



MODELO PREDICTIVO DE FRAGMENTACIÓN Y SU APLICACIÓN EN UNA MATRIZ DE DECISIÓN

Abel Eduardo Anchorena López¹

MINERA BARRICK MISQUICHILCA

Resumen

El objetivo del Modelo Predictivo de Fragmentación realizado para Mina Lagunas Norte es simular la pila de material volado, para lo cual se emplea una base experimental obtenida del análisis de voladuras realizadas en el tajo. Las predicciones en fragmentación de material serán relacionadas con sus costos estimados con el fin de obtener múltiples alternativas de diseño.

Este trabajo muestra una adaptación concreta de la ecuación de **V.M. Kuznetsov (1973)**, dicha ecuación es reparametrizada mediante ajuste no lineal, las “Ecuaciones Tipo Kuznetsov” obtenidas de tamaños de fragmentos X_{50} y X_{80} , son incorporadas como parámetros en la Función Weibull Rosin Rammier Ordinaria, la cual es utilizada como función descriptora de la pila de material volado.

ESTIMACIÓN DE LA MEDIDA DE FRAGMENTACIÓN

En Mina Lagunas Norte, la estimación de la medida de fragmentación se realiza mediante el Sistema Split, el cual se basa en el análisis digital de imágenes. El Sistema Split cuenta con una cámara instalada en chancadora primaria, la cual toma fotografías en el momento de la descarga de los camiones. El corte de finos es de 2.78 pulgadas, valores menores son extrapolación del sistema.

El Sistema Split proporciona una estimación de la medida de la fragmentación, en nuestro caso es considerada como la base de datos experimental del modelo.

La confiabilidad en las estimaciones dadas por el Sistema Split dependerán de su correcto funcionamiento, para lo cual se debe tener en cuenta ciertas recomendaciones: calibraciones periódicas del sistema, monitoreo constante de su funcionamiento, buena iluminación en la descarga de los camiones, posicionamiento correcto de la cámara (si el sostenimiento es con brazo hidráulico se debe dar mantenimiento continuo), calidad de la fotografía, entre otras.

VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA “ECUACIÓN TIPO KUZNETSOV”

Las variables que utiliza el modelo son:

- Factor de Roca (A)
- Consumo Específico(q), en Kg/ m³
- Carga Media del taladro (Q), en Kg
- Energía Media (E) , en KJ/Kg, donde: $E = \frac{1}{\sum_{i=1}^{nh} m_i} \sum_{k=1}^{nh} m_i E_i$; m_i es la masa total del taladro, la media es Q. La energía E_i es la energía total del explosivo, se expresa en KJ/Kg, este valor es dado en tablas por el fabricante del explosivo.



FACTOR DE ROCA O CONSTANTE DE ROCA

El Factor de Roca es la variable que cuantifica al macizo rocoso para efectos de una voladura y se obtiene mediante la interpretación de las propiedades: geológicas, físicas y estructurales del macizo. En muchos casos interpretar correctamente el macizo rocoso resulta complicado, dada la poca información disponible y su limitada representatividad en comparación a la extensión de un proyecto, para lo cual es necesario valorar la zona más extensa o si existe la posibilidad de analizar más de un factor de roca para un proyecto.

El Factor de Roca estimado debe ajustarse a las ecuaciones de tamaños de fragmentos, es necesario que las tendencias del Factor de Roca y los tamaños de fragmentos sean las correctas, esto debe ser corroborado antes de incluirla como variable del modelo matemático.

En la elaboración del Modelo Predictivo de Fragmentación para Mina Lagunas Norte, se ha empleado el Factor de Roca propuesto por **Claude Cunningham (1987)**.

La estimación del Factor de Roca se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$A = 0.06 * (RMD + RDI + HF) \quad (1)$$

RMD, describe la masa rocosa, RDI describe el efecto de la densidad de la roca, HF la influencia de la dureza de la roca.

La valorización de cada una de las variables se muestra en la Tabla1.

Tabla1. Índice de volabilidad de Cunningham.

PARÁMETRO	RANKING
Descripción de la Masa Rocosa (RMD)	
Pulverulento/Quebradizo	10
Diaclasado verticalmente	JPS + JPA
Masiva	50
Espaciamiento de Fracturas (JPS)	
0.1 m	10
0.1 a sobre tamaño	20
Sobre tamaño a tamaño de la malla	50
Angulo del Plano entre Fracturas (JPA)	
Buza fuera de la cara	20
Rumbo perpendicular a la cara	30
Buza hacia la cara	40
Influencia de la Densidad (RDI)	$RDI=25*SG - 50$
Factor Dureza (HF)	E/3 para E<50 GPa, UCS/5 para E>50

Las "Ecuaciones Tipo Kuznetsov" están representadas por la siguiente expresión:

$$X_{\alpha} = A * (q)^a * Q^b * (E)^c \quad (2)$$

Donde:

- X_{α} : Tamaño del percentil α
- q : Consumo Específico (kg/m^3)
- Q : Carga Media (Kg)
- E : Energía Media (KJ/kg)
- A : Factor de Roca

El tamaño de fragmento X_{α} experimental, resulta de la curva granulométrica estimada por el Sistema Split, para lo cual se realiza una interpolación en escala log-log, esto es posible dado que las curvas en pequeños intervalos son casi lineales.



La interpolación se obtiene usando la siguiente expresión:

$$\text{Log}(X_\alpha/X_1) = \text{Log}(\alpha/P_1) / (\text{Log}(P_2/P_1) * \text{Log}(X_2/X_1)) \quad (3)$$

Donde las variables X_1 , X_2 son los tamaños que horquillan X_α y P_1 , P_2 son sus porcentajes pasantes.

REGISTROS DE VOLADURAS

Los registros de voladura contienen información necesaria para estimar las ecuaciones X_{50} y X_{80} , los valores se muestran en la Tabla 4. Los tamaños de fragmentos experimentales X_{50} y X_{80} , son obtenidos de la estimación de la curva granulométrica dada por el Sistema Split. El Factor de Roca (A), es obtenido de la valorización del macizo rocoso, utilizando el índice de volabilidad propuesto por **Cunningham (1987)**.

La información de las variables: Consumo Específico (q) y Carga Media (Q) provienen del carguío de los taladros.

Los registros de carguío contienen: los Kilogramos de explosivo utilizados por taladro, el tipo de explosivo y las densidades del explosivo calculadas en el campo, parámetros de diseño (Burden, espaciamiento y altura), medidas de los pozos, alturas de los tacos, además de información referente al contenido de agua en los pozos y si existiera alguna zona de cráter.

La variable Energía Media (E_i), es obtenida mediante tablas proporcionadas por el fabricante del explosivo.

Explosivos

En Mina Lagunas Norte se utiliza ANFO y ANFO PESADO en taladros de producción, contorno y buffer. En taladros de pre corte y

disparos secundarios se utiliza emulsión encartuchada de 1 1/8 x 8 pulgadas, 1 1/2 x 13.4 pulgadas, 2 x 16 pulgadas y 3 pulgadas.

Para la iniciación se utilizan detonadores electrónicos I-kon con booster de 450 gramos y se utiliza exel de 600 ms como back up.

En la Tabla 2 se muestran las propiedades de los explosivos utilizados en el carguío de taladros, los resultados de las pruebas realizadas para determinar las velocidades de detonación se muestran en la Tabla 3

Tabla 2. Densidad y energía total del ANFO y de las mezclas explosivos

Producto	Densidad (gr/cm ³)	Energía Total (Kj/Kg)
ANFO	0.785	3960
HA-28	0.885	3850
HA-37	0.995	3780
HA-46	1.17	2720
HA-45/55	1.26	3655
HA-55	1.26	3640
HA-64	1.32	3479

Tabla 3. Velocidades de detonación obtenidas en Mina Lagunas Norte

Producto	VOD Promedio (m/s)
ANFO	-----
HA-28	4581
HA-37	4901
HA-46	5080
HA-45/55	5132
HA-55	5192
HA-64	-----



Tabla 4. Registro de 41 voladuras realizadas en Mina Lagunas Norte entre los años 2014-2015.

PROYECTOS	X ₅₀	X ₈₀	A	q	Q	E
9-4100-124-03M1	66.67	186.69	5.0	1.162	362.500	3609.640
9-4100-124-04M1	66.26	222.34	5.0	1.035	323.000	3589.118
9-4100-128-02M1	67.94	196.46	3.8	1.132	382.719	3575.909
9-4100-134-02M1	67.48	204.46	3.5	1.170	365.090	3660.000
9-4090-112-02M1	75.51	210.39	4.8	1.243	387.921	3550.616
9-4100-137-01M1	58.75	186.42	4.7	1.189	371.122	3479.436
9-4090-115-02-M1	38.21	136.41	3.5	1.261	393.566	3510.893
9-4090-115-05-M1	55.05	182.06	3.5	1.220	380.769	3479.436
9-4080-132-02M1	69.47	184.50	3.4	0.927	365.909	2720.000
9-4080-133-01M1	60.65	180.31	3.5	1.020	344.821	3539.762
9-4080-133-02M1	66.26	203.99	3.5	1.080	365.161	3504.717
9-4070-120-01M2AL	89.97	235.70	2.9	0.967	353.913	2720.000
10-4060-098-01M1	52.21	182.73	3.6	1.070	361.780	2720.000
10-4060-098-06M1	51.23	163.81	3.6	1.002	338.640	2720.000
10-4060-098-02M1	56.67	185.26	3.6	1.121	379.205	2720.000
11-4070-123-06M1	59.44	192.61	4.4	1.182	399.811	3659.796
11-4070-125-02M1	52.90	173.00	3.6	1.009	341.294	3649.338
11-4070-125-03M1	56.54	189.35	3.6	0.991	335.128	3638.702
9-4070-122-02-M1	60.44	187.15	2.8	0.788	288.250	3850.000
9-4070-122-04M1	65.11	200.78	2.8	0.742	271.579	3850.000
10-4060-099-03-M1	54.35	189.93	3.0	0.875	320.075	3157.939
10-4060-099-05M1	66.34	183.12	3.0	0.979	358.412	2720.000
11-4070-126-02-M1	63.28	227.78	3.2	0.980	331.379	2894.277
10-4060-100-01-M1	125.64	347.77	3.5	0.935	342.059	2757.711
10-4060-100-03-M1	46.10	147.51	3.5	0.908	332.381	3640.000
9-4060-102-01-M1	60.69	170.56	3.3	0.962	351.892	2939.211
9-4060-102-04-M1	40.55	130.92	3.3	0.842	308.045	3389.350
9-4060-106-02-M1	58.22	181.22	3.3	0.845	309.149	3780.000
10-4060-105-02-M1	44.33	145.08	3.6	0.913	308.798	3780.000
9-4060-107-04-M1	61.20	181.19	3.5	1.074	363.261	2776.503
7-4050-089-01-M1	67.94	209.30	3.0	0.530	224.896	3780.000
8-4050-093-02-M1	74.43	216.96	4.0	0.929	314.000	3780.000
8-4050-098-01M1	64.61	182.16	3.1	0.610	206.364	3780.000
8-4050-098-03M1	48.41	168.22	3.1	0.665	224.792	3780.000
8-4040-086-02M1	73.48	204.73	3.4	0.783	309.118	3714.511
8-4040-086-04M1	67.92	203.74	3.4	0.710	280.256	3621.743
8-4040-086-01M1	82.24	216.40	3.4	0.822	324.737	3484.064
8-4050-104-01M1	65.49	203.60	4.1	0.831	327.973	2841.964
8-4050-104-04M1A	84.98	221.35	4.1	0.946	373.491	3141.632
8-4030-098-01M1A	78.86	224.18	4.1	1.121	349.792	3567.944
8-4030-098-03M1A	75.77	196.18	4.1	1.106	345.062	3617.169

Los datos mostrados en la Tabla 4, son sometidos a ajustes no lineales ("Ecuaciones Tipo Kuznetsov"), utilizando algoritmos de *Levenberg-Marquardt*, de mínimos cuadrados.

En la Tabla5, se muestran las ecuaciones de estimación para X₅₀ y X₈₀, la ecuación propuesta para X_α es:

$$X_{\alpha} = A * (q)^a * Q^b * (E)^{(a+b)}$$

(4)

Tabla 5. Ecuaciones Tipo Kuznetsov para tamaños X₅₀ y X₈₀ y sus respectivos intervalos de confianza

X _α (mm)	Ecuación Tipo Kuznetsov	I.C.
X ₅₀	A*(q) ^{-1.2172*} (Q) ^{0.9123*} (E) ^{-0.3049}	a:[-1.7637,-0.6708] b:[0.5960,12286]
X ₈₀	A*(q) ^{-1.1690*} (Q) ^{0.9633*} (E) ^{-0.2057}	a:[-1.6256,-0.7125] b:[0.6989, 1.2278]

FUNCIÓN DESCRIPTORA DE LA PILA DE MATERIAL VOLADO

El modelo de predicción de fragmentación propuesto para Mina Lagunas Norte, utiliza la Función Weibull Rosin Rammler Ordinaria como función descriptora de la pila de material volado.

Estudios recientes **Sanchidrián (2013)**, muestran las bondades en los ajustes de las funciones truncadas, *Sanchidrián* analizó numerosas funciones descriptoras de la pila de material volado, ajustadas a curvas de material fragmentado (1234 curvas de fragmentación), las mediciones provienen de pilas de material el cual fue pesado y cribado. Entre las conclusiones que obtuvo menciona: *en muchos casos, las funciones truncadas de tres parámetros resultan ser mejores que las funciones bi-componentes (de mayor complejidad y con más parámetros) y mejores que las funciones de dos parámetros como la Weibull Rosin Rammler Ordinaria, algunos ejemplos de estas funciones truncadas son: la Función Swebrec y la Función Weibull Rosin Rammler Truncada.*

Las Funciones de tres parámetros dan buenos ajustes hasta pasantes de 10% y en la zona final de la curva. La función Weibull Rosin Rammler Ordinaria, función de dos parámetros (X₅₀ y n) presenta problemas de ajustes (ver Figura 1), sin embargo debido a la imposibilidad de estimar el parámetro X_{max}, necesario para reproducir las Funciones Truncadas (un problema es que

X_{max} no responde al modelo de Ecuaciones Tipo Kuznetsov.), se ha utilizado la función Weibull Rosin Rammler Ordinaria para modelar la pila de material volado en la Mina Lagunas Norte, esta función tiene buenos ajustes en la zona central de la curva, donde se encuentran pasantes del 20% al 80%, el problema de usar esta función surge si se desea extender la distribución debajo de 20% del pasante. Además la función presenta dificultad en el ajuste de la zona final de la distribución, esto es por el carácter asintótico de la función.

El Sistema Split presenta el mismo problema al estimar la parte final de la curva granulométrica (cola de la distribución -zona gruesa), que al estimar la zona baja (zona fina-debajo del “fines cut off”), la cual se obtiene también por una extrapolación del sistema. En la zona gruesa la dificultad está en los pocos ejemplares que tiene el Sistema Split para estimar los valores.

En el Gráfico 1 se aprecia el buen comportamiento de las funciones de tres parámetros truncadas en comparación a la Función Weibull Rosin Rammler Ordinaria.

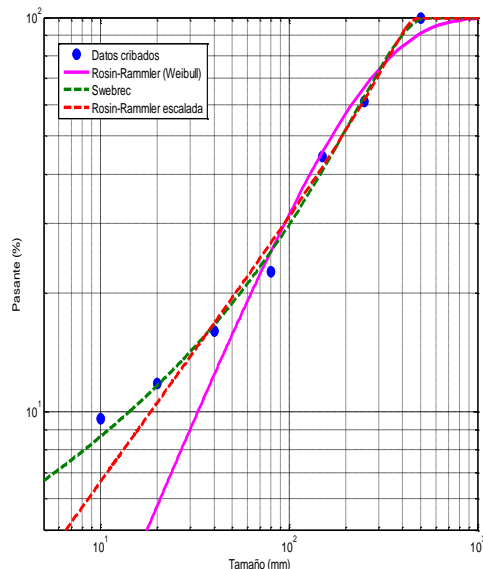
La ecuación que describe la Función Weibull Rosin Rammler ordinaria es:

$$FWRR = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n} \quad (5)$$

Dónde: X es tamaño de la abertura del tamiz, X_c es el tamaño característico del material fragmentado (tamaño para el que la fracción pasante es $1 - 1/e = 0.632$), n es el parámetro de forma que es la pendiente de la curva log-log.

MODELO PREDICTIVO DE FRAGMENTACIÓN MINA LAGUNAS NORTE

Gráfico 1: Comparativo de los ajustes de las Funciones: Swebrec, Weibull Rosin Rammler Ordinaria, Weibull Rosin Rammler escalada con la distribución de datos cribados



Fuente: Gráfica proporcionada por Dr. José Sanchidrián Blanco

El Modelo Kuz-Ram, propuesto por **Claude Cunningham (1983)**, estima los siguientes parámetros: Tamaño Medio de Fragmento (X_{50}), calculado mediante la ecuación de V.M. Kuznetsov (1973), este modelo utiliza la Función Weibull Rosin Rammler Ordinaria como función descriptora de la pila de material volado. El gran aporte de **Cunningham**, es la estimación de la exponente n de la función, el cual lo denomina como: Índice de Uniformidad, dicha estimación se basa en relaciones geométricas de los diseños de la voladura.

El modelo realizado para la Mina Lagunas Norte, propone algo diferente. Estimar tamaños de fragmentos, reparametrizando la ecuación de Kuznetsov e incorporar estos parámetros en la Función Weibull Rosin Rammler Ordinaria, además de una nueva estimación para el Parámetro de Forma n (índice de uniformidad en el modelo Kuz-Ram).



Cálculo Propuesto del Parámetro de Forma (ni)

Asumir un valor para la exponente en la función Weibull Rosin Rammler Ordinaria es asumir una distribución de la pila de material volado.

Si hacemos una similitud con una recta, el tamaño medio da un punto y la pendiente de la recta nos da la función lineal, de forma similar ocurre en una función no lineal, asumir un valor del exponente es asumir una distribución para una función determinada.

En este contexto surge la interrogante: **¿El exponente de la función descriptora de fragmentación debe tener solo una interpretación geométrica?**

El Modelo Predictivo de Fragmentación elaborado para la Mina Lagunas Norte, propone un nuevo método de calcular este exponente, con una base física proveniente de los datos experimentales tomados en la Mina.

La Función Weibull Rosin Rammler Ordinaria que incorpora el parámetro X_{50} está dada por la ecuación:

$$R = e^{-\ln(2)\left(\frac{X}{X_{50}}\right)^n} \quad (6)$$

De la expresión anterior, se obtiene el parámetro de forma n en función de los tamaños X_{50} y X_{80}

$$ni = \frac{\ln\left(\frac{\ln(5)}{\ln(2)}\right)}{\ln\left(\frac{X_{80}}{X_{50}}\right)} \quad (7)$$

Ecuación del Modelo

$$P(x) = 1 - e^{-\ln(2)\left(\frac{X}{X_{50}}\right)^{\frac{\ln\left(\frac{\ln(5)}{\ln(2)}\right)}{\ln\left(\frac{X_{80}}{X_{50}}\right)}} \quad (8)$$

Las fórmulas para estimar tamaños de fragmento X_{50} y X_{80} son:

$$X_{50} = A * (q)^{-1.2172} * Q^{0.9123} * (E)^{-0.3049} \quad (9)$$

$$X_{80} = A * (q)^{-1.1692} * Q^{0.9635} * (E)^{-0.2057} \quad (10)$$

MATRIZ DE COSTOS

La elaboración de la matriz de costos consiste en estimar los costos totales de perforación y voladura asociado a los posibles diseños a realizar. La Matriz de Costos debe incluir las siguientes estimaciones:

1. Costo de Perforación (CP)

Es el costo relacionado a la perforación de un proyecto, depende principalmente de: costo de la broca, los costos de los aceros (estimando sus respectivos rendimientos), el costo del diésel que consume el equipo y el ratio de penetración, además se pueden incluir costos que se consideren relevantes en la perforación. Los costos mencionados anteriormente se relacionan con los parámetros geométricos del proyecto: malla de perforación (burden, espaciamiento), altura de banco, sobre perforación, y diámetro del taladro, con estas variables se obtiene un Costo de Perforación (CP) en \$/TM, esto se realiza para cada diseño.

La precisión en la estimación del Costo de Perforación (CP) dependerá de los datos. Si la estimación de costos se realiza para una mina con un tiempo considerable de



operación, esta contará con mayor cantidad de datos históricos, lo cual es favorable para los cálculos, mientras que una mina que recién inicia su operación tendrá pocos o ningún dato, en ambos casos es importante pronosticar el costo futuro, si no se cuenta con datos históricos es posible recopilar información que nos pueda servir como punto de partida. La Tabla 6, muestra el precio de los aceros y sus respectivos rendimientos por diámetro de perforación, en la Tabla 7 se muestra información de los ratios de penetración (ROP) y el consumo de diésel para cada diámetro.

Tabla6. Precios y rendimientos

	Precios (USD)		Rendimientos (m)	
	9 7/8" Ø	7 7/8" Ø	9 7/8" Ø	7 7/8" Ø
Broca	3300	2048	492.52	410.24
Deck Bushing	3045	3005	21000	18000
Bit Sub	2812	2690	8400	6400
Barra	8287	5696	14648	19000
Shock Absorber	26700	26700	51000	36000

Tabla7. Ratio de penetración, consumo y precio de diésel

Diámetro	ROP (m/h)	Gal/hora	USD/Gal
9 7/8"	21.68	30	3.83
7 7/8"	19.58	21	3.83

En la Tabla 8 se muestra los costos estimados de perforación para diámetros de 9 7/8" y 7 7/8".

Tabla 8. Costos de Perforación (CPm) en USD/m

	Costos (\$/m)	
	9 7/8" Ø	7 7/8" Ø
Broca	6.70	4.99
Deck Bushing	0.15	0.17
Bit Sub	0.33	0.42
Barra	0.57	0.30
Shock Absorber	0.52	0.74
Diésel	5.30	4.11
Costo de perforación (\$/m)	13.57	10.73

El Costo de Perforación (CP) se estima partiendo del costo de un taladro, el cual aporta un valor en toneladas de material roto, estas toneladas dependen de los parámetros de la malla de perforación, la altura del banco, la sobre perforación y la densidad de la roca. El Costo de Perforación CP se estima con la siguiente expresión:

$$CP = \frac{CPm \left(\frac{\$}{m} \right) * (H(m) + SD(m))}{B(m) * Es(m) * H(m) * De \left(\frac{TM}{m^3} \right)} \quad (11)$$

H: Altura del banco, SD: Sobre perforación, B: Burden, Es: Espaciamento, De: Densidad de la roca.

2. Costos de Voladura (CV)

Son los costos relacionados al uso del explosivo y accesorios en un proyecto de voladura. Dependerá del costo de la mezcla a utilizar, diámetro del pozo, altura de carga, costo del primado, densidad del explosivo y del aporte en tonelaje del pozo a ser volado.

2.1. Costo del Sistema de Iniciación (CPr)

Dependerá del tipo de primado que se utilice. En el caso de la Mina Lagunas Norte se utiliza para el primado de un taladro: booster (1 unidad), detonador electrónico (1 unidad) y detonador pirotécnico (1 unidad).

$$CPr = \text{Booster } (\$) + \text{Det. Elect. } (\$) + \text{Det. Piro. } (\$) \quad (12)$$

En la Tabla 9 se muestran los precios de los detonadores electrónicos y pirotécnicos, así como el precio del iniciador.



El costo del primado en la Mina Lagunas Norte es de 33.49 USD.

Tabla 9. Costo de Primado del taladro

Accesorio	Unidad	Costo (USD)
Booster (450 g)	1	4.61
I-Kon	1	25.32
Exel (600 ms)	1	3.56
Costo del Primado	1	33.49

2.2. Costo de la Mezcla Explosiva (CM)

Se determina en base a los precios de los insumos necesarios para elaborar las diferentes mezclas explosivas a utilizar en la voladura.

Dadas las siguientes variables: CN: Costo del Nitrato (\$/Kg), CE: Costo de la Emulsión Matriz (\$/kg), CD: Costo del Diésel (\$/kg) y si "n" es el porcentaje de Emulsión Matriz de una mezcla, el costo estaría dado por:

$$\begin{aligned}
 CM &= n\% * C. E. \left(\frac{\$}{Kg} \right) \\
 &+ 94\% * (100 - n)\% * C. N. \left(\frac{\$}{kg} \right) \\
 &+ 6\% * (100 - n)\% * C. D. \left(\frac{\$}{Kg} \right)
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

En la Tabla 10 se muestran los costos obtenidos de las diferentes mezclas explosivas

Tabla 10. Costos de las Mezclas

Mezcla	\$/Kg
ANFO	0.744
HA-28	0.756
HA-37	0.761
HA-46	0.767
HA-45/55	0.77
HA-55	0.773
HA-64	0.778
HA-73	0.784

De las densidades de las diferentes mezclas explosivas y conociendo el

diámetro del taladro, se estiman los Kilos de mezcla explosiva por metro lineal (DCL):

$$DCL \left(\frac{Kg}{m} \right) = 0.507 * Dm \left(\frac{gr}{cm^3} \right) * (D \text{ (Pulg.)})^2
 \tag{14}$$

Dm: Densidad del explosivo, D: diámetro del taladro en pulgadas.

El costo de voladura (CV) incluye el costo de cargar y primar un taladro considerando su aporte en tonelaje. La fórmula está representada mediante la siguiente expresión:

$$CV = \frac{C(m) * DCL \left(\frac{Kg}{m} \right) * CM \left(\frac{\$}{Kg} \right) + CPr(\$)}{B(m) * Es(m) * H(m) * De \left(\frac{TM}{m^3} \right)}
 \tag{15}$$

C: Altura de Carga, DCL: Kilos de Explosivo por Metro Lineal, CM: Costo de la Mezcla Explosiva, CPr: Costo del Primado, B: Burden, Es: Espaciamiento, H: Altura de Banco, De: Densidad de la Roca.

3. Costo Total de Perforación y Voladura (CP&V):

Es la sumatoria de los costos de perforación (CP) y de voladura (CV), los cuales son estimados para un proyecto en particular.

$$CP\&V = CP + CV
 \tag{16}$$

MATRIZ DE DECISIÓN

La Matriz de Decisión se elabora de las estimaciones que resultan al utilizar el Modelo Predictivo de Fragmentación para Mina Lagunas Norte y su relación con la Matriz de Costos (CP&V). La Matriz de decisión muestra las diferentes alternativas que existen en el diseño de una voladura donde se incorpora la variable costo.

Esta matriz nos permite tomar la decisión del mejor diseño de voladura que se puede realizar en la mina, teniendo en cuenta las restricciones de la operación, como son: diámetros de taladros, tipos de explosivos, pozos con agua, disparos cerca de estructuras, cuidados de taludes, etc... El objetivo de utilizar esta Matriz, consiste en seleccionar el diseño que más se adecua a nuestra necesidad, tomando como criterio inicial el costo en USD/TM de obtener un X_{80} .

CASO PRÁCTICO: Proyecto 4050-125

A continuación se presenta un proyecto disparado del 8 de enero del 2015. La época de lluvias origina humedad en los taladro y en algunos casos se tienen taladros con agua, no existe restricciones por cuidado de pared final ni estructuras cercanas, la perforación debe ser con diámetro de 9 7/8" debido a la baja disponibilidad de perforadoras en ese momento. Planta requiere un P (80) entre 6.5" y 7.5" con lo cual su rendimiento en TM/hora es el óptimo y no presenta desgaste prematuro de componentes.

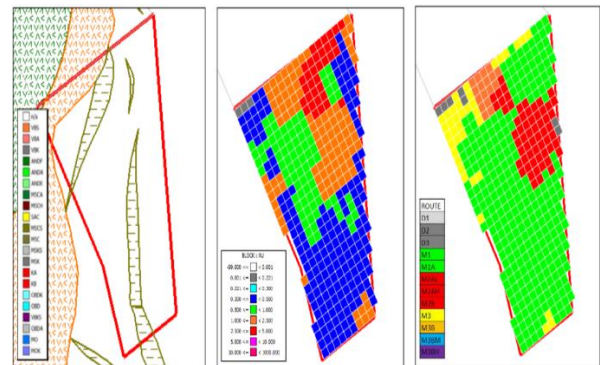
El diseño seleccionado se realizó aplicando la Matriz de Decisión y restricciones del disparo.

Litología Predictiva del Proyecto 4050-125

El proyecto en su mayoría es roca arenisca con intercalaciones de limos carbonosos y

en menor proporción material volcánico. La litología predictiva del proyecto se muestra en el Plano1, el cuadro de la izquierda muestra el tipo de roca. El área de color blanco es la roca arenisca, el área de color naranja es el material volcánico y las intercalaciones de color gris son los limos carbonosos. El cuadro central y el cuadro de la derecha, muestran las leyes de oro y tipo de mineral respectivamente.

Plano1. Litología predictiva del proyecto 4050-125



Parámetros Geo mecánicos

Las propiedades de la roca: resistencia compresiva, módulo de Young y densidad de la roca se dan a continuación:

- Densidad de la Roca: 2.45 TM/m³
- Resistencia compresiva: 149 MPa
- Módulo de Young: 11.9 GPa

La valorización del proyecto según el ranking del factor de roca es:

- Descripción del macizo rocoso (RMR): JPS + JPA
- Espaciamiento de Fracturas (JPS): Fracturas espaciadas entre 0.3 m a 0.5 m
- Orientación de del Plano entre fracturas (JPA): orientación 75 grados buza afuera de la cara

Cálculo del Factor de Roca A:

Los valores obtenidos del ranking son: RMR = 45, JPS = 20, JPA = 25, HI = 4, SGI = 11.25. El Factor de Roca (A) estimado es 3.6.

Aplicación de la Matriz de Decisión en el proyecto 4050-125

VARIABLES DE DISEÑO:

- Diámetro del taladro : 251 mm
- Altura del taco : 5 m
- Altura del banco : 10 m
- Sobre perforación : 1 m
- Factor de Roca (A) : 3.6

La Matriz de Decisión evalúa las predicciones P (80) y su costo de perforación y voladura respectivo, se han considerado las siguientes mallas: 4.98 x 5.75, 5.2 x 6, 5.41 x 6.25, 5.63 x 6.5, 5.85 x 6.75, 6.06 x 7 y las evalúa para cada mezcla explosiva (descritas anteriormente en la Tabla 2).

Los resultados obtenidos en la Matriz de Decisión se muestran en el Gráfico 2. En Gráfico 3 se observa los tamaños X_{80} y sus costos, estos diseños cumplen con la condición de fragmentación requerida por planta.

Gráfico 2. Tamaños X_{80} simulados por el Modelo Predictivo vs Costos de perforación y voladura.

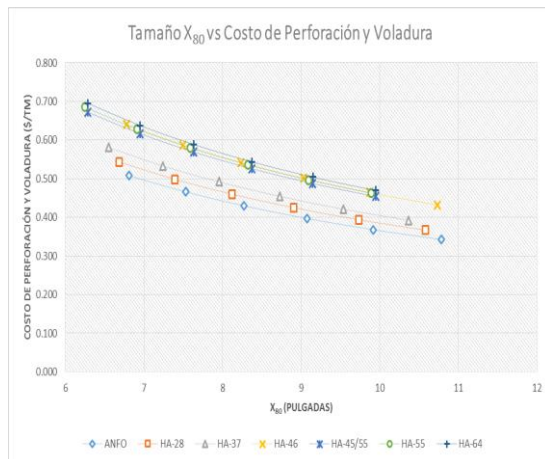
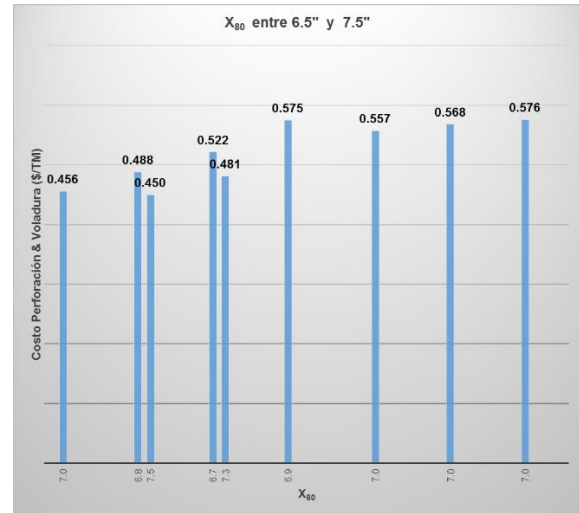


Gráfico 3. Diseños que cumplen con el requerimiento de planta



La Tabla 11 muestra los diseños seleccionados en color gris, de este grupo se debe optar por los de menor costo y decidir el mejor diseño de voladura.

Tabla 11. Diseños propuestos

Explosivo	ANFO	HA 28	HA 37	HA 46	HA 45/55	HA 55	HA 64
4.98 x 5.75	6.3	6.2	6.0	6.3	5.8	5.8	5.8
5.2 x 6	7.0	6.8	6.7	6.9	6.4	6.4	6.4
5.41 x 6.25	7.6	7.5	7.3	7.6	7.0	7.0	7.0
5.63 x 6.5	8.4	8.2	8.1	8.3	7.7	7.7	7.7
5.85 x 6.75	9.2	9.0	8.8	9.1	8.4	8.4	8.5
6.06 x 7	10.0	9.8	9.6	9.9	9.2	9.1	9.2

En el caso del proyecto 4050-125 se decidió por el diseño de malla de 5.2 x 6 y una mezcla explosiva de HA-37, el costo esperado es de 0.522 \$/TM, con un P (80) simulado de 6.7”.

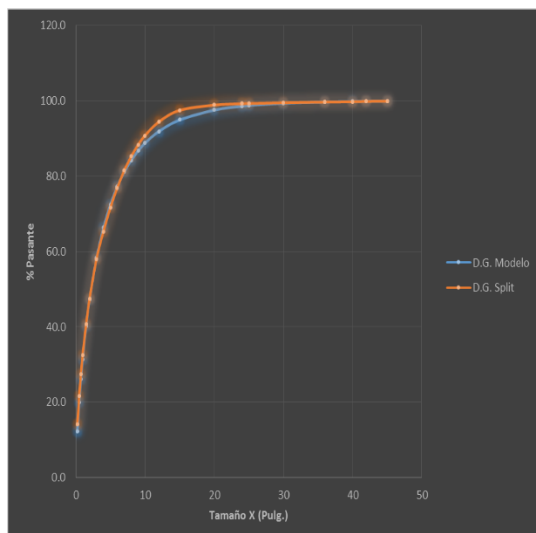
En este caso se decidió por un diseño que cumple los requerimientos de fragmentación y el costo es bajo, sin embargo no es el diseño de menor costo de la Matriz, existen opciones de cargar con ANFO o HA-28 que darían un mayor ahorro, también existe la posibilidad de ampliar la malla de perforación, pero la decisión del diseño contempla la probabilidad de tener taladros húmedos, por tal motivo se prefirió una mezcla con mayor contenido de emulsión la cual tiene mejor comportamiento con el agua, en lo referente a fragmentación se prefirió un valor más cercano a 7".

En el Grafico 4 se presenta la curva granulométrica simulada por el Modelo Predictivo de Fragmentación vs la curva estimada por el Sistema Split. En la Tabla 12 se ha incluido: los puntos de las curvas (tamaño, % pasante), la suma total de cuadrados y suma de cuadrados del error, necesarios para estimar el coeficiente de determinación R^2 .

Tabla 12. Resultados de la simulación

Pulg.	mm	% Pasante Modelo	% Pasante Split	SCR	SCT
0.25	6.35	12.3	14.13	3.287693664	3650.97921
0.5	12.7	20.0	21.66	2.819287987	2797.70471
0.75	19.05	26.2	27.53	1.810010849	2211.19388
1	25.4	31.5	32.48	1.003559182	1770.16538
1.5	38.1	40.2	40.68	0.191578352	1147.40271
2	50.8	47.3	47.44	0.012723714	735.132844
3	76.2	58.2	58.01	0.051487186	273.681878
4	101.6	66.3	65.31	0.947134448	85.4392111
5	127	72.4	71.59	0.716958488	8.78134444
6	152.4	77.3	76.91	0.118050535	5.55387778
7	177.8	81.1	81.48	0.154287245	47.9787111
8	203.2	84.2	85.17	0.985973287	112.713611
9	228.6	86.7	88.29	2.552048078	188.696011
10	254	88.8	90.77	4.051167918	262.980278
12	304.8	91.9	94.4	6.336353527	393.890178
15	381	94.9	97.46	6.535036998	524.715378
20	508	97.5	98.85	1.708197363	590.328011
24	609.6	98.6	99.21	0.389556826	607.951211
25	635	98.8	99.26	0.246122667	610.419378
30	762	99.4	99.5	0.020225186	622.336178
36	914.4	99.7	99.67	0.000748836	630.846944
40	1016	99.8	99.75	0.004051418	634.872011
42	1066.8	99.9	99.84	0.000172426	639.415511
45	1143	99.9	99.89	4.52174E-05	641.946678

Gráfico 4. Sistema Split vs Modelo Predictivo



El coeficiente de determinación R^2 es 99.8%, lo que indica que el ajuste del modelo es muy bueno. El P (80) simulado es de 6.7" y un el P (80) estimado por Split de 6.6".

CONCLUSIONES

- Las ecuaciones propuestas para estimar los tamaños de fragmento X_{50} y X_{80} presentan intervalos de confianza aceptables al 95%, las tendencias de los tamaños de fragmento y las variables independientes son livianas con fuerte dispersión de datos (R^2 bajos), sin embargo las pendientes de las regresiones son las correctas.
- Existe "multicolinealidad" entre las variables independientes q y Q de las ecuaciones, esta relación debería disminuir con la incorporación de más voladuras con diámetros diferentes.



- Funciones descriptoras de tres parámetros como: Swebrec o Weibull Rosin Rammler Truncada, dan mejores ajustes a las distribuciones de una pila de material volado, tanto en pasantes de hasta 10% como en las colas superiores de las distribuciones, sin embargo la función Weibull Rosin Rammler Ordinaria da buenos ajustes en la “zona central” de la pila de material volado ($20\% < p < 80\%$), por lo tanto el modelo propuesto, presenta buenos ajustes a la pila de material volado estimado por Split (limitaciones: zona de finos, debajo del fines cut off y zona gruesa mayor a 80% en pasante).
- El Modelo de Predicción de Fragmentación para la Mina Lagunas Norte es propio para el yacimiento, considera las características del macizo rocoso del tajo y su interacción con las propiedades de los explosivos utilizados. La propuesta de la estimación del Parámetro Forma (exponente de la función) está basada en un sustento físico como lo son las estimaciones de los tamaños de fragmentos y no en variables geométricas como proponen modelos como: Kuz Ram o JKMRC.
- Modelar la pila de material volado e incorporarlo en una Matriz de Decisión trae grandes beneficios como es obtener una fragmentación requerida por la operación al mejor costo, utilizando de manera eficiente los recursos.

REFERENCIAS

Cunningham CVB. 1983. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. Proc. 1st Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Luleå, Sweden, pp 439-453.

Cunningham CVB. 1987. Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – four years on. Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, CO, pp 475-487.

Kanchibotla SS, Valery W, Morrell S. 1999. Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding. Proc. Explo'99—A Conference on Rock Breaking. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Kalgoorlie, Australia. pp. 137–144.

Kuznetsov VM. 1973. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. Soviet Mining Sci. 9: 144–148.

Lilly P. 1986. An empirical method of assessing rock mass blastability, Proc. Large Open Pit Mine Conference, Australia, October 1986, pp 89-92.

Ouchterlony, F. 2005. The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing. Mining Techn. (Trans. of the Inst. of Mining & Met. A) 114: A29–A44.

Ouchterlony, F. 2015. Personal communication.

Sanchidrián J A. 2013. ¿Qué función representa mejor la distribución granulométrica de la roca fragmentada? Sipervor XII, Lima, Perú, 21-23 noviembre de 2013. Universidad Nacional de Ingeniería.

Sanchidrián, J A, Segarra, P, Ouchterlony, F and López, LM. On the accuracy of fragment size measurement by image analysis in combination with some distribution functions. Rock Mech Rock Eng 42: 95-116

Sanchidrián, J A., Segarra, P and López, L M. 2006. A Practical Procedure for the Measurement of Fragmentation by Blasting by Image Analysis. Rock Mech Rock Eng, 39(4): 359-382.

Sanchidrián, J A. 2014-2015. Personal communication.



ENCUENTRO
TECNOLOGIA
E INVESTIGACION

Modelo Predictivo de Fragmentación y su Aplicación en una Matriz de Decisión

Abel Eduardo Anchorena López

Minera Barrick Misquichilca

ENCUENTRO
TECNOLOGIA
E INVESTIGACION

INDICE

- 1. Objetivos**
- 2. Resumen**
- 3. Fundamento Teórico del Modelo**
 - 3.1. Ecuación Kuznetsov (1973)
 - 3.2. Ecuación Tipo Kuznetsov
 - 3.3. Variables de la Ecuación Tipo Kuznetsov
 - 3.4. Medición de la Fragmentación
 - 3.5. Funciones Descriptoras de la Fragmentación
 - 3.6. ¿Por qué Utilizar la Función WRRO en el Modelo?
 - 3.7. Parámetro de Forma “n” Cunningham
 - 3.8. Parámetro de Forma “ni” Modelo
- 4. Modelo Predictivo de Fragmentación: Mina Lagunas Norte**
 - 4.1. Perforación y Explosivos
 - 4.2. Data Experimental
 - 4.3. Ecuación del Modelo Predictivo de Fragmentación
- 5. Costos Estimados**
 - 5.1. Costo de Perforación
 - 5.2. Costo de Voladura
- 6. Matriz de Decisión**
- 7. Casos de Estudio**
- 8. Conclusiones**
- 9. Recomendación**

1.-Objetivo

Simular la pila de material volado mediante un **modelo confiable** propio del yacimiento, en el cual se relacionen las propiedades de la roca y el explosivo con los parámetros de las funciones descriptoras de fragmentación, optando por el **menor costo y cumpliendo con los requerimientos del cliente.**

2.- Resumen

- El Modelo Predictivo de Fragmentación emplea **datos experimentales**, obtenidos de voladuras realizadas en mina, los cuales son sometidos a ajustes no lineales.
- El Modelo utiliza la función **Weibull Rosin Rammler Ordinaria** como función descriptora de la pila de material volado.
- Los parámetros de la función son estimados mediante una adaptación concreta de la **Ecuación Kuznetsov (1973)**, la cual es **reparametrizada**.
- El estudio propone una **estimación del exponente n** de la Función Rosin Rammler, empleando un criterio Físico.
- Las predicciones de fragmentación son asociadas a costos de perforación y voladura necesarios para su realización, lo cual proporciona múltiples alternativas de diseño, evaluadas en una **Matriz de Decisión**.

PREPARACIÓN

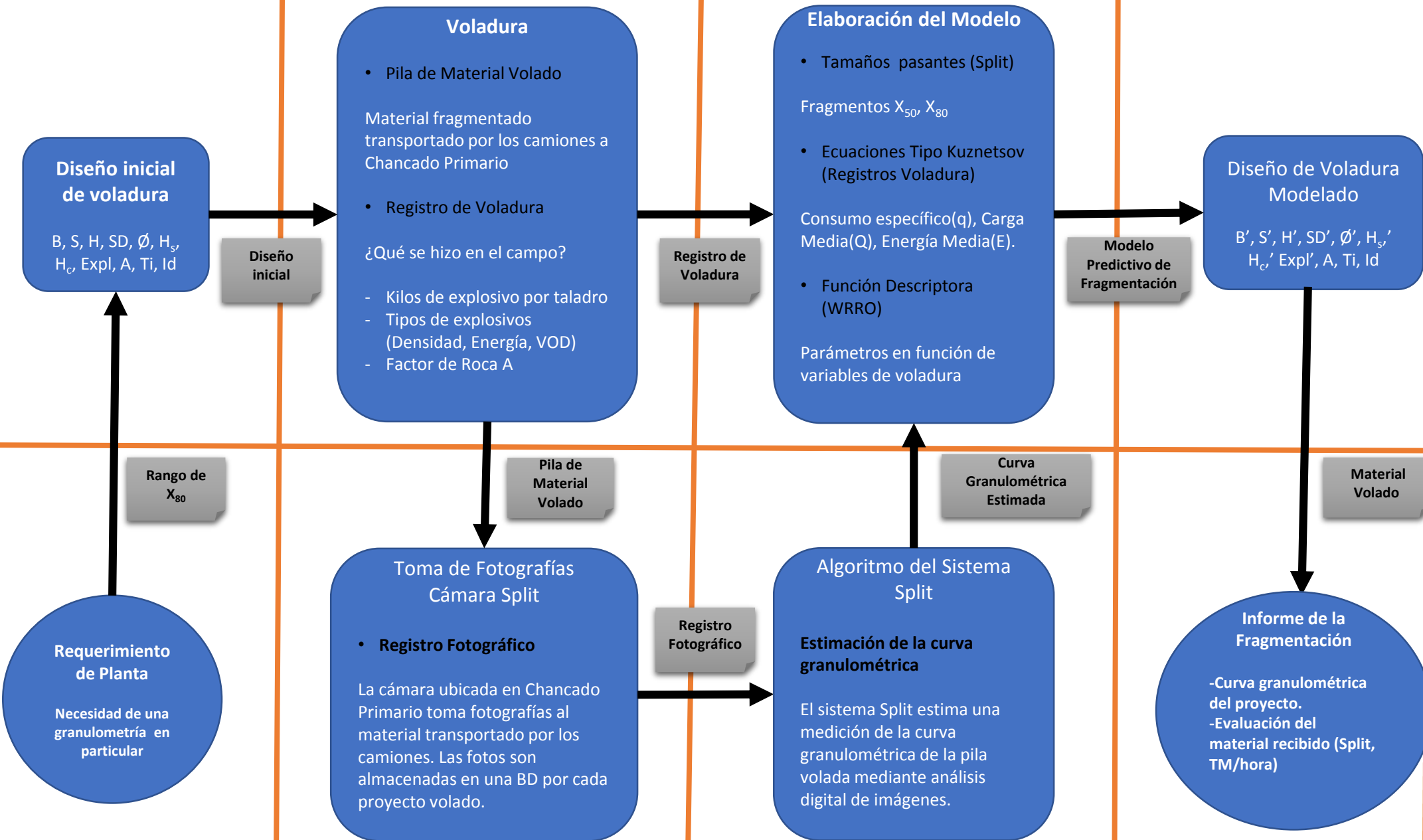
RECOLECCIÓN DE DATOS

ANÁLISIS

ACEPTACIÓN

MINA

PLANTA



3.- Fundamento Teórico del Modelo



3.1- Ecuación Kuznetsov (1973)

A=7; Para rocas medias

A=10; Para rocas duras pero fisuradas

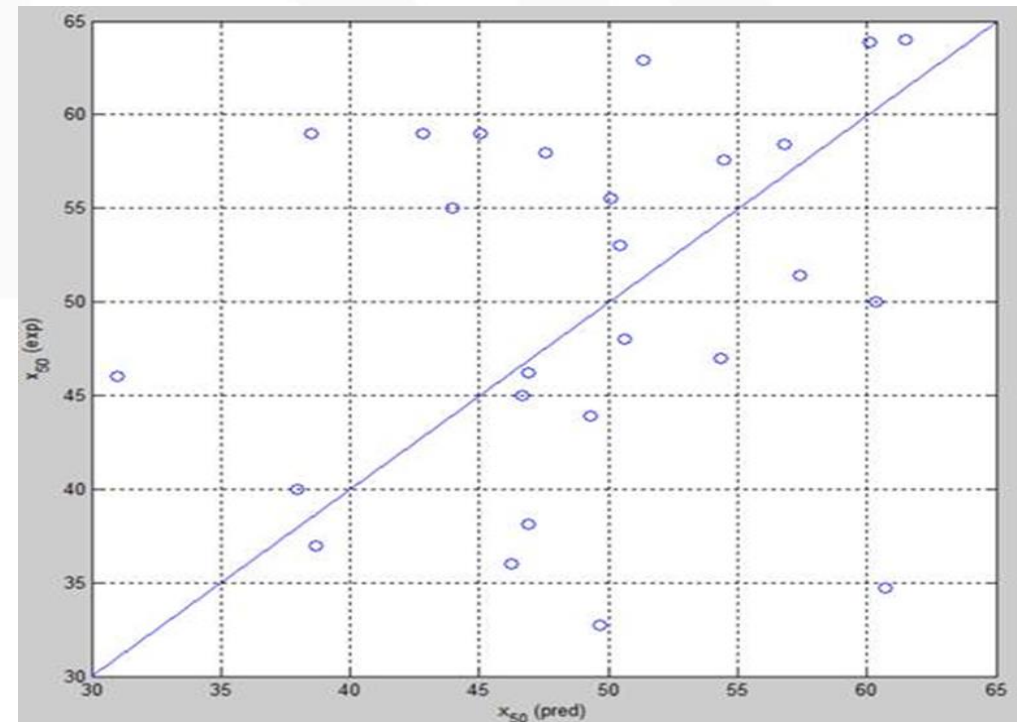
A=13; Para rocas muy duras poco fisuradas

Explosivo: TNT

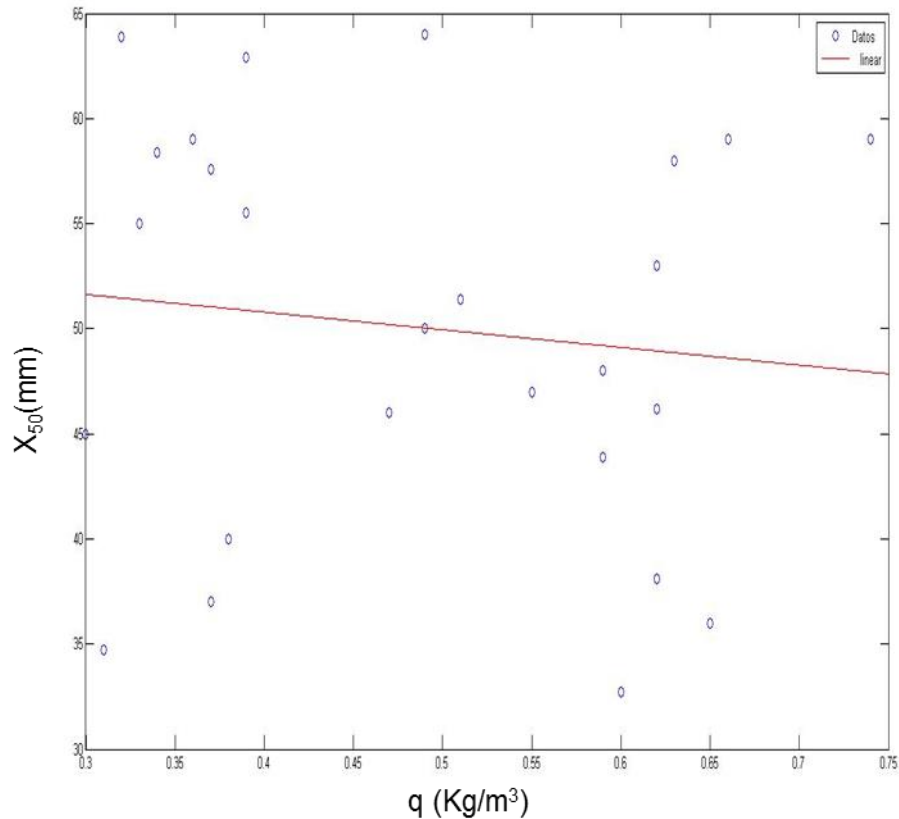
El error medio predicho-experimental es del 18 %, y algunos errores son hasta el 75 %.

Tamaño Teórico (cm)	Tamaño Experimental (cm)	A	q (kg/m ³)	Q(Kg)
42	37	7	0.37	390
41	40	7	0.38	400
48	55	7	0.33	480
34	46	7	0.47	350
41	59	7	0.36	320
38	45	7	0.3	410
60	34.7	10	0.31	260
56	58.4	10	0.34	285
59	57.6	10	0.37	352
56.6	62.9	10	0.39	320
55	55.5	10	0.39	270
64.5	63.9	10	0.32	293
38	59	13	0.74	675
51.5	50	13	0.49	625
44.5	48	13	0.59	557
47	47	13	0.55	600
48	64	13	0.49	710
44	53	13	0.62	730
41	58	13	0.63	533
44.5	46.2	13	0.62	440
42.3	43.9	13	0.59	465
44.5	38.1	13	0.62	440
43	32.7	13	0.6	540
40	36	13	0.65	530
39	59	13	0.66	485
49	51.4	13	0.51	560

“The mean diameter of the fragments by blasting rock” V.M. Kuznetsov

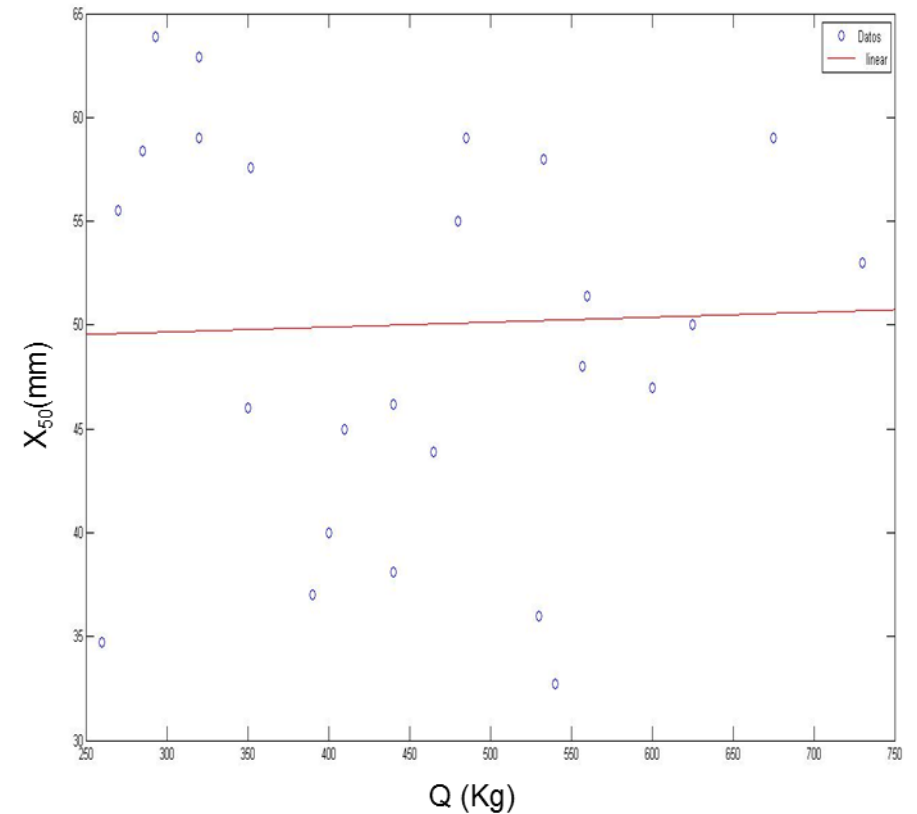


Tendencias de la Ecuación



$a = -0.8596$, I.C. [-1.1531, -0.5661]
valor $p : 3 \times 10^{-6}$

$b = 0.1433$, I.C. [0.1041, 0.1824]
valor $p : 9 \times 10^{-8}$



Los exponentes son **significativos**,
las conclusiones de Kuznetsov son
fuertes respecto a que X_{50}
disminuye con q y **augmenta** con Q .

3.2- Ecuación “Tipo Kuznetsov”

Ecuación Kuznetsov (incluye RWS):

$$X_{50} = A q^{-0.8} Q^{1/6} \left(\frac{115}{RWS} \right)^{-0.8 + \frac{1}{6}} = -0.633$$

* RWS: potencia en peso del explosivo respecto al ANFO

Ecuación Tipo Kuznetsov:

Los tamaños de la distribución de roca fragmentada por voladura se puede expresar mediante fórmulas del tipo Kuznetsov.

Lo importante es emplear las **tendencias** de Kuznetsov y aplicarlos a una mina.

$$X_{\alpha} = A q^a Q^b E^{(a+b)}$$

Donde:

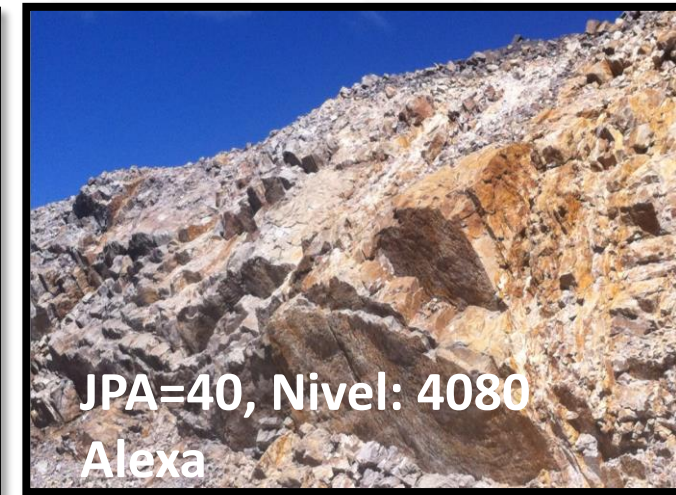
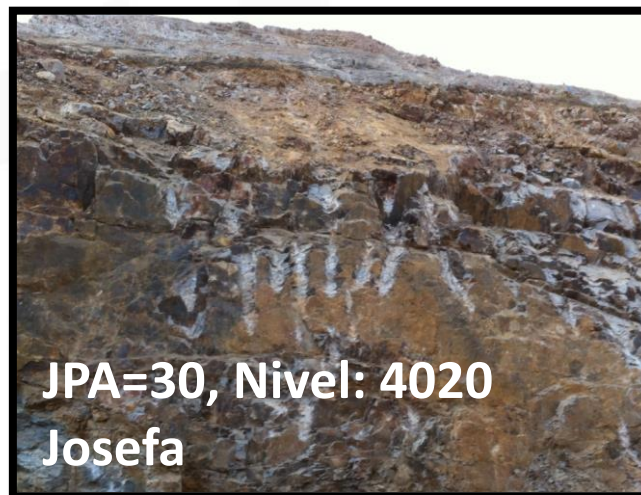
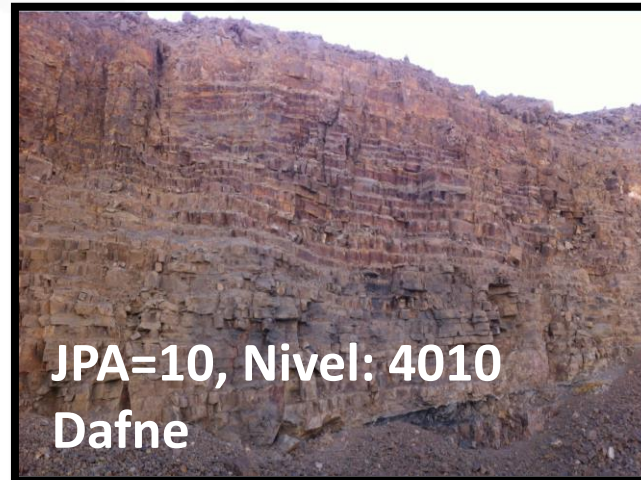
Factor de Roca (A)	:	Cunningham 1987
Consumo Específico(q)	:	Kg/ m ³
Carga Media del Taladro (Q)	:	Kg
Energía Media (E)	:	KJ/Kg

3.3.-Variables de la Ecuación Tipo Kuznetsov

I) Factor de Roca(A):

El modelo utiliza el Factor de Roca propuesto Cunningham en 1987.

PARÁMETRO	RANKING
Descripción de la Masa Rocosa (RMD)	
Pulverulento/Quebradizo	10
Diaclasado verticalmente	JPS + JPA
Masiva	50
Espaciamiento de Fracturas (JPS)	
0.1 m	10
0.1 a sobre tamaño	20
Sobre tamaño a tamaño de la malla	50
Angulo del Plano entre Fracturas (JPA)	
Buza fuera de la cara	20
Rumbo perpendicular a la cara	30
Buza hacia la cara	40
Influencia de la Densidad (RDI)	$RDI=25*SG - 50$
Factor Dureza (HF)	E/3 para E<50 GPa, UCS/5 para E>50



$$A = 0.06(RMD + RDI + HF)$$

II) Consumo Específico (q):

Kilogramos de explosivo por metro cúbico.

$$q = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} q_i}{n * B * S * H}$$

III) Carga Media (Q):

Kilogramos de explosivo por taladro.

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} q_i}{n}$$

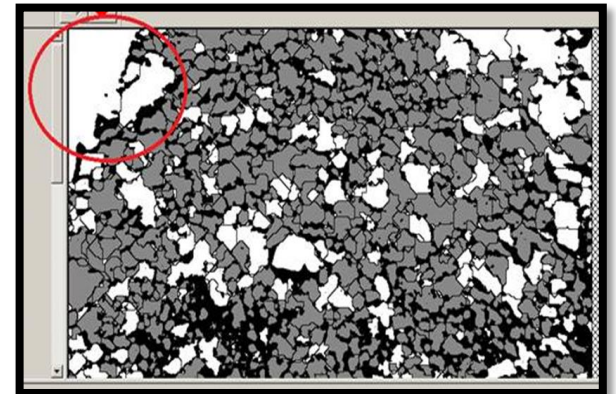
IV) Energía Media (E):

Energía Total
Kilo Joule por Kilogramo de explosivo.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} m_i * E_i}{\sum_{i=1}^{i=n} m_i}$$

3.4.-Medición de la Fragmentación

- En Mina Lagunas Norte, la estimación de la medida de fragmentación se realiza mediante el **Sistema Split**.
- Split se basa en el **análisis digital de imágenes**.
- El Sistema Split cuenta con una cámara instalada en chancadora primaria (toma seis fotos por camión).
- El **corte de finos es de 2.78 pulgadas**, valores menores son extrapolación del sistema.
- La parte final de la curva estimada por Split presenta un comportamiento asintótico.
- Es necesario que la **estimación de la medida de fragmentación** sea fiable (calibraciones periódicas del sistema, monitoreo constante, buena iluminación, posicionamiento de la cámara)



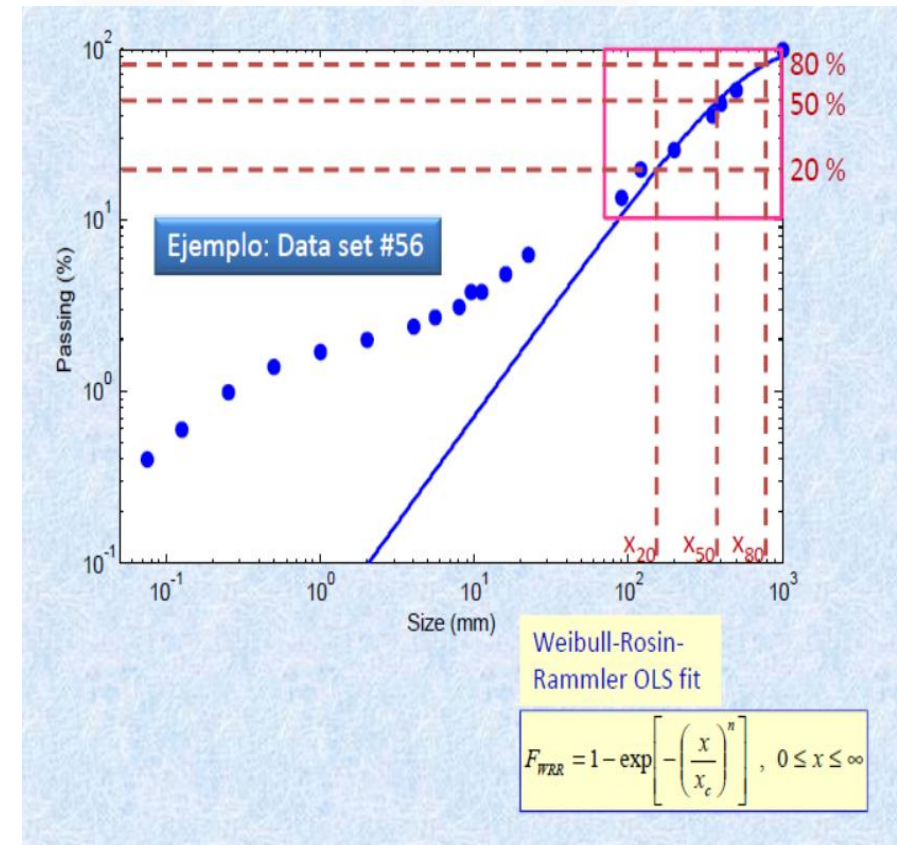
3.5.-Funciones Descriptoras de Fragmentación

Sanchidrián (2013)

Realizó estudios donde muestra las bondades en los ajustes de numerosas funciones, que pueden describir mejor, la distribución de una pila de material volado (1234 curvas de fragmentación *pesadas y cribadas*).

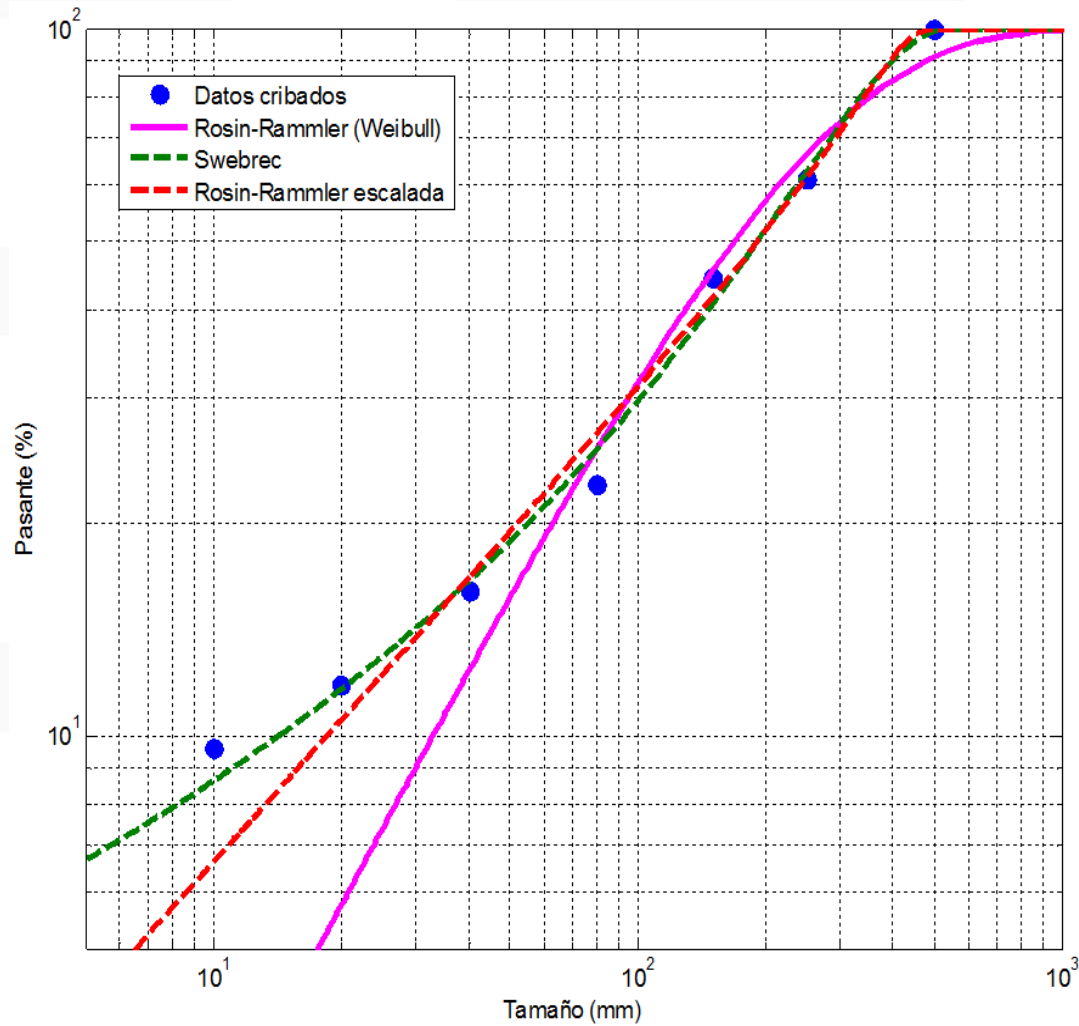
Algunas conclusiones:

- En muchos casos *funciones de tres parámetros* resultan mejores que las *funciones bi componentes*.
- Las funciones de tres parámetros (**SWE y TWRR**) dan buenos ajustes hasta *pasantes de 10%*.
- Función **WRRO** da buenos ajustes en la “*zona central*” ($20\% < p < 80\%$).

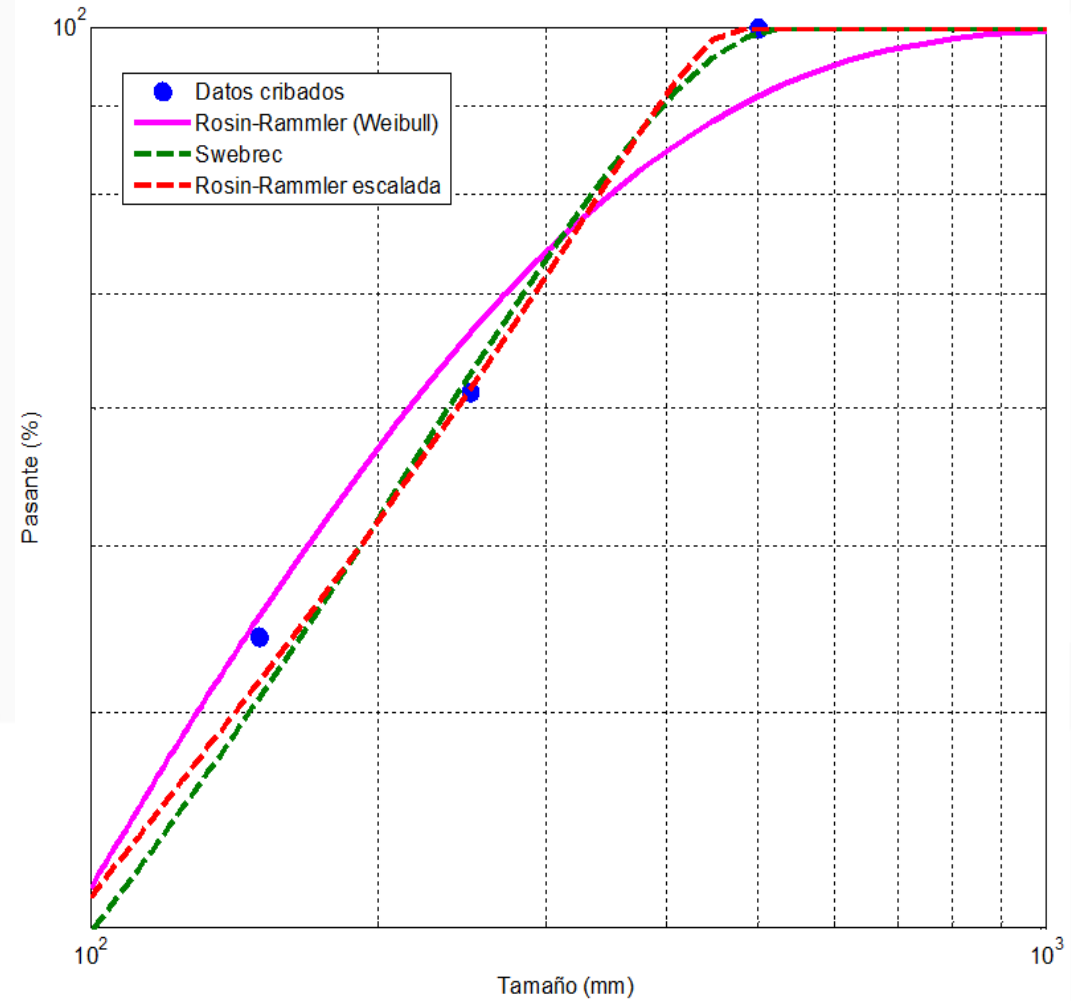


Comparación de los Ajustes de las Funciones

Zona Fina



Zona Gruesa



Fuente: Dr. José Sanchidrián Blanco

Funciones Descriptoras de Fragmentación

- $FWRRO = 1 - e^{-\left[\frac{x}{x_c}\right]^n}$ (Función Weibull Rosin Rammler Ordinaria)

El efecto truncado: $\varepsilon = \frac{x}{x_{max}-x}$; $\varepsilon_c = \frac{x_c}{x_{max}-x_c}$

- $FTWRR = 1 - e^{-\left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right]^n}$ (Función Weibull Rosin Rammler Truncada)

- $FSWE = \frac{1}{1 + \left[\frac{\log\left(\frac{x_{max}}{x}\right)}{\log\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right)}\right]^b}$ (Función Swebrec)

3.6.-¿ Por que utilizar la Función WRRO en el Modelo?

- Dificultad de estimar las colas de las distribuciones, debido a que hay pocos ejemplares para su muestreo.
- Las curvas del Sistema Split presentan en las terminaciones ***un comportamiento pseudo-asintótico*** y debajo del corte de finos ***extrapolación***, **“no se puede medir lo que no se ve”**, el algoritmo no es capaz de delinear.
- El Sistema Split tiene un rango de *estimación de medida*, entre el **50% hasta 85%**, la función WRRO da buenos ajustes en la **“zona central”** ($20% < p < 80%$).

3.7.- Parámetro de Forma (n) Cunningham

Asumir un valor para la exponente de la distribución WRRO, es *asumir una distribución*

$$n = \left(\frac{L0}{H}\right) * \left(2.2 - 14 \frac{B}{d}\right) * \left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right)^{0.5} * \left(1 - \frac{W}{B}\right)$$

Cunningham 1983

$$n = n_s \left(\frac{L0}{H}\right)^{0.3} * \sqrt{\left(1 - 30 \frac{B}{d}\right)} * \sqrt{\left(1 + \frac{S}{B}\right)} * \left(1 - \frac{W}{B}\right)$$

Cunningham 2005

¿El exponente de la función descriptora de fragmentación debe tener solo una interpretación geométrica?

¿? Burden, Espaciamiento, Diámetro del taladro, Altura de carga, etc.....

3.8.- Parámetro de Forma (ni) Modelo

El objetivo del modelo es representar la granulometría mediante una función.

Es necesario que la fórmula del parámetro de la función se dé cuando existan datos físicos que lo apoyen, como es el conocimiento de los tamaños de fragmentos.

$$R = e^{-\ln(2) * \left(\frac{X}{X_{50}}\right)^n}$$

Función WRR0 en función de X_{50}

Si $R=0.2$:

$$ni = \frac{\ln\left(\frac{\ln(5)}{\ln(2)}\right)}{\ln\left(\frac{X_{80}}{X_{50}}\right)}$$

Parámetro de Forma del Modelo

4.- Modelo Predictivo de Fragmentación: Mina Lagunas Norte



4.1.- Perforación y Explosivos

Perforación

- Tres perforadoras Terex Reedrill SKS 12 : Diámetros de perforación 9 7/8" y 7 7/8".
- Una perforadora Ingersoll Rand DMM2 : Diámetro de perforación 7 7/8".
- Una perforadora CAT MD6420: Diámetro de perforación 9 7/8"
- Una perforadora Ranger 700 : Diámetros de perforación 4" y 4.5".
- Una perforadora Sandvik DP 1500 i: Diámetros de perforación de 4.5", 5" y 6".
- Una perforadora Atlas Copco Flex Roc: Diámetros de 4.5", 5" y 6"

Diámetros de perforación

- Diámetro de 7 7/8 para taladros de buffer, contorno y en algunos casos para producción.
- Diámetros de 4.5" y 5" para taladros de pre corte.
- Diámetro de 9 7/8" para taladros de producción.

Longitud del taladro : Altura del banco 10 m y 1 m de sobre perforación.

Explosivos

Se utiliza ANFO y ANFO PESADO; la iniciación consta de un detonador electrónico, un booster de 450 gr y un detonador pirotécnico (back up).

Cuadro de Densidades y Energías Totales

Producto	Densidad (gr/cm ³)	Energía Total (Kj/Kg)
ANFO	0.785	3960
HA-28	0.885	3850
HA-37	0.995	3780
HA-46	1.17	3720
HA-45/55	1.26	3655
HA-55	1.27	3640
HA-64	1.31	3479



Control de Calidad:

- Mediciones de VOD
- Control de Densidades
- Calibración de camiones
- Control de Diésel en ANFO
- Análisis granulométrico de Nitrato

4.2.-Data Experimental

Los tamaños X_{50} y X_{80} son los tamaños experimentales, se obtienen de las curvas granulométricas estimadas por Split por interpolación doble log entre puntos.

$$\text{Log}(X_\alpha/X_1) = \text{Log}(\alpha/P_1) / (\text{Log}(P_2/P_1) * \text{Log}(X_2/X_1))$$

Ajuste a ecuación “*Tipo Kuznetsov*” de la forma:

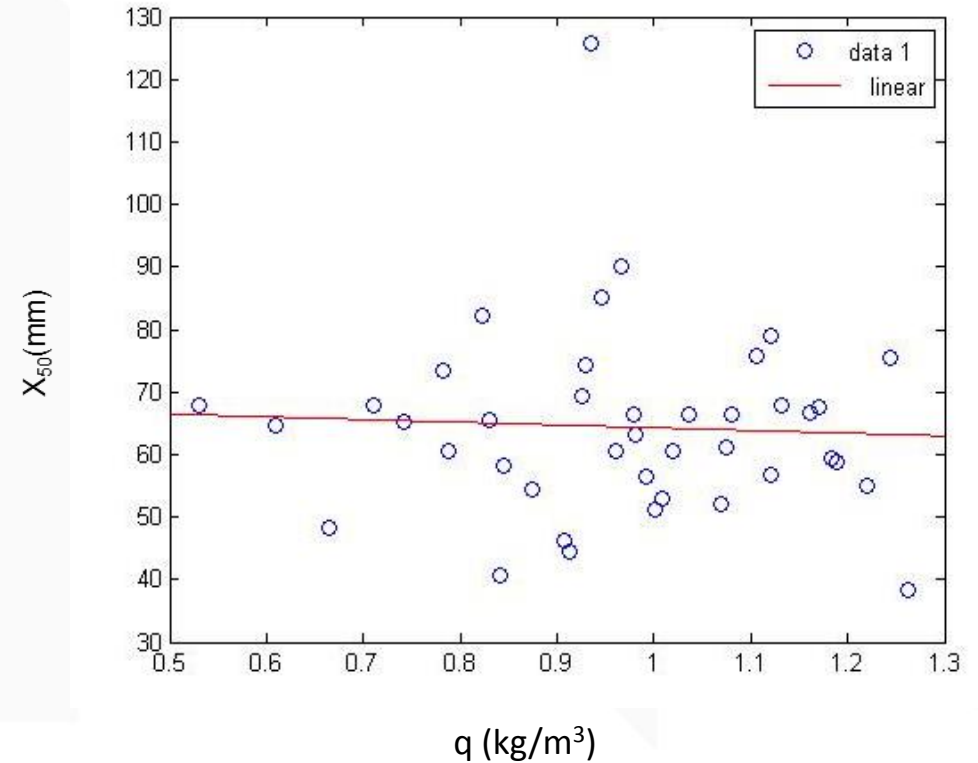
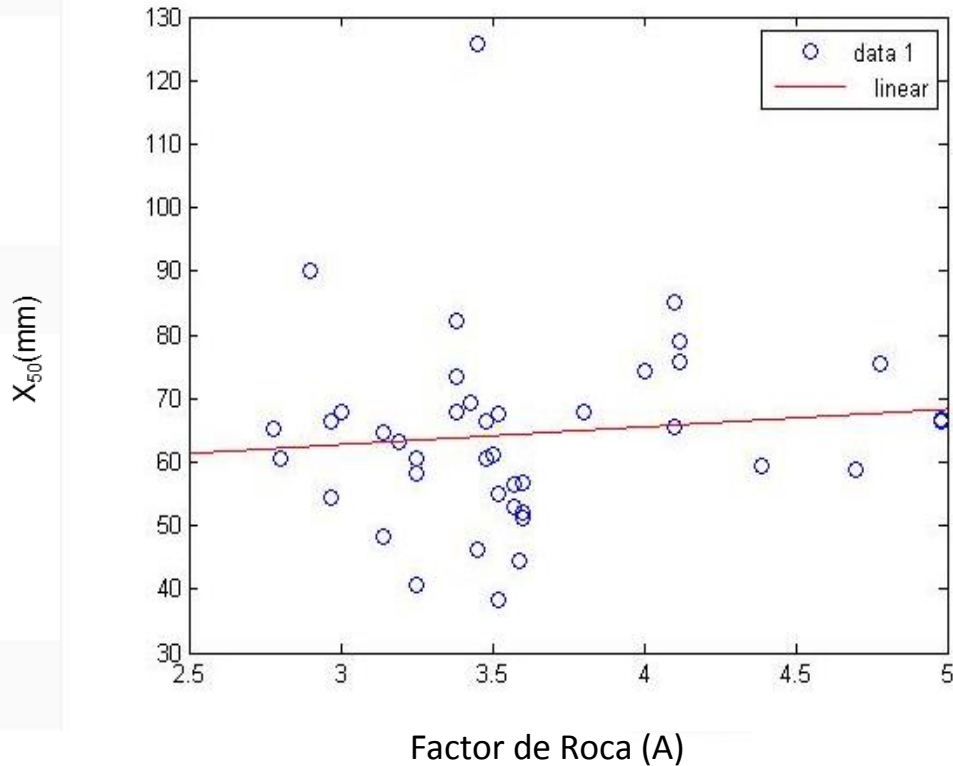
$$X_\alpha = A \cdot q^a \cdot Q^b \cdot E^{(a+b)}$$

Los datos obtenidos son sometidos a algoritmos de ajuste no lineal de Levenberg-Marquardt de mínimos cuadrados.

PROYECTOS	X_{50}	X_{80}	A	q	Q	E
9-4100-124-03M1	66.67	186.69	4.98	1.16	362.50	3609.64
9-4100-124-04M1	66.26	222.34	4.98	1.04	323.00	3589.12
9-4100-128-02M1	67.94	196.46	3.80	1.13	382.72	3575.91
9-4100-134-02M1	67.48	204.46	3.52	1.17	365.09	3660.00
9-4090-112-02M1	75.51	210.39	4.78	1.24	387.92	3550.62
9-4100-137-01M1	58.75	186.42	4.70	1.19	371.12	3479.44
9-4090-115-02-M1	38.21	136.41	3.52	1.26	393.57	3510.89
9-4090-115-05-M1	55.05	182.06	3.52	1.22	380.77	3479.44
9-4080-132-02M1	69.47	184.50	3.43	0.93	365.91	3720.00
9-4080-133-01M1	60.65	180.31	3.48	1.02	344.82	3667.67
9-4080-133-02M1	66.26	203.99	3.48	1.08	365.16	3669.91
9-4070-120-01M2AL	89.97	235.70	2.90	0.97	353.91	3720.00
10-4060-098-01M1	52.21	182.73	3.60	1.07	361.78	3720.00
10-4060-098-06M1	51.23	163.81	3.60	1.00	338.64	3720.00
10-4060-098-02M1	56.67	185.26	3.60	1.12	379.20	3720.00
11-4070-123-06M1	59.44	192.61	4.39	1.18	399.81	3659.80
11-4070-125-02M1	52.90	173.00	3.57	1.01	341.29	3649.34
11-4070-125-03M1	56.54	189.35	3.57	0.99	335.13	3638.70
9-4070-122-02-M1	60.44	187.15	2.80	0.79	288.25	3850.00
9-4070-122-04M1	65.11	200.78	2.78	0.74	271.58	3850.00
10-4060-099-03-M1	54.35	189.93	2.97	0.87	320.07	3744.79
10-4060-099-05M1	66.34	183.12	2.97	0.98	358.41	3720.00
11-4070-126-02-M1	63.28	227.78	3.19	0.98	331.38	3729.86
10-4060-100-01-M1	125.64	347.77	3.45	0.93	342.06	3708.05
10-4060-100-03-M1	46.10	147.51	3.45	0.91	332.38	3640.00
9-4060-102-01-M1	60.69	170.56	3.25	0.96	351.89	3694.97
9-4060-102-04-M1	40.55	130.92	3.25	0.84	308.05	3797.00
9-4060-106-02-M1	58.22	181.22	3.25	0.84	309.15	3780.00
10-4060-105-02-M1	44.33	145.08	3.59	0.91	308.80	3780.00
9-4060-107-04-M1	61.20	181.19	3.50	1.07	363.26	3718.45
7-4050-089-01-M1	67.94	209.30	3.00	0.53	224.90	3780.00
8-4050-093-02-M1	74.43	216.96	4.00	0.93	314.00	3780.00
8-4050-098-01M1	64.61	182.16	3.14	0.61	206.36	3780.00
8-4050-098-03M1	48.41	168.22	3.14	0.66	224.79	3780.00
8-4040-086-02M1	73.48	204.73	3.38	0.78	309.12	3714.51
8-4040-086-04M1	67.92	203.74	3.38	0.71	280.26	3621.74
8-4040-086-01M1	82.24	216.40	3.38	0.82	324.74	3484.06
8-4050-104-01M1	65.49	203.60	4.10	0.83	327.97	3685.19
8-4050-104-04M1A	84.98	221.35	4.10	0.95	373.49	3586.44
8-4030-098-01M1A	78.86	224.18	4.12	1.12	349.79	3567.94
8-4030-098-03M1A	75.77	196.18	4.12	1.11	345.06	3617.17

Registro de 41 voladuras realizadas entre 2014 y el 2015

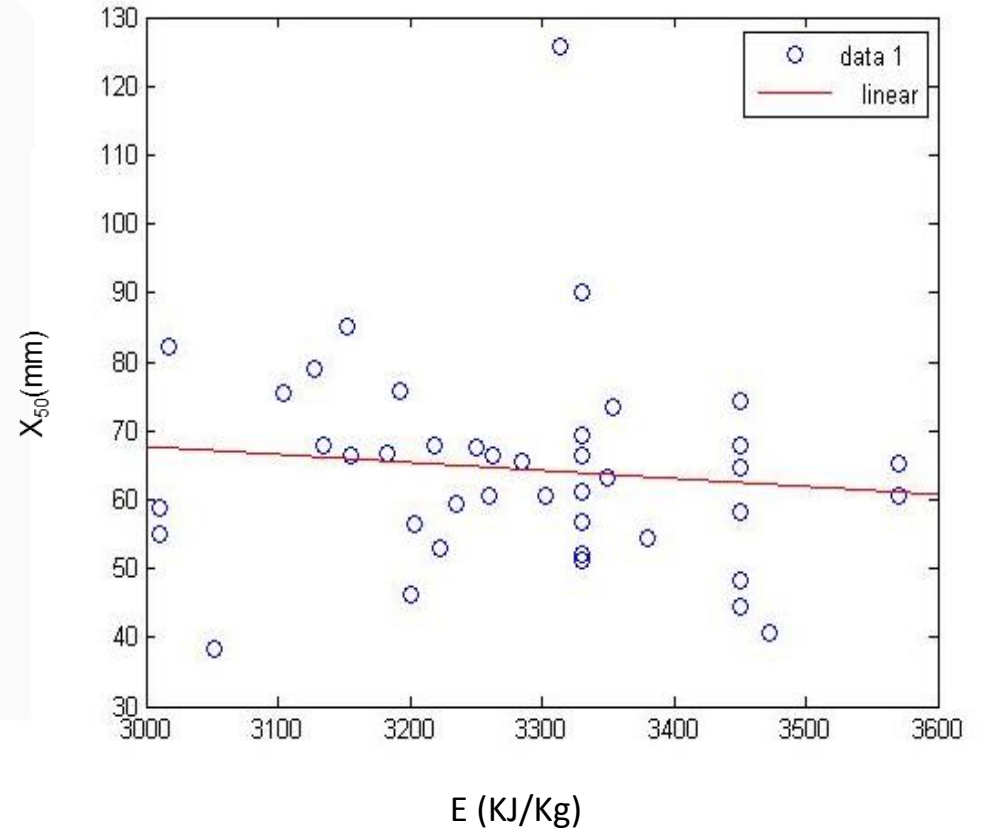
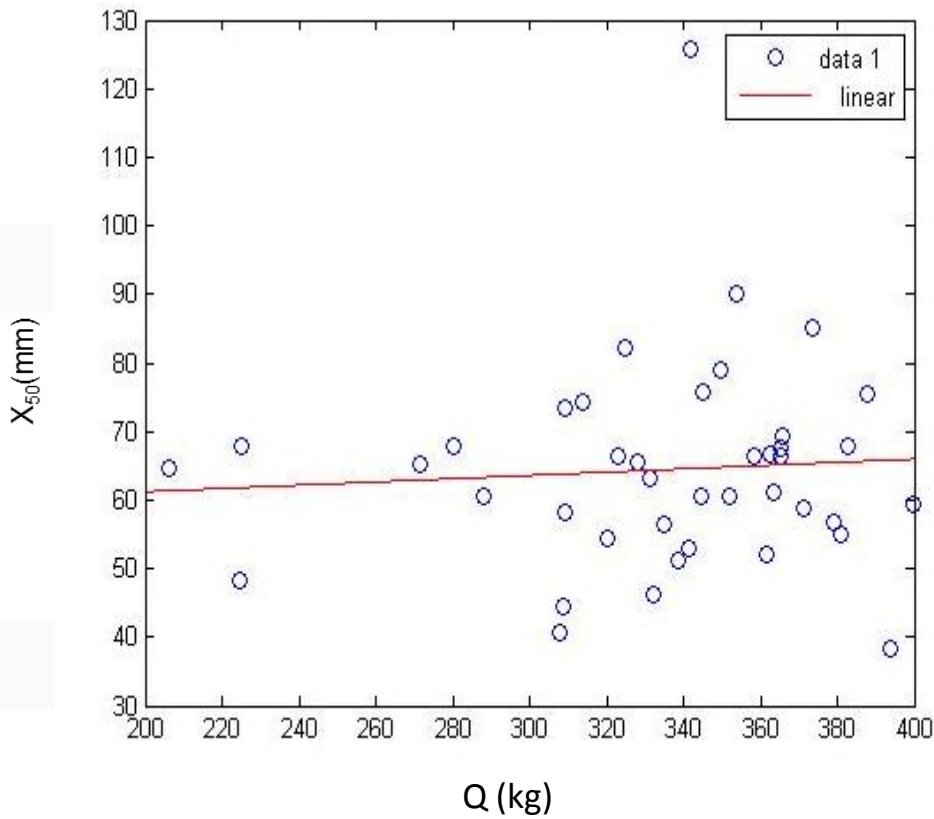
Tendencias de las Variables



El tamaño de fragmento **augmenta** al **incrementar** A

El tamaño de fragmento **disminuye** al **incrementar** q

Tendencias de las Variables



El tamaño de fragmento *aumenta* al *incrementar* Q

El tamaño de fragmento *disminuye* al *incrementar* E

*Las tendencias para X_{80} son similares

4.3.-Ecuaciones del Modelo Predictivo de Fragmentación: Lagunas Norte

$$X_{50} = A * (q)^{-1.1559} * (Q)^{0.8785} * E^{-0.2774}$$

$$\text{I.C: } \begin{array}{l} a: [-1.7762, -0.5356] \\ b: [0.5176, 1.2345] \end{array}$$

$$X_{80} = A * (q)^{-1.1051} * (Q)^{0.9274} * E^{-0.1777}$$

$$\text{I.C: } \begin{array}{l} a: [-1.6267, -0.5836] \\ b: [0.6239, 1.2310] \end{array}$$

Los exponentes *son significativos* con intervalo de confianza del 95%

El **Modelo Predictivo de Fragmentación** es representado por la siguiente expresión:

$$P(X) = 1 - e^{-\ln(2) * \left(\frac{X}{X_{50}}\right)^{\left(\frac{\ln\left(\frac{\ln(5)}{\ln(2)}\right)}{\ln\left(\frac{X_{80}}{X_{50}}\right)}\right)}$$

5.-Costos Estimados



5.1-Costo de Perforación

Los costos han sido estimados en función del precio del componente y su rendimiento medio.

	Costos (\$/m)	
	9 7/8" Ø	7 7/8" Ø
Broca	6.70	4.99
Deck Bushing	0.15	0.17
Bit Sub	0.33	0.42
Barra	0.57	0.30
Shock Absorver	0.52	0.74
Diésel	5.30	4.11
Costo de perforación (\$/m)	13.57	10.73

El costo de perforación en función de los parámetros de la malla de perforación es representado por la ecuación:

$$CP \left(\frac{\$}{TM} \right) = \frac{CPm \left(\frac{\$}{m} \right) * (H(m) + SD(m))}{B(m) * Es(m) * H(m) * De \left(\frac{TM}{m^3} \right)}$$

CPm : Costo de perforación $\left(\frac{\$}{m} \right)$

H : Altura de banco

SD : Sobre perforación

B : Burden

Es : Espaciamiento

De : Densidad de la Roca

5.2- Costo de Voladura

Costo del Primado:

$$CPr = \text{Booster } (\$) + \text{Det. Elect. } (\$) + \text{Det. Piro. } (\$)$$

Costo de la Mezcla Explosiva:

$$CM = n\% * C. E. \left(\frac{\$}{Kg} \right) + 94\% * (100 - n)\% * C. N. \left(\frac{\$}{kg} \right) + 6\% * (100 - n)\% * C. D \left(\frac{\$}{Kg} \right)$$

Donde:

CN: Costo del Nitrato (\$/Kg), CE: Costo de la Emulsión Matriz (\$/kg), CD: Costo del Diésel (\$/kg), “n” es el porcentaje de Emulsión Matriz de una Mezcla.

Mezcla Explosiva por metro lineal:

$$DCL \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}} \right) = 0.507 * Dm \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) * (D (\text{Pulg.}))^2$$

Donde:

Dm: Densidad de la Mezcla Explosiva

D: Diámetro del pozo

Costo por Voladura(CV)

El costo de voladura (CV) incluye el costo de cargar y primar un taladro considerando su aporte en tonelaje.

$$CV \left(\frac{\$}{\text{TM}} \right) = \frac{C(\text{m}) * DCL \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}} \right) * CM \left(\frac{\$}{\text{Kg}} \right) + CPr(\$)}{B(\text{m}) * Es(\text{m}) * H(\text{m}) * De \left(\frac{\text{TM}}{\text{m}^3} \right)}$$

Donde:

C: Altura de Carga

Costo estimado de perforación y voladura :

$$\mathbf{CP\&V = CP+CV}$$

6.- Matriz de Decisión

El modelo predice tamaños de fragmentos X_{80} , los cuales *son asociados al costo estimado*, necesario para realizar dicha voladura.

Se generan múltiples alternativas de diseño.

$$X_{80} = A * (q)^{-1.1051} * (Q)^{0.9274} * E^{-0.1777}$$

$$q = \frac{k * dens \text{ Explo} * \phi^2 * C}{B * Es * H}$$

$$Q = k * dens \text{ Explo} * \phi^2 * C$$

E= Energía total del explosivo utilizado

$$\frac{CPm \left(\frac{\$}{m} \right) * (H(m) + SD(m))}{B(m) * Es(m) * H(m) * De \left(\frac{TM}{m^3} \right)}$$

+

$$\frac{C(m) * DCL \left(\frac{Kg}{m} \right) * CM \left(\frac{\$}{Kg} \right) + CPr(\$)}{B(m) * Es(m) * H(m) * De \left(\frac{TM}{m^3} \right)}$$

7.- Casos de Estudio



Caso I: Proyecto 4050-125

A continuación se presenta un proyecto disparado el 8 de Enero del 2015.

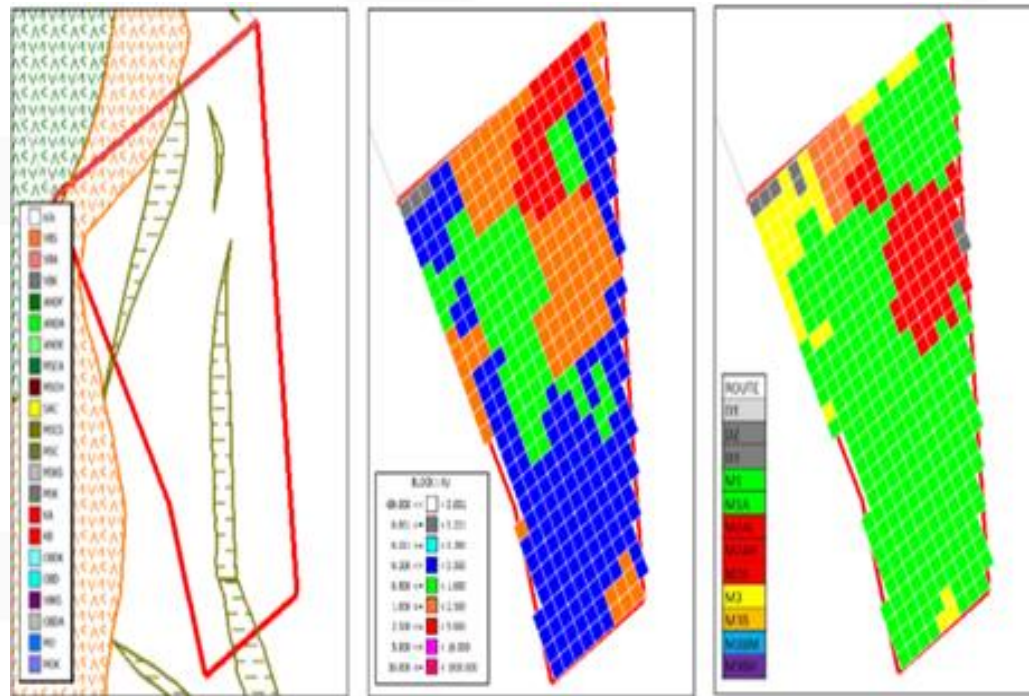
La época de lluvias origina humedad en los taladro y en algunos casos se tienen taladros con agua.

No existen restricciones por cuidado de pared final ni estructuras cercanas, la perforación debe ser con diámetro de 9 7/8" debido a la baja disponibilidad de perforadoras en ese momento.

Planta requiere un X_{80} entre 6.5" y 7.5", con lo cual su rendimiento en TM/hora es el mejor y no presenta desgaste prematuro de componentes.

Información del proyecto

Litología Predictiva



Parámetros Geomecánicos

- Densidad de la Roca: 2.45 TM/m³
- Resistencia compresiva: 149 MPa
- Módulo de Young: 11.9 GPa
- Espaciamiento de Fracturas (JPS):
Fracturas espaciadas entre 0.3 m a 0.5 m
- Orientación de del Plano entre fracturas (JPA): orientación 75 grados buza afuera de la cara

Los valores obtenidos del ranking son: RMD = 45, JPS = 20, JPA = 25, HF=, 4, RDI= 11.25.
El Factor de Roca (A) estimado es 3.6.

Matriz de Decisión-Inputs

Variables de Diseño:

Diámetro del taladro : 251 mm
Altura del taco : 5 m
Altura del banco : 10 m
Sobre perforación : 1 m
Factor de Roca (A) : 3.6

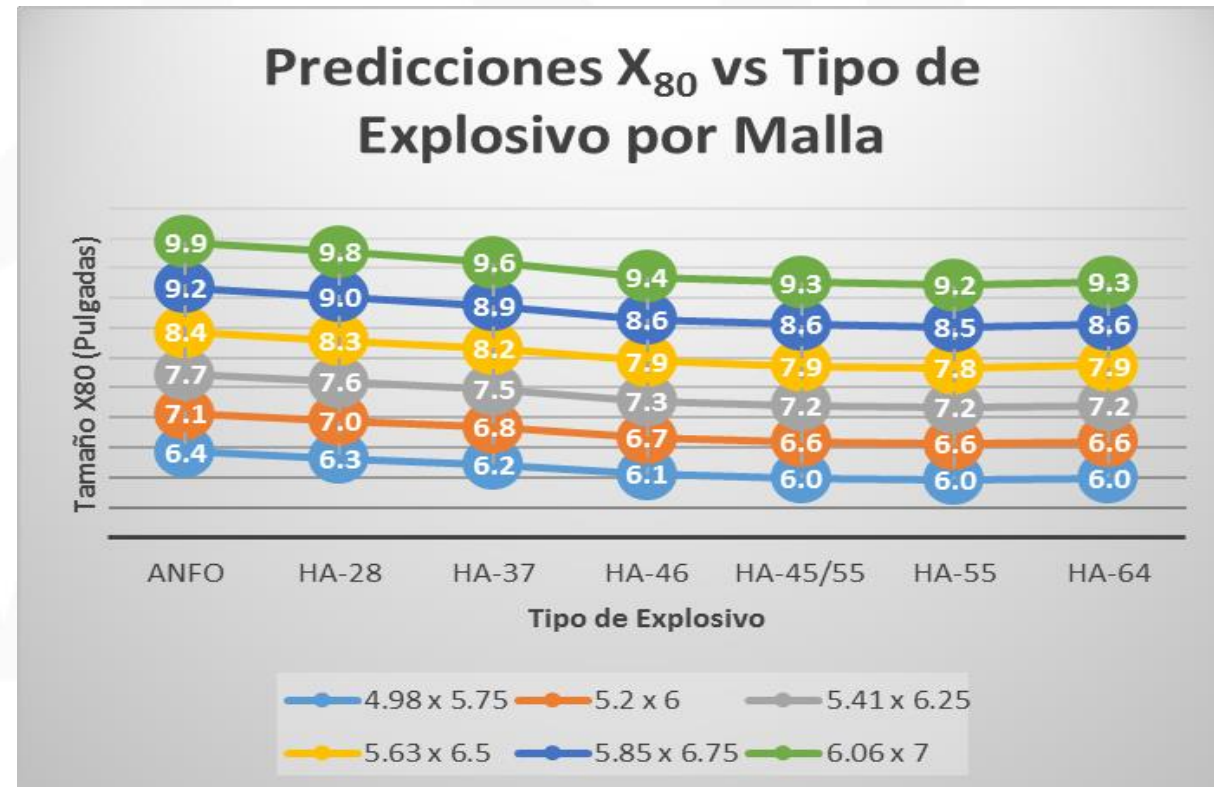
Se han considerado las siguientes mallas en la matriz (podrían ser mas):

4.98 x 5.75; 5.2 x 6; 5.41 x 6.25; 5.63 x 6.5;
5.85 x 6.75; 6.06 x 7

Se evalúan tamaños X_{80} y costos para cada malla y mezcla explosiva.

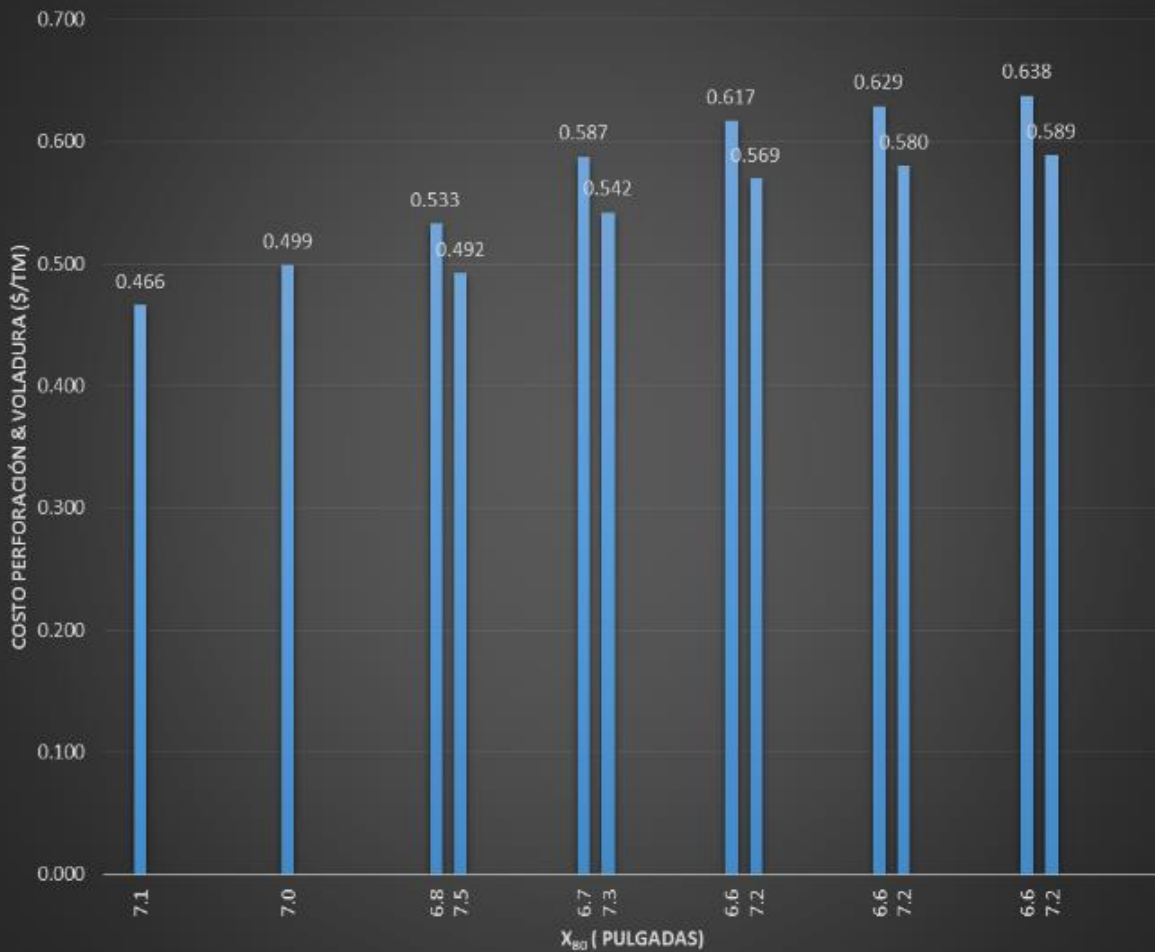
	Costos (\$/m)	
	9 7/8" Ø	7 7/8" Ø
Broca	6.70	4.99
Deck Bushing	0.15	0.17
Bit Sub	0.33	0.42
Barra	0.57	0.30
Shock Absorber	0.52	0.74
Diésel	5.30	4.11
Costo de perforación (\$/m)	13.57	10.73

Mezcla	\$/Kg
ANFO	0.744
HA-28	0.756
HA-37	0.761
HA-46	0.767
HA-45/55	0.77
HA-55	0.773
HA-64	0.778
HA-73	0.784



Matriz de Decisión-Alternativas

Tamaño X_{80} (de 6.5" a 7.5")



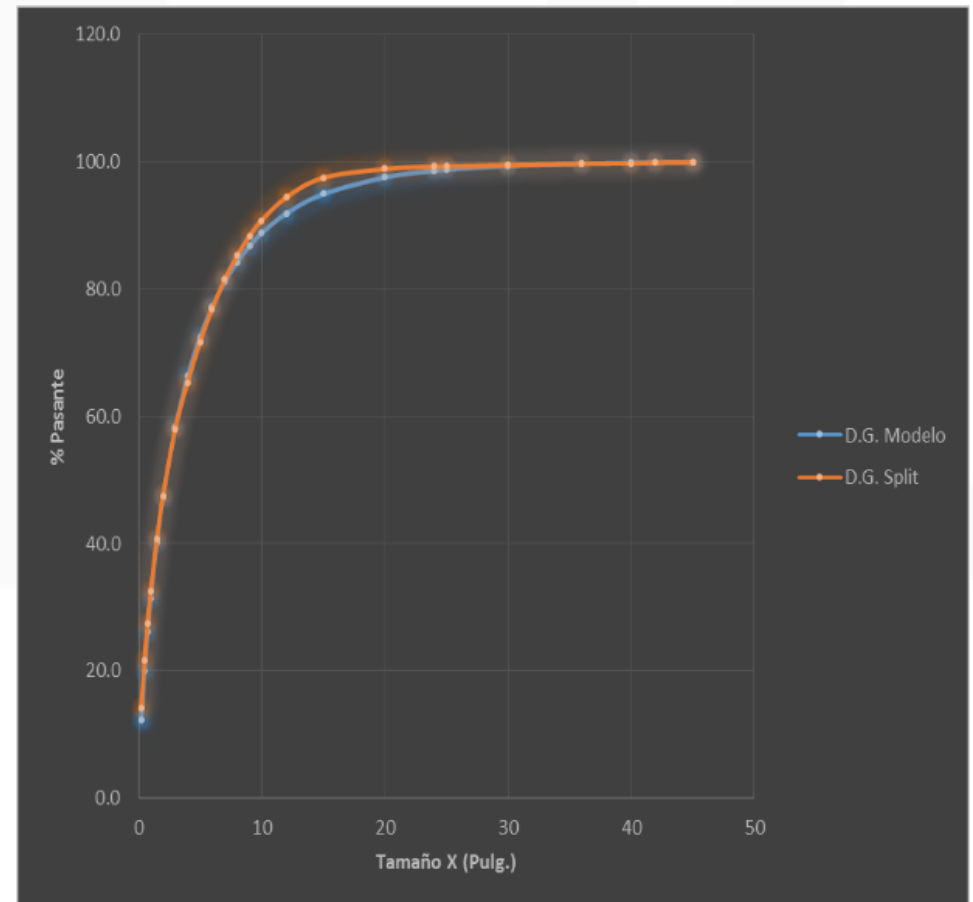
- Restricción: X_{80} entre 6.5" y 7.5"
- Selección en función de costos y restricciones de voladura.

Explosivo	ANFO	HA	HA	HA	HA	HA	HA
Malla		28	37	46	45/55	55	64
4.98 x 5.75	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	6.0	6.0
5.2 x 6	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.6	6.6
5.41 x 6.25	7.7	7.6	7.5	7.3	7.2	7.2	7.2
5.63 x 6.5	8.4	8.3	8.2	7.9	7.9	7.8	7.9
5.85 x 6.75	9.2	9.0	8.9	8.6	8.6	8.5	8.6
6.06 x 7	9.9	9.8	9.6	9.4	9.3	9.2	9.3

Aplicación de La Matriz de Decisión-Resultados

En el caso del proyecto 4050-125 se decidió por el diseño de malla de 5.2 x 6 y una mezcla explosiva de **HA-37**, el costo esperado es de **0.53 \$/TM**, con un **X₈₀ simulado de 6.8"**.

Pulg.	mm	% Pasante Modelo	% Pasante Split	SCR	SCT
0.25	6.35	12.3	14.13	3.287693664	3650.97921
0.5	12.7	20.0	21.66	2.819287987	2797.70471
0.75	19.05	26.2	27.53	1.810010849	2211.19388
1	25.4	31.5	32.48	1.003559182	1770.16538
1.5	38.1	40.2	40.68	0.191578352	1147.40271
2	50.8	47.3	47.44	0.012723714	735.132844
3	76.2	58.2	58.01	0.051487186	273.681878
4	101.6	66.3	65.31	0.947134448	85.4392111
5	127	72.4	71.59	0.716958488	8.78134444
6	152.4	77.3	76.91	0.118050535	5.55387778
7	177.8	81.1	81.48	0.154287245	47.9787111
8	203.2	84.2	85.17	0.985973287	112.713611
9	228.6	86.7	88.29	2.552048078	188.696011
10	254	88.8	90.77	4.051167918	262.980278
12	304.8	91.9	94.4	6.336353527	393.890178
15	381	94.9	97.46	6.535036998	524.715378
20	508	97.5	98.85	1.708197363	590.328011
24	609.6	98.6	99.21	0.389556826	607.951211
25	635	98.8	99.26	0.246122667	610.419378
30	762	99.4	99.5	0.020225186	622.336178
36	914.4	99.7	99.67	0.000748836	630.846944
40	1016	99.8	99.75	0.004051418	634.872011
42	1066.8	99.9	99.84	0.000172426	639.415511
45	1143	99.9	99.89	4.52174E-05	641.946678



El coeficiente de determinación **R² es 99.8%**, lo que indica que el ajuste del modelo es muy bueno.

El X₈₀ **simulado es de 6.8"** y el X₈₀ **estimado por Split de 6.6"**.

Caso II: Ajuste del Factor de Roca

El caso II, hace referencia a un proyecto que incluye un sector con macizo rocoso atípico, cuyo factor de roca estimado **no es representativo**, este caso puede ocurrir si es poco común cierto tipo de roca en el yacimiento (no cumple con el ranking de valorización empleado).

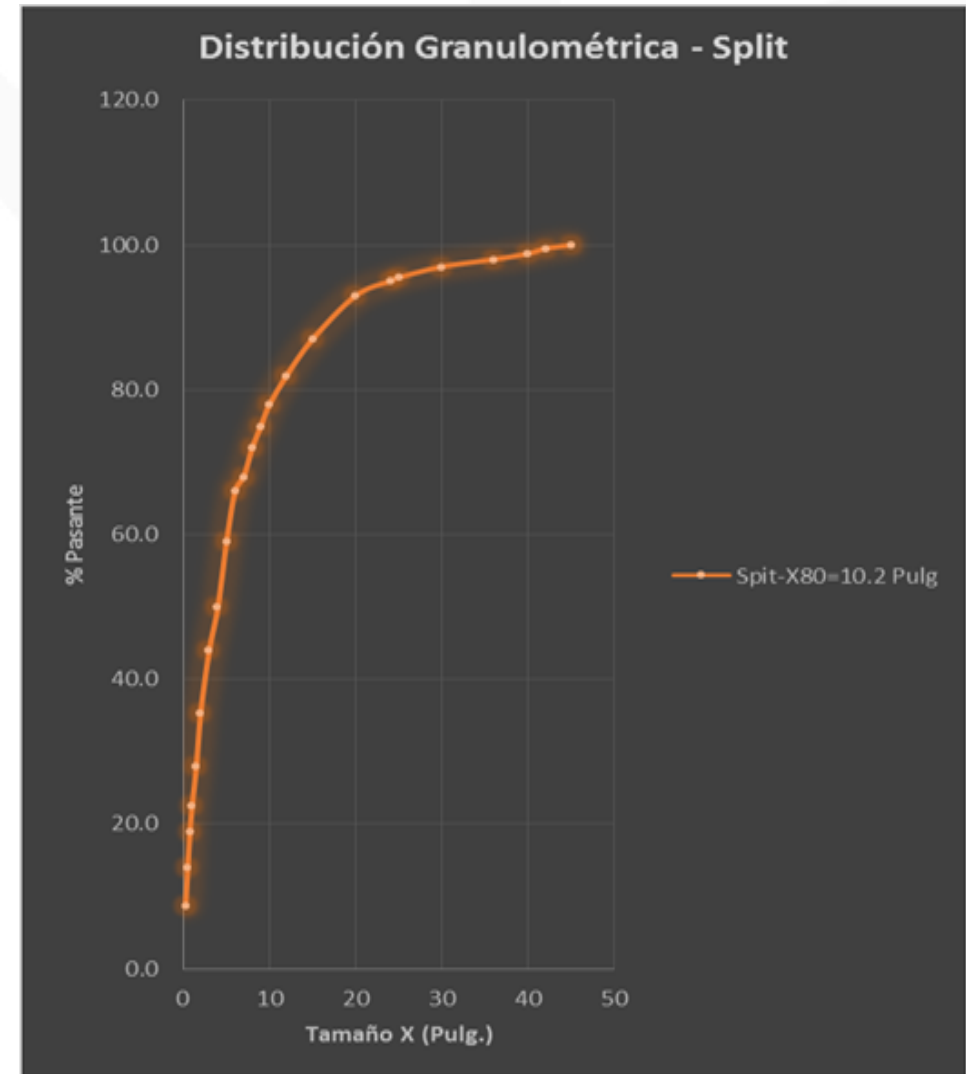
En este contexto surgen algunas interrogantes:

¿Cuál es el Factor de Roca que describe mejor una zona poco común para efectos de voladura?

Parámetros de voladura

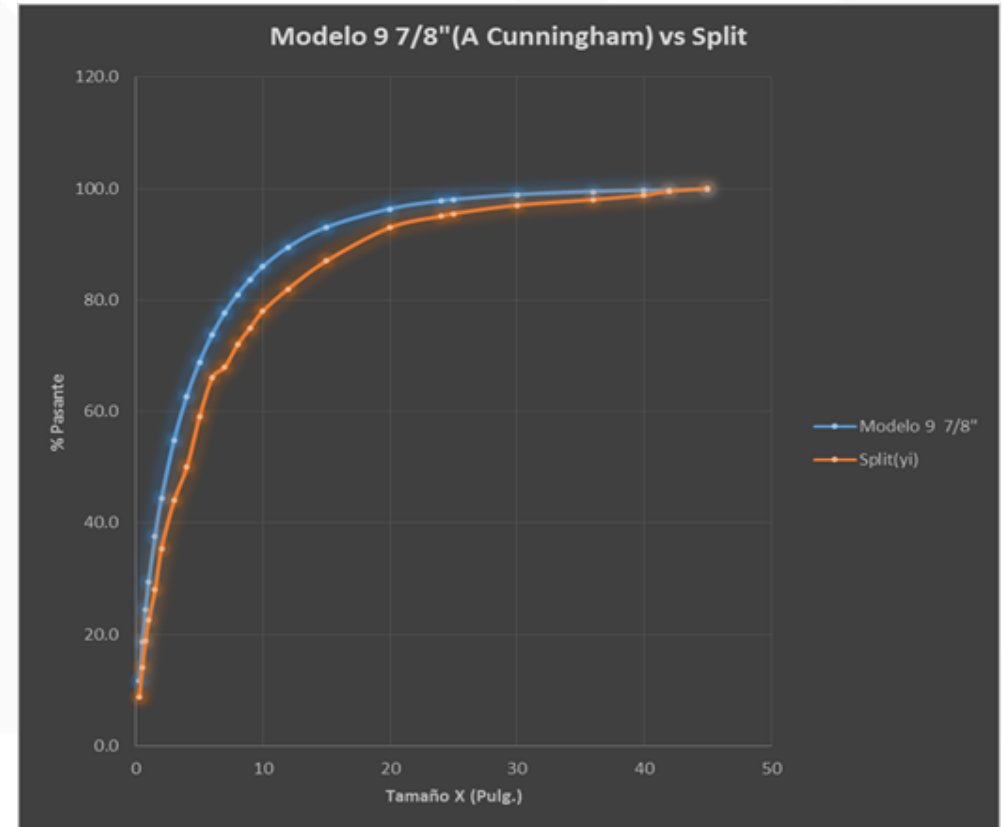
Diámetro del Pozo (mm)	251
Altura del banco (m)	10
Taco (m)	5
Sobre Perforación (m)	1
Burden (m)	4.98
Espaciamiento (m)	5.75
Densidad del explosivo (gr/cm ³)	1.2
Energía del Explosivo (Kj/Kg)	3530
Densidad de la roca (TM/m ³)	2.58
Módulo de Young: E(Gpa)	11.4
Resistencia compresiva: UCS (Mpa)	175.55
Factor de Roca (A Cunningham)	4.7
Exponente n	0.751

¿ Que hacer si el Factor de Roca utilizado, no refleja la medición de la fragmentación de la pila volada?



Comparación Split vs Modelo

X(Pulg.)	Modelo(yiest)	Split(yi)	$(y_i - y_m)^2$	$(y_i - y_{iest})^2$
0.25	11.57	8.7	3289.978	8.260
0.5	18.70	14.1	2699.668	21.136
0.75	24.47	18.9	2223.908	31.038
1	29.41	22.5	1897.328	47.791
1.5	37.64	28	1448.437	92.978
2	44.35	35.4	939.933	80.175
3	54.83	44	486.570	117.313
4	62.71	50	257.870	161.491
5	68.85	59	49.820	96.994
6	73.75	66	0.003	60.028
7	77.72	68	3.770	94.502
8	80.98	72	35.303	80.712
9	83.69	75	79.953	75.511
10	85.95	78	142.603	63.227
12	89.47	82	254.137	55.747
15	93.01	87	438.553	36.156
20	96.32	93	725.853	11.034
24	97.73	95	837.620	7.477
25	97.99	95.5	866.812	6.182
30	98.86	97	957.387	3.476
36	99.41	98	1020.270	1.992
40	99.61	98.8	1072.017	0.663
42	99.69	99.5	1118.345	0.035
45	99.77	100	1152.037	0.053

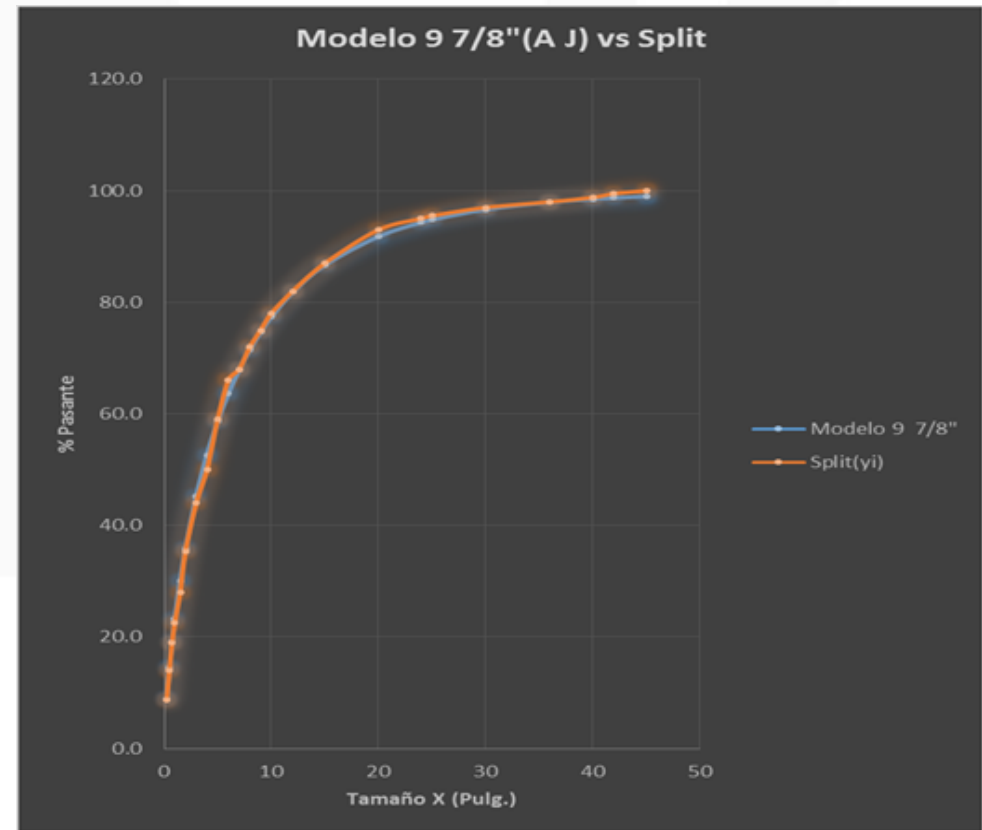


Los valores obtenidos son: SCE=1153.97, SCT=21998.18, $R^2 = 94.8\%$

¿ Que hacer si el Factor de Roca utilizado, no refleja la fragmentación de la pila volada?

El valor de A_j se obtiene al hacer mínima la suma de cuadrados del error (SCE) variando solo el Factor de Roca (A).

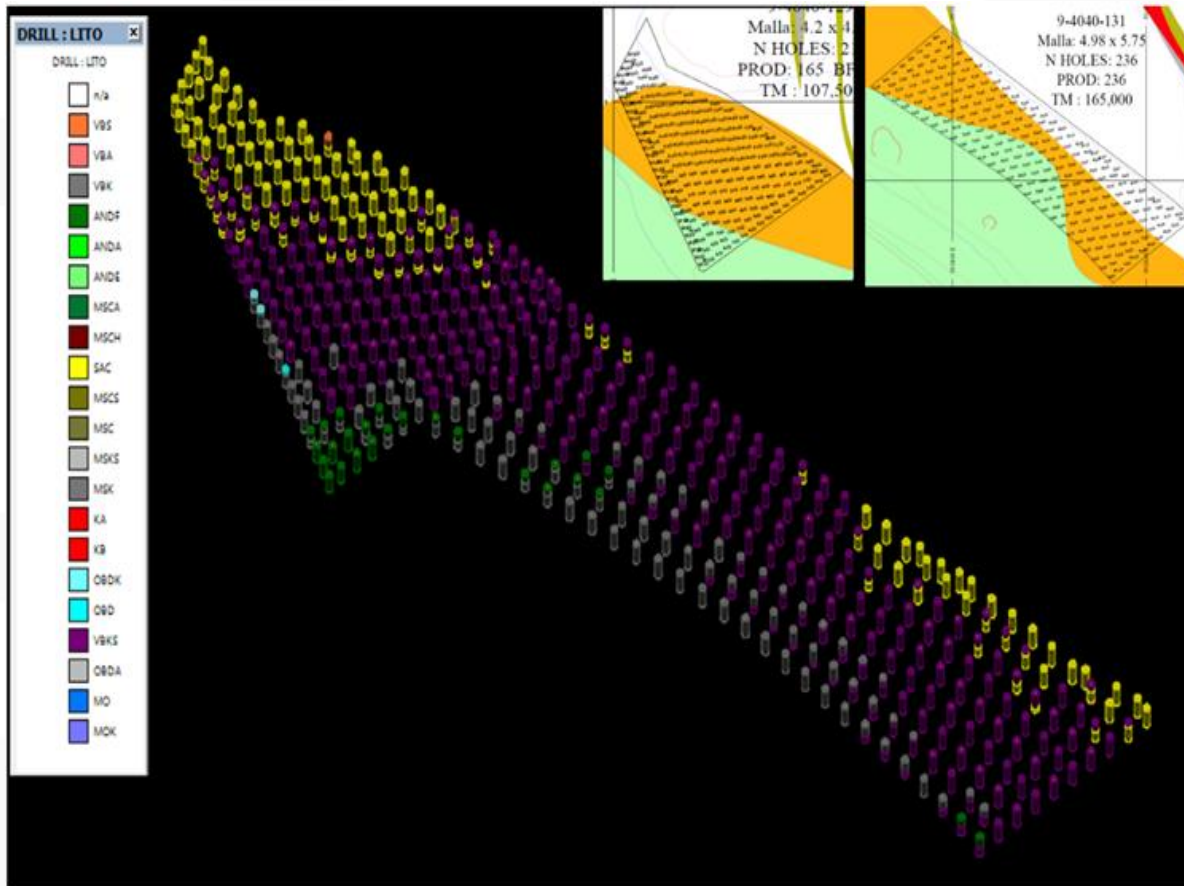
X(Pulg.)	Modelo(y_{iest})	Split(y_i)	$(y_i - y_m)^2$	$(y_i - y_{iest})^2$
0.25	8.90	8.7	3289.978	0.040
0.5	14.52	14.1	2699.668	0.174
0.75	19.16	18.9	2223.908	0.067
1	23.20	22.5	1897.328	0.490
1.5	30.09	28	1448.437	4.350
2	35.87	35.4	939.933	0.217
3	45.24	44	486.570	1.546
4	52.64	50	257.870	6.993
5	58.68	59	49.820	0.102
6	63.71	66	0.003	5.266
7	67.95	68	3.770	0.003
8	71.57	72	35.303	0.182
9	74.70	75	79.953	0.093
10	77.40	78	142.603	0.358
12	81.83	82	254.137	0.028
15	86.69	87	438.553	0.097
20	91.81	93	725.853	1.405
24	94.33	95	837.620	0.449
25	94.81	95.5	866.812	0.470
30	96.64	97	957.387	0.129
36	97.96	98	1020.270	0.002
40	98.52	98.8	1072.017	0.080
42	98.73	99.5	1118.345	0.588
45	99.00	100	1152.037	1.008



Los valores obtenidos son: SCE=24.13, SCT=21998.18, $R^2 = 99.98\%$

El Factor de Roca Ajustado (A_j) es 6.8.

Litología de los proyectos



En Mina Lagunas Norte se tiene una brecha volcánica poco común en el yacimiento, de matriz carbonosa con clastos de arenisca y limos, la cual presenta oquedades. Esta roca es de buena ley pero ha generado problemas en fragmentación llegando a tener tamaños X_{80} mayores a 10 pulgadas.

Diseño utilizando el Factor de Roca Ajustado (A_j) = 6.8.

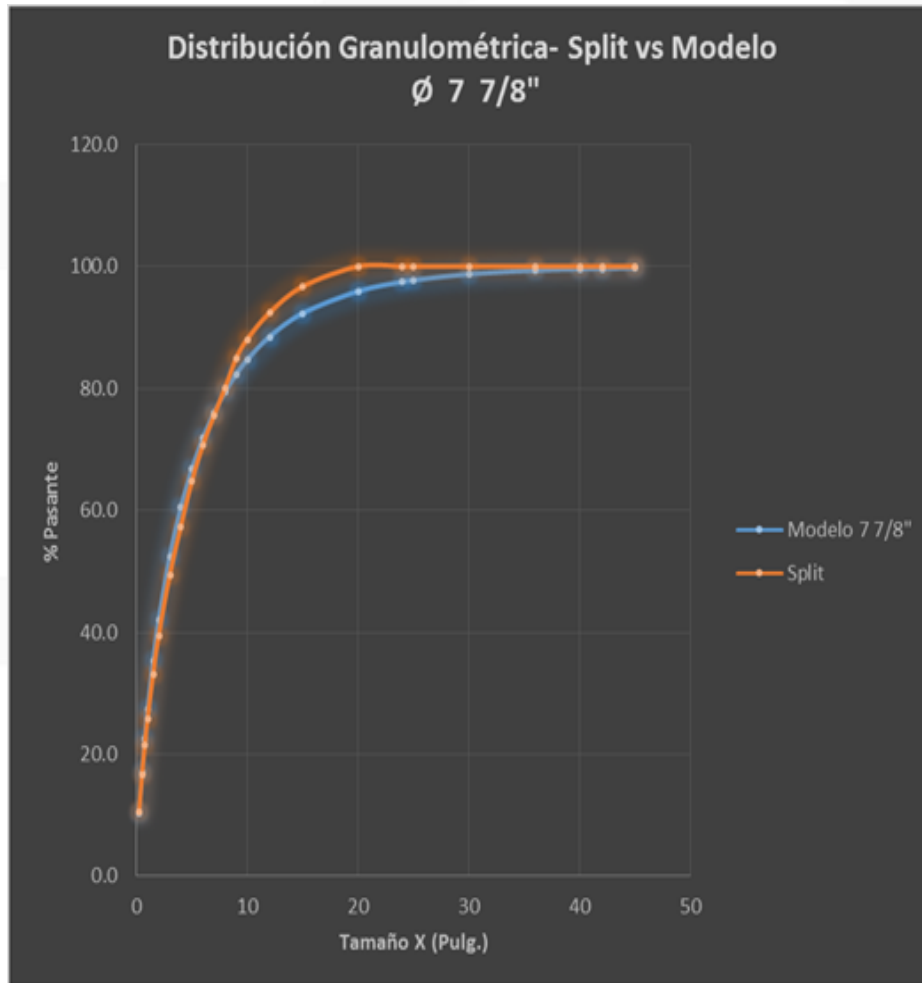
Parámetros de voladura	Diseño \varnothing 7 7/8"	Diseño \varnothing 9 7/8"
Diámetro del Pozo (mm)	200	251
Altura del banco (m)	10	10
Taco (m)	4.5	5
Sobre Perforación (m)	0.53	1
Burden (m)	4.2	4.98
Espaciamiento (m)	4.85	5.75
Densidad del explosivo (gr/cm ³)	1.2	1.2
Energía del Explosivo (Kj/Kg)	3530	3530
Densidad de la roca (TM/m ³)	2.58	2.58
Módulo de Young: E(Gpa)	11.4	11.4
Resistencia compresiva: UCS (Mpa)	175.55	175.55
Exponente n	0.77	0.75

Costos de Perforación

Diseño	\$/m	\$/m ³
Costo perf-9 7/8"	13.51	0.47
Costo perf-7 7/8"	10.9	0.54

Simulación

Diseño	X ₈₀ simulado	CP&V (\$/m ³)	Costo (\$/Taladro)
Modelo 7 7/8"	8.2	1.43	301.668
Modelo 9 7/8"	11.1	1.47	433.475



El X_{80} estimado por el **Sistema Split es de 8"**.

El Modelo Predictivo de Fragmentación para Mina Lagunas Norte **usando el Factor de Roca Ajustado(A_f)** dio como resultado un **X_{80} de 8.2"**.

El diseño inicial estima un costo **de 1.47 $\$/m^3$** en comparación a **1.43 $\$/m^3$** con el nuevo diseño, mejorando la fragmentación del material volado.

Fotografía de los Proyectos 4040-129/4040-131



8.- Conclusiones



- El modelo Predictivo de Fragmentación desarrollado presenta **exponentes significativos** con **intervalos de confianza del 95%**, esto se traduce a que el modelo es confiable.
- Si no se tiene un **sistema de medición confiable**, no es posible modelar la voladura.
- El modelo Predictivo gana fiabilidad en el tiempo, es necesario analizar voladuras, incorporarlas al modelo generando variabilidad en los datos.
- El cálculo del Factor Forma (ni) le da un **sentido físico al modelo**, la uniformidad de la granulometría **no debe depender** solo de datos geométricos.
- Utilizar el modelo Matriz de Decisión, es una propuesta innovadora, genera **grandes ahorros** en la operación garantizando **una fragmentación sostenible, agregando valor al cliente.**

9.- Recomendación



Las percepciones “*son buenas*”, pero tienen limitaciones.

Debemos *medir, medir, medir*, lo que no se mide no se puede planificar, debido a que *no se puede controlar*.

GRACIAS.

