



SIMULACIONES PARA EL MUESTREO MINERO

Marco Alfaro

Doctor en Geoestadística

Rolando Carrasco

Magister en Geoestadística

En este trabajo se presentan varias simulaciones de muestreo correspondientes a proyectos y operaciones mineras. Ellas muestran que en nuestras minas y plantas estamos plagados de especímenes, es decir, ejemplares no representativos. En los ejemplos se hace hincapié en el principio de equi-probabilidad el cual conduce a una muestra representativa.

Estos ejemplos nos muestran cómo las simulaciones pueden ayudar a los mineros en la obtención de muestras representativas. Se observa que una simulación con gráficos es mejor que un millón de palabras.

INTRODUCCIÓN

La teoría moderna del muestreo de materiales mineros (sólidos y particulados) se basa en las investigaciones de Pierre Gy, también estudiada por Francis Pitard y Dominique François-Bongarçon (ver bibliografía).

El principio fundamental del muestreo minero en el caso de material particulado establece que:

“El muestreo debe ser equi-probable”

En el caso de minerales, el muestreo es equi-probable cuando cualquier fragmento que constituye el lote tiene la misma probabilidad de ser elegido para la muestra.

Según Pierre Gy, cuando esta condición no se cumple, se tiene más bien un “especimen”, es decir un ejemplar no necesariamente representativo.

Ejemplos de especímenes en minería son el muestreo de carros, camiones o stock piles (pila de mineral) debido a que estamos forzados a tomar una muestra superficial y de una granulometría limitada.

Es sabido que en casi todas nuestras minas, plantas y laboratorios el muestreo del material minero es muy pobre, debido a que existe una gran variedad de instrumentos incorrectos (no equi-probables) y a la ignorancia de las reglas simples del muestreo correcto.

SIMULACIONES

En este trabajo presentaremos varias simulaciones de muestreo en minas y plantas y mostraremos cómo pueden ayudarnos para la elección de un muestreo correcto.

Ejemplo 1: El ojo humano

En algunas ocasiones el muestreo es “visual”. El ojo humano es muy malo para estimar la proporción exacta de materiales. En el ejemplo siguiente la pregunta es: ¿Cuál es la proporción de material (gris claro) y (gris oscuro)?

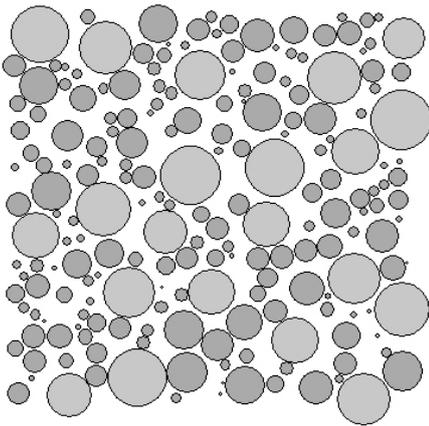


FIGURA 1

Partículas de color gris claro y gris oscuro.

Las simulaciones muestran que es muy difícil para el ojo proporcionar una respuesta correcta: luego no es recomendable el uso de muestras visuales.

Ejemplo 2: Muestreo de pozos de tronadura

Un problema, no muy bien resuelto, es el muestreo de un pozo de tronadura (perforación en la roca que se rellena con explosivos) en una mina a cielo abierto. La simulación siguiente muestra casi todos los problemas que se presentan al momento de tomar una muestra cuando se perfora la roca: viento, tipo de roca, método de muestreo (equi-probable o no). Ver la (Figura 2).

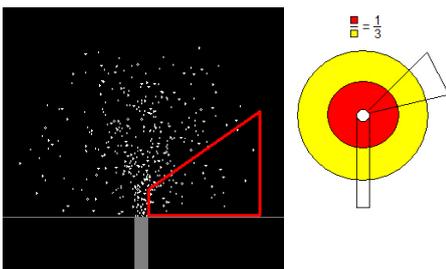


FIGURA 2

Muestreo de pozos de tronadura en minería a cielo abierto.

Ejemplo 3: Muestro de Flujos de Mineral.

Este muestreo se realiza una vez que el mineral ha salido de la mina, ha sido reducido de tamaño y está en movimiento. Se usan “cortadores” de muestra los cuales deben ser perpendiculares al flujo tal como se muestra en el esquema de la (Figura 3).

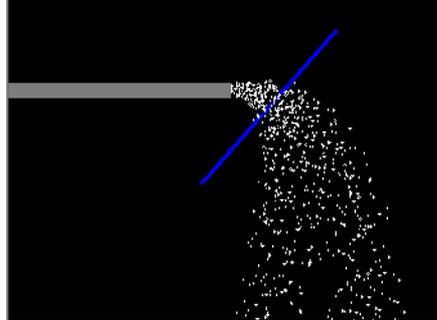


FIGURA 3

Muestreo en la planta.

Las simulaciones muestran que la mejor manera de muestrear este flujo es en “caída libre”.

Ejemplo 4: Muestreo de flujo líquido.

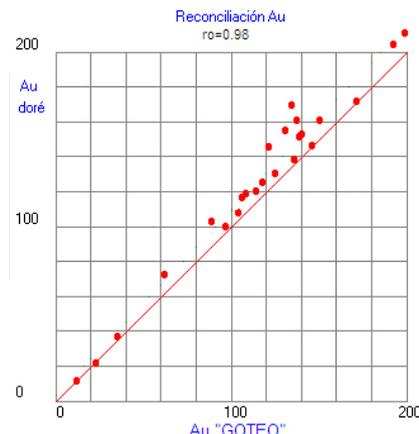
En algunas minas de oro se usa muestreo de líquidos por goteo, como en la (Figura 4):



FIGURA 4

Muestreo de oro por goteo.

Las simulaciones muestran que este tipo de muestreo produce un sesgo considerable en la determinación del contenido de oro (ley de oro). La Figura 5 representa el caso para una mina de oro chilena.



Ejemplo 5: La fórmula de Pierre Gy para el caso del oro.

Es muy fácil calcular el error fundamental del muestreo mediante la fórmula de Pierre Gy – Bongarçon para el oro. Para ello, creamos el programa de la Figura 6 (existen programas para otros minerales). Con este programa se pueden simular diferentes tamaños de muestras, leyes, granulometrías, densidades, etc.

Formula de Gy (mineral de oro)

Ms	10000		
MI	120000000		
d	5		
dI	0.001		
aL	0.000005		
g1	19		
g2	2.4		
b	1.5		
g	0.25		
f	0.5	Error %	12.96

FIGURA 6

Cálculo de la fórmula de Gy.

La fórmula de Gy para el cálculo de la varianza relativa del error de muestreo establece lo siguiente:

$$\sigma_R^2 = K d^3 \left(\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$$

K= constante de muestreo

d= diámetro (nominal) de la partícula más grande en el lote

M_S= peso de la muestra (en gramos)

M_L= peso del lote (en gramos)

Ejemplo 6: Un experimento de muestreo.

Un experimento clásico de muestreo se puede realizar de la manera siguiente:

En un recipiente poner 20 kg de arroz (Figura 7), lo cual corresponde aproximadamente a 1,000,000 de granos; tomar 10 granos, pintarlos rojo con un plumón, poner de nuevo en el recipiente y mezclar (observar que el contenido corresponde a una ley de 10 g / t “de alta ley de oro” ya liberado. Tomamos una muestra equi-probable de 250 gr.

FIGURA 5

El sesgo. Diagrama de dispersión. En el eje x la ley de la muestra y en el eje y el valor real, a partir del “doré” (barra de oro). Au=Oro y ro=coeficiente de correlación.

En las figuras 7 y 8 tenemos las simulaciones para un lote de 10 ppm de Au y de un lote de cobre de 1% de Cu.

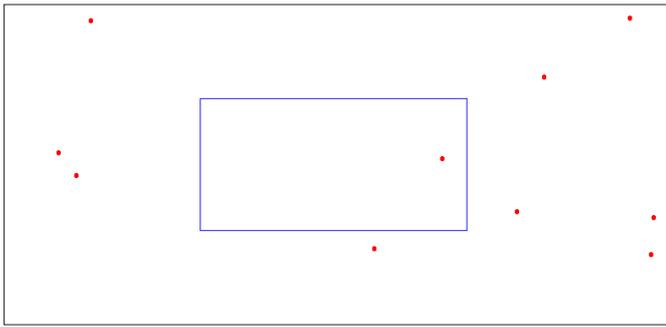


FIGURA 7

Muestreo de un lote con ley de 10 ppm.

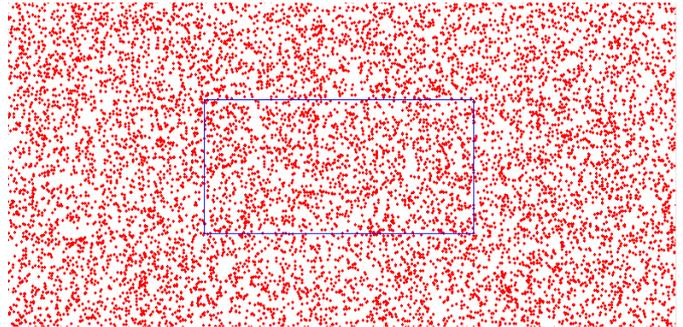


FIGURA 8

Muestreo de un lote de ley 1%.

Las conclusiones de las simulaciones en este caso son obvias. La más importante es que es muy difícil muestrear minerales de baja ley (oro, plata, arsénico, etc.)

Ejemplo 7: Reconciliación de leyes Mina-Planta.

La Figura 9 muestra las leyes diarias a la entrada de la planta en una mina de cobre.

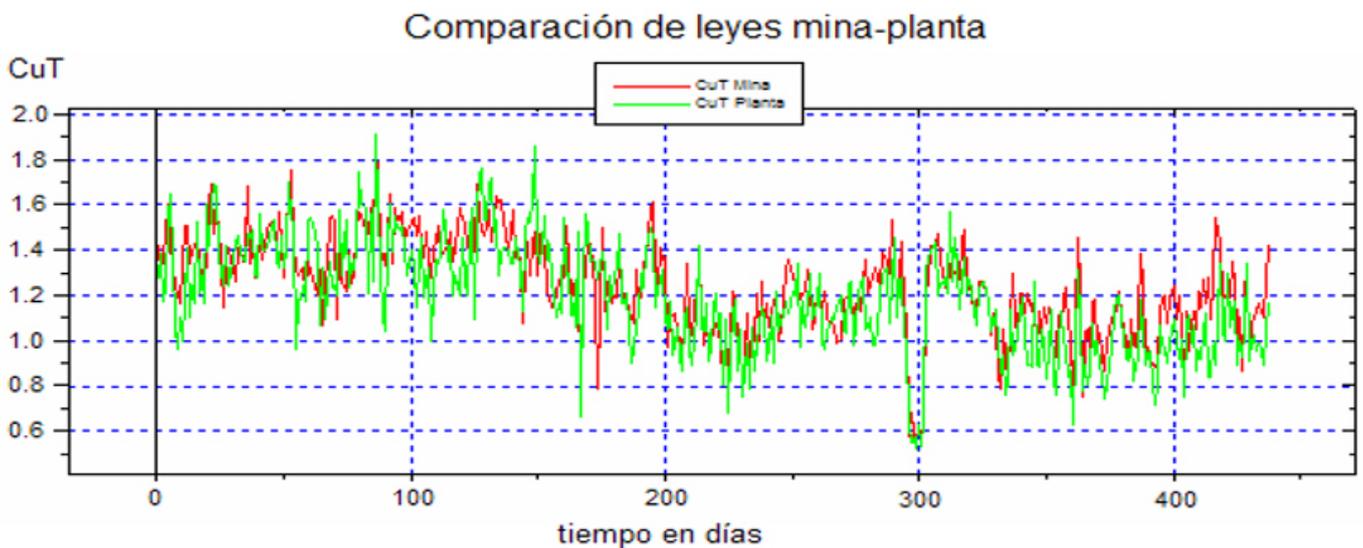


FIGURA 9

Leyes diarias en la reconciliación de leyes mina-planta.

Hay problemas en esta mina. Para estudiarlos, hemos calculado los variogramas del cobre de la mina y de la planta. Ambos variogramas se presentan en la figura 10.

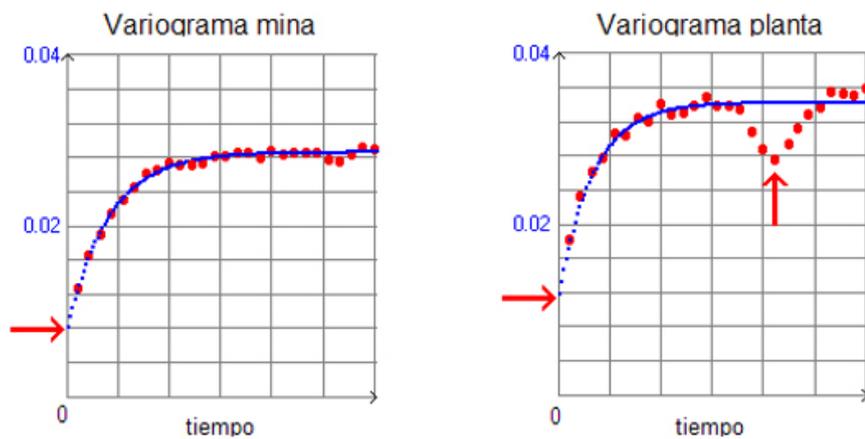


FIGURA 10

Variogramas de la mina y de la planta. Observar el efecto de pepita y el efecto de hoyo en el variograma de la planta.

El variograma de la planta es más errático que el de la mina y además tiene "efecto de hoyo". En muchos casos el efecto de hoyo se debe a periodicidades de las leyes en el tiempo. Las simulaciones (Figuras 11) muestran cuál podría ser el problema.

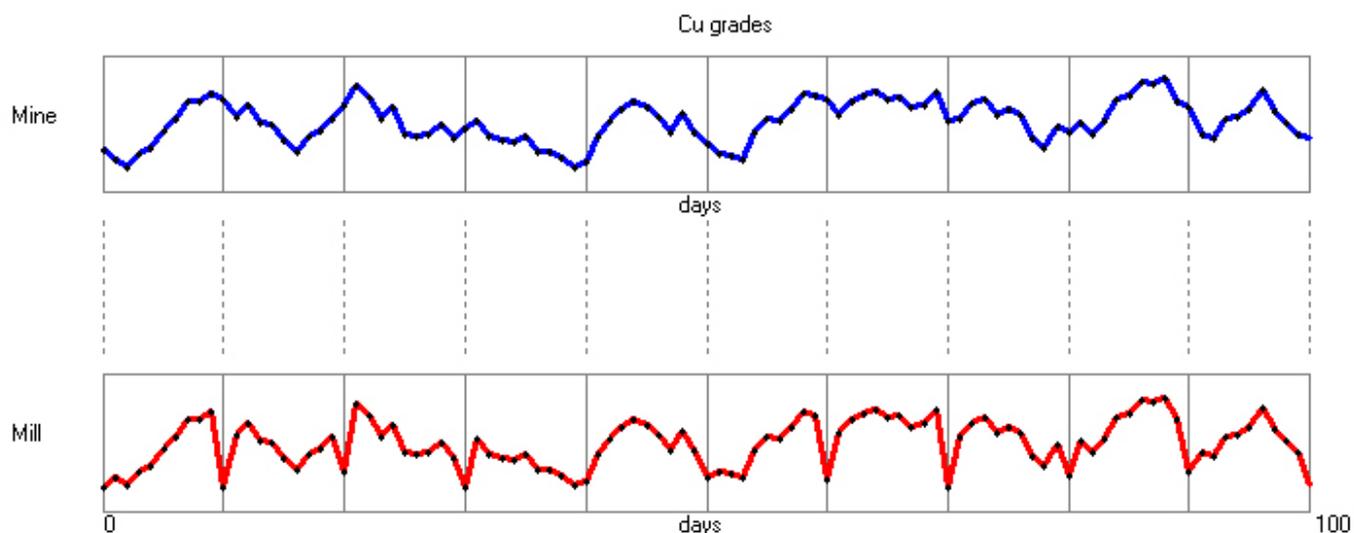


FIGURA 11

Balance metalúrgico. Cada 10 días las leyes de la planta "se bajan" arbitrariamente. El variograma presenta un efecto de hoyo y efecto de pepita.

En esta simulación, el balance metalúrgico realizado cada 10 días hace bajar, las leyes de la planta con las mismas consecuencias que observamos en los variogramas reales.

CONCLUSIONES

Con la ayuda de las simulaciones, se puede asistir al minero para cuantificar la importancia económica de un muestreo correcto. Podemos concluir entonces que:

- En nuestras minas, plantas y laboratorios estamos plagados de especímenes.
- El costo adicional de un muestreo correcto es siempre insignificante y se amortiza rápidamente.

BIBLIOGRAFÍA

- M. Alfaro. *Estadística*. Depto. Matemáticas. Universidad de Chile, Santiago, Chile 1988.
- M. Alfaro. *Introducción al Muestreo Minero*. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. Santiago, Chile, 2003.
- M. Alfaro. *Introdução a Mostragem na Mineração*. Yamana Gold 2011.
- M. Alfaro. *Introduction to Mine Sampling*. Yamana Gold 2012.
- M. Alfaro. *Blast Hole Sampling in Andina and Los Bronces*. WCSB8, Burdeos Francia, 2016.
- D. F. Bongarçon. *Muestreo de Minerales y Comparación de Leyes Mina-Planta*. Tecniterrae, Santiago, Chile, 1966.
- P. Gy. *Sampling of Particulate Materials*. Elsevier, Amsterdam, Holland, 1982.
- P. Gy and D. F. Bongarçon, *Seminario de Muestreo de Minerales*. Tecniterrae, Santiago, Chile, 1999.
- P. Gy and D. F. Bongarçon, *El error más común en la aplicación de la teoría del muestreo de minerales de P. Gy*. Magazine "Minerales". Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2000.
- P. Gy. *Sampling for Analytical Purposes*. Wiley, New York, 2000.
- W. Cochran *Sampling Techniques*, J. Wiley, New York, 1977.