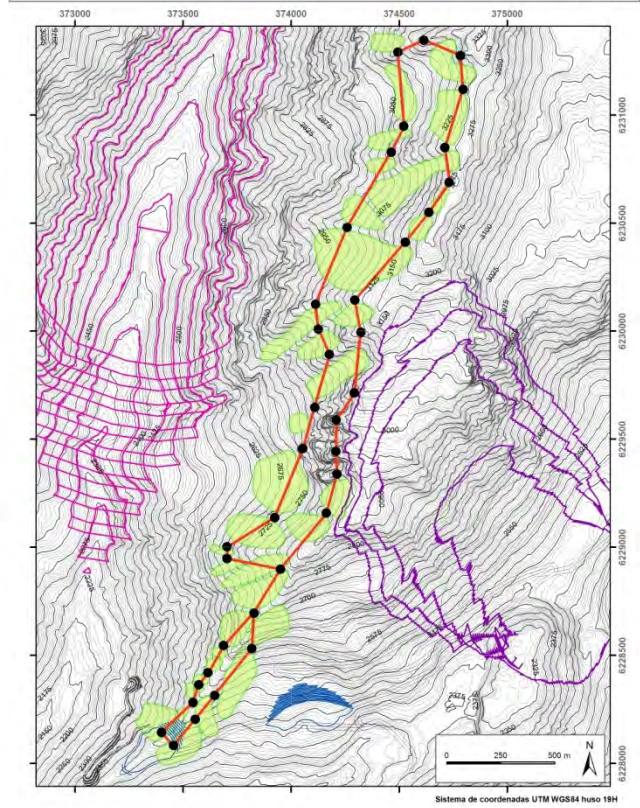
Protección temporal

Evaluación del riesgo de avalanchas en la explotación del Rajo Norte en la mina El Teniente en Chile. Ingeniería de Prefactibilidad.

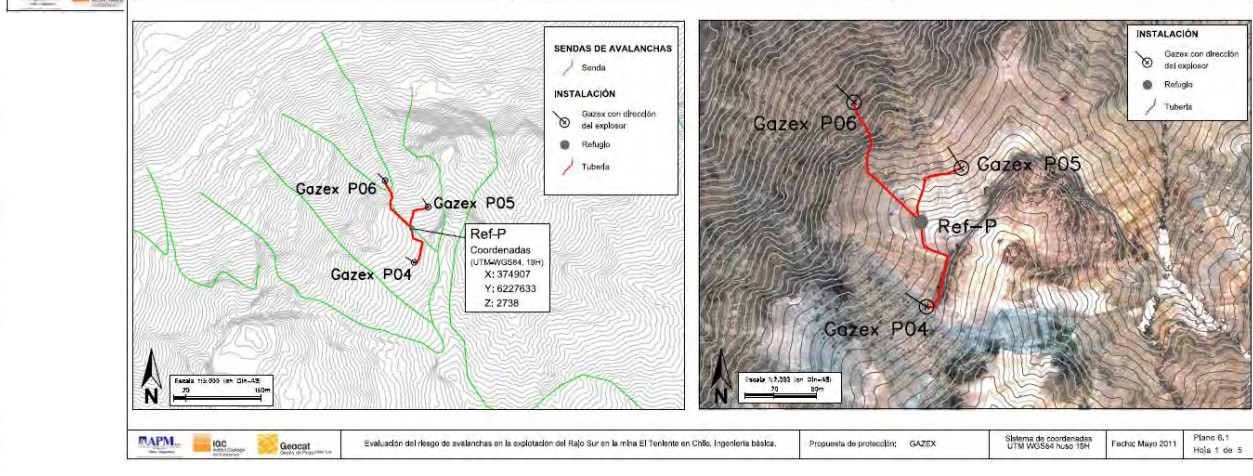
CATEX alternativa 1

Longitud en planta: 7,624m
Desnivel total: 850m
Poste Nº de postes: 37

Mayo 2012



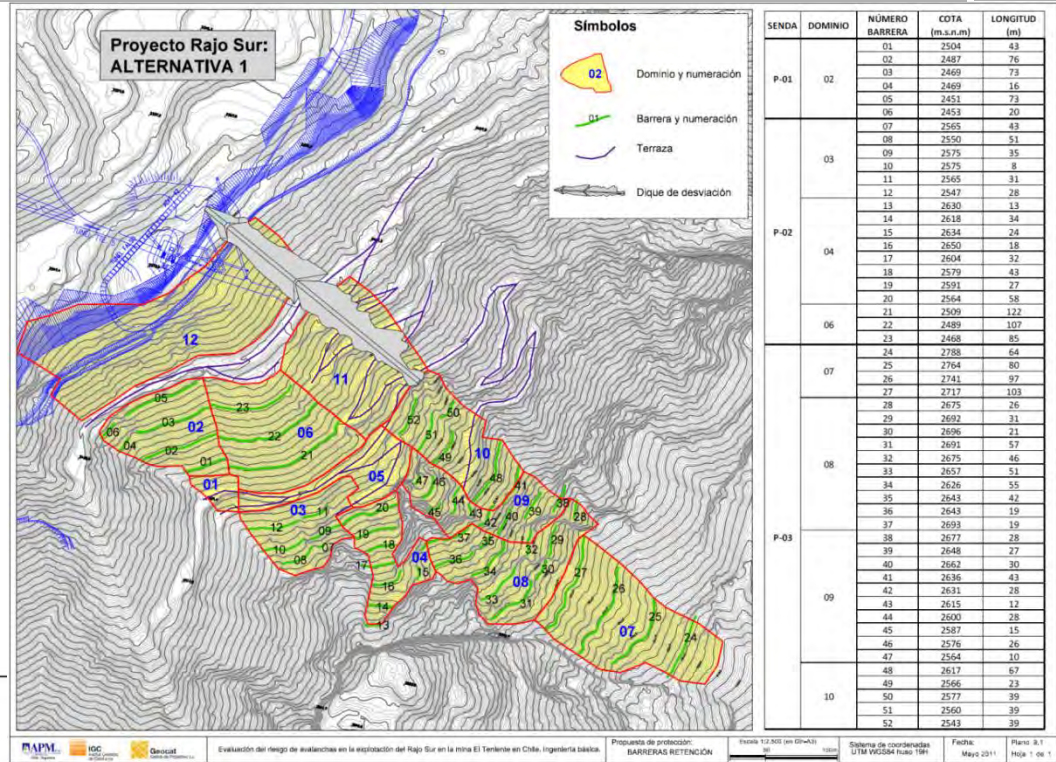
| Gazex | Imagen | Coordenadas (UTM/WGS84, 19H) | Tipo; Inercial de 3,0m ³ | Terreno de cimiento; suelo con bloques |
|---|--------|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Gazex P04 (Considerado en la alternativa 1) | | X: 374911 Y: 6227575 Z: 2751 | | |
| Gazex P05 | | X: 374935 Y: 6227670 Z: 2718 | | |
| Gazex P06 | | X: 374860 Y: 6227716 Z: 2665 | | |



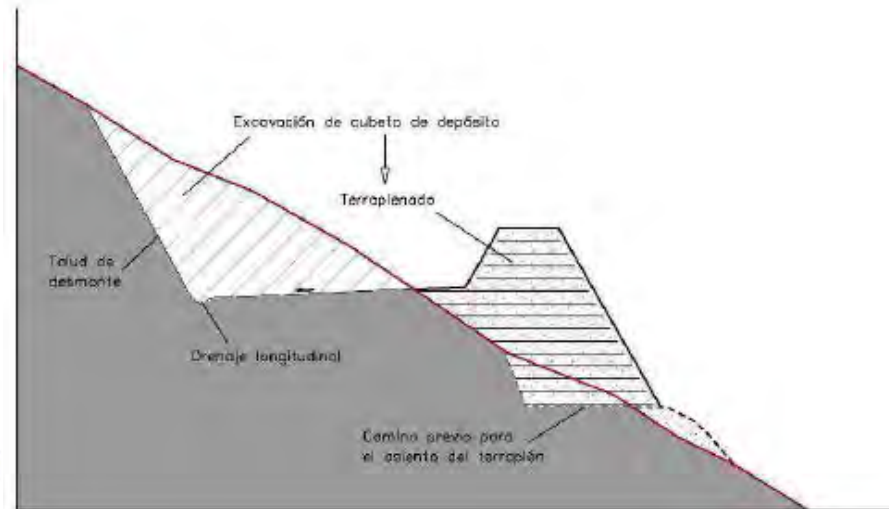
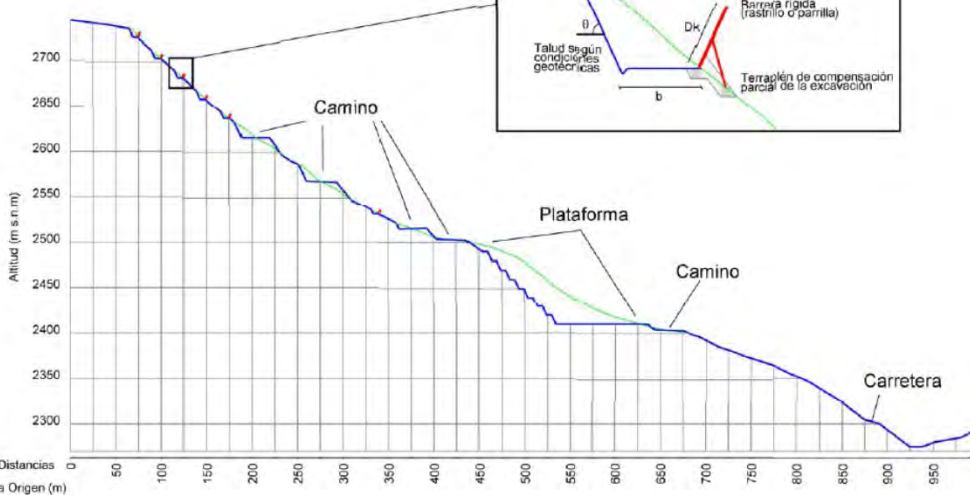
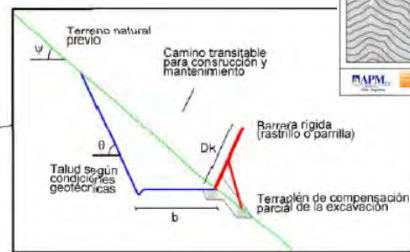
Estrategia de mitigación del riesgo

Protección permanente activa

- Para zonas de instalaciones fijas estratégicas al pie de ladera

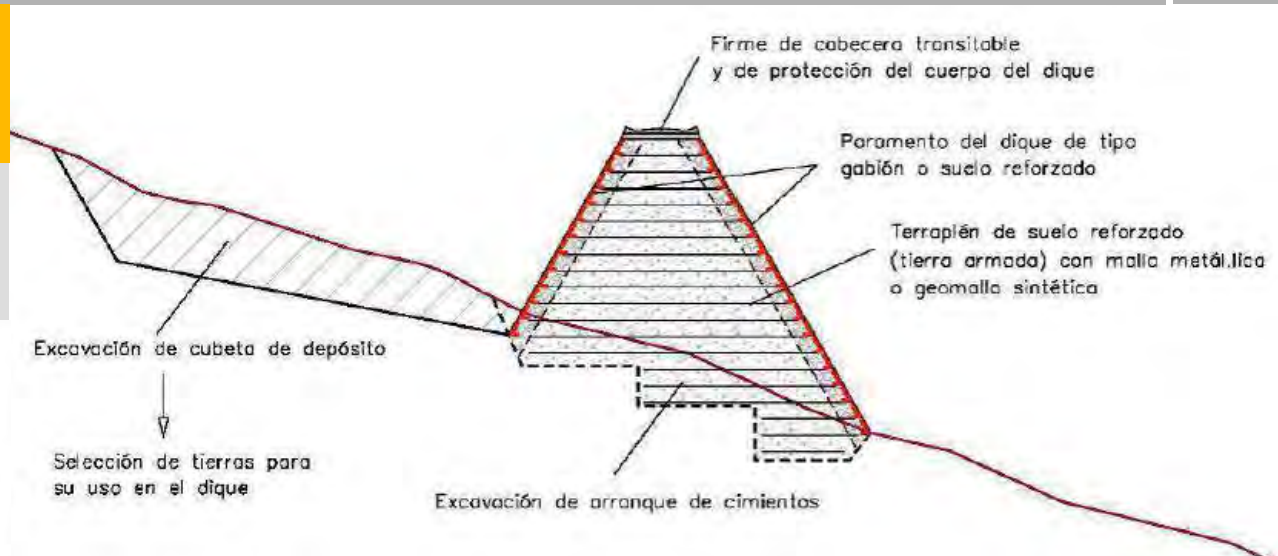
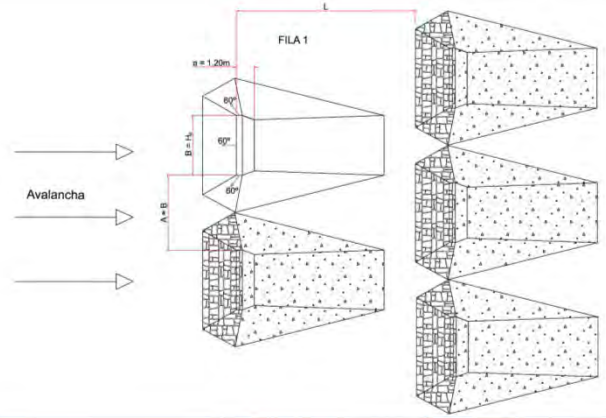


Medidas de protección para la plataforma de chancado. Alternativa 1



Estrategia de mitigación del riesgo

Protección permanente pasiva



**MITIGACIÓN DEL RIESGO DE
ALUDES EN LA MINA EL
TENIENTE EN LOS ANDES
CENTRALES DE CHILE**



ACNA

**Cicle de xerrades
Assemblea ACNA**

Vielha (Val d'Aran)
15 novembre 2014

Gracias por su atención

Marc Janeras Casanova
marc.janeras@icgc.cat



ICGC

Institut

Cartogràfic i Geològic
de Catalunya