

# Programación Lineal para la Optimización del Llenado de Botaderos

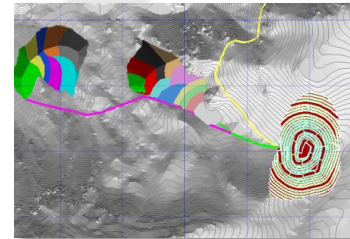


**Santiago, Agosto  
2012**



# Proceso de Planificación

- Uno de los objetivos de la planificación de largo plazo, sino el mas importante, es el de determinar la mejor secuencia de extracción y alimentación a planta, de tal forma de maximizar el NPV.
- El área de planificación es responsable de definir la forma y mejor ubicación física de los botaderos de estéril y otras obras necesarias para el desarrollo normal de la mina.
- Debe definir la secuencia de llenado de los botaderos basándose en criterios como distancias, tiempos, costos, medio ambiente, disponibilidad de equipos de apoyo, etc.



Esto ultimo es lo que muchas veces no se hace con el debido detalle o no se le da la importancia que tiene.



# Definición del Problema

- ❖ El llenado de los botaderos debe realizarse de manera racional, considerando que los tiempos de ciclo en el corto plazo, afectarán a los de largo plazo.
- ❖ En muy pocas ocasiones se establece la secuencia de llenado de un botadero, y menos aun, una secuencia optima.
- ❖ Estas son, normalmente, decisiones del día a día, y que quedan en manos de los jefes de turno o planificadores de corto plazo.
- ❖ Por tanto, es necesario entregar una guía al corto plazo para que pueda establecer los destinos respecto del plan de largo plazo, y sobre este tomar las decisiones del día a día.





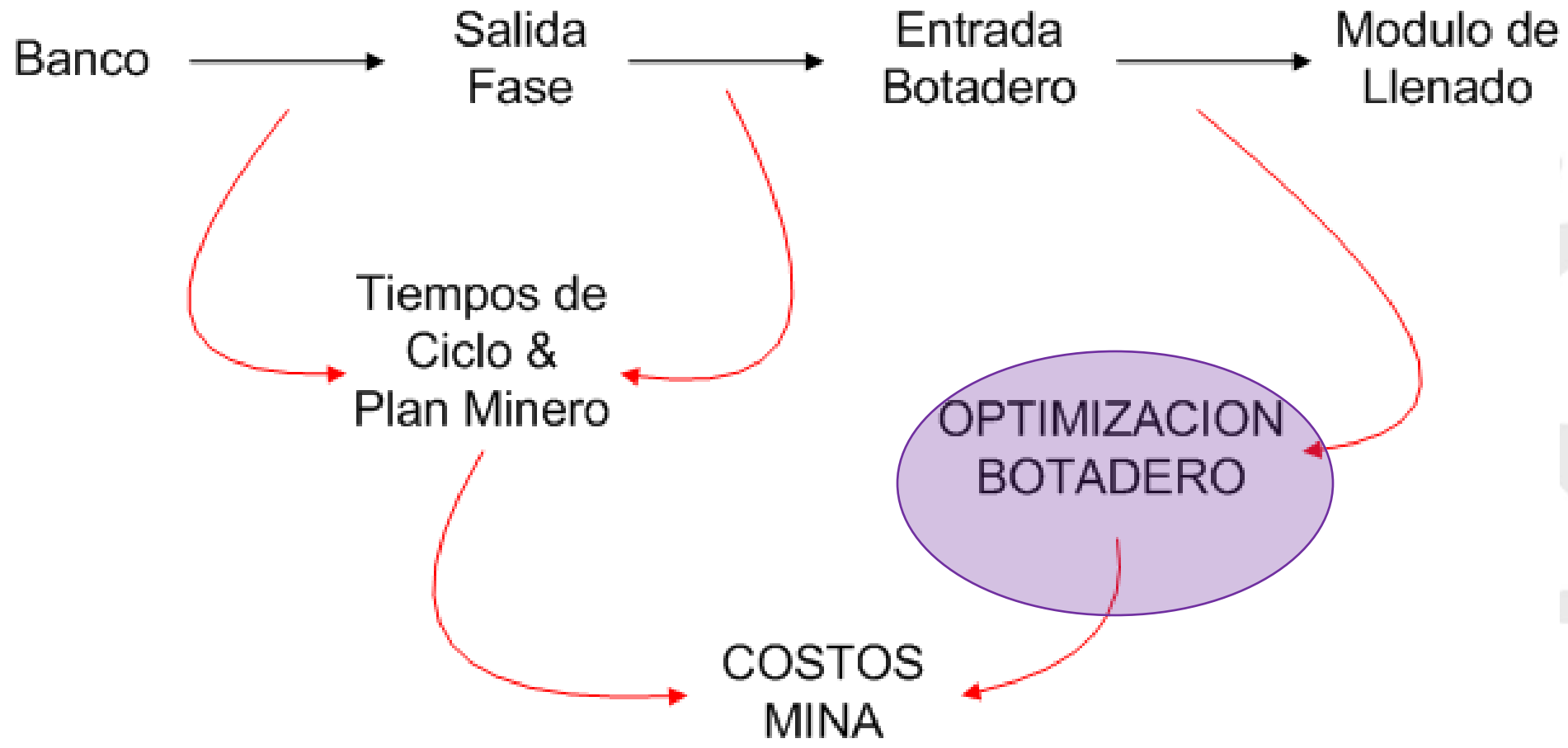
# Objetivos de la Herramienta

- ❖ Objetivo Principal: MINIMIZAR LOS TIEMPOS DE CICLO DE TRANSPORTE (Costos, Neumáticos, Polvo, etc.).
- ❖ Obtener la distribución de tonelajes optima para el llenado de cada piso del botadero.
- ❖ Disponer de una herramienta para realizar el cálculo de tiempos de transporte con mayor precisión.
- ❖ Desarrollar un plan de llenado que pueda ser administrado de manera fácil y sencilla en el corto plazo, y que esté alineado con el plan de largo plazo.



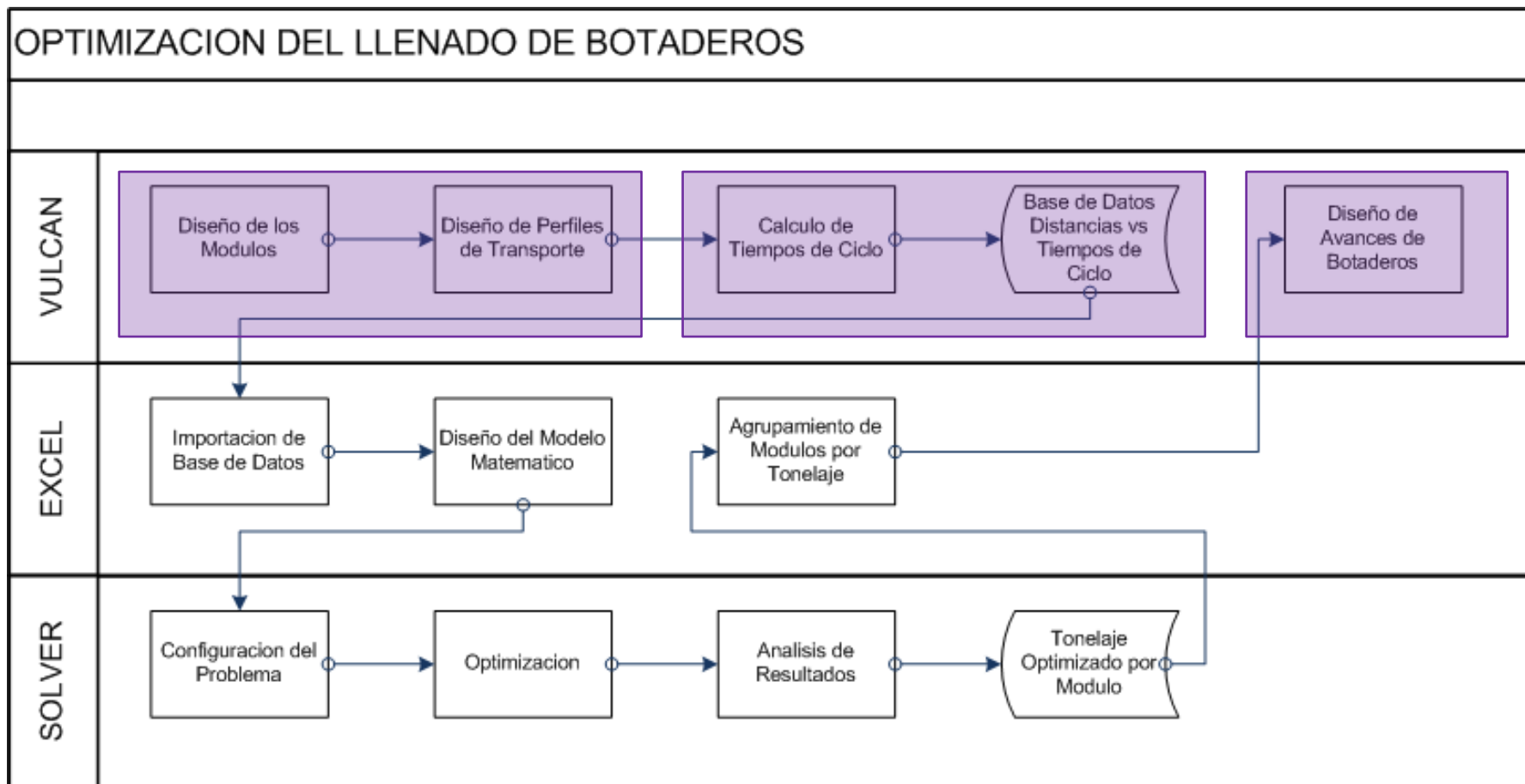


# Donde Opera esta Herramienta?



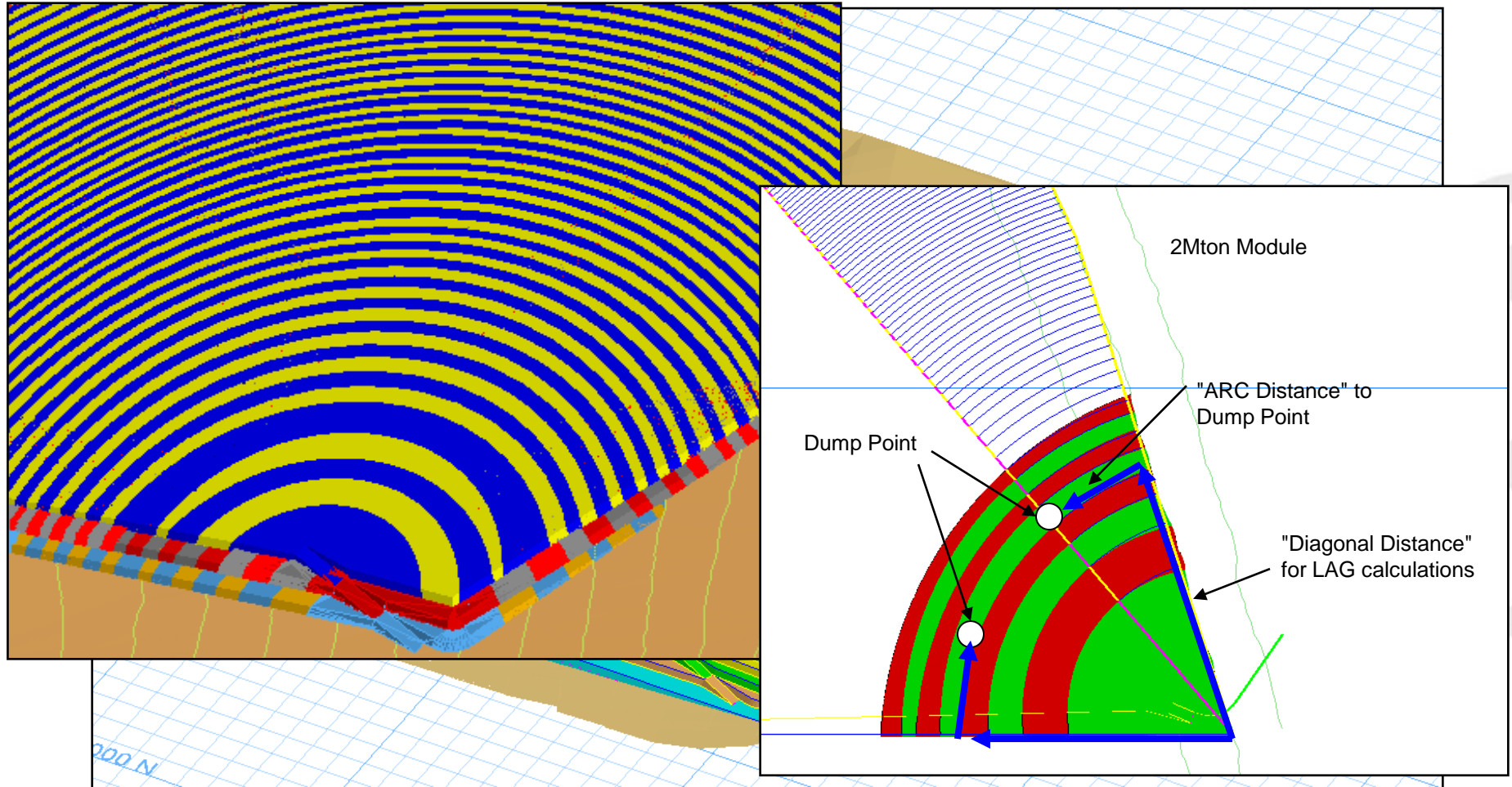


# Secuencia de Trabajo





# Perfil de Transporte y Módulos de Llenado





# Crear Base de Datos de Rutas y Tiempos

- Mediante la utilización de herramientas CAD en Vulcan, se diseñan las rutas de transporte desde cada uno de los bancos hasta el modulo de llenado.
- Con el modulo HAULAGE PROFILE, se obtienen los valores de distancias de transporte y tiempos de ciclo para cada tramo.

	Object	Distance	Units	Loaded min	Empty min	Total min
DISTANCIA HORIZONTAL RECTA	Modulo 01	551.21	m	1.07	0.83	1.95
	Modulo 02	141.94	m	0.28	0.21	0.54
	Modulo 03	96.42	m	0.19	0.14	0.38
	Modulo 04	74.79	m	0.15	0.11	0.31
	Modulo 05	76.93	m	0.15	0.12	0.31
	Modulo 06	52.67	m	0.10	0.08	0.23
	Modulo 07	60.51	m	0.12	0.09	0.26
	Modulo 08	41.56	m	0.08	0.06	0.19
	Modulo 09	50.48	m	0.10	0.08	0.22
	Modulo 10	47.77	m	0.09	0.07	0.21
	Modulo 11	39.36	m	0.08	0.06	0.19
	Modulo 12	42.90	m	0.08	0.06	0.20
	Modulo 13	33.77	m	0.07	0.05	0.17
	Modulo 14	35.89	m	0.07	0.05	0.17
	Modulo 15	32.59	m	0.06	0.05	0.16
	Modulo 16	31.70	m	0.06	0.05	0.16
	Modulo 17	31.61	m	0.06	0.05	0.16
	Modulo 18	29.64	m	0.06	0.04	0.15
	Modulo 19	28.93	m	0.06	0.04	0.15
	Modulo 20	27.42	m	0.05	0.04	0.14
	Modulo 21	27.09	m	0.05	0.04	0.14
	Modulo 22	25.88	m	0.05	0.04	0.14
	Modulo 23	26.24	m	0.05	0.04	0.14
DISTANCIA HORIZONTAL EN ARCO	Arco 01	224.35	m	0.44	0.34	0.82
	Arco 02	281.98	m	0.55	0.42	1.02
	Arco 03	321.18	m	0.62	0.48	1.16
	Arco 04	351.64	m	0.68	0.53	1.26
	Arco 05	382.93	m	0.74	0.57	1.37
	Arco 06	404.38	m	0.79	0.61	1.44
	Arco 07	428.99	m	0.83	0.64	1.53
	Arco 08	445.79	m	0.87	0.67	1.59
	Arco 09	466.42	m	0.91	0.70	1.66
	Arco 10	485.78	m	0.94	0.73	1.72
	Arco 11	501.86	m	0.98	0.75	1.78
	Arco 12	519.25	m	1.01	0.78	1.84
	Arco 13	533.01	m	1.04	0.80	1.89
	Arco 14	547.61	m	1.06	0.82	1.94
	Arco 15	560.91	m	1.09	0.84	1.98
	Arco 16	573.72	m	1.12	0.86	2.03
	Arco 17	586.66	m	1.14	0.88	2.07
	Arco 18	598.68	m	1.16	0.90	2.11
	Arco 19	610.41	m	1.19	0.92	2.15
	Arco 20	621.58	m	1.21	0.93	2.19
	Arco 21	632.60	m	1.23	0.95	2.23
	Arco 22	643.11	m	1.25	0.96	2.26
	Arco 23	653.80	m	1.27	0.98	2.30





# Distancias de Transporte a Cada Modulo

		Acumulado Espesor Modulo (para desfase)					Distancia Recorrida por Modulo				
		1,730	1,745	1,760	1,775	1,790	1,730	1,745	1,760	1,775	1,790
Mod00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mod01	2,000	551	300	358	286	421	913	692	938	1,064	1,439
Mod02	4,000	693	406	458	366	496	1,113	853	1,076	1,197	1,563
Mod03	6,000	790	489	531	428	548	1,248	968	1,177	1,300	1,650
Mod04	8,000	864	562	601	504	604	1,353	1,070	1,276	1,426	1,743
Mod05	10,000	941	632	658	600	659	1,462	1,167	1,354	1,585	1,833
Mod06	12,000	994	692	710	648	708	1,536	1,251	1,427	1,666	1,915
Mod07	14,000	1,054	746	759	695	756	1,621	1,326	1,495	1,744	1,994
Mod08	16,000	1,096	810	803	741	798	1,679	1,416	1,556	1,819	2,065
Mod09	18,000	1,147	855	848	776	832	1,750	1,477	1,619	1,878	2,121
Mod10	20,000	1,194	906	890	822	870	1,818	1,549	1,677	1,953	2,183
Mod11	22,000	1,234	951	930	854	907	1,873	1,611	1,734	2,007	2,245
Mod12	24,000	1,277	999	965	892	946	1,933	1,677	1,781	2,069	2,310
Mod13	26,000	1,310	1,044	1,005	927	980	1,981	1,740	1,838	2,128	2,366
Mod14	28,000	1,346	1,092	1,041	959	1,014	2,031	1,807	1,888	2,182	2,423
Mod15	30,000	1,379	1,128	1,072	993	1,039	2,077	1,858	1,930	2,238	2,465
Mod16	32,000	1,411	1,163	1,106	1,029	1,073	2,122	1,906	1,977	2,297	2,521
Mod17	34,000	1,442	1,205	1,136	1,055	1,104	2,166	1,965	2,020	2,340	2,572
Mod18	36,000	1,472	1,248	1,168	1,079	1,133	2,208	2,024	2,064	2,381	2,620
Mod19	38,000	1,501	1,284	1,201	1,107	1,155	2,249	2,075	2,109	2,426	2,657
Mod20	40,000	1,528	1,320	1,229	1,130	1,189	2,287	2,125	2,149	2,464	2,713
Mod21	42,000	1,555	1,355	1,260	1,152	1,218	2,325	2,173	2,192	2,502	2,761
Mod22	44,000	1,581	1,394	1,288	1,183	1,243	2,362	2,227	2,230	2,553	2,803
Mod23	46,000	1,607	1,426	1,315	1,212	1,267	2,399	2,272	2,269	2,601	2,843



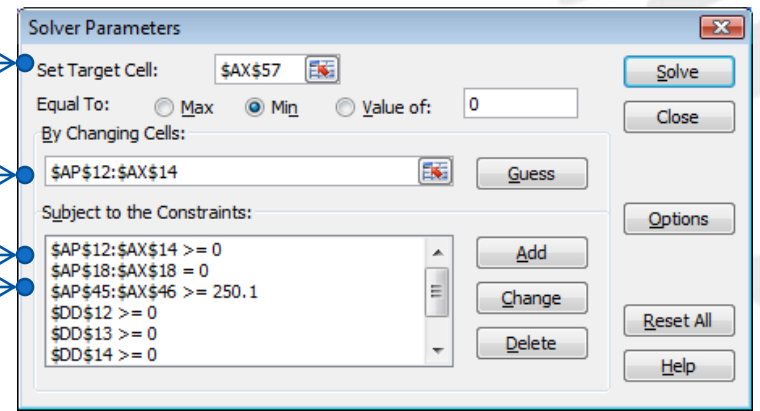
# Tiempos de Ciclo a Cada Modulo

		Ciclo Incremental Recto					Ciclo Arco					Ciclo Acumulado Modulo				
		1,730	1,745	1,760	1,775	1,790	1,730	1,745	1,760	1,775	1,790	1,730	1,745	1,760	1,775	1,790
Mod00	-	0.33	1.02	1.02	1.02	1.02	-	-	-	-	-	0.33	1.35	2.36	3.38	4.40
Mod01	2,000	1.32	0.72	0.86	0.69	1.01	0.54	0.25	0.34	0.45	0.67	2.19	2.32	3.56	4.52	6.07
Mod02	4,000	0.34	0.25	0.24	0.19	0.18	0.68	0.38	0.43	0.58	0.78	2.67	2.70	3.89	4.84	6.37
Mod03	6,000	0.23	0.20	0.17	0.15	0.13	0.77	0.46	0.50	0.68	0.87	3.00	2.98	4.14	5.09	6.58
Mod04	8,000	0.18	0.18	0.17	0.18	0.13	0.84	0.53	0.57	0.80	0.96	3.25	3.22	4.37	5.39	6.81
Mod05	10,000	0.18	0.17	0.13	0.23	0.13	0.92	0.59	0.62	0.95	1.04	3.51	3.46	4.56	5.77	7.02
Mod06	12,000	0.13	0.14	0.13	0.12	0.12	0.97	0.65	0.67	1.03	1.12	3.69	3.66	4.74	5.96	7.22
Mod07	14,000	0.15	0.13	0.12	0.11	0.11	1.03	0.70	0.71	1.10	1.20	3.89	3.84	4.90	6.15	7.41
Mod08	16,000	0.10	0.16	0.11	0.11	0.10	1.07	0.76	0.75	1.17	1.26	4.03	4.05	5.05	6.33	7.58
Mod09	18,000	0.12	0.11	0.11	0.09	0.08	1.12	0.80	0.80	1.23	1.32	4.20	4.20	5.20	6.47	7.71
Mod10	20,000	0.11	0.12	0.10	0.11	0.09	1.17	0.85	0.84	1.30	1.38	4.36	4.37	5.34	6.65	7.86
Mod11	22,000	0.09	0.11	0.10	0.08	0.09	1.20	0.89	0.87	1.35	1.43	4.50	4.52	5.47	6.78	8.01
Mod12	24,000	0.10	0.11	0.08	0.09	0.09	1.25	0.94	0.91	1.41	1.50	4.64	4.68	5.59	6.93	8.16
Mod13	26,000	0.08	0.11	0.10	0.09	0.08	1.28	0.98	0.94	1.47	1.55	4.75	4.83	5.72	7.07	8.30
Mod14	28,000	0.09	0.12	0.09	0.08	0.08	1.31	1.03	0.98	1.52	1.60	4.88	4.99	5.84	7.20	8.44
Mod15	30,000	0.08	0.09	0.07	0.08	0.06	1.35	1.06	1.01	1.57	1.64	4.99	5.11	5.94	7.34	8.54
Mod16	32,000	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	1.38	1.09	1.04	1.63	1.70	5.09	5.23	6.06	7.48	8.67
Mod17	34,000	0.08	0.10	0.07	0.06	0.07	1.41	1.13	1.07	1.67	1.75	5.20	5.37	6.16	7.58	8.79
Mod18	36,000	0.07	0.10	0.08	0.06	0.07	1.44	1.17	1.10	1.71	1.79	5.30	5.51	6.26	7.68	8.91
Mod19	38,000	0.07	0.09	0.08	0.07	0.05	1.46	1.21	1.13	1.75	1.83	5.40	5.64	6.37	7.79	9.00
Mod20	40,000	0.07	0.09	0.07	0.05	0.08	1.49	1.24	1.15	1.79	1.88	5.49	5.75	6.47	7.88	9.13
Mod21	42,000	0.07	0.08	0.07	0.05	0.07	1.52	1.27	1.18	1.82	1.93	5.58	5.87	6.57	7.97	9.25
Mod22	44,000	0.06	0.09	0.07	0.07	0.06	1.54	1.31	1.21	1.87	1.97	5.67	6.00	6.66	8.09	9.35
Mod23	46,000	0.06	0.08	0.07	0.07	0.06	1.57	1.34	1.24	1.92	2.00	5.76	6.11	6.76	8.21	9.44

# Parámetros de la Optimización

		Per 1	Per 2	Per 3	Per 4	Per 5	Per 6	Per 7	Per 8 a	Per 8 b
Tonnage by Levels										
WASTE to DUMP		7,903	7,061	7,180	6,209	6,293	6,410	6,063	4,947	2,736
173,367	nv. 1130	1,576	919	396	1,943	2,370	2,909	3,599	1,972	1,109
140,815	nv. 1145	5,527	4,339	3,479	2,848	3,631	2,263	2,190	1,581	1,159
161,923	nv. 1160	800	1,803	3,305	1,417	2,292	3,237	2,276	994	489
165,150	nv. 1175									
171,749	nv. 1190									
	TOTAL	7,903	7,061	7,180	6,209	6,293	6,410	6,063	4,947	2,736
DIFFERENCE										
ACTUAL	TONELAJE ACUMULADO EN CADA PISO. ESTO SIRVE PARA LA BUSQUEDA DE DISTANCIA DE AVANCE Y DESFASE ENTRE PISOS									
13,340	nv. 1130	14,916	15,836	16,232	18,175	20,545	23,454	27,053	29,025	30,134
1,815	nv. 1145	7,342	11,681	15,159	18,008	21,639	23,902	26,092	27,673	28,832
-	nv. 1160	800	2,603	5,908	7,325	9,618	12,855	15,131	16,125	16,614
-	nv. 1175	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	nv. 1190	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15,155	Total	23,058	30,119	37,300	43,508	51,801	60,211	68,276	72,823	75,581
DISTANCIA TOTAL RECORRIDA (MODULO ANTERIOR + PROPORCIONAL MODULO ACTUAL+RAMPA INGRESO)										
nv. 1130		1,657	1,676	1,706	1,774	1,844	1,922	2,014	2,061	2,092
nv. 1145		908	1,104	1,251	1,360	1,466	1,538	1,624	1,662	1,699
nv. 1160		434	718	886	964	1,055	1,179	1,249	1,288	1,299
nv. 1175		-	-	-	-	-	-	-	-	-
nv. 1190		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ave.		605	661	683	884	936	987	1,098	1,144	1,166
DISTANCIA "DIAGONAL" PARA EL CONTROL DEL DESFASE ENTRE NIVELES										
nv. 1130		1,074	1,093	1,102	1,151	1,205	1,329	1,363	1,381	
nv. 1145		538	682	783	855	943	996	1,046	1,084	1,107
nv. 1160		143	388	527	577	647	731	784	806	817
nv. 1175		-	-	-	-	-	-	-	-	-
nv. 1190		-	-	-	-	-	-	-	-	-
DESFASE ENTRE NIVELES (> 250m)										
nv. 1130		-	-	-	-	-	-	-	-	-
nv. 1145		536	410	319	296	262	269	283	279	274
nv. 1160		394	294	256	277	296	265	262	278	290
nv. 1175		-	-	-	-	-	-	-	-	-
nv. 1190		-	-	-	-	-	-	-	-	-
PREMINE CYCLE TIME TO DUMP POINT										
3.82	nv. 1130	3.95	4.02	4.05	4.22	4.40	4.60	4.82	4.93	4.99
2.23	nv. 1145	3.14	3.63	3.96	4.20	4.49	4.67	4.84	4.97	5.04
-	nv. 1160	2.84	3.66	4.12	4.29	4.52	4.80	4.98	5.05	5.09
-	nv. 1175	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	nv. 1190	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tmpo. Promedio Periodo		3.27	3.69	4.04	4.23	4.48	4.70	4.87	4.97	5.03
Tmpo. Acumulado		3.27	3.47	3.65	3.78	3.94	4.08	4.20	4.26	4.30

Tonelaje optimizado de cada modulo para cumplir con la función objetivo  
 Restricciones de tonelaje



Solver Parameters

Set Target Cell:

Equal To:  Max  Min  Value of:

By Changing Cells:

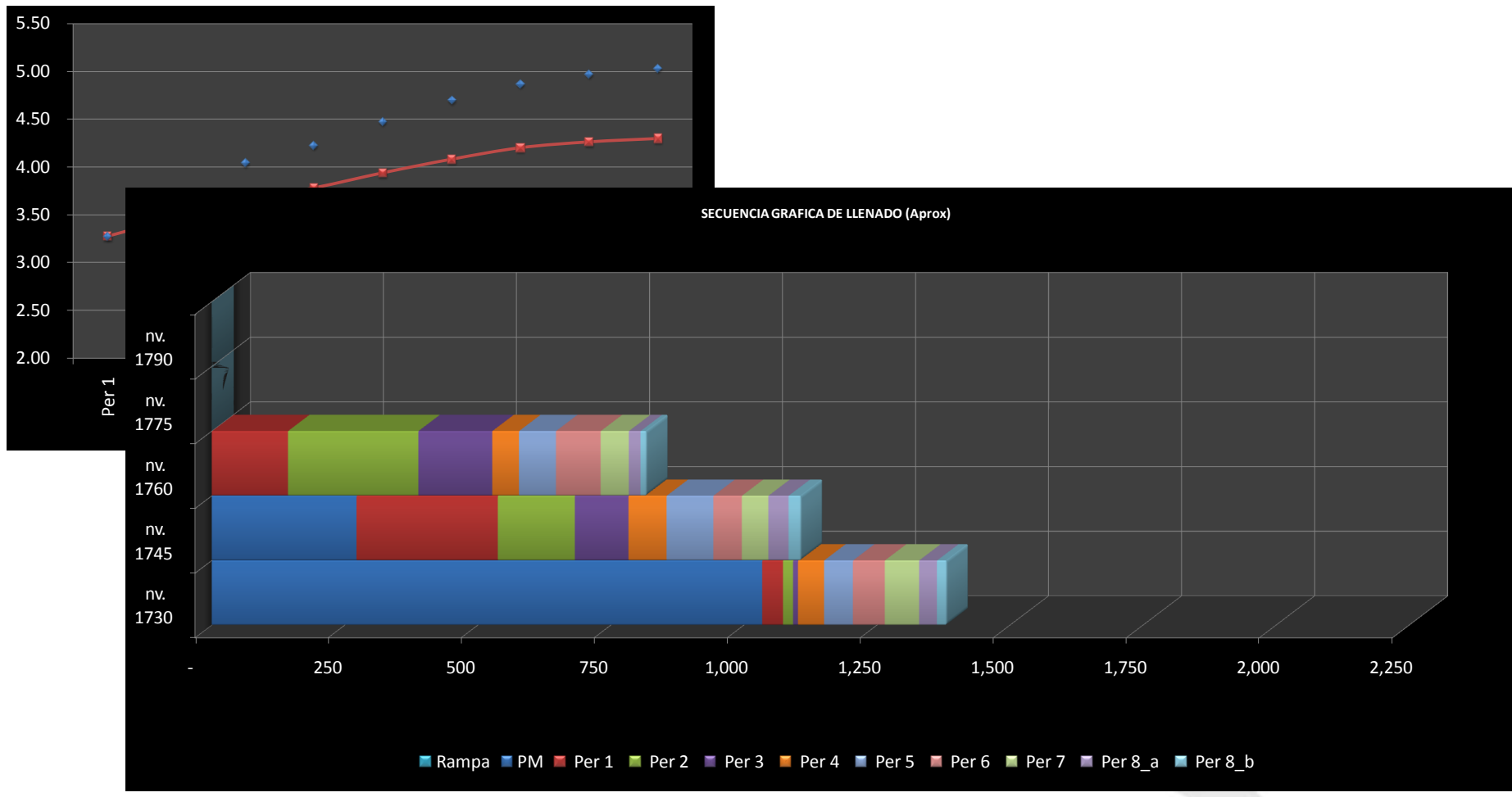
Subject to the Constraints:

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Restricciones de desfase entre niveles de vaciado  
 Función Objetivo: Minimizar el tiempo de ciclo acumulado

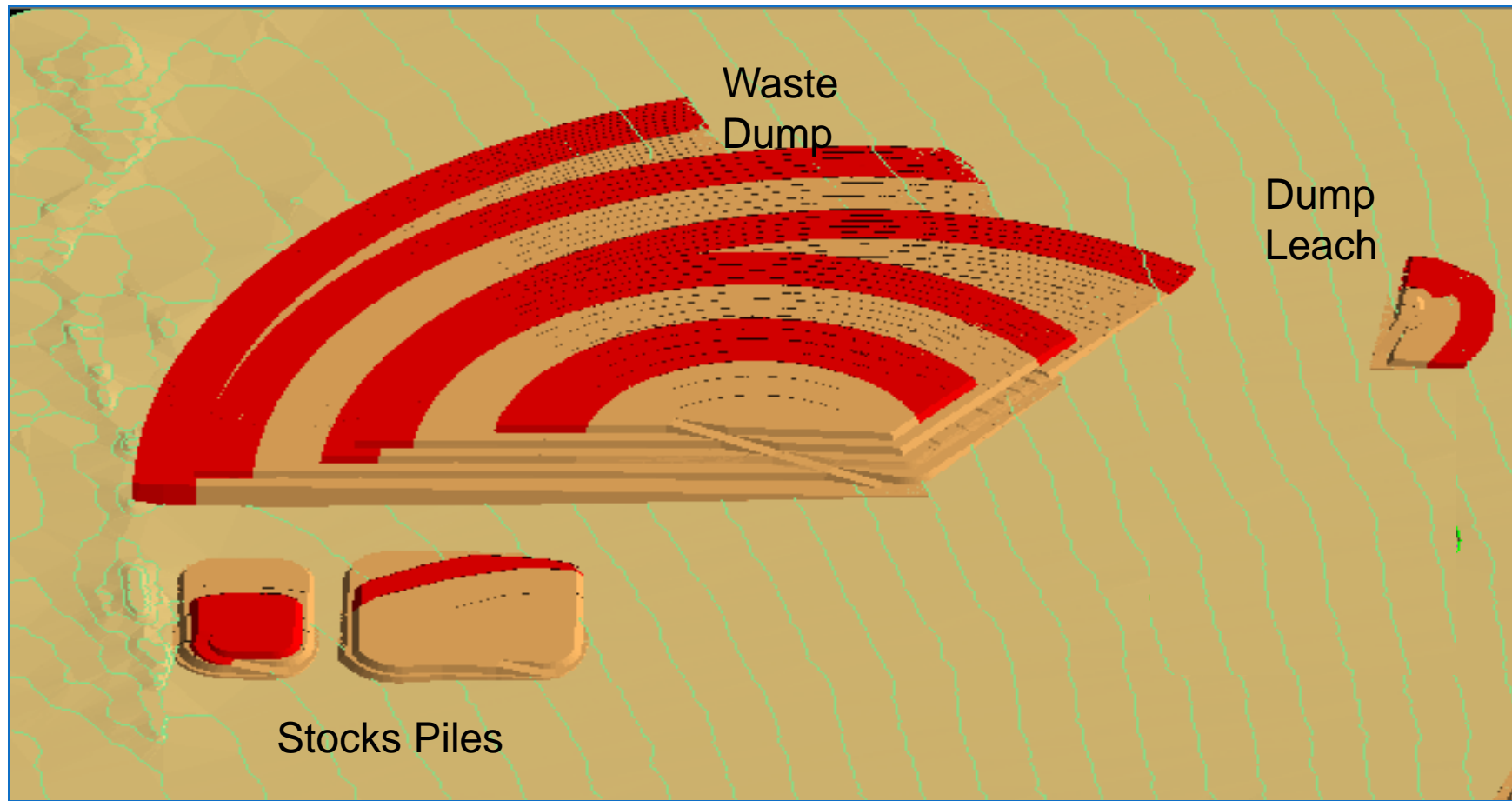


# Resultados Gráficos en Excel



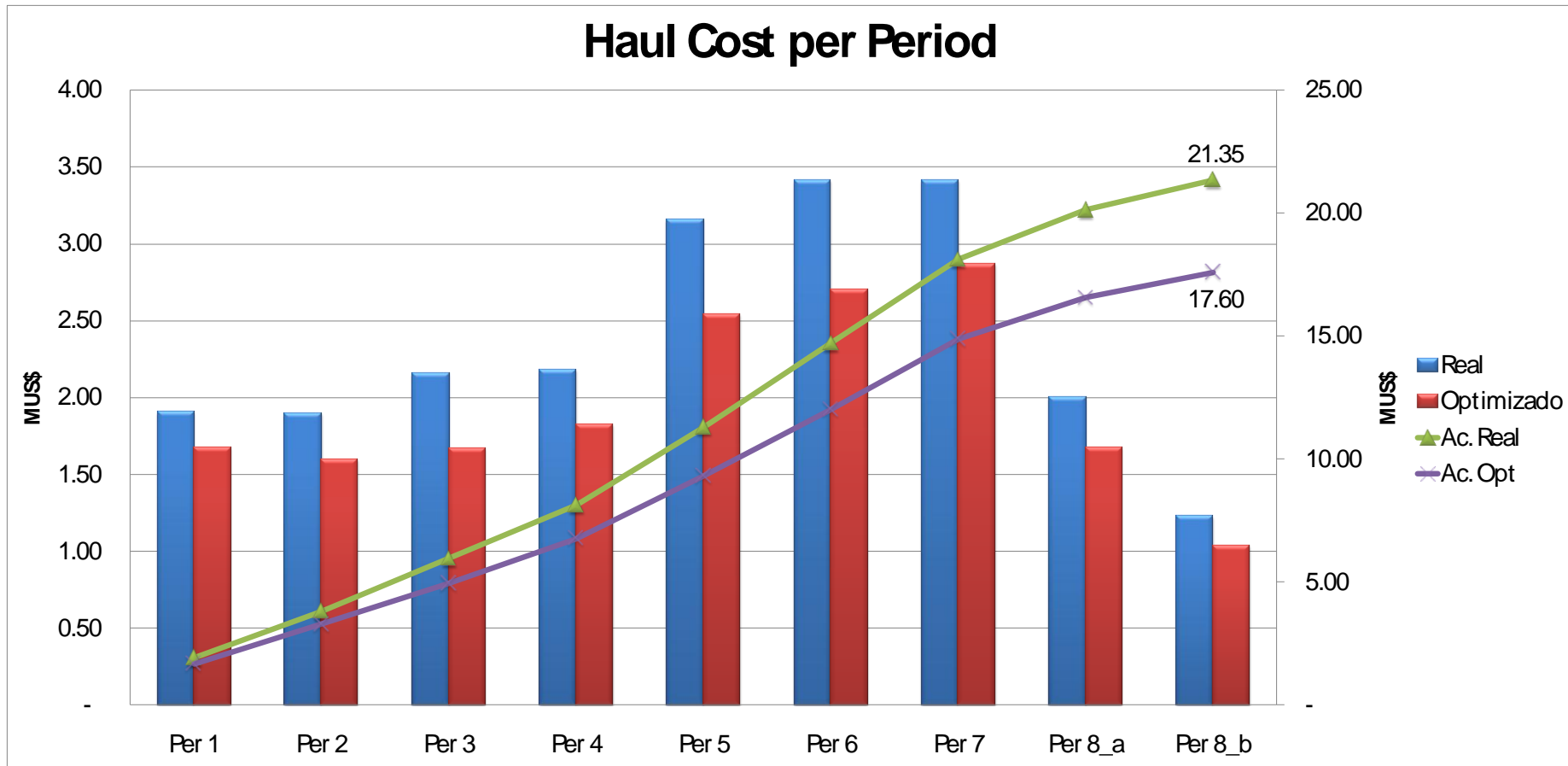


# Resultados Gráficos en Vulcan





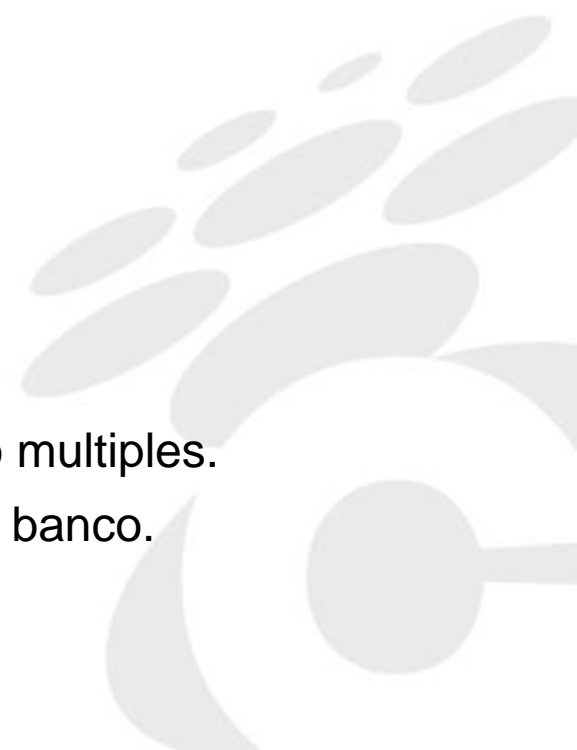
# Comparación Caso Real





# Plus & Deltas

- + Fácil uso en Excel.
  - + Abierto a nuevas restricciones.
  - + Evaluación de múltiples alternativas.
  - + Aplicable a Stocks, Pilas ROM, Botaderos, etc.
- 
- Δ Función objetivo única → Macro para funciones objetivo multiples.
  - Δ Solo dentro del botadero → Se puede modelar desde el banco.





# Conclusiones

- ❖ La Herramienta entrega en secuencia de llenado OPTIMA, basado en la disminución de los tiempos de transporte distribuyendo espacialmente los materiales de manera satisfactoria.
- ❖ La optimización respeta las condiciones de desfase entre pisos del botadero. En general cumple con todas las restricciones.
- ❖ Permite disminuir el tiempo de respuesta para alternativas de planes mineros.
- ❖ Definir una secuencia de llenado de los botaderos permitirá establecer un programa para la preparación de las plataformas, con lo cual se pueden calcular los requerimientos de equipos con antelación.

