



# Modelo cinemático aplicado a la minería subterránea

F. Vivanco<sup>1</sup>, F. Melo<sup>1</sup>, C. Fuentes<sup>2</sup>, V. Apablaza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Santiago de Chile, CIMAT

<sup>2</sup>IM2, Codelco, Chile



# Resumen



- Objetivo:

Desarrollar una herramienta para ayudar en la optimización de la recuperación de mineral reduciendo la dilución en la minería subterránea por excavación por bloques.

- Aproximación:

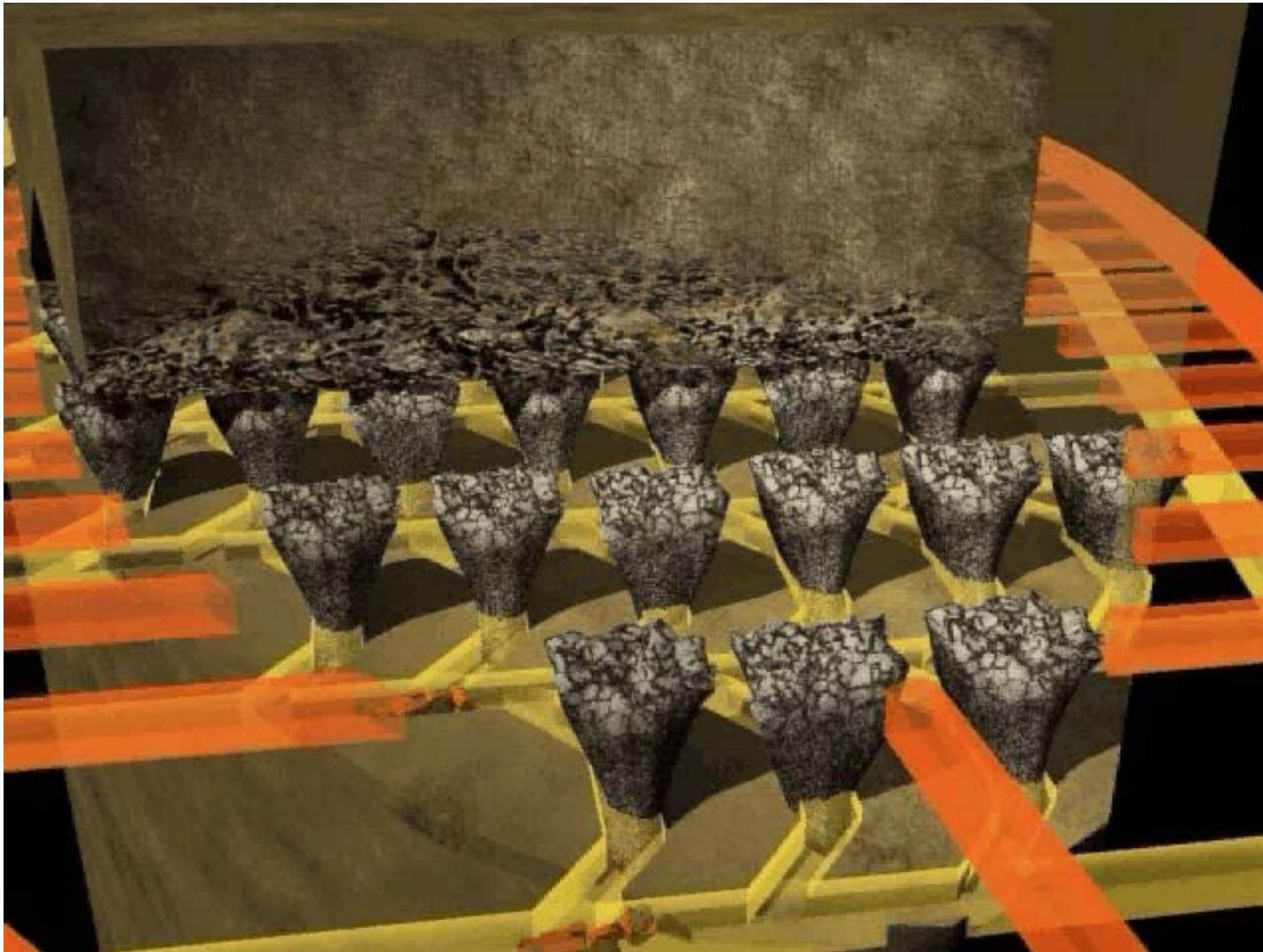
Modelo cinemático y validación experimental a escala de laboratorio.

# Minería subterránea – excavación por bloques

- **Producción a gran escala.** Método de bajo costo, mineral de baja ley, donde otras técnicas son inseguras.
- **Condiciones.** Cuerpo mineral masivo, grandes dimensiones, roca fracturable en tamaños manejables.
- **Descripción.** Fracturación de las rocas aprovechando gravedad+esfuerzos sobre éstas. Mínima perforación y explosiones.
- **Problemas.** Generación de gran cantidad de pre-mineral, dilución de mineral, perturbaciones en la superficie.

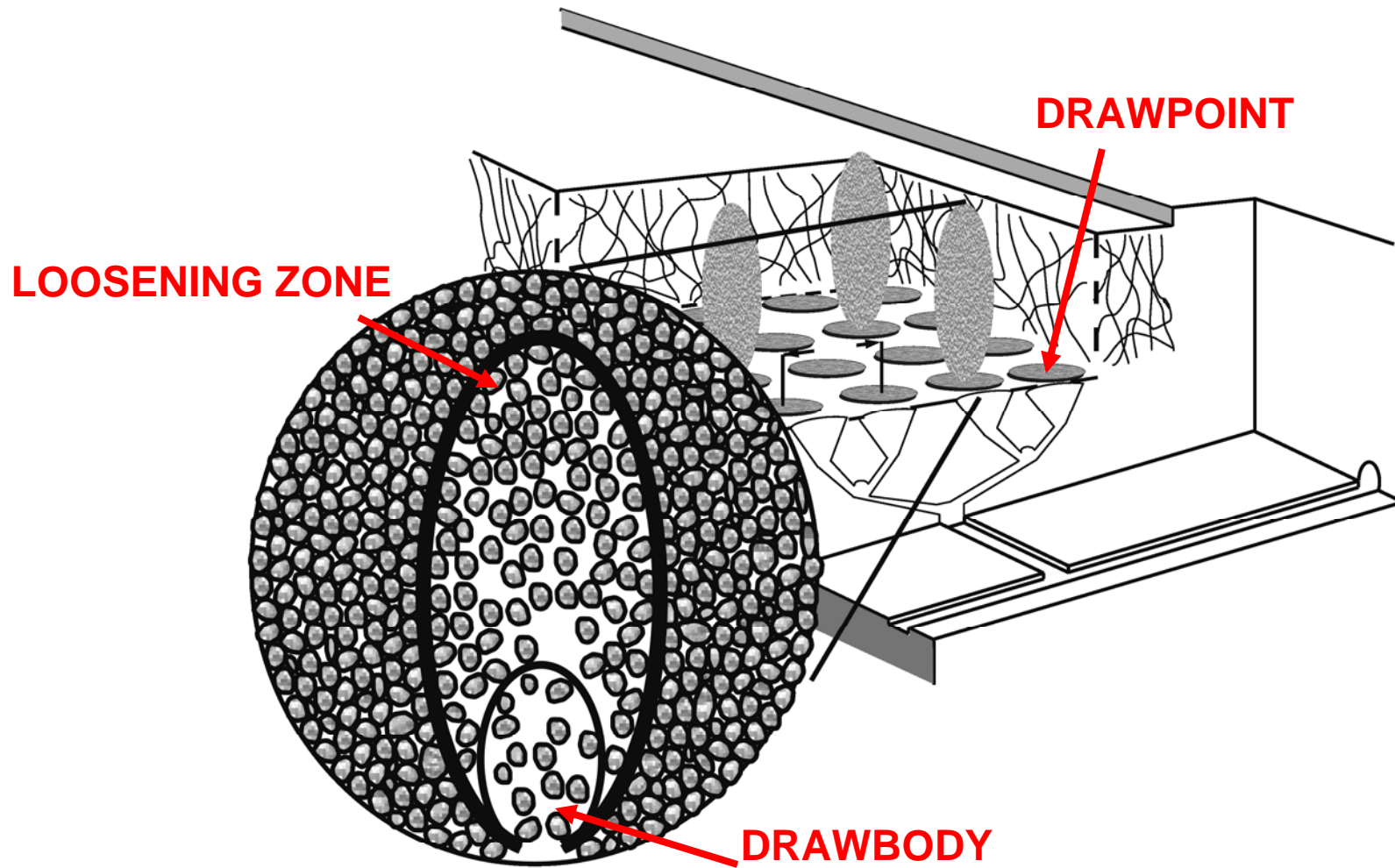
# Excavación por bloques

**Optimización del diseño de la mina y de su operación.**



Cortesía de C.  
Fuentes

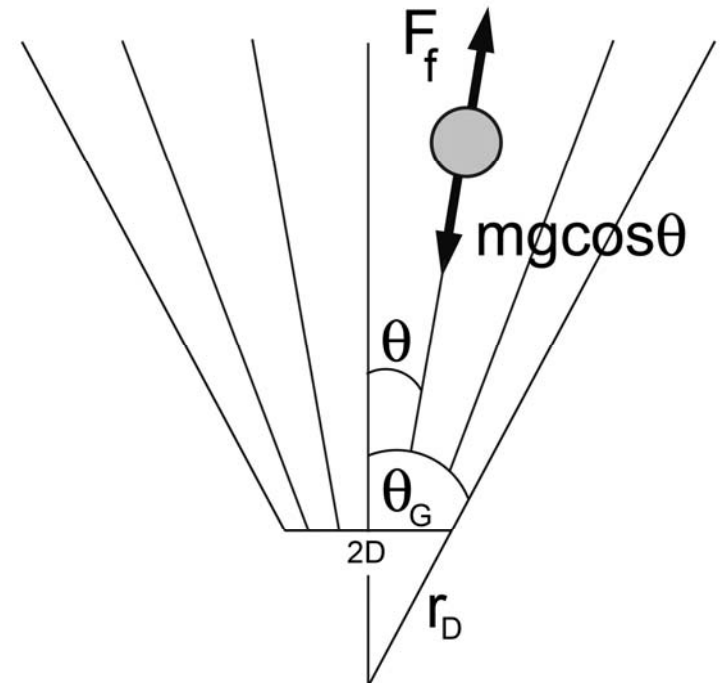
# Conceptos



- Bergmark-Roos

$$r(\theta, t) = r_0(\theta) - \frac{1}{2} a_r(\theta) t^2$$

$$\rho = \rho_0 \frac{r_0^2}{r^2}$$



# Modelos para el drawbody

- Plasticidad<sup>1</sup>

$$v_r = -\frac{v_0 r_D^2}{r^2} f(\theta)$$

$$\rho = \rho_0$$

<sup>1</sup>La distribución de velocidad se obtiene a partir de la distribución de esfuerzos en el material estático.

# Volumen del drawbody

- Bergmark-Roos**

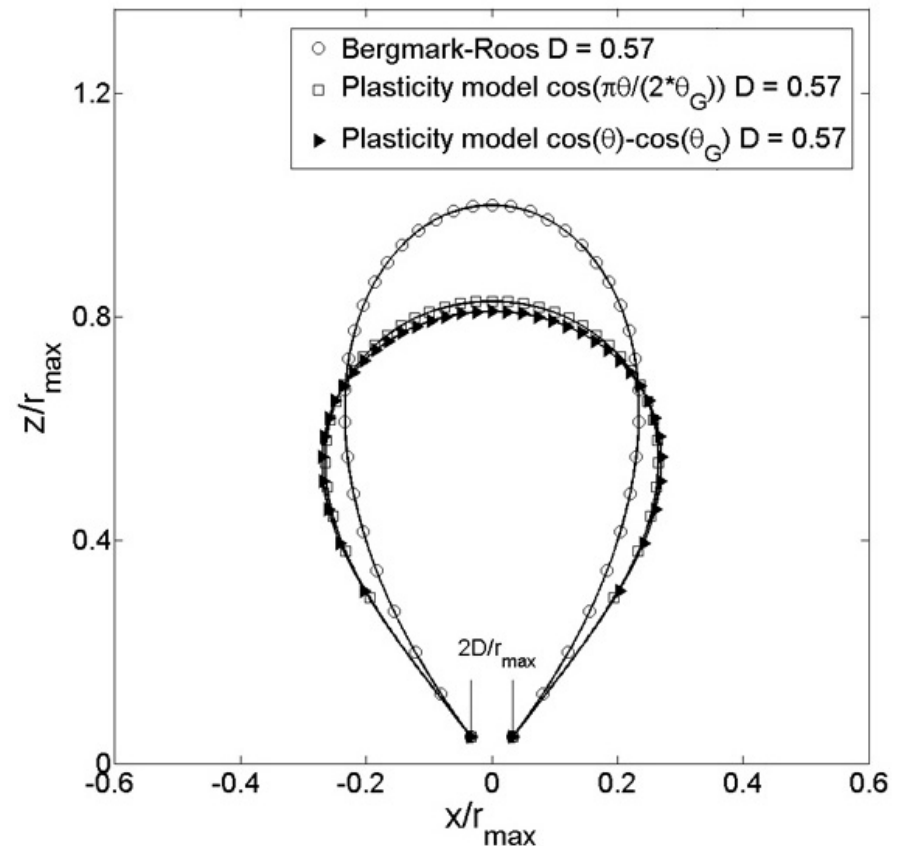
$$\Omega_0 = \frac{\pi}{6} (1 - \cos \theta_G) \left[ r_{\max}^3 - r_D^3 + r_{\max}^2 r_D + r_{\max} r_D^2 \right]$$

$$\rightarrow_{r_{\max} \gg r_D} \Omega_0 = \frac{\pi}{6} (1 - \cos \theta_G) r_{\max}^3$$

- Plasticity**

$$\Omega_0 = \frac{\pi}{3} (r_{\max}^3 - r_D^3) \left[ \frac{\cos^2 \theta_G - 2 \cos \theta_G + 1}{1 - \cos \theta_G} \right]$$

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{3} \left[ \frac{r_{\max}^3 - r_D^3}{(\pi/2\theta_G)^2 - 1} \right] \left[ \frac{\pi}{2\theta_G} \sin \theta_G - 1 \right]$$





Nedderman and Tüzun, Powder Technol. **22**, 243 (1979)

$$v_x = -D_P \frac{\partial v_y}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial v_y}{\partial y} = D_P \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} \quad \frac{\partial v_z}{\partial z} = D_P \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right]$$

- Distribución de velocidad en silos rectangulares.
- Situación estacionaria.
- Empaquetamiento suelto.
- Dilatación cuando el sistema denso comienza a fluir

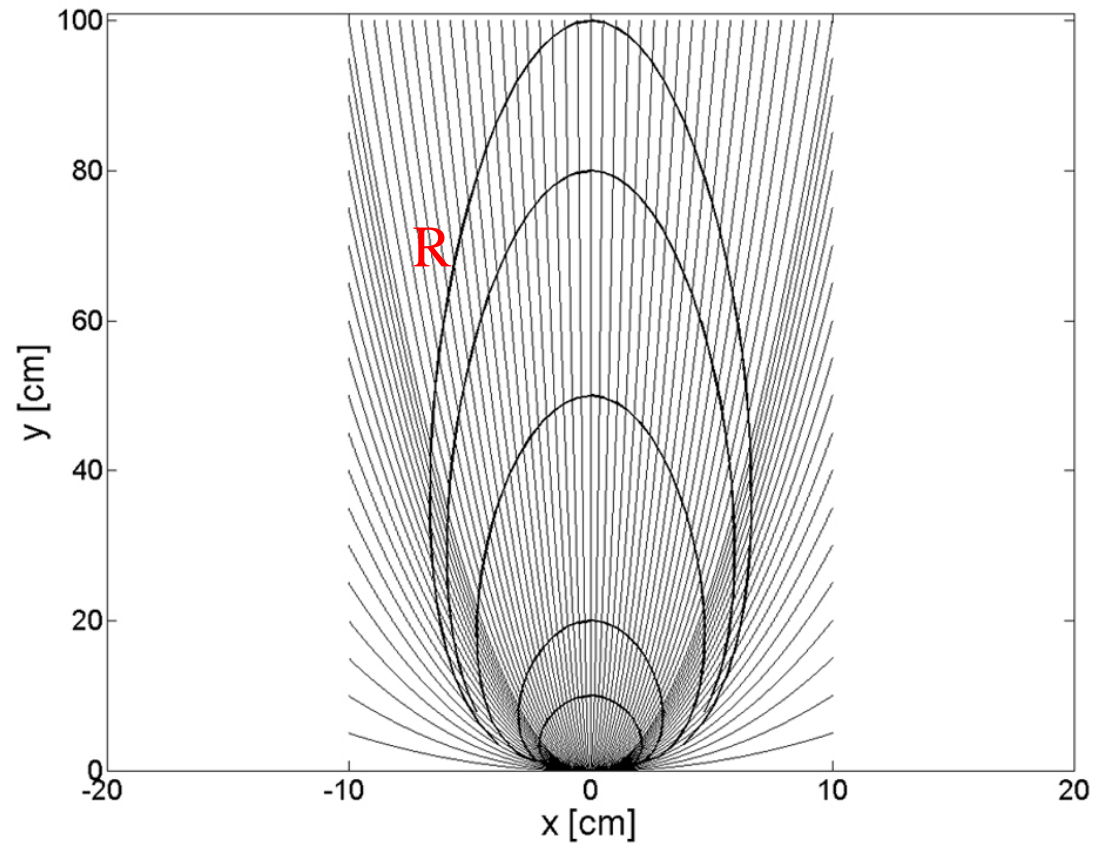
- Líneas de corriente

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y, D, Q)$$

$$\frac{dy}{dt} = g(x, y, D, Q)$$

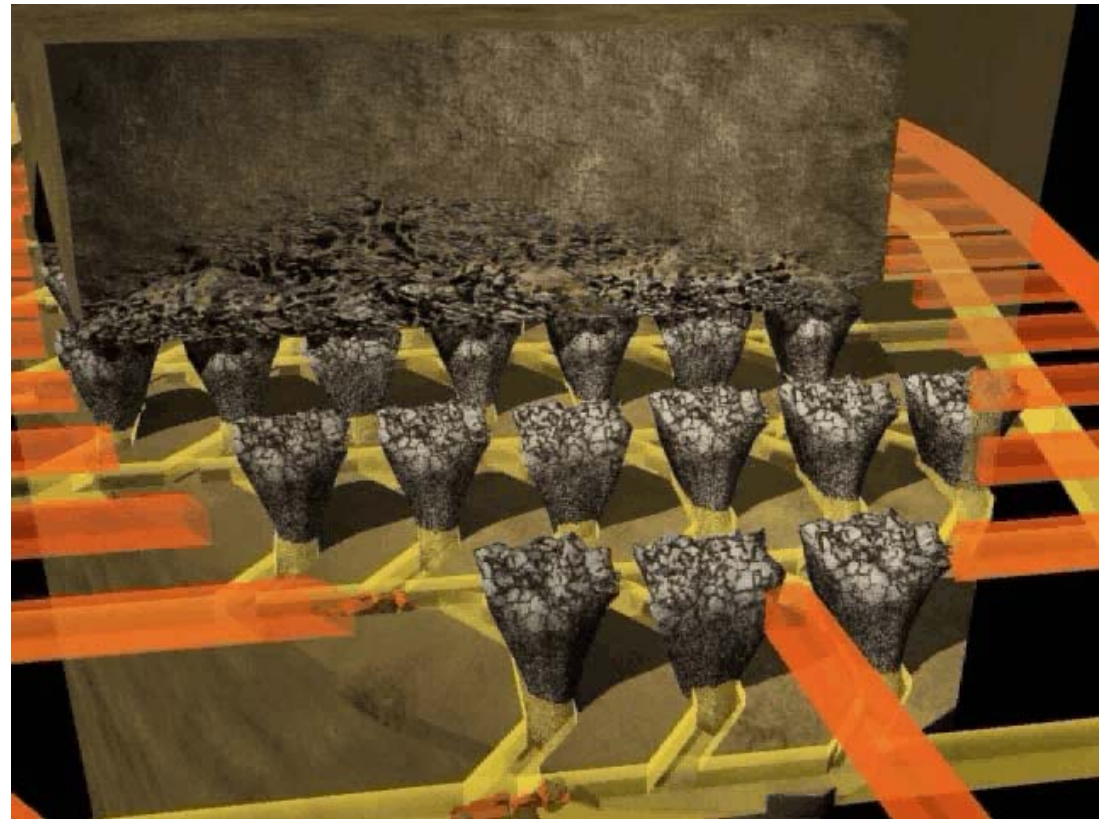
- Condición drawbody

$$R(x_0, y_0, D) = Qt$$



# Interacción de drawpoints

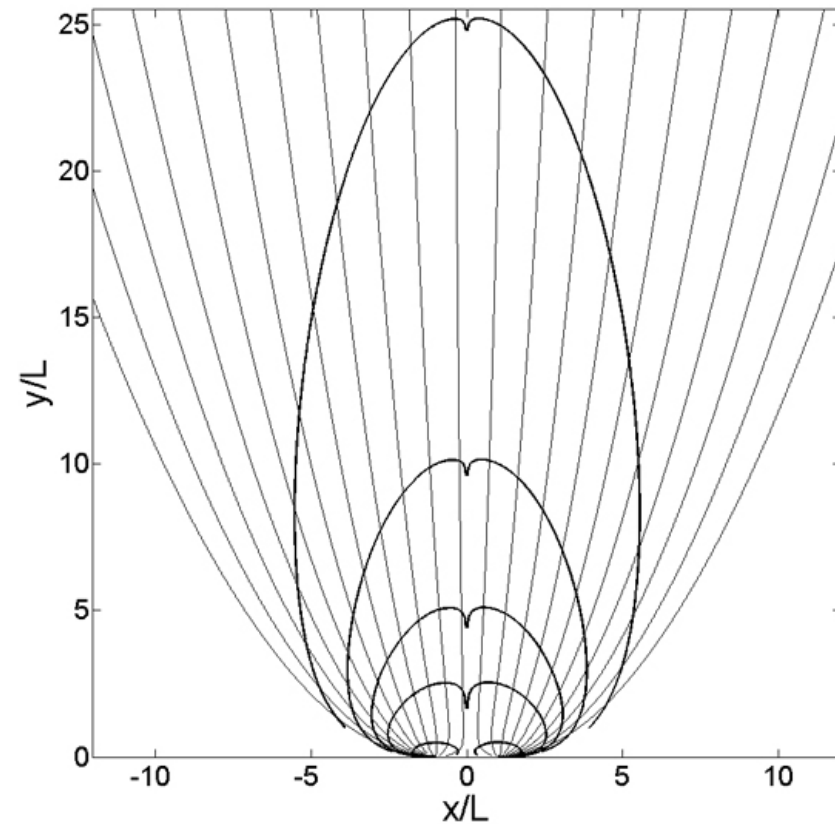
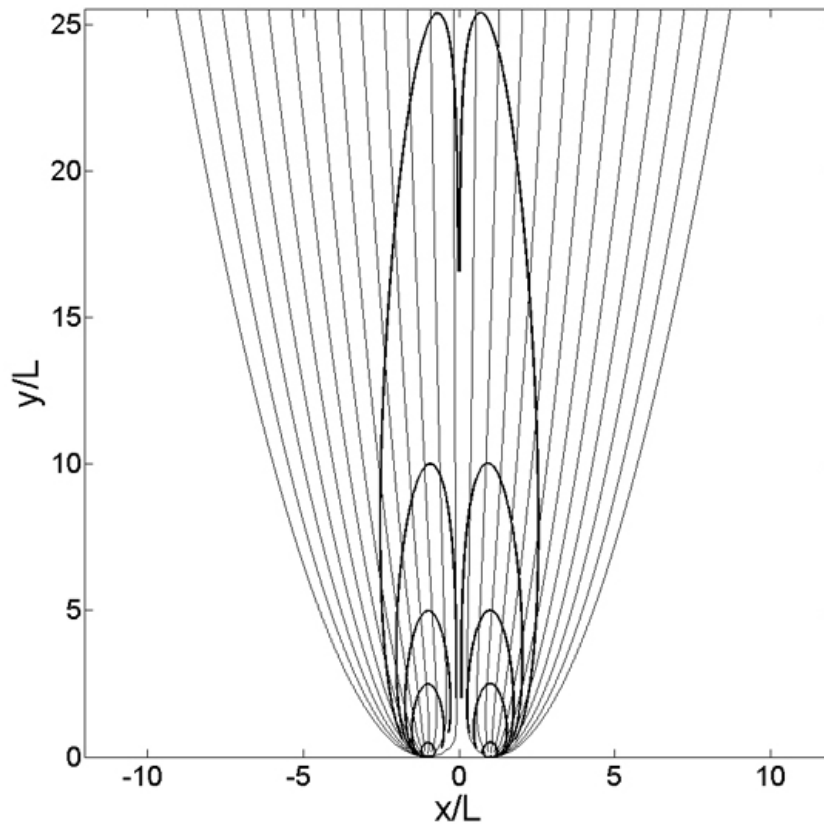
- Extracción: simultánea o alternada.
- Cómo interactúan los drawpoints?
- Distribución de drawpoints está basada en el sentido común y la experiencia.
- Descripción simplificada usando la linealidad del modelo cinemático.



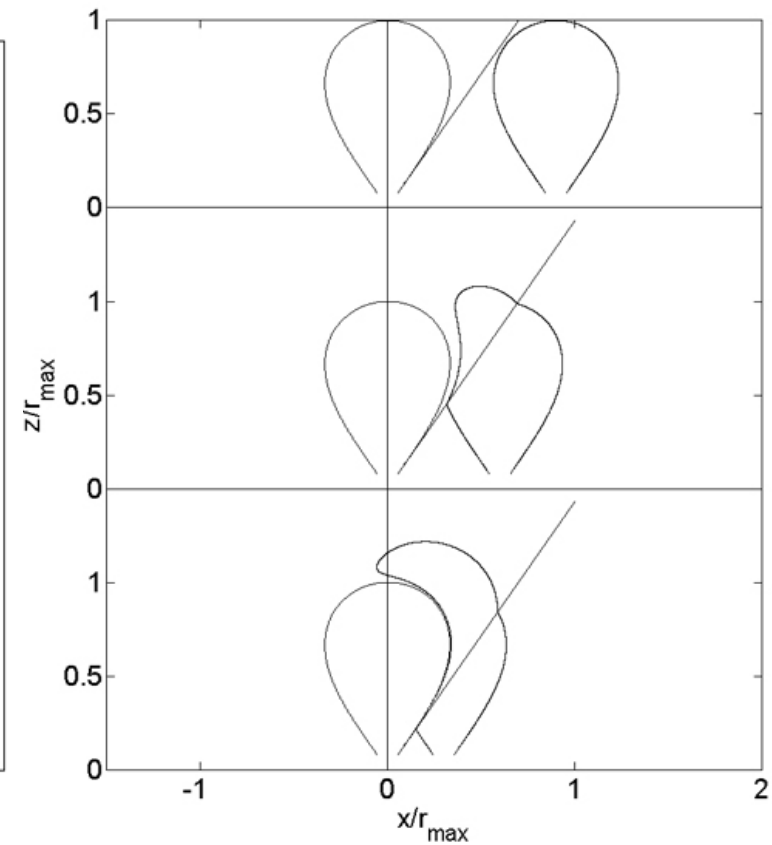
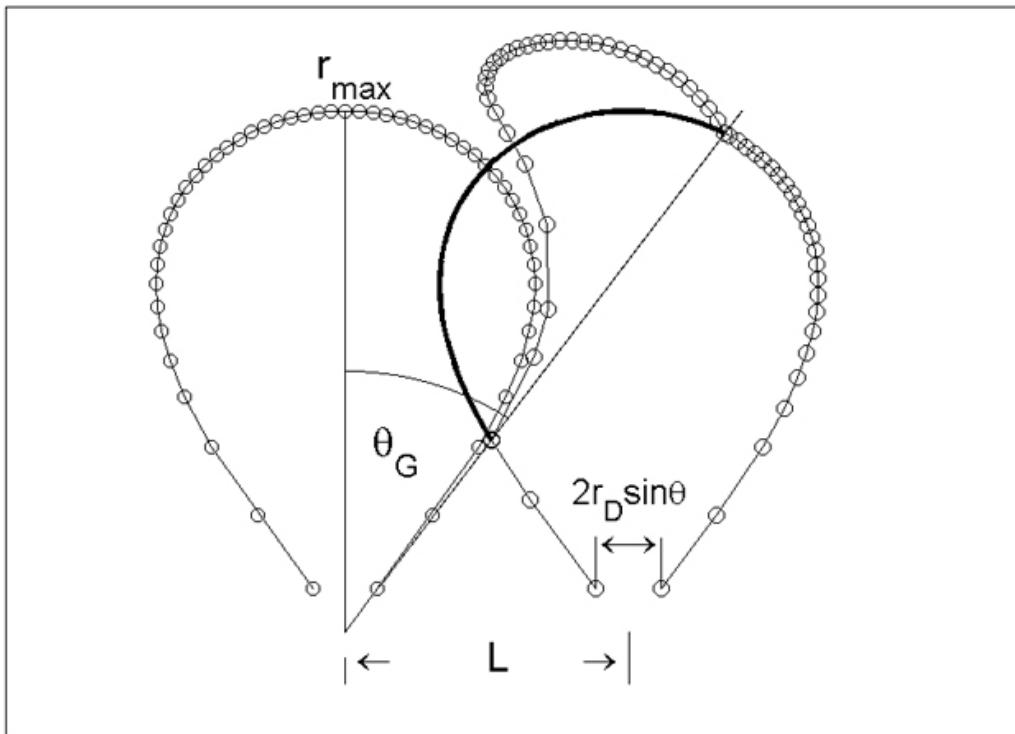
# Interacción de drawpoints

- Extracción simultánea

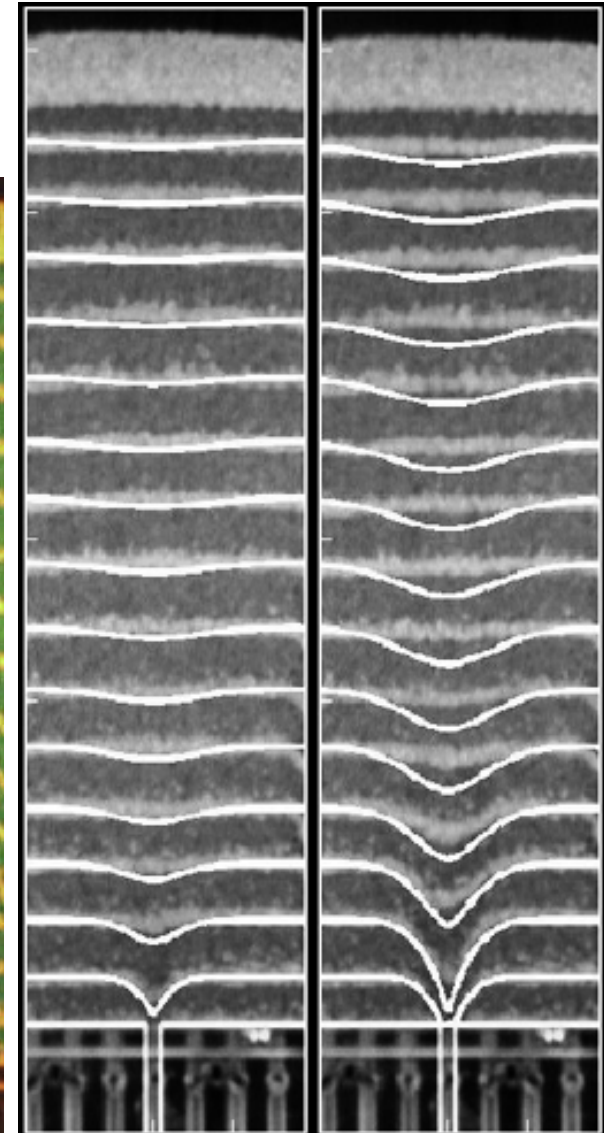
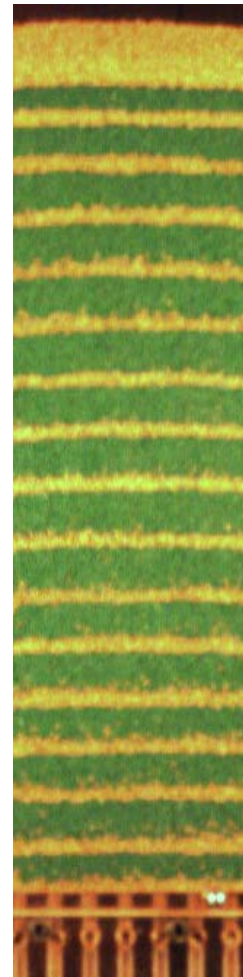
$$\vec{v} = \sum_{\vec{L}_i} \vec{v}_{Q_{0i}} (\vec{x} - \vec{L}_i)$$



- Extracción alternada



- **Modelo cinemático puro**
- Buen acuerdo cerca de la apertura.
- Predicción teórica falla lejos de la apertura.
- Area de la deflexión es igual al material extraído (hipótesis densidad cte.) No se satisface en los exps.
- La dilatancia debe ser considerada.



F. Melo et al, in press in IJRMMS (2006).

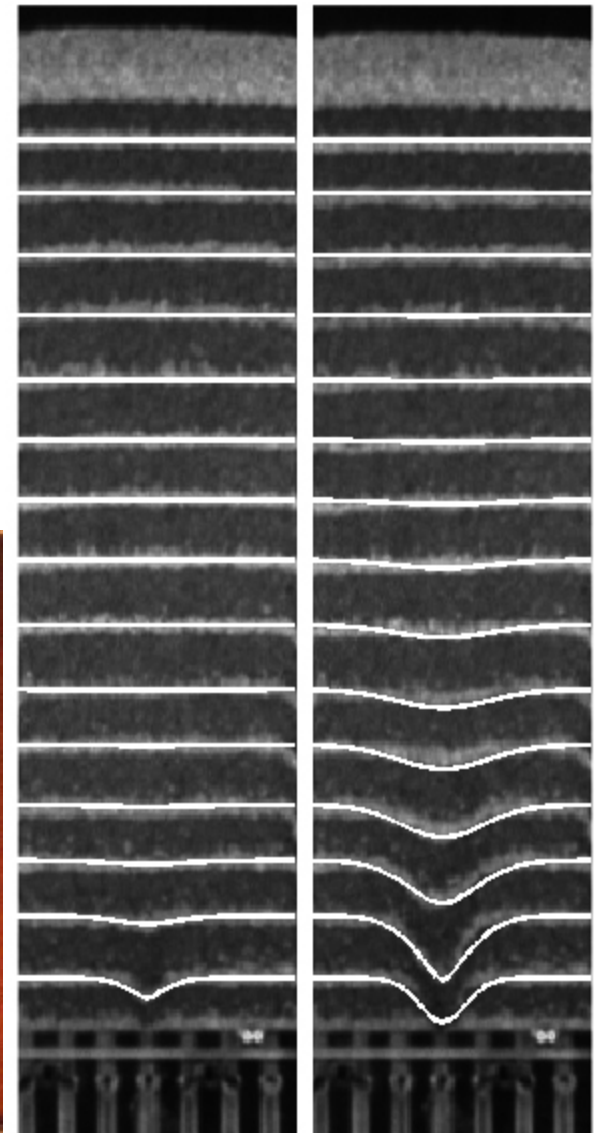
# Experimentos y modelo

- Modelo cinemático + dilatación

$$\frac{\partial v^n}{\partial y} = D(v_T) \frac{\partial^2 v^n}{\partial x^2} + f(v_T, d) v^n$$

$$f(v_T, d) = -\alpha_0 \exp\left(-\frac{|v_T|}{d}\right) \frac{v^n}{d}$$

Dilatación





# Resumen

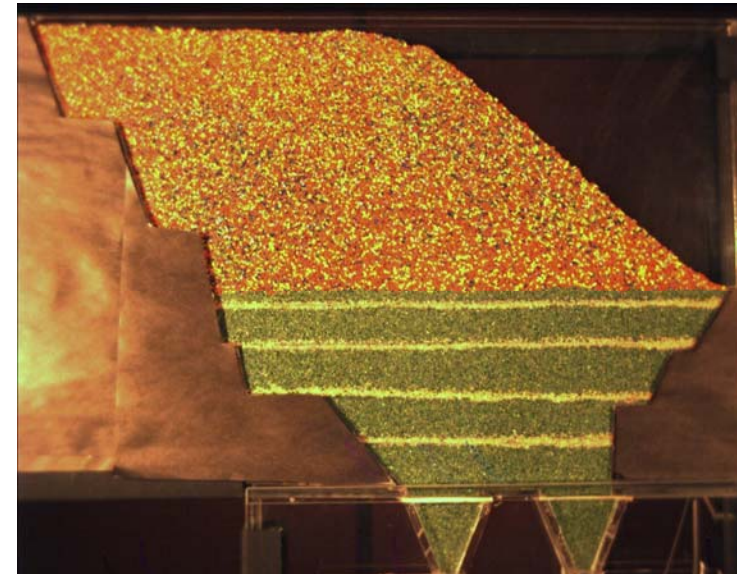
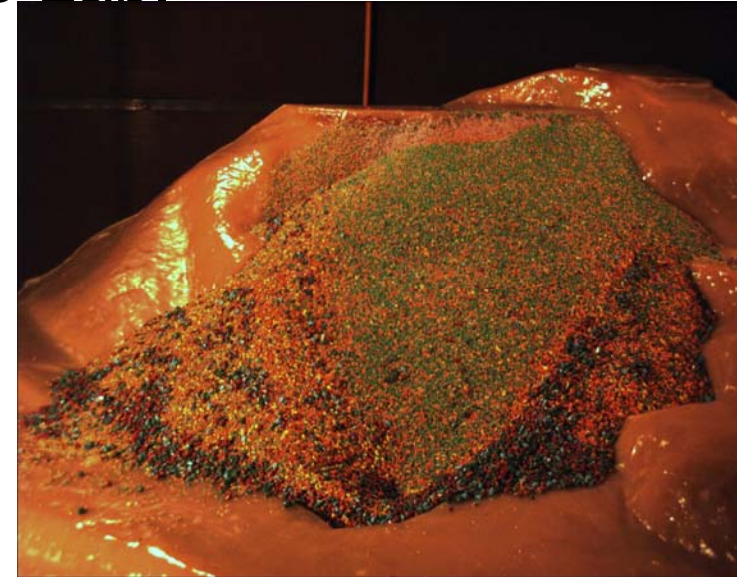
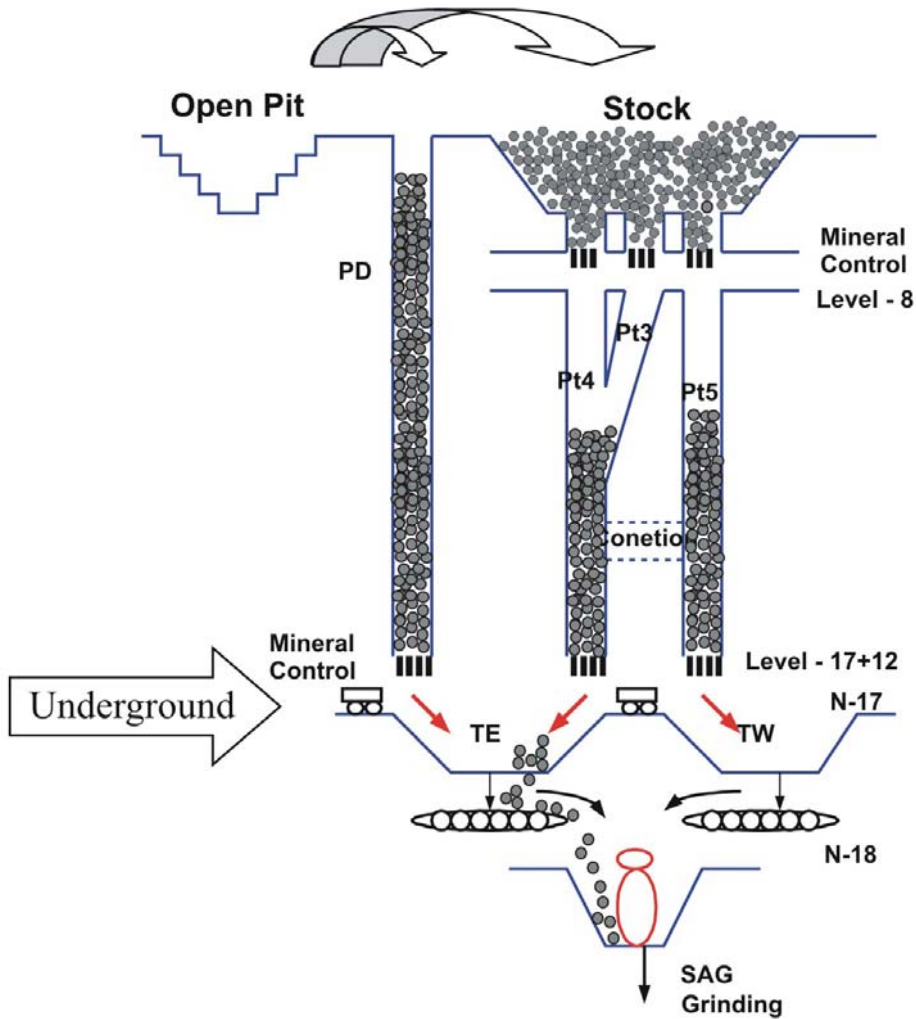


- Modelo de B-R presenta aumento de la densidad.
- Modelos cinemático y de plasticidad, describen el perfil de drawpoint y loosening zone.
- Modelo cinemático muestra las características encontradas en la extracción por un sólo drawpoint.
- Interacción de drawpoints puede describirse mediante el modelo cinemático.
- Introducción de la dilatancia mejora predicción del modelo cinemático.
- Modelo cinemático se puede utilizar como herramienta simple en la optimización del espaciado de los drawpoints y en la estrategia de extracción.



# Trabajos futuros

- Acumulación de mineral, escala de Lab.



C. Fuentes, G.Bravo & D. Opazo

# Trabajos futuros

- Acumulación de mineral, escala real.
- 1100M ton. Capacidad de almacenamiento.
- 500K ton. Producción, 3 meses.
- Acceso a medidas locales.

