

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**APLICACIÓN DE SIMULACIÓN DISCRETA EN LA ESTIMACIÓN  
DEL NÚMERO DE CAMIONES EN UNA MINA DE COBRE A TAJO  
ABIERTO**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas**

**AUTORES:**

Gabriel Alejandro Bujaico Morante

Diego Fernando Huayanca Escobar

**ASESOR:**

Dr. Kiko Alexi Delgado Villanueva

Lima, septiembre del 2022

### Informe de Similitud

Yo, DELGADO VILLANUEVA KIKO ALEXI,

docente de la Facultad de CIENCIAS E INGENIERÍA de la Pontificia

Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

APLICACIÓN DE SIMULACIÓN DISCRETA EN LA ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CAMIONES EN UNA MINA DE COBRE A TAJO ABIERTO,

del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as)

Gabriel Alejandro Bujaico Morante,  
Diego Fernando Huayanca Escobar,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 1%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 11/01/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 20 de enero de 2023

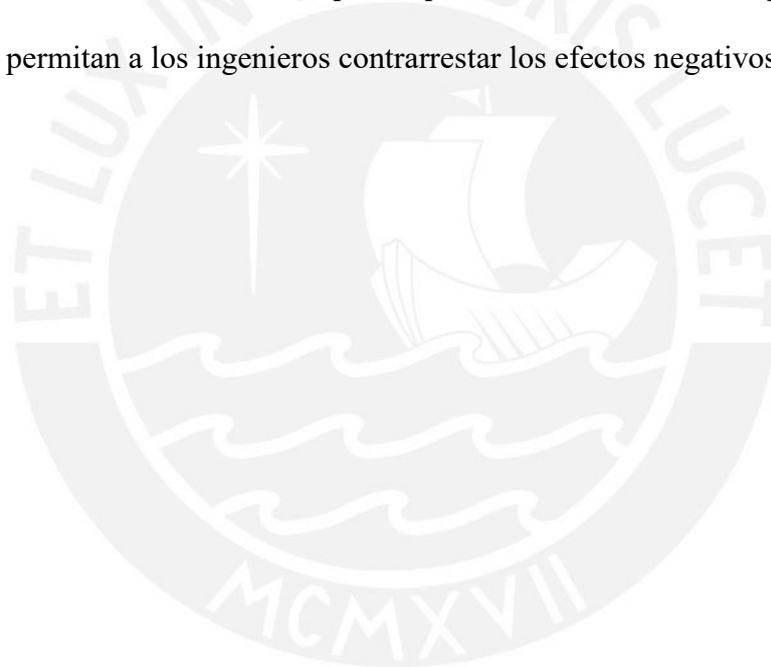
Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Delgado Villanueva Kiko Alexi</u>	
DNI: 42797374	Firma 
ORCID: 0000-0003-0470-8535	

## RESUMEN

Esta tesis busca proponer una metodología de simulación de eventos discretos para el cálculo de flota de camiones necesaria para el cumplimiento del plan de producción anual incorporando variables aleatorias presentes en el ciclo de transporte que reflejen las condiciones operativas reales de la mina. Para el presente documento se tomó como caso de estudio una operación minera que explota cobre a tajo abierto y busca expandir sus operaciones desde las 100,000 hasta las 140,000 toneladas por día. El plan anual desarrollado incluye incorporar más camiones a su flota existente de 29 camiones, para ello, en la unidad se emplea una metodología de estimación de flota determinística utilizando los valores medios de la capacidad de carguío y de tiempos fijos en el ciclo de transporte. Sin embargo, dado que la adición de cada camión significa una inversión considerable de dinero, es necesario evaluar los criterios considerados y afinar ciertas variables que, en definitiva, afectan el cálculo y permitan cumplir con los objetivos de producción establecidos por la compañía.

En el presente documento se compara la aplicación de modelos estocásticos y determinísticos. En ambos casos se emplea el software *Arena* para modelar el proceso de carguío y acarreo. En primer lugar, se calibra el modelo estocástico con los parámetros recopilados de los procesos mencionados y, posterior a la verificación de los resultados producidos, se procede a replicar los doce meses del plan anual. Asimismo, se emplea el algoritmo de Dijkstra para estimar el tiempo promedio de los viajes de ida y regreso, y toda la información obtenida de las simulaciones es procesada con el lenguaje de programación Python en el IDE llamado Jupyter Notebook. Posterior al procesamiento de datos, se calculan diversos indicadores de interés tales como las horas trabajadas por la flota de camiones en el mes, la productividad de estos, el tiempo promedio del ciclo de acarreo, la distancia promedio recorrida. Todos los anteriores indicadores ayudan a explicar el número de camiones requeridos mes a mes.

Finalmente, el software Arena permitió replicar el comportamiento de los parámetros del sistema de carguío y acarreo, y ello se vio reflejado en los resultados de las simulaciones del modelo estocástico. Asimismo, los resultados obtenidos comprueban que la aplicación de modelos estocásticos impactó en la estimación del número de camiones dado que la variabilidad de las funciones afectó cada uno de los parámetros de la simulación. Así, se obtuvo que es necesario incorporar 13 camiones desde diciembre del 2022 hasta el final del año 2023 para cumplir con la producción de cobre planificada. Además, mediante la aplicación de simulaciones discretas se observa que se generan mayores colas en los equipos de carguío dada la incorporación de camiones adicionales, por lo que existe una ventana de optimización en las operaciones que permitan a los ingenieros contrarrestar los efectos negativos de las colas.



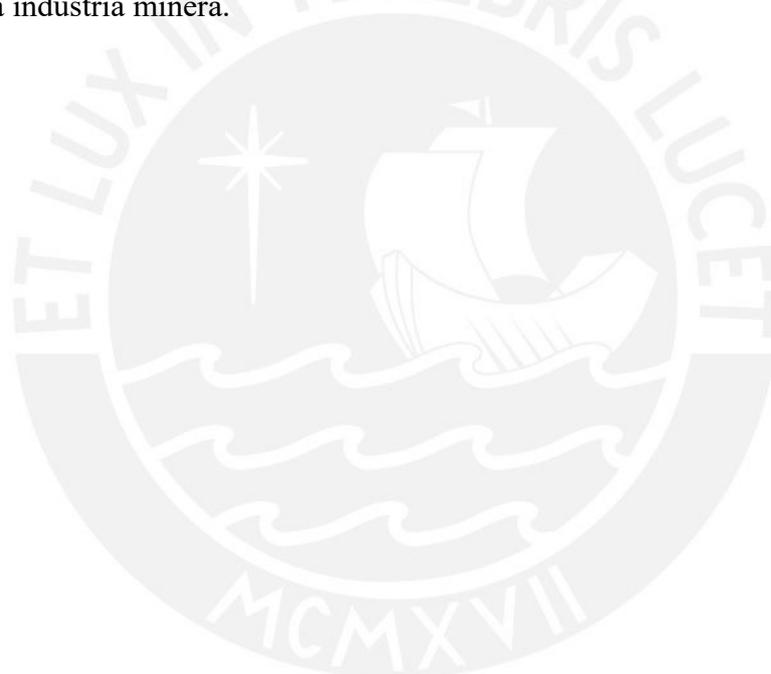
## DEDICATORIA

A mis papás y mi familia por seguir creyendo en mí a pesar de la adversidad de estos últimos años, y también a los amigos y colegas de diversos países en estos pasados cinco años de quienes aprendí diversos conocimientos aplicados a esta tesis y que dedicaron parte de su tiempo para que pueda aprender nuevos temas en esta pequeña gran industria minera.

Diego.

A mis padres, familia y amigos, por su apoyo incondicional, por forjar los fundamentos de la persona que soy y por brindarme impulso para lograr mis metas. A mis colegas, por compartirme sus conocimientos y experiencias: invaluable aporte para mi desarrollo profesional en la industria minera.

Gabriel.



## TABLA DE CONTENIDO

<b>INDICE DE TABLAS</b>	vii
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	viii
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	1
1.3 ANTECEDENTES DE CASOS.....	1
1.4 PREGUNTA DE HIPÓTESIS .....	3
1.5 DESCRIPCIÓN DE LA MINA.....	3
1.5.1 EQUIPOS EN MINA .....	3
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</b>	5
2.1 MODELOS PROBABILÍSTICOS .....	5
2.1.1 VARIABLES ALEATORIAS .....	5
2.1.1.1 VARIABLES DISCRETAS.....	5
2.1.1.2 VARIABLES CONTINUAS.....	6
2.1.2 DISTRIBUCIONES COMUNES .....	7
2.1.2.1 DISTRIBUCIÓN NORMAL.....	7
2.1.2.2 DISTRIBUCIÓN BETA.....	8
2.1.3 PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE .....	10
2.1.4 TAMAÑO DE MUESTRA.....	12
2.2 SIMULACIÓN EN SISTEMAS DE CARGUÍO Y ACARREO	12
2.2.1 MODELOS ESTOCÁSTICO Y DETERMINÍSTICO .....	13
2.3 DIMENSIONAMIENTO DE FLOTA.....	14
2.3.1 TIEMPOS EN EL CICLO DE UN CAMIÓN.....	14
2.3.2 IMPORTANCIA DE LA ESTIMACIÓN DE CAMIONES .....	18
2.4 GENERALIDADES DEL SOFTWARE ARENA.....	18
2.5 ALGORITMO DE DIJKSTRA.....	19
<b>CAPÍTULO 3: PLAN DE TRABAJO</b>	21
<b>CAPÍTULO 4: ESTIMACIÓN DE CAMIONES</b>	22
4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	22
4.2 CREACIÓN DEL MODELO DE CALIBRACIÓN EN ARENA .....	25
4.2.1 CONSIDERACIONES INICIALES.....	25
4.2.2 SALIDA DE CAMIONES.....	26

4.2.2 MODELAMIENTO DEL PROCESO DE CARGUÍO .....	27
4.2.3 MODELAMIENTO DEL VIAJE DE UN CAMIÓN CARGADO .....	30
4.2.4 MODELAMIENTO DEL PROCESO DE DESCARGA .....	31
4.2.5 MODELAMIENTO DEL VIAJE DE UN CAMIÓN DESCARGADO .....	32
4.2.6 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	33
4.3 RESULTADOS DEL MODELO DE CALIBRACIÓN .....	34
4.4 DESARROLLO DEL PLAN ANUAL MEDIANTE UN MODELO ESTOCÁSTICO ...	38
4.4.1 MES DE ENERO .....	38
4.4.2 MES DE FEBRERO .....	40
4.4.3 MES DE MARZO .....	42
4.4.4 MES DE ABRIL .....	44
4.4.5 MES DE MAYO .....	46
4.4.6 MES DE JUNIO .....	48
4.4.7 MES DE JULIO .....	50
4.4.8 MES DE AGOSTO .....	52
4.4.9 MES DE SEPTIEMBRE .....	54
4.4.10 MES DE OCTUBRE .....	56
4.4.11 MES DE NOVIEMBRE .....	58
4.4.12 MES DE DICIEMBRE .....	60
4.5 DESARROLLO DEL PLAN ANUAL MEDIANTE UN MODELO DETERMINÍSTICO	62
4.5.1 MES DE ENERO .....	63
4.5.2 MES DE FEBRERO .....	64
4.5.3 MES DE MARZO .....	66
4.5.4 MES DE ABRIL .....	68
4.5.5 MES DE MAYO .....	69
4.5.6 MES DE JUNIO .....	71
4.5.7 MES DE JULIO .....	73
4.5.8 MES DE AGOSTO .....	75
4.5.9 MES DE SEPTIEMBRE .....	76
4.5.10 MES DE OCTUBRE .....	78
4.5.11 MES DE NOVIEMBRE .....	80
4.5.12 MES DE DICIEMBRE .....	82
4.6 RESULTADOS FINALES .....	83
4.6.1 NÚMERO DE CAMIONES .....	85
4.6.2 HORAS TRABAJADAS MES POR LA FLOTA DE CAMIONES .....	86

<b>4.6.3 PRODUCTIVIDAD DE CAMIONES</b> .....	87
<b>4.6.4 TIEMPO PROMEDIO DEL CICLO</b> .....	88
<b>4.6.5 DISTANCIA PROMEDIO RECORRIDA</b> .....	89
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES</b>	90
<b>5.1 CONCLUSIONES</b> .....	90
<b>5.2 RECOMENDACIONES</b> .....	91
<b>5.3 OBSERVACIONES</b> .....	91
<b>REFERENCIAS</b>	93
<b>ANEXOS</b>	96



## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Variable aleatoria con su respectiva función de probabilidad discreta de masa y distribución acumulada.</i>	9
<i>Tabla 2. Tonelaje enviado a cada destino en el día.</i>	23
<i>Tabla 3. Tamaño mínimo de muestras a recolectar para los tonelajes depositados por palas y cargadores</i>	24
<i>Tabla 4. Funciones de distribución de los tonelajes cargados por palas y cargadores.</i>	24
<i>Tabla 5. Función de distribución para la salida de camiones.</i>	24
<i>Tabla 6. Funciones de distribución de los tiempos fijos en el equipo de carguío.</i>	24
<i>Tabla 7. Funciones de distribución de los tiempos fijos en las zonas de descarga.</i>	24
<i>Tabla 8. Asignación de nombre para cada flota de volquetes a cada equipo de carguío.</i>	27
<i>Tabla 9. Nomenclatura empleada para cada material.</i>	29
<i>Tabla 10. Tonelaje planificado para el mes de enero.</i>	38
<i>Tabla 11. Tonelaje planificado para el mes de febrero.</i>	40
<i>Tabla 12. Tonelaje planificado para el mes de marzo.</i>	42
<i>Tabla 13. Tonelaje planificado para el mes de abril.</i>	44
<i>Tabla 14. Tonelaje planificado para el mes de mayo.</i>	46
<i>Tabla 15. Tonelaje planificado para el mes de junio.</i>	48
<i>Tabla 16. Tonelaje planificado para el mes de julio.</i>	50
<i>Tabla 17. Tonelaje planificado para el mes de agosto.</i>	52
<i>Tabla 18. Tonelaje planificado para el mes de septiembre.</i>	54
<i>Tabla 19. Tonelaje planificado para el mes de octubre.</i>	56
<i>Tabla 20. Tonelaje planificado para el mes de noviembre.</i>	58
<i>Tabla 21. Tonelaje planificado para el mes de diciembre.</i>	60
<i>Tabla 22. Número de días por mes en el sistema asiático.</i>	84

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Gráfica de la función de densidad de distribución de x (Devore, 2012).</i>	6
<i>Figura 2. Gráfica de la función de densidad de probabilidad normal (Navidi, 2006).</i>	8
<i>Figura 3. Gráfica de la función de densidad de probabilidad beta (Kim, 2020).</i>	9
<i>Figura 4. Gráfica de la distribución empírica discreta (Adaptado de Rossetti, 2021).</i>	10
<i>Figura 5. Asignación de camiones sin regla de despacho (izquierda) y con regla de despacho (derecha) (Adoptado de Askari-nasab &amp; Tabesh, 2012)</i>	13
<i>Figura 6. Ciclo común en camiones (Fuente: Elaboración propia).</i>	14
<i>Figura 7. Modelo de uso de tiempo para un equipo de acarreo (Adaptado de Ballantyne, 2019).</i>	16
<i>Figura 8. Flujoograma del ciclo de acarreo (Elaboración propia).</i>	17
<i>Figura 9. Disposición de destinos en mina (Elaboración propia).</i>	22
<i>Figura 10. Secuencia para simular la salida de camiones y restricción de tonelajes.</i>	27
<i>Figura 11. Artificio para rastrear el ingreso de camiones y clasificar los materiales cargados.</i>	28
<i>Figura 12. Descripción del proceso de carguío para la pala 1.</i>	30
<i>Figura 13. Descripción del proceso de viaje cargado desde la pala 1.</i>	30
<i>Figura 14. Descripción del proceso de descarga en la chancadora.</i>	31
<i>Figura 15. Descripción del proceso de viaje de retorno desde la chancadora.</i>	32
<i>Figura 16. Resultados reales del día versus la simulación.</i>	34
<i>Figura 17. Distribución de camiones para cada equipo de carguío.</i>	35
<i>Figura 18. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	35
<i>Figura 19. Ciclo total de acarreo para la flota asignada a pala 1.</i>	36
<i>Figura 20. Ciclo total de acarreo para la flota asignada a pala 2.</i>	36
<i>Figura 21. Ciclo total de acarreo para la flota asignada a pala 3.</i>	37
<i>Figura 22. Ciclo total de acarreo para la flota asignada a cargadores.</i>	37
<i>Figura 23. Resultados del tonelaje planeado versus la simulación.</i>	39
<i>Figura 24. Distribución de camiones para el mes de enero.</i>	39
<i>Figura 25. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	40
<i>Figura 26. Resultados del tonelaje planeado de febrero versus la simulación.</i>	41
<i>Figura 27. Distribución de camiones para el mes de febrero.</i>	41
<i>Figura 28. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	42
<i>Figura 29. Resultados del tonelaje planeado de marzo versus la simulación.</i>	43
<i>Figura 30. Distribución de camiones para el mes de marzo.</i>	43
<i>Figura 31. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	44
<i>Figura 32. Resultados del tonelaje planeado de abril versus la simulación.</i>	45
<i>Figura 33. Distribución de camiones para el mes de abril.</i>	45
<i>Figura 34. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	46
<i>Figura 35. Resultados del tonelaje planeado de mayo versus la simulación.</i>	47
<i>Figura 36. Distribución de camiones para el mes de mayo.</i>	47
<i>Figura 37. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	48
<i>Figura 38. Resultados del tonelaje planeado de junio versus la simulación.</i>	49
<i>Figura 39. Distribución de camiones para el mes de junio.</i>	49
<i>Figura 40. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	50
<i>Figura 41. Resultados del tonelaje planeado de julio versus la simulación.</i>	51
<i>Figura 42. Distribución de camiones para el mes de julio.</i>	51
<i>Figura 43. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	52
<i>Figura 44. Resultados del tonelaje planeado de agosto versus la simulación.</i>	53
<i>Figura 45. Distribución de camiones para el mes de agosto.</i>	53

<i>Figura 46. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	54
<i>Figura 47. Resultados del tonelaje planeado de septiembre versus la simulación.</i>	55
<i>Figura 48. Distribución de camiones para el mes de septiembre.</i>	55
<i>Figura 49. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	56
<i>Figura 50. Resultados del tonelaje planeado de octubre versus la simulación.</i>	57
<i>Figura 51. Distribución de camiones para el mes de octubre.</i>	57
<i>Figura 52. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	58
<i>Figura 53. Resultados del tonelaje planeado de noviembre versus la simulación.</i>	59
<i>Figura 54. Distribución de camiones para el mes de noviembre.</i>	59
<i>Figura 55. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	60
<i>Figura 56. Resultados del tonelaje planeado de diciembre versus la simulación.</i>	61
<i>Figura 57. Distribución de camiones para el mes de diciembre.</i>	61
<i>Figura 58. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	62
<i>Figura 59. Resultados del tonelaje planeado versus la simulación.</i>	63
<i>Figura 60. Distribución de camiones para el mes de enero.</i>	63
<i>Figura 61. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	64
<i>Figura 62. Resultados del tonelaje planeado de febrero versus la simulación.</i>	65
<i>Figura 63. Distribución de camiones para el mes de febrero.</i>	65
<i>Figura 64. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	66
<i>Figura 65. Resultados del tonelaje planeado de marzo versus la simulación.</i>	66
<i>Figura 66. Distribución de camiones para el mes de marzo.</i>	67
<i>Figura 67. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	67
<i>Figura 68. Resultados en tonelaje reales de abril versus la simulación.</i>	68
<i>Figura 69. Distribución de camiones para el mes de abril.</i>	68
<i>Figura 70. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	69
<i>Figura 71. Resultados del tonelaje planeado de mayo versus la simulación.</i>	70
<i>Figura 72. Distribución de camiones para el mes de mayo.</i>	70
<i>Figura 73. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	71
<i>Figura 74. Resultados del tonelaje planeado de junio versus la simulación.</i>	72
<i>Figura 75. Distribución de camiones para el mes de junio.</i>	72
<i>Figura 76. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	73
<i>Figura 77. Resultados del tonelaje planeado de julio versus la simulación.</i>	73
<i>Figura 78. Distribución de camiones para el mes de julio.</i>	74
<i>Figura 79. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	74
<i>Figura 80. Resultados del tonelaje planeado de agosto versus la simulación.</i>	75
<i>Figura 81. Distribución de camiones para el mes de agosto.</i>	75
<i>Figura 82. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	76
<i>Figura 83. Resultados del tonelaje planeado de septiembre versus la simulación.</i>	77
<i>Figura 84. Distribución de camiones para el mes de septiembre.</i>	77
<i>Figura 85. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	78
<i>Figura 86. Resultados del tonelaje planeado de octubre versus la simulación.</i>	79
<i>Figura 87. Distribución de camiones para el mes de octubre.</i>	79
<i>Figura 88. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	80
<i>Figura 89. Resultados del tonelaje planeado de noviembre versus la simulación.</i>	81
<i>Figura 90. Distribución de camiones para el mes de noviembre.</i>	81
<i>Figura 91. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	82
<i>Figura 92. Resultados del tonelaje planeado de diciembre versus la simulación.</i>	82
<i>Figura 93. Distribución de camiones para el mes de diciembre.</i>	83

<i>Figura 94. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.</i>	83
<i>Figura 95. Tonelaje a mover diario promedio para el año 2023.</i>	84
<i>Figura 96. Número de volquetes necesarios en los modelos estocástico y determinístico.</i>	85
<i>Figura 97. Horas de camiones trabajadas en los modelos estocástico y determinístico.</i>	86
<i>Figura 98. Productividad de camiones en los modelos estocástico y determinístico.</i>	87
<i>Figura 99. Ciclo promedio de los camiones en los modelos estocástico y determinístico.</i>	88
<i>Figura 100. Distancia recorrida en promedio por los camiones en los modelos estocástico y determinístico.</i>	89
<i>Figura 101. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 1.</i>	96
<i>Figura 102. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 2.</i>	96
<i>Figura 103. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 3.</i>	97
<i>Figura 104. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada al cargador 3.</i>	97
<i>Figura 105. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada al cargador 1.</i>	98
<i>Figura 106. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 1.</i>	98
<i>Figura 107. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 2.</i>	99
<i>Figura 108. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 3.</i>	99
<i>Figura 109. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada al cargador 3.</i>	100
<i>Figura 110. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada al cargador 1.</i>	100
<i>Figura 111. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 1.</i>	101
<i>Figura 112. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 2.</i>	101
<i>Figura 113. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 3.</i>	102
<i>Figura 114. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada al cargador 3.</i>	102
<i>Figura 115. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada al cargador 1.</i>	103
<i>Figura 116. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 1.</i>	103
<i>Figura 117. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 2.</i>	104
<i>Figura 118. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 3.</i>	104
<i>Figura 119. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 3.</i>	105
<i>Figura 120. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 1.</i>	105
<i>Figura 121. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 2.</i>	106
<i>Figura 122. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 1.</i>	106
<i>Figura 123. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 2.</i>	107
<i>Figura 124. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 3.</i>	107
<i>Figura 125. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 3.</i>	108
<i>Figura 126. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 1.</i>	108
<i>Figura 127. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 2.</i>	109
<i>Figura 128. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 1.</i>	109
<i>Figura 129. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 2.</i>	110
<i>Figura 130. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 3.</i>	110
<i>Figura 131. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 3.</i>	111
<i>Figura 132. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 1.</i>	111
<i>Figura 133. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 2.</i>	112
<i>Figura 134. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 1.</i>	112
<i>Figura 135. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 2.</i>	113
<i>Figura 136. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 3.</i>	113
<i>Figura 137. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 3.</i>	114
<i>Figura 138. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 1.</i>	114
<i>Figura 139. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 2.</i>	115
<i>Figura 140. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 1.</i>	115

<i>Figura 141. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 2.</i>	116
<i>Figura 142. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 3.</i>	116
<i>Figura 143. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 3.</i>	117
<i>Figura 144. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 1.</i>	117
<i>Figura 145. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 2.</i>	118
<i>Figura 146. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 1.</i>	118
<i>Figura 147. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 2.</i>	119
<i>Figura 148. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 3.</i>	119
<i>Figura 149. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 3.</i>	120
<i>Figura 150. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 1.</i>	120
<i>Figura 151. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 2.</i>	121
<i>Figura 152. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 1.</i>	121
<i>Figura 153. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 2.</i>	122
<i>Figura 154. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 3.</i>	122
<i>Figura 155. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 3.</i>	123
<i>Figura 156. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 1.</i>	123
<i>Figura 157. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 2.</i>	124
<i>Figura 158. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 1.</i>	124
<i>Figura 159. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 2.</i>	125
<i>Figura 160. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 3.</i>	125
<i>Figura 161. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 3.</i>	126
<i>Figura 162. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 1.</i>	126
<i>Figura 163. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 2.</i>	127
<i>Figura 164. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 1.</i>	127
<i>Figura 165. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 2.</i>	128
<i>Figura 166. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 3.</i>	128
<i>Figura 167. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 3.</i>	129
<i>Figura 168. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 1.</i>	129
<i>Figura 169. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 2.</i>	130
<i>Figura 170. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 1.</i>	130
<i>Figura 171. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 2.</i>	131
<i>Figura 172. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 3.</i>	131
<i>Figura 173. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada al cargador 3.</i>	132
<i>Figura 174. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada al cargador 1.</i>	132
<i>Figura 175. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 1.</i>	133
<i>Figura 176. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 2.</i>	133
<i>Figura 177. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 3.</i>	134
<i>Figura 178. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada al cargador 3.</i>	134
<i>Figura 179. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada al cargador 1.</i>	135
<i>Figura 180. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 1.</i>	135
<i>Figura 181. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 2.</i>	136
<i>Figura 182. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 3.</i>	136
<i>Figura 183. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada al cargador 3.</i>	137
<i>Figura 184. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada al cargador 1.</i>	137
<i>Figura 185. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 1.</i>	138
<i>Figura 186. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 2.</i>	138
<i>Figura 187. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 3.</i>	139
<i>Figura 188. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 3.</i>	139

<i>Figura 189. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 1.</i>	140
<i>Figura 190. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 2.</i>	140
<i>Figura 191. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 1.</i>	141
<i>Figura 192. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 2.</i>	141
<i>Figura 193. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 3.</i>	142
<i>Figura 194. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 3.</i>	142
<i>Figura 195. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 1.</i>	143
<i>Figura 196. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 2.</i>	143
<i>Figura 197. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 1.</i>	144
<i>Figura 198. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 2.</i>	144
<i>Figura 199. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 3.</i>	145
<i>Figura 200. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 3.</i>	145
<i>Figura 201. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 1.</i>	146
<i>Figura 202. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 2.</i>	146
<i>Figura 203. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 1.</i>	147
<i>Figura 204. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 2.</i>	147
<i>Figura 205. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 3.</i>	148
<i>Figura 206. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 3.</i>	148
<i>Figura 207. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 1.</i>	149
<i>Figura 208. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 2.</i>	149
<i>Figura 209. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 1.</i>	150
<i>Figura 210. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 2.</i>	150
<i>Figura 211. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 3.</i>	151
<i>Figura 212. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 3.</i>	151
<i>Figura 213. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 1.</i>	152
<i>Figura 214. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 2.</i>	152
<i>Figura 215. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 1.</i>	153
<i>Figura 216. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 2.</i>	153
<i>Figura 217. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 3.</i>	154
<i>Figura 218. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 3.</i>	154
<i>Figura 219. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 1.</i>	155
<i>Figura 220. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 2.</i>	155
<i>Figura 221. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 1.</i>	156
<i>Figura 222. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 2.</i>	156
<i>Figura 223. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 3.</i>	157
<i>Figura 224. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 3.</i>	157
<i>Figura 225. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 1.</i>	158
<i>Figura 226. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 2.</i>	158
<i>Figura 227. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 1.</i>	159
<i>Figura 228. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 2.</i>	159
<i>Figura 229. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 3.</i>	160
<i>Figura 230. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 3.</i>	160
<i>Figura 231. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 1.</i>	161
<i>Figura 232. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 2.</i>	161
<i>Figura 233. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 1.</i>	162
<i>Figura 234. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 2.</i>	162
<i>Figura 235. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 3.</i>	163
<i>Figura 236. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 3.</i>	163

*Figura 237. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 1..... 164*  
*Figura 238. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 2..... 164*



## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 JUSTIFICACIÓN**

El presente trabajo nace como iniciativa para mejorar la estimación del cálculo de camiones a mediano plazo en una mina de cobre a tajo abierto. La metodología tradicional no toma en cuenta la variabilidad de los tiempos fijos ni de las cargas útiles de los equipos de carguío para calcular el número de camiones en el plan anual. Todo lo anterior debe ser tomado en cuenta para el cumplimiento de la producción propuesta en un plan anual.

### **1.2 OBJETIVOS**

#### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Proponer una metodología de simulación de eventos discretos para el cálculo de flota de camiones necesaria para el cumplimiento de los tonelajes del plan anual incorporando variables aleatorias presentes en el ciclo del camión que reflejen las condiciones operativas reales.

#### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar información de los tiempos fijos y cargas útiles de los equipos de carguío que podamos utilizar de muestra para la creación de funciones de distribución probabilística.
- Crear un modelo de simulación para cada mes que incorpore los orígenes y destinos de acuerdo al plan anual.
- Simular diversos escenarios que utilicen las variables aleatorias modeladas presentes en campo.
- Definir el número de camiones requeridos en base al escenario que cumpla con lo establecido por el plan anual.

### **1.3 ANTECEDENTES DE CASOS**

Una alternativa factible a la aplicación de herramientas matemáticas analíticas que pueden ser muy complicadas de formular es la utilización de simulación por eventos discretos

(Dindarloo & Siami-Lrdemoosa, 2016). Actualmente, en la industria minera, existe una amplia tendencia por la utilización de modelos de simulación dada la capacidad de predecir diversos escenarios y los resultados precisos obtenidos de estos (Tabesh et al., 2016). Así, existen diversos documentos que reflejan la aplicación exitosa del software Arena en la estimación del número de camiones en diversas minas a tajo abierto. En el continente americano existe un artículo en Estados Unidos donde el autor concluye que la simulación mediante el software Arena replica exitosamente los sistemas actuales en proceso. Adicionalmente, los distintos escenarios generados permiten al usuario comparar los resultados de estos y desarrollar estrategias que incrementan la productividad de los camiones (Coronado, 2016). Por otro lado, la autora Montes Higueta desarrolla en su tesis un análisis de sensibilidad al variar el número de camiones en una mina de hierro a tajo abierto. La metodología empleada por Montes consiste en crear un modelo alimentado por parámetros propios en el minado a corto plazo tales como polígonos de mineral, tiempos variables del sistema de despacho *Jigsaw*, entre otros de manera que se pueda calcular el número óptimo de camiones en diversos escenarios al variar del throughput en la operación minera estudiada (Montes Higueta, 2017). Asimismo, en África específicamente en Ghana se conoce del desarrollo de un modelo estocástico que permite predecir la producción semanal en una mina de oro. El autor señala que los resultados predichos por el modelo estocástico difieren en un 2.34%, mientras que la implementación de un modelo determinístico varía en un 5.44% comparado con el tonelaje real producido (Kaba et al., 2014). Finalmente, un grupo de investigadores logró estimar el número de camiones en una mina a tajo abierto mediante la aplicación de un modelo de simulación en el software Arena, y ello incorporó incertidumbres presentes en los procesos de carguío y acarreo (Askari-Nasab et al., 2012).

## 1.4 PREGUNTA DE HIPÓTESIS

La variabilidad de los parámetros empleadas en la simulación estocástica tiene impacto en los tiempos del ciclo de transporte de los camiones y, por tanto, en el número de camiones requeridos para cumplir con la producción anual.

## 1.5 DESCRIPCIÓN DE LA MINA

La compañía minera produce concentrado de cobre en una mina ubicada en el norte del país desde el año 2014 mediante el método de tajo abierto. La producción de concentrados es obtenida mediante la flotación de minerales sulfurosos como la calcopirita.

La producción diaria actual es de aproximadamente 100,000 toneladas por día y el *Stripping Ratio* o relación desmonte mineral es de aproximadamente 0.6. La mina cuenta con una vida útil de 36 años. Inicialmente se planeaba producir concentrado de cobre y molibdeno de manera separada, pero esto no ha sido posible hasta la fecha debido a que existen muchos problemas con respecto a la separación de ciertos contaminantes tales como el arsénico, talco, zinc, fierro, óxido de magnesio, entre otros.

La planta concentradora es alimentada con mineral de ley de cobre mayor a 0.5% proveniente desde mina. Asimismo, se cuenta con dos stocks de largo plazo llamados Stock 3 y 7, los cuales albergan mineral con leyes de cobre menores a 0.5%. Sin embargo, al Stock 7 se deposita mineral con leyes de arsénico mayores al 0.5%; mientras que al Stock 3 se envía mineral con leyes de este contaminante menores a 0.5%.

La extracción de mineral comprende la explotación de un pórfido de cobre y *skarn*, y las reservas de la mina están cuantificadas en 1,520 millones de toneladas con una ley promedio de 0.468 % Cu.

### 1.5.1 EQUIPOS EN MINA

El proceso de minado es ejecutado por tres palas de cables CAT 7495 y dos cargadores frontales. A continuación, se mencionan los equipos presentes en la operación.

- 3 palas de cables CAT 7495 HR
- 2 cargadores frontales LeTorneau 2350
- 29 camiones CAT 797F (capacidad de carga de 374 toneladas métricas)
- 3 perforadoras Atlas Copco PV-351
- 2 perforadoras CAT MD6640
- 1 perforadora Atlas Copco ROC L-8
- 3 tractores de orugas CAT D11T
- 3 tractores de orugas CAT D10T
- Otros equipos auxiliares



## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 MODELOS PROBABILÍSTICOS

#### 2.1.1 VARIABLES ALEATORIAS

Una variable aleatoria se caracteriza por asignar un valor numérico a cada uno de los resultados obtenidos en un experimento o espacio muestral (Navidi, 2006). Estas variables son clasificadas en variables aleatorias discretas y continuas.

##### 2.1.1.1 VARIABLES DISCRETAS

Las variables discretas se caracterizan porque sus posibles valores conforman un conjunto discreto, es decir, si los valores constituyen un conjunto contable que al ser ordenados presentan una separación entre cada valor y el siguiente. Asimismo, este conjunto de valores puede ser finito o infinito (Wasserman, 2003).

El modelo probabilístico de un experimento necesita vincular un valor de probabilidad con cada punto de un espacio muestral. La función de probabilidad de masa es aquella función que vincula el valor de probabilidad con la variable aleatoria discreta (Vargas, 2005). Esta función de probabilidad es representada con  $p(x)$  y hace referencia a la probabilidad que “X”, la variable aleatoria discreta, sea igual a “x” cuando se realice el experimento (Navidi, 2006).

$$p(x) = P(X = x)$$

Asimismo, los valores de las probabilidades se encuentran comprendidos de 0 a 1 y la suma de todos los posibles valores de “X” es igual a 1.

$$\sum_x p(x) = \sum_x P(X = x) = 1$$

La media poblacional, conocida también como media o esperanza, de una variable aleatoria discreta “X” se denota con  $\mu_X$  o simplemente  $\mu$ .

$$\mu_X = \sum_x xP(X = x)$$

La varianza poblacional de una variable aleatoria “X” o varianza se denota como  $\sigma_X^2$  o simplemente  $\sigma^2$ . Existen dos maneras de expresar la varianza.

$$\sigma_X^2 = \sum_x (x - \mu_X)^2 P(X = x)$$

$$\sigma_X^2 = \sum_x x^2 P(X = x) - \mu_X^2$$

La desviación estándar poblacional o desviación estándar es igual a la raíz cuadrada de la varianza y se denota como  $\sigma_X$  o  $\sigma$ .

$$\sigma_X = \sqrt{\sigma_X^2}$$

### 2.1.1.2 VARIABLES CONTINUAS

Una variable aleatoria es continua cuando sus probabilidades están explicadas por áreas bajo una función de densidad de probabilidad o llamada también distribución de probabilidad (Devore, 2012; Navidi, 2006).

Así, sea “X” una variable continua y  $f(x)$  su función de densidad de probabilidad. Con  $a$  y  $b$ , dos números cualquiera donde  $a$  es menor que  $b$ .

$$P(a \leq X \leq b) = P(a \leq X < b) = P(a < X \leq b) = P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx$$

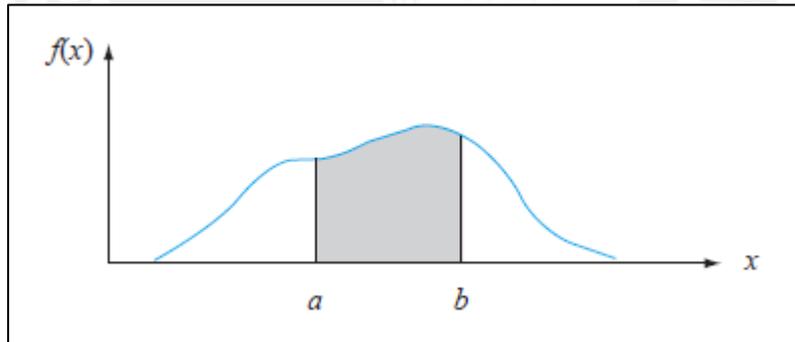


Figura 1. Gráfica de la función de densidad de distribución de  $x$  (Devore, 2012).

Al igual que para las variables discretas, la media y varianza de una variable continua se encuentran definidas por una función de densidad de probabilidad en lugar de la función de masa (Navidi, 2006). Así, sea  $X$  una variable aleatoria continua y  $f(x)$  su función de densidad de probabilidad, la media de  $X$  ( $\mu_X$ ) se encuentra dada por la siguiente expresión.

$$\mu_X = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx$$

La varianza de X ( $\sigma_X^2$ ) se expresa de las maneras mostradas.

$$\sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)^2 f(x) dx$$

$$\sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x) dx - \mu_X^2$$

Finalmente, la desviación estándar ( $\sigma_X$ ) es igual a la raíz cuadrada de la varianza.

$$\sigma_X = \sqrt{\sigma_X^2}$$

## 2.1.2 DISTRIBUCIONES COMUNES

Las funciones de densidad de probabilidad o de masa pueden aproximarse a familias de curvas comunes. A continuación, se mencionarán las principales.

### 2.1.2.1 DISTRIBUCIÓN NORMAL

Conocida también como distribución de Gauss, es de gran utilidad como modelo de muchas poblaciones continuas ya que se emplea como aproximación de estas (Devore, 2012; Navidi, 2006). Así, sea X una variable aleatoria normal, su función de densidad de probabilidad se encuentra expresada con fórmula mostrada.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

De la expresión mostrada,  $\mu$  es la media y  $\sigma^2$  la varianza. Asimismo, la curva normal o función de densidad de probabilidad normal es simétrica alrededor de la media ( $\mu$ ) que también representa la mediana. La figura 2 muestra las características de las poblaciones normales.

- El 68% de la población se encuentra aproximadamente en el intervalo  $\mu \pm \sigma$ .
- El 95% de la población se encuentra aproximadamente en el intervalo  $\mu \pm 2\sigma$ .
- El 99.7% de la población se encuentra aproximadamente en el intervalo  $\mu \pm 3\sigma$ .

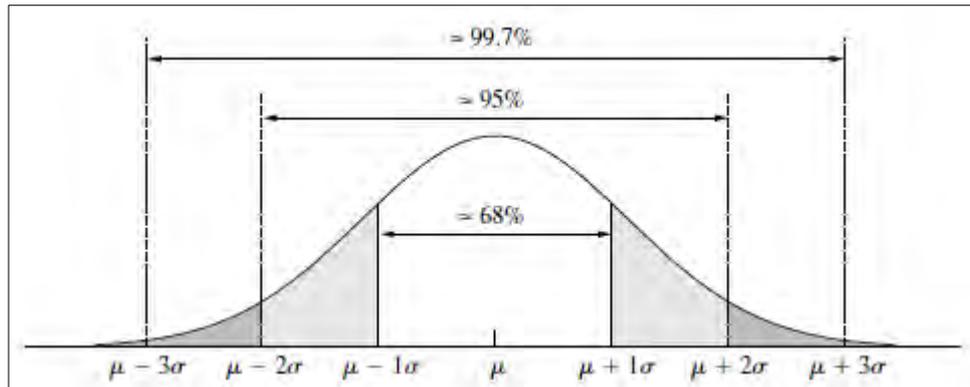


Figura 2. Gráfica de la función de densidad de probabilidad normal (Navidi, 2006).

El número  $z$  es la unidad estándar equivalente a  $x$ . Se expresa en función a la media  $\mu$ , la desviación estándar  $\sigma$  y una unidad  $x$  seleccionada de una población normal.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

### 2.1.2.2 DISTRIBUCIÓN BETA

Distribución caracterizada por su probabilidad positiva cuyo dominio va de 0 a 1. Sea  $X$  una variable aleatoria, y cuya función de distribución beta consiste de dos parámetros positivos denominados  $\alpha$  y  $\beta$ , entonces la función de distribución de probabilidad se expresa de la manera siguiente.

$$P(x) = \begin{cases} \frac{(1-x)^{\beta-1} * x^{\alpha-1}}{B(\alpha, \beta)} & \text{si } 0 < x < 1 \\ 0 & \text{todo lo demás} \end{cases}$$

De lo mostrado anteriormente  $B(\alpha, \beta)$  es una función beta que depende de una función gama tal y como se muestra a continuación.

$$B(\alpha, \beta) = \frac{\gamma(\alpha) * \gamma(\beta)}{\gamma(\alpha + \beta)}$$

Cabe destacar que la función de distribución de probabilidad de una distribución beta posee un comportamiento variable ya que puede verse de manera acampanada, asintótica en los extremos o como una línea recta (Devore, 2012; Kim, 2020).

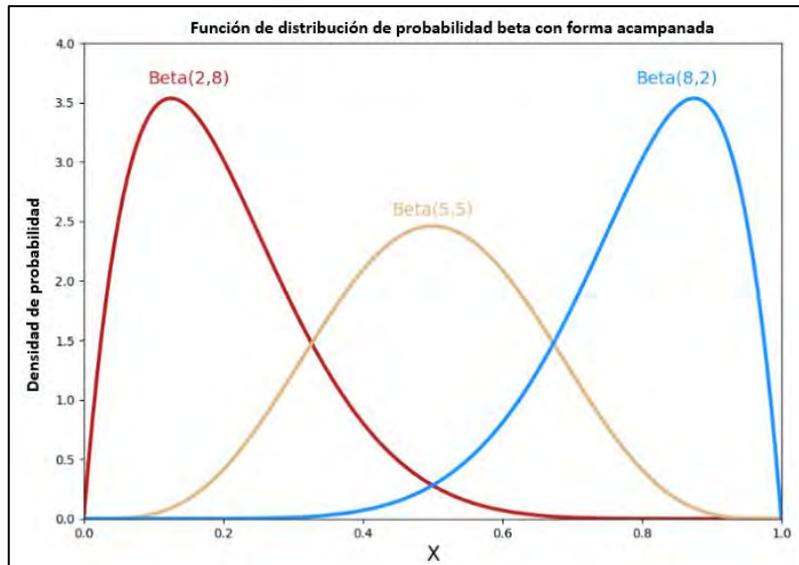


Figura 3. Gráfica de la función de densidad de probabilidad beta (Kim, 2020).

### 2.2.2.3 DISTRIBUCIÓN EMPÍRICA DISCRETA

Sea  $X$  una variable aleatoria con una función de probabilidad discreta de masa  $f(X)$  y función de distribución acumulada  $F(X)$  definidas como se muestra a continuación.

Tabla 1. Variable aleatoria con su respectiva función de probabilidad discreta de masa y distribución acumulada.

$X_i$	1	2	3
$f(X_i)$	0.3	0.3	0.4
$F(X_i)$	0.3	0.6	1

Nota. Tomado de “Simulation Modeling and Arena 3rd Edition”, por Rossetti, 2021.

Entonces, la representación gráfica de la distribución empírica discreta de esta distribución se representa de la manera mostrada.

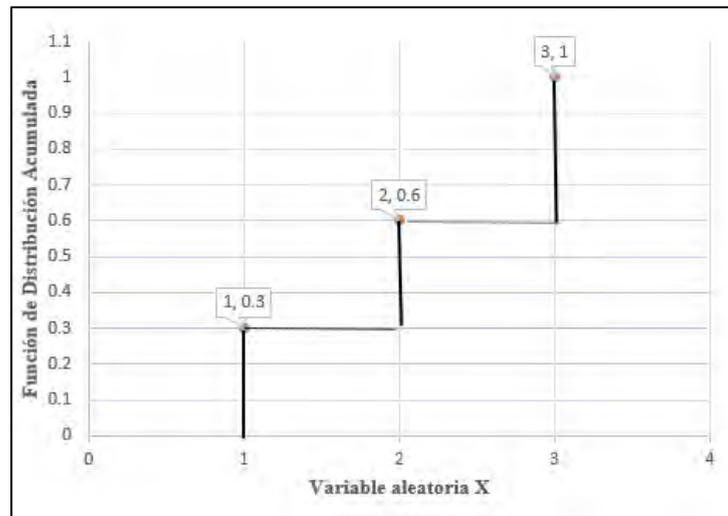


Figura 4. Gráfica de la distribución empírica discreta (Adaptado de Rossetti, 2021).

### 2.1.3 PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE

Las pruebas de bondad de ajuste permiten comprobar el nivel de significancia o ajuste entre una determinada distribución de probabilidad y los datos observados de una muestra aleatoria. (Rossetti, 2021; Valdez y Alfaro, 2015). En el presente documento se describen dos de los métodos empleados por el software Arena para demostrar la bondad de ajuste.

Por un lado, el test Ji-cuadrado es el procedimiento más usado para estimar en un modelo la bondad de ajuste. Este método compara las frecuencias entre clases luego de agrupar los datos provenientes de las observaciones con los de la tabla Ji-cuadrado. En caso se observe mayor diferencia entre las clases se rechaza la distribución propuesta (Meza Castro, 2011; Valdez y Alfaro, 2015). Para una función normal tomada como ejemplo que se ajuste a los datos seleccionados, primero se calcula la probabilidad acumulada y se selecciona un número de intervalos para agrupar los datos. Este número de intervalos es calculado como la raíz cuadrada del número de datos recolectados. Posterior a ello se calcula el valor Z en base a los porcentajes acumulados y se estima el límite superior de los intervalos de los datos recolectados usando los valores Z. Asimismo, con los límites superiores se cuenta el número de datos

contenidos en estos rangos y se comparan con los valores esperados, los cuales se obtienen en base al número de intervalos y datos totales recolectados. El estimador Chi-cuadrado ( $\chi_0^2$ ) se calcula al comparar los valores observados ( $c_j$ ) versus los esperados ( $np_j$ ).

$$\chi_0^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(c_j - np_j)^2}{np_j}$$

Finalmente, se suman todos los valores del estimador Chi-cuadrado y se calcula el valor crítico de este como la probabilidad normal estándar, Si esta probabilidad denominada *p-value* es mayor a 0.05, entonces no se rechaza la hipótesis por lo que la distribución normal asumida se ajustaría a los datos recolectados.

Por otro lado, el test de Kolmogórov-Smirnov compara los datos reunidos con la función de distribución acumulada (IBM, 2021). Para obtener el *p-value* mediante este test, primero se selecciona cierta distribución que pueda ajustarse a los datos proporcionados. Por ejemplo, sea la normal distribución a ser analizada, se calcula el promedio y la desviación estándar de los datos. Posterior a ello, se ordenan los valores de los datos de menor a mayor y se les asigna un índice “i” el cual va desde el valor 1 hasta el número de datos totales. Luego, se divide este valor i entre el número total de datos. A continuación, se calcula el valor Z para cada muestra recolectada con la expresión mostrada en el inciso 2.1.2.1. Asimismo, se estima la probabilidad normal estándar y estos se comparan con los valores observados para la división i entre N como es descrito por las fórmulas de Kolmogórov-Smirnov, las cuales se muestran a continuación.

$$D_n^+ = \max_{1 \leq i \leq n} \left\langle \frac{i}{n} - \hat{F}(X_{(i)}) \right\rangle$$

$$D_n^- = \max_{1 \leq i \leq n} \left\langle \hat{F}(X_{(i)}) - \frac{i-1}{n} \right\rangle$$

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} \langle D_n^+, D_n^- \rangle$$

Finalmente, si el valor  $D_n$  es menor que el valor obtenido de la tabla de valores críticos de Kolmogórov-Smirnov y donde el *p-value* es mayor a 0.05, entonces la hipótesis nula no es

rechazada y el valor  $p$ -value es el dado por  $D_n$ . Para ambas pruebas de bondad de ajuste, un mayor  $p$ -value es indicador de que la función de distribución seleccionada se ajusta mejor a los datos recolectados.

#### 2.1.4 TAMAÑO DE MUESTRA

El tamaño óptimo de una muestra se define por métodos estadísticos. Considerando que las observaciones se encuentran distribuidas bajo una función normal con media ( $\bar{X}$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ), entonces la distribución normal para una muestra mayor a 30 ( $n \geq 30$ ) lleva el intervalo de confianza y desviación estándar mostrados (Konz, 2002; Niebel & Freivalds, 2014).

$$\text{Intervalo de confianza} = \bar{X} \pm \frac{Z_{\sigma}}{\sqrt{n}}$$

$$\text{Desviación estándar } (\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Del intervalo de confianza mostrado anteriormente es posible obtener el tamaño de muestra requerida ( $n$ ) mediante la siguiente expresión.

$$n = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \sigma}{E} \right)^2$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$ : Valor correspondiente a la distribución normal

E: Error máximo permisible

## 2.2 SIMULACIÓN EN SISTEMAS DE CARGUÍO Y ACARREO

En cuanto al estudio de sistemas de carguío y acarreo, en la industria minera, la simulación es uno de los métodos más utilizados debido a que es una herramienta práctica. Cabe resaltar que la data que se ingresa es uno de los aspectos más importantes en la implementación de cualquier simulación. El modelamiento de los sistemas de acarreo en una mina a tajo abierto usando simulaciones por computadora se lleva realizando por muchos años.

Los modelos han sido desarrollados de muchas maneras e incluyen datos de estudios de tiempo o reportes con los ciclos de acarreo generados por sistemas de despacho de camiones, cálculos basados en las curvas de rendimiento proporcionado por los fabricantes, entre otros. En los reportes del Sistema Dispatch se registran cada uno de los ciclos llevados a cabo por los camiones, por ejemplo, el tiempo que le toma a cierto camión cuadrarse para ser cargado por una pala de cables. Asimismo, los tiempos de viaje para cada camión, estando cargado y vacío, también son requeridos para cada tramo del camino. De manera parecida, los tiempos de carga y descarga son requeridos para muchas palas al igual que los puntos de descarga.

Durante el proceso de simulación, los camiones recorren un perfil de acarreo en un ciclo pudiendo seguir un conjunto de reglas de despacho, sin importar la pala o cargador frontal que se le asigne, o simplemente asignar un equipo cargador fijo para cada volquete (Sturgul, 2000).

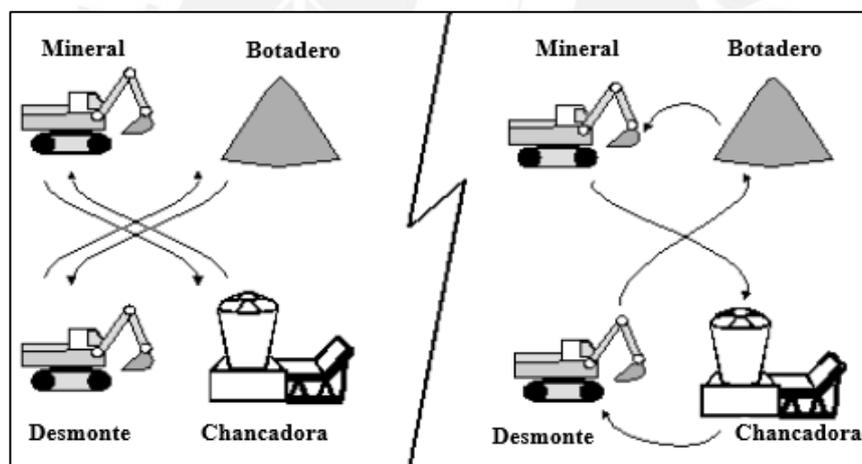


Figura 5. Asignación de camiones sin regla de despacho (izquierda) y con regla de despacho (derecha) (Adoptado de Askari-nasab & Tabesh, 2012)

### 2.2.1 MODELOS ESTOCÁSTICO Y DETERMINÍSTICO

La naturaleza de los sistemas de palas y camiones es estocástica dado el comportamiento de las variables involucradas en el proceso de carguío y acarreo; sin embargo, muchas veces esta naturaleza estocástica se trata como determinística dada la complejidad de la programación matemática y el tiempo invertido para la modelación (Dembetembe, 2017; Torkamani, 2013).

Los modelos estocásticos se caracterizan porque al menos uno de los resultados proviene de una variable aleatoria, en caso contrario, se denomina determinístico. Asimismo, el estado

de un sistema dinámico estocástico define un proceso aleatorio y su comportamiento solo puede describirse probabilísticamente (Cassandras & Lafortune, 2021).

Ahora bien, la única manera de comprobar el comportamiento de cierto modelo matemático, sea estocástico o determinístico, es comparar los resultados reales con las estimaciones obtenidas por el modelo. Por un lado, para un modelo determinístico que no posea error experimental basta con comparar los valores observados. No obstante, para un modelo estocástico se debe entender que las variables consideradas son muestras obtenidas directamente de distintos escenarios reales, así pueden presentarse límites máximos y mínimos que deben verse reflejados en el modelo. En adición, se sugiere que las probabilidades calculadas con el modelo y las reales observadas sean comparadas ya que los resultados del modelo estocástico pueden producir un resultado distinto al esperado (Batista de Souza, 2019; May, 2012).

## 2.3 DIMENSIONAMIENTO DE FLOTA

### 2.3.1 TIEMPOS EN EL CICLO DE UN CAMIÓN

El ciclo de un camión se encuentra resumido en la figura 6 mostrada a continuación.

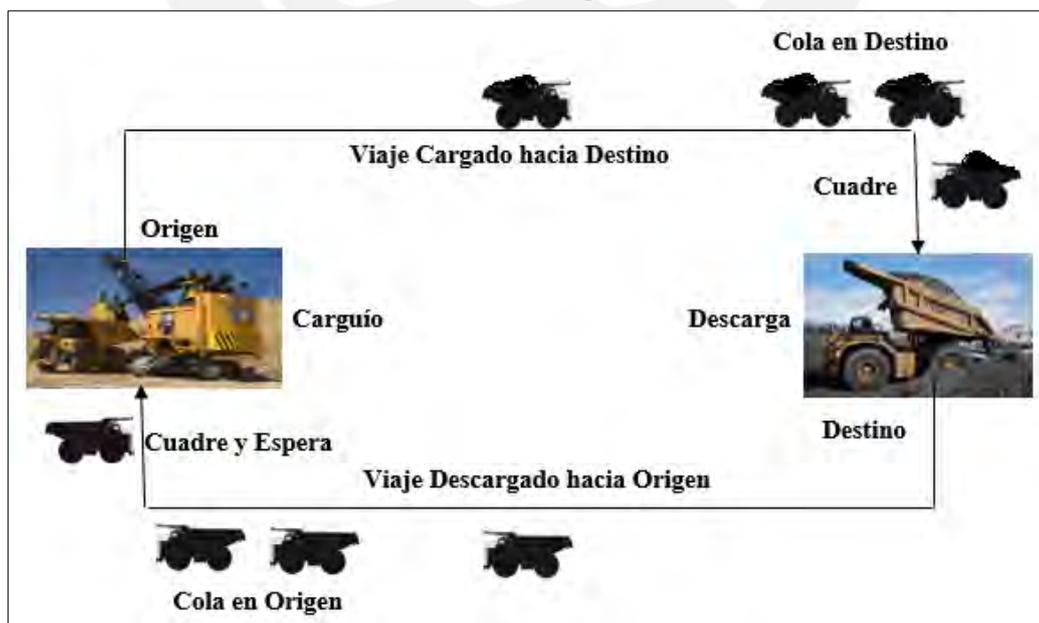


Figura 6. Ciclo común en camiones (Fuente: Elaboración propia).

En la figura 6 el origen hace referencia a la presencia de una pala de cables, cargador frontal o cualquier otro equipo de carguío que espera depositar material en el equipo de acarreo. Por otra parte, el destino hace mención al lugar donde el equipo de acarreo depositará el material. Estos destinos pueden ser un *stockpile* o pila de acopio de mineral, un botadero o la chancadora primaria.

A continuación, se da una descripción de cada uno de los tiempos que conforman el ciclo de un camión.

- Tiempo de cuadro en el origen (TDO): Es el tiempo empleado por el equipo de acarreo en cuadrarse para ser cargado por el equipo de carguío.
- Tiempo de espera para carguío (TEC): Este tiempo comprende desde que el equipo de acarreo se encuentra correctamente cuadrado hasta la primera baldada depositada por el equipo de carguío.
- Tiempo de carguío (TC): Es el tiempo que toma cargar al equipo de acarreo.
- Tiempo de viaje cargado (TVC): Es el tiempo empleado por el equipo de acarreo desde que parte de la posición del equipo de carguío hasta llegar al destino.
- Tiempo de cola en el destino (TCD): Ocurre cuando el equipo llega al destino, pero tiene que esperar para ingresar y descargar el material.
- Tiempo de cuadro en el destino (TDD): Es el tiempo empleado por el equipo de acarreo en cuadrarse para realizar la descarga de material.
- Tiempo de descarga (TD): Tiempo que tarda el equipo de acarreo en descargar el material.
- Tiempo de viaje descargado (TVD): Es el tiempo empleado por el equipo de acarreo desde que la tolva regresa a su lugar luego de la descarga hasta llegar de vuelta al origen.
- Tiempo de cola en el origen (TCO): Ocurre cuando el equipo llega al equipo de carguío, pero tiene que esperar para ingresar al frente de trabajo.

El ciclo del camión puede representarse como la suma de los tiempos fijos y tiempos variables.

Todos los tiempos son registrados en minutos.

$$\text{Tiempo fijo} = \text{TDO} + \text{TEC} + \text{TC} + \text{TCD} + \text{TDD} + \text{TD} + \text{TCO}$$

$$\text{Tiempo variable} = \text{TVC} + \text{TVD}$$

Además de los tiempos mencionados, el camión realiza otras actividades, cuyos periodos son también medidos. Estas actividades incluyen cambio de guardia, parqueo, viajes a truckshop para mantenimiento, limpieza de tolvas, llenado de combustible, entre otras. Así, la figura 7 explica en detalle el modelo de uso de tiempo.

Tiempo efectivo produciendo (Dispatch)	Demora Operativa			Demora Programada				Stand By	Fallas por operación	Por Mantenimiento Mecánico				
Tiempo que la máquina está funcionando				Paradas Operativas						Parada Mecánica				
La producción depende del número de ciclos por hora y de la carga promedio. Ello depende a su vez de las condiciones de trabajo y las prácticas operativas con los equipos.	Colas, transporte e ineficiencias	Llenado de combustible	Cambios de turno	Voladuras	Charlas de seguridad y almuerzos	Días y horas no laborables	Falta de material en los frentes	Tiempos de ciclos menores	Ausentismo, permisos especiales	Neumáticos y herramientas de desgaste	Accidentes, causas ajenas a mantenimiento	Reparaciones, logística, intercambios	PMs, inspecciones, evaluaciones	Lubricación y engrase

Figura 7. Modelo de uso de tiempo para un equipo de acarreo (Adaptado de Ballantyne, 2019).

Lo mostrado en la figura 6 también puede ser representado en un flujograma en la figura 8, el cual servirá de base para construir el modelo en el software Arena. El ciclo de carguío comienza con los camiones llegando al frente de minado donde una pala o cargador frontal se encuentra manipulando mineral o desmonte. El número de camiones es asignado a cada equipo de carguío de manera fija. Los camiones al llegar hacia el equipo de carguío pueden hacer cola o proceder a cuadrarse dependiendo de la presencia de otro camión en el frente. Luego de que el camión se cuadra, el equipo de carguío puede estar listo o no para depositar la primera pasada con material sobre el camión. Posterior a ello, el camión viaja a cierto destino donde entrarán en cola o podrán cuadrarse para descargar su material. Finalmente, el ciclo de acarreo termina cuando el camión regresa vacío hacia el frente de carguío no sin antes sufrir un retraso producto de las paradas operativas que ocurren en la operación minera. Todos los resultados obtenidos

de los procesos ocurridos son almacenados en formato txt, los cuales serán procesados con el lenguaje de programación Python y transformados en cinco indicadores a analizar.

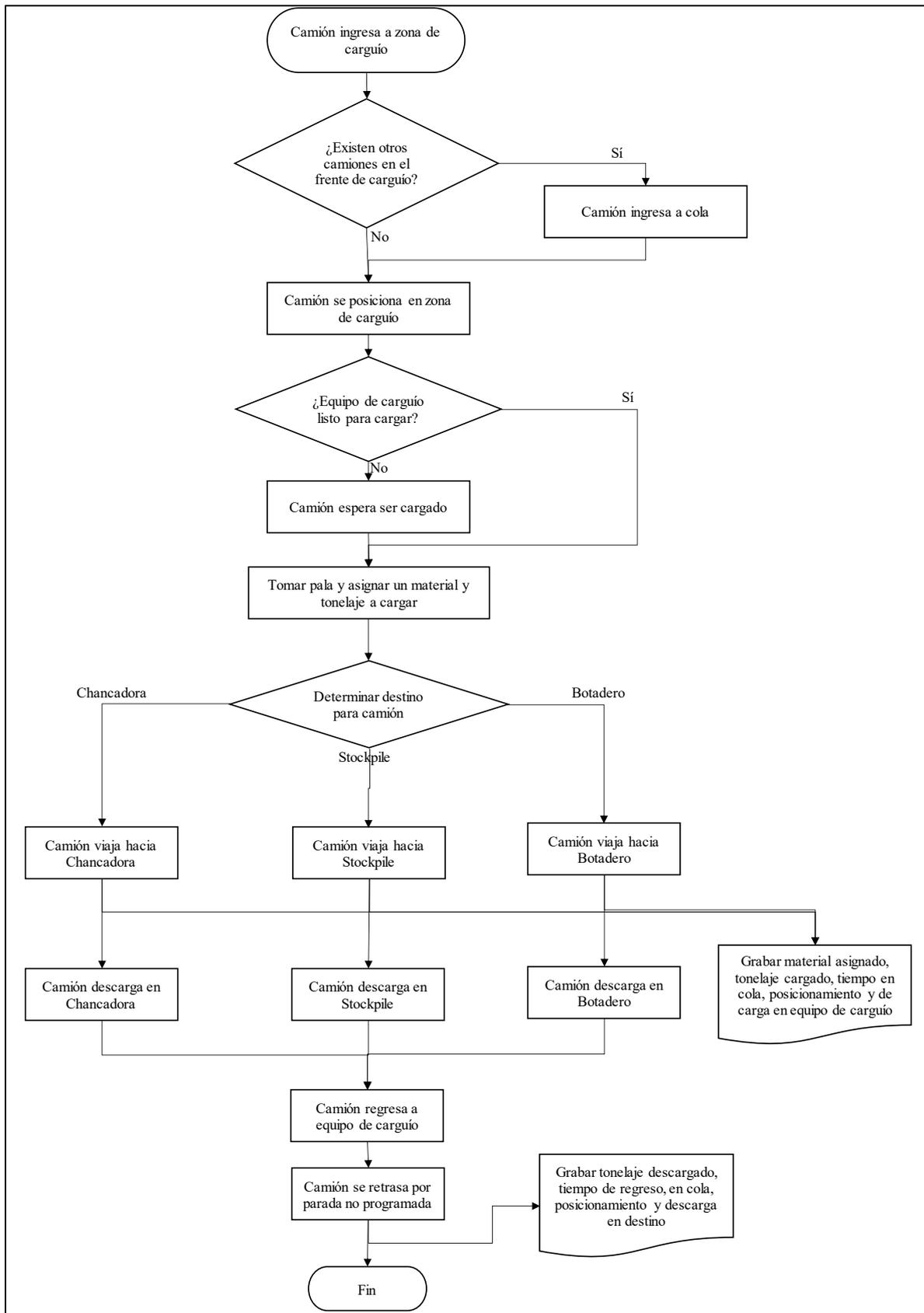


Figura 8. Flujograma del ciclo de acarreo (Elaboración propia).

### 2.3.2 IMPORTANCIA DE LA ESTIMACIÓN DE CAMIONES

Los costos incurridos en el acarreo representan entre el 15% a 30 % de total de los gastos de capital en minería subterránea y entre el 50 a 60% del costo operativo total en operaciones a tajo abierto (Dammers et al., 2019; Nel et al., 2011). A su vez, los camiones empleados en la explotación de cobre a tajo abierto se encuentran entre los más grandes del mundo, con capacidades de hasta 400 toneladas cortas y costos entre los 3 y 5 millones de dólares por unidad. Asimismo, a medida que se profundiza la explotación de mineral, los costos de transporte en la operación se incrementarán debido al aumento en la distancia de las rutas de acarreo y un mayor consumo de combustible (Park et al., 2016). Finalmente, una mala estimación del número de volquetes trae consigo riesgos como no cumplir con la demanda de mineral planeada dado el aumento en los tiempos en colas y congestiónamiento en mina, así como incremento de los costos operativos.

### 2.4 GENERALIDADES DEL SOFTWARE ARENA

ARENA, software comercial desarrollado por *Rockwell Automation*, permite simular eventos discretos con el propósito de modelar operaciones con exactitud en diversos sectores siendo minería una de ellos. El software, el cual está basado en el lenguaje SIMAN, presenta una interfaz amigable con el usuario quien es capaz de incorporar parámetros y restricciones reales operacionales. Posterior a lo mencionado, el usuario debe calibrar los modelos con la finalidad de mejorar la precisión de las predicciones para un uso futuro.

Otra ventaja de este programa yace en la visualización de las variables que conforman el proceso de carguío y acarreo a medida que se lleva a cabo la simulación, así como de los equipos que participan en el proceso.

Ahora bien, Arena trabaja mediante módulos los cuales se componen de bloques y elementos. En primer lugar, los bloques representan operaciones y contienen una lógica específica como lo es decidir el destino de cierto camión. Por otro lado, los elementos

representan recursos, colas u otro componente que recopile información estadística (Altiok & Melamed, 2007). Las colas, por ejemplo, son aquellas formadas en un origen o destino cuando las entidades como los camiones se van acumulando.

## 2.5 ALGORITMO DE DIJKSTRA

Cuando se trata de resolver problemas relacionados a encontrar la distancia más corta, el algoritmo de Dijkstra es una opción a considerar. Desarrollado en 1956, el algoritmo trabaja con un grafo cuyos vértices poseen pesos o valores no negativos. Dijkstra es uno de los ejemplos más ilustres de algoritmos voraces (*greedy algorithm*) ya que elige la opción óptima en cada paso local con la finalidad de lograr una solución general óptima (Cormen et al., 2009; Demaine & Leiserson, 2005; Stein, 2011). Su implementación se muestra a continuación.

Dijkstra ( $G, W, s$ )

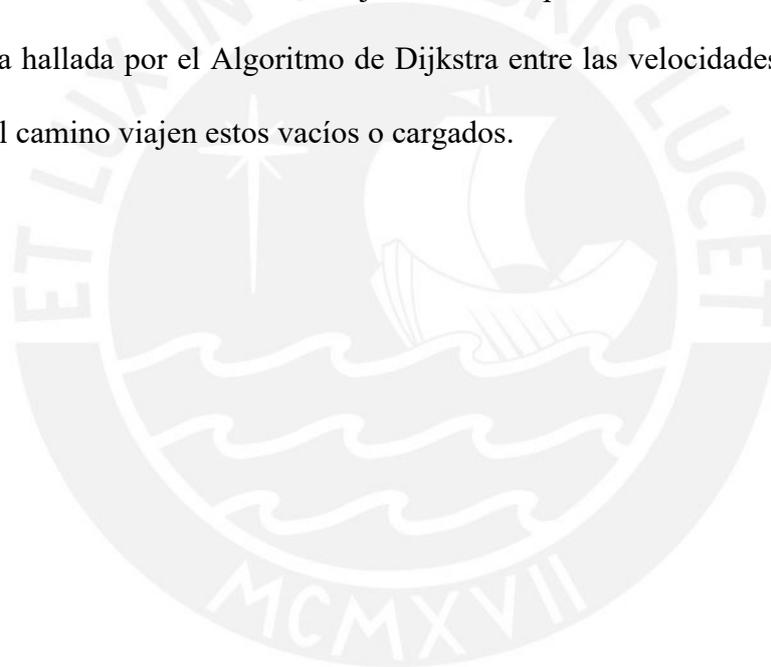
```

1   Initialize ( $G, s$ )
2    $S \leftarrow \emptyset$ 
3    $Q \leftarrow V[G]$ 
4   While  $Q \neq \emptyset$ 
5      $u = \text{Extract-Min}(Q)$ 
6      $S = S \cup \{u\}$ 
7     for each vertex  $v \in G.\text{Adj}[u]$ 
8       Relax ( $u, v, W$ )

```

De lo mostrado, Dijkstra ( $G, W, s$ ) denota a “ $G$ ”, que hace mención al grafo; “ $W$ ”, a los pesos; y “ $s$ ”, al vértice origen. La primera línea del algoritmo significa que “ $s$ ” es el vértice origen o inicial, y el peso de este es cero. Todos los otros vértices tienen como valor infinito. De la segunda y tercera línea, donde “ $S$ ” y “ $Q$ ” son dos conjuntos de vértices, se entiende que al inicio no se ha efectuado ningún procesamiento que permita conocer la distancia mínima entre dos vértices dado que “ $S$ ” está vacío. Por otro lado, aún no se ha generado ningún “ $Q$ ”, por lo que a medida que se procesen los vértices, estos se moverán hacia al conjunto “ $S$ ”. En

consecuencia, “S” contendrá el conjunto de vértices que se conoce como “el camino más corto”. Las líneas cuatro y cinco hacen referencia a que mientras existan vértices que necesiten ser procesados, entonces se tomará el valor mínimo de cada vértice no determinado “Q”. Finalmente, las líneas siete y ocho muestran el proceso iterativo seguido por el algoritmo, donde la relajación puede cambiar el valor del vértice “ $v$ ” si se generan nuevos valores mínimos “u” (Demaine & Leiserson, 2005). Para el presente trabajo este algoritmo será de vital importancia en el desarrollo de las simulaciones mes a mes para estimar el tiempo de viaje de ida y vuelta dado que las distancias a recorrer por cada uno de los camiones partiendo de un origen hasta cierto destino variarán en el tajo. Estos tiempos se calcularán como la división entre la distancia hallada por el Algoritmo de Dijkstra entre las velocidades de los camiones por gradiente del camino viajen estos vacíos o cargados.



### CAPÍTULO 3: PLAN DE TRABAJO

El presente capítulo describe la metodología desarrollada para lograr la estimación del número de camiones en un año mediante la aplicación de simulaciones.

En primer lugar, se procede a recopilar información disponible sobre las variables que intervienen en el proceso de carguío y acarreo tales como el tonelaje depositado por cada equipo de carguío, los orígenes y destinos en cada uno de los meses a simular, las topografías y rutas de acarreo, y el reporte de despacho del mes de abril del presente año con los tiempos fijos. Luego, a partir del reporte con los tiempos en el ciclo de acarreo y tonelajes acarreados, se generan las funciones de distribución de probabilidad y funciones de densidad con la finalidad de obtener alguna distribución que se ajuste a los datos de la muestra.

A continuación, se genera y calibra el modelo en el software Arena mediante la recreación de un día en mina. Para lograr este objetivo se recopila el plan diario ejecutado y los resultados obtenidos por el área de operaciones. Estos datos incluyen orígenes y destinos, tonelajes depositados, ubicaciones de los equipos de carguío y acarreo, y rutas empleadas. La calibración nos permitirá recrear las condiciones operativas existentes en la mina.

Posterior a la calibración del modelo en Arena, se recrean los planes mensuales del año 2023 aplicando modelos estocásticos y determinísticos añadiendo el diseño de los nuevos perfiles de acarreo, la incorporación de nuevos equipos de carguío y el establecimiento de tonelajes objetivo en cada mes. Finalmente, se analizan y presentan los resultados alcanzados de estos escenarios y, en base a ello, se toma aquella opción que optimice los recursos disponibles.

## CAPÍTULO 4: ESTIMACIÓN DE CAMIONES

### 4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DISPONIBLE

La estimación del número de camiones mediante la metodología de simulación de variables discretas requiere de información base que describa ciertas características operativas en la mina.

El procedimiento comienza a partir del reporte *MineStar* pues este registra los tonelajes cargados y movidos por los equipos de carguío y acarreo. La mina tomada como ejemplo trabaja con una flota de 3 palas de cables, 2 cargadores frontales y 29 camiones. Todos estos equipos cumplen con el movimiento de material que alimentan los distintos destinos tales como la chancadora primaria, botaderos 1 y 2, y *stockpiles* 1, 2 y 3.



Figura 9. Disposición de destinos en mina (Elaboración propia).

El modelo debe ser capaz de reflejar los parámetros operativos obtenidos en el reporte de Dispatch, para ello se busca replicar primero los resultados de un día. Durante el día escogido se envía material desde cinco frentes, y se deposita en la chancadora primaria, *stockpiles* 1, 2 o 3, y en el botadero 2. Además, los equipos que participan en la operación son las palas 1, 2 y 3, y los cargadores frontales 3 y 1.

La tabla 2 muestra el tonelaje minado y los destinos de los materiales excavados por cada uno de los equipos de carguío.

Tabla 2. *Tonelaje enviado a cada destino en el día.*

<b>Equipo\Destino</b>	<b>Chancadora</b>	<b>Stock 1</b>	<b>Stock 2</b>	<b>Stock 3</b>	<b>Botadero 2</b>
<b>Pala 1</b>	58,762		39,558	10,400	
<b>Pala 2</b>	42,276	36,962		13,500	766
<b>Pala 3</b>		13,100		38,107	42,955
<b>Cargador 3</b>					17,257
<b>Cargador 1</b>					17,066
<b>Tonelaje Total</b>	101,038	50,062	39,558	62,007	78,044

A diferencia de otros materiales bibliográficos consultados donde se añaden parámetros como las características de los materiales y el número de pasadas para cargar los camiones, en el presente documento se trabaja solo con el tiempo total de carguío para facilitar el desarrollo del modelo en Arena. Así, a partir del reporte del sistema MineStar que contiene datos de siete días se generan las funciones de distribución que mejor se adecuan a la muestra de datos de los tiempos en los ciclos de carguío y los tonelajes cargados a los camiones con la ayuda del módulo Input Analyzer presente en el software Arena. Estas distribuciones fueron evaluadas con los tests Ji-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov (KS) dado que Arena trabaja con estas pruebas para medir la bondad de ajuste de cierta distribución con los datos obtenidos.

En el presente trabajo el tamaño de muestra recolectada para cada uno de los parámetros fue más que suficiente dado que el tamaño de muestra requerido mínimo para obtener un nivel de confianza igual al 95% y un error muestral tolerable del 5%. El parámetro donde se necesitó un mayor tamaño de muestras fue para el caso del tonelaje cargado por el LT03 (con un total de 58 muestras). Según lo visto en el apartado 2.1.4, el tamaño mínimo de muestra (n) dependerá del valor correspondiente a la distribución normal, el error máximo permisible y la desviación estándar de los parámetros. Así, existe una mayor desviación para los tonelajes cargados por los equipos, y el tamaño mínimo de muestras es detallado en la tabla 3.

Tabla 3. *Tamaño mínimo de muestras a recolectar para los tonelajes depositados por palas y cargadores*

Parámetro	$Z_{\alpha/2}$	$\sigma$	E	n
Tonelaje Pala 1	1.96	14.03	5	31
Tonelaje Pala 2	1.96	19.39	5	58
Tonelaje Pala 3	1.96	18.20	5	51
Tonelaje LT03	1.96	16.12	5	40
Tonelaje LT01	1.96	15.70	5	38

Tabla 4. *Funciones de distribución de los tonelajes cargados por palas y cargadores.*

Equipo de carguío	Distribución	Expresión	# de Datos	p-value KS	Error
Pala 1	Normal	NORM(375, 18.9)	267	> 0.15	0.002106
Pala 2	Normal	NORM(370, 16.1)	240	> 0.15	0.006607
Pala 3	Normal	NORM(376, 15.7)	256	> 0.15	0.003483
Cargador Frontal 3	Beta	$321 + 96 * \text{BETA}(1.82, 2.96)$	96	> 0.15	0.007573
Cargador Frontal 1	Normal	NORM(357, 13.9)	75	> 0.15	0.007145

Tabla 5. *Función de distribución para la salida de camiones.*

Tipo de Tiempo	Distribución	Expresión	# de Datos	p-value KS	Error
Salida de camiones	Normal	NORM(4.18, 1.03)	128	> 0.15	0.016269

Tabla 6. *Funciones de distribución de los tiempos fijos en el equipo de carguío.*

Tipo de Tiempo	Distribución	Expresión	# de Datos	p-value KS	Error
Cuadrado en Pala 1	Beta	$0.73 + 0.84 * \text{BETA}(1.37, 1.46)$	267	> 0.15	0.003612
Espera en ser cargado por Pala 1	Beta	$0.01 + 0.87 * \text{BETA}(8.67, 12.5)$	267	> 0.15	0.003061
Carguío por Pala 1	Beta	$1.76 + 1.24 * \text{BETA}(3.3, 3.31)$	267	> 0.15	0.002285
Cuadrado en Pala 2	Beta	$0.73 + 0.83 * \text{BETA}(1.21, 1.68)$	240	> 0.15	0.006755
Espera en ser cargado por Pala 2	Beta	$0.01 + 0.87 * \text{BETA}(6.96, 7.49)$	240	> 0.15	0.00519
Carguío por Pala 2	Normal	NORM(2.32, 0.164)	240	> 0.15	0.004032
Cuadrado en Pala 3	Normal	NORM(1.09, 0.136)	256	> 0.15	0.017094
Espera en ser cargado por Pala 3	Beta	$0.03 + 0.85 * \text{BETA}(6.54, 10.1)$	256	> 0.15	0.002007
Carguío por Pala 3	Beta	$1.78 + 1.35 * \text{BETA}(5.66, 9.83)$	256	0.0518	0.009006
Cuadrado en CF 3	Beta	$0.75 + 0.8 * \text{BETA}(4.75, 6.34)$	96	> 0.15	0.011225
Espera en ser cargado por CF 3	Beta	$0.07 + 1.07 * \text{BETA}(0.917, 1.4)$	96	> 0.15	0.033927
Carguío por CF 3	Beta	$4.52 + 2.15 * \text{BETA}(7.7, 7.97)$	96	> 0.15	0.003864
Cuadrado en CF 1	Normal	NORM(1.08, 0.0938)	75	> 0.15	0.000836
Espera en ser cargado por CF 1	Beta	$0.15 + 0.69 * \text{BETA}(3.27, 3.12)$	75	> 0.15	0.008227
Carguío por CF 1	Normal	NORM(5.62, 0.248)	75	> 0.15	0.005183

Tabla 7. *Funciones de distribución de los tiempos fijos en las zonas de descarga.*

Tipo de Tiempo	Distribución	Expresión	# de Datos	p-value KS	Error
Cuadrado en Chancadora	Normal	NORM(1.55, 0.0621)	150	> 0.15	0.002465
Descarga en Chancadora	Normal	NORM(0.882, 0.0271)	150	> 0.15	0.003761
Cuadrado en Stockpile	Beta	$0.88 + 0.17 * \text{BETA}(5.42, 5.89)$	160	> 0.15	0.002049
Descarga en Stockpile	Normal	NORM(0.912, 0.021)	160	> 0.15	0.005051
Cuadrado en Botadero	Normal	NORM(0.945, 0.0264)	148	> 0.15	0.002304
Descarga en Botadero	Normal	NORM(0.911, 0.0266)	148	> 0.15	0.00675
Delay	Normal	NORM(1.17, 0.0249)	110	> 0.15	0.001754

De las tablas 4 hasta 7 se muestran las funciones de distribución para los datos extraídos del reporte de Despacho. Por un lado, el p-value de la prueba Kolmogorov-Smirnov en todos los parámetros analizados es mayor a 0.05, por lo que la distribución seleccionada se ajusta a los datos recolectados. Por otro lado, también se muestra el error cuadrado, el cual se obtiene como la suma de cuadrados de las diferencias entre la frecuencia relativa y la probabilidad asociada entre cada intervalo. Cabe destacar que en la tabla 4 se observa una distribución de tipo beta para el cargador frontal 3 y ello es debido a una modificación de la cuchara como consecuencia de un accidente. Además, durante la simulación mensual a partir del mes de abril se asumirá que el comportamiento del cargador 2 será igual que el 1 dado que este último es de adquisición reciente. Asimismo, otra consideración tomada fue la de considerar una misma función de distribución en los tiempos de cuadrado y descarga de material entre los diversos *stockpiles* y botaderos ya que el comportamiento de estos es muy parecido. Es por ello que en la tabla 7 se observa que las funciones de distribución en los *stockpiles* y botaderos trabajan como una misma.

## **4.2 CREACIÓN DEL MODELO DE CALIBRACIÓN EN ARENA**

### **4.2.1 CONSIDERACIONES INICIALES**

En el apartado teórico se hace mención de que la asignación de camiones dentro de una simulación para estimar el número de camiones puede hacer uso de un algoritmo de despacho o ser trabajado sin este. En el presente texto se decide optar por lo segundo; sin embargo, se busca comparar los resultados obtenidos por el desarrollo de los modelos estocásticos y determinísticos. Por un lado, el modelo estocástico implica introducir las funciones de distribución descritas en las tablas 4, 5, 6 y 7. Por otro lado, el modelo determinístico trabaja con los valores medios.

Ahora bien, dentro de los modelos estocásticos y determinísticos se consideran las siguientes restricciones.

- El ciclo diario promedio dura veinte horas dado que dentro de las 24 horas se descuentan las demoras programadas por cambio de turno, inspección de los equipos, voladura y refrigerios.
- Dentro del ciclo de los camiones se consideran las demoras no programadas por ciclo de camión, es decir, se ingresa un tiempo de retraso en el ciclo hecho por los camiones.
- No se consideran paradas por mantenimiento correctivo ni preventivo en camiones, palas y cargadores frontales, por lo que todos los equipos siempre están disponibles.
- No se toma en cuenta el tiempo de reserva de los camiones, es decir por falta de operador, falta de capacidad de la chancadora o por falta de volquetes.
- En las colas de los camiones se considera la aplicación de la técnica FIFO, es decir, el primer camión en llegar será el primero en ser cargado.
- Por escasez de información, los datos recolectados fueron tomados en época seca, por lo que no se consideran las demoras generadas por condiciones climáticas adversas como lluvias o nevadas.

#### **4.2.2 SALIDA DE CAMIONES**

Arena es una herramienta flexible que permite replicar cualquier proceso. En el caso de la actividad minera ocurre que los camiones son estacionados en un determinado lugar donde los operadores proceden a terminar su trabajo y cambiar de lugar con sus compañeros de manera que ellos inicien con el siguiente turno. Ahora bien, para el modelamiento de este proceso se considera que al inicio de turno los camiones ingresan directamente a los frentes de carguío y que, al finalizar el horario, los vehículos no regresan a un estacionamiento, sino que continúan trabajando hasta que el tiempo asignado en la simulación termine.

Dado que cada equipo de carguío trabaja con un número determinado de camiones, el proceso en Arena luce de la siguiente manera.

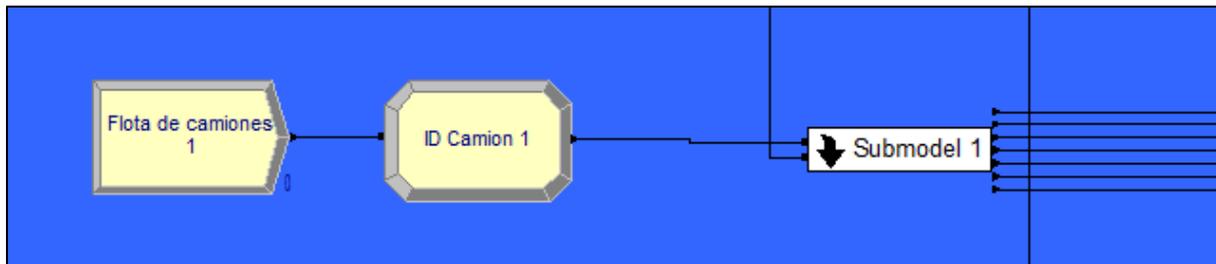


Figura 10. Secuencia para simular la salida de camiones y restricción de tonelajes.

De la figura 10, el número y la salida de camiones se crea mediante el bloque *CREATE*, llamado “*Flota de camiones 1*”. El siguiente bloque *ASSIGN* ya renombrado como “*ID Camion 1*” crea las entidades “*Camiones 1*” y asigna una identidad única a cada camión lo que permite identificarlos fácilmente durante el ciclo. La siguiente tabla define las nomenclaturas empleadas para cada flota de camiones asignadas a cada equipo de carguío.

Tabla 8. Asignación de nombre para cada flota de volquetes a cada equipo de carguío.

EQUIPO	NOMENCLATURA
Pala 1	Camiones1
Pala 2	Camiones2
Pala 3	Camiones3
CF 3	Camiones4
CF 1	Camiones5

Una vez que los vehículos son creados, el tonelaje que deben acarrear estas maquinarias es restringido mediante un submodelo llamado “*Submodel 1*”, el cual contiene una función empírica discreta.

#### 4.2.2 MODELAMIENTO DEL PROCESO DE CARGUÍO

En líneas generales, dentro de las minas ocurre que los camiones mineros al ingresar a los frentes de minado pueden encontrar a los equipos de carguío ocupados o sin actividad, en caso ocurra lo primero tendrán que esperar un determinado tiempo. El software Arena simula las colas en base a las funciones de distribución y el número de camiones asignados a cada equipo de carguío. Posteriormente, cuando las palas o cargadores terminen de cargar, los camiones proceden a cuadrarse. Aquí ocurre que las palas pueden carecer de material que cargar o simplemente continúan con el carguío del cucharón y deposición del material en la

tolva del vehículo. Luego de que el camión es cargado, este se dirige al destino asignado por el operador de la pala. El camión viaja un determinado tiempo hasta su destino donde pueden generarse colas o no dependiendo del número de equipos presentes.

El modelo de Arena explica todo lo mencionado en el párrafo anterior para la pala 1 mediante los siguientes bloques. Primero, se registra el tiempo de llegada del camión hacia la pala mediante el bloque *ASSIGN*. En la figura 11 se identifica como “*Assign Wait at Load Pala 01*”. Luego, dado que se empleó una función empírica discreta definida dentro de un submodelo, se clasifica el material de acuerdo a lo que la pala asignará con un bloque *DECIDE* renombrado “*Tonelaje Pala 1 Material*”, con esto se asegura que se clasifique al camión por material a acarrear Al interior de los bloques *ASSIGN* “*Tac M1 Pala 01*”, “*Tac M3 Pala 01*” y “*Tac M4 Pala 01*” se registran los tonelajes acumulados cargados posteriormente por las palas hacia los camiones.

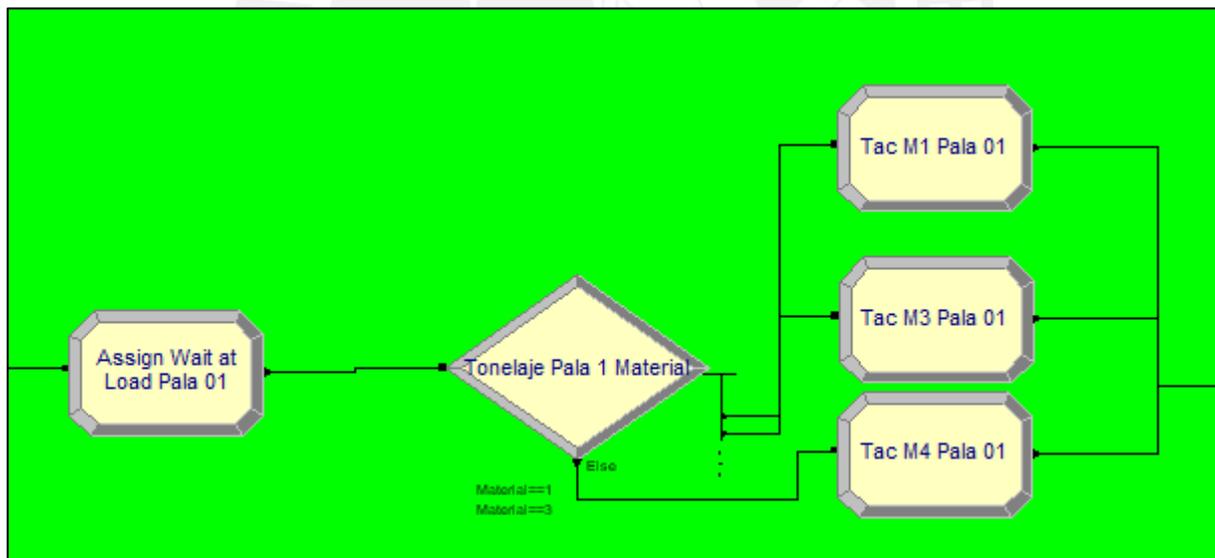


Figura 11. Artificio para rastrear el ingreso de camiones y clasificar los materiales cargados..

Para la clasificación del material cargado se emplea un código tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9. *Nomenclatura empleada para cada material.*

DESTINO	NOMENCLATURA
Crusher	M1
Stock 1	M2
Stock 2	M3
Stock 3	M4
Botadero 2	M5

De la figura 11 entonces se observa que la pala 1 envió material a los destinos chancadora, stock 2 y 3, lo cual corresponde al material movido en el día a simular. Continuando con el modelo, en la figura 12 se observa al bloque “*Seize Pala 01*”, el cual toma al recurso pala 1 para asignarle la función de cargar material a la flota de camiones. Asimismo, el bloque *ASSIGN* llamado “*Assign Spot Time Pala 01*” graba el tiempo del camión en la cola. Dado que Arena simula las colas en función a las distribuciones de los tiempos en que toma cuadrar y cargar a cada camión con el tiempo de llegada, lo que sí es posible es especificar qué camión es cargado primero, en este caso corresponde al primer camión que llega a la pala mediante la modalidad FIFO. Posteriormente, el bloque “*Delay Spot Time Pala 01*” retrasa por cierto tiempo cada camión, ello permite replicar el tiempo que le toma a cada camión cuadrarse para luego ser cargado por la pala. El tiempo transcurrido hasta que se estaciona el camión en la pala se mide mediante el bloque “*Assign W4L Time Pala 01*”. A continuación, el bloque DELAY, escrito como “*Delay W4L Time Pala 01*” añade un tiempo extra, el cual refleja el tiempo que espera el camión para ser cargado por la pala 1. Posterior a ello, el tiempo registrado hasta pasado este evento se graba en la variable creada dentro del bloque “*Assign Load Time Pala 01*”. Seguido, se agrega el tiempo de carguío de la pala 1 con el bloque “*Delay Load Time Pala 01*”. Una vez que la pala termina de cargar al camión, esta indicación se expresa en Arena mediante el bloque *RELEASE*, descrito como “*Release Pala 01*” lo que permite al siguiente camión salir de la cola para ser cargado. Por último, el tiempo tomado por todo el proceso se registra en la variable almacenada en el bloque “*End Load Pala 01*”. Todos los tiempos y

tonelajes anteriores son almacenados en el bloque *READWRITE* denominado “Guardar info 1”.

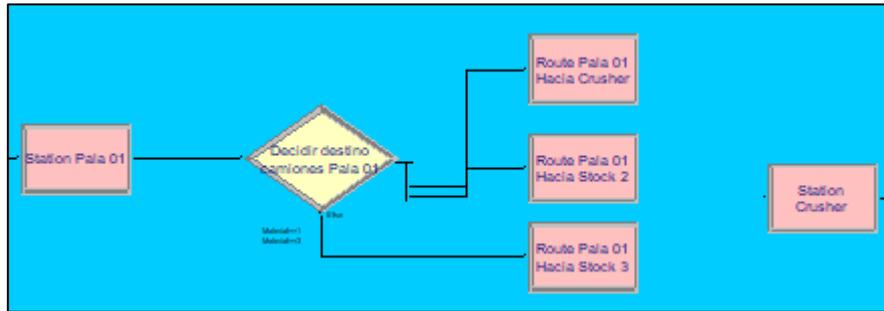


Figura 12. Descripción del proceso de carguío para la pala 1.

#### 4.2.3 MODELAMIENTO DEL VIAJE DE UN CAMIÓN CARGADO

Luego de que el camión se retira del frente de minado de la pala 1 con destino ya asignado, el tiempo que le toma recorrer el trayecto es modelado en el software Arena con los siguientes bloques tal y como lo muestra la figura 13.

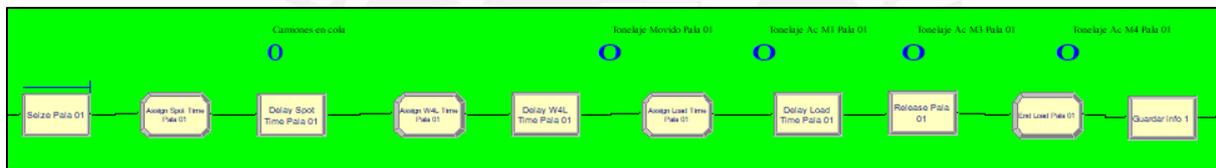


Figura 13. Descripción del proceso de viaje cargado desde la pala 1.

En primer lugar, se añade un bloque *STATION* llamado “*Station Pala 01*”. La lógica utilizada es clasificar a los camiones en base al material que están acarreado, para ello se emplea el bloque *DECIDE* escrito como “*Decidir destino camiones Pala 01*”. Así, de acuerdo a la simulación del día, los camiones transportan materiales desde la pala 1 hacia la chancadora, *stockpile 2* o 3. De acuerdo al destino al que se dirijan, a los camiones les tomará determinado tiempo, el cual se registra en el bloque *ROUTE*. Ahora bien, este tiempo es obtenido mediante una macro en Excel que incorpora el algoritmo de Dijkstra lo cual permite importar las distancias de acarreo más cortas desde el software *MinePlan* y transformarlas en tiempos conociendo las velocidades de ida y regreso dada determinada gradiente. Las velocidades utilizadas se muestran en el anexo al final del presente documento. Así también, los tiempos calculados a partir de la macro no son funciones, sino números no integrales. Por último, se

añade la estación de destino a la que llegarán los camiones, las cuales serán para el caso de la pala 1 los bloques “Station Crusher”, “Station Stock 2” o “Station Stock 3”.

#### 4.2.4 MODELAMIENTO DEL PROCESO DE DESCARGA

La lógica detrás del proceso de descarga es similar al del proceso de carguío. En el siguiente párrafo se describe el proceso seguido por un camión que llega a la chancadora debido a que el mismo proceso se repite para los demás destinos. Primero, se registra el tiempo de llegada del camión hacia la chancadora mediante el bloque *ASSIGN*. En la figura 14 se identifica como “*End Full Travel to Crusher*”. Seguido, se observa al bloque “*Seize Dump Crusher*”, el cual toma al recurso “*Crusher*” que será donde los camiones puedan descargar su material. Asimismo, el bloque *ASSIGN* llamado “*Assign Spot Time Dump Crusher*” graba el tiempo del camión en la cola de la chancadora. Al igual que para el ciclo de carguío, acá también se trabaja con la modalidad FIFO. Posteriormente, el bloque “*Delay Spot Dump Crusher*” añade un tiempo extra correspondiente al cuadrado del camión. A continuación, el bloque “*Assign Dump Time Crusher*” registra el tiempo tomado hasta el cuadrado del vehículo. Luego, mediante “*Delay Dump Time Crusher*” se refleja el tiempo que le toma al camión descargar el mineral en la chancadora primaria. Posterior a ello, el tiempo registrado hasta pasado este evento se graba en la variable creada dentro del bloque “*Assign Dump Time Crusher*”. Una vez que el camión ha vaciado su carga, esta indicación se expresa en Arena mediante el bloque *RELEASE*, descrito como “*Release Crusher*” lo que permite al siguiente camión salir de la cola para descargar. Por último, el tiempo tomado por todo el proceso se registra en la variable almacenada en el bloque “*End Dump Crusher*”.

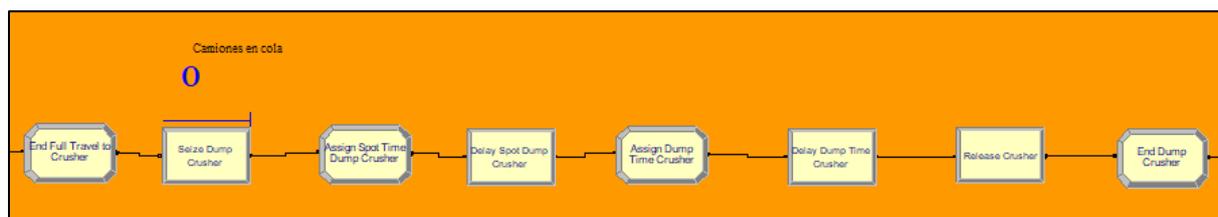


Figura 14. Descripción del proceso de descarga en la chancadora.

#### 4.2.5 MODELAMIENTO DEL VIAJE DE UN CAMIÓN DESCARGADO

Posterior a que el camión se retira del destino, cada vehículo debe regresar a la pala o cargador con el que fue asignado. De acuerdo a lo ocurrido en la simulación diaria, los camiones que descargaron mineral en chancadora provinieron de las palas 1 y 2. Así, tal y como se muestra en la figura 15 se lleva a cabo el proceso de retorno hacia los equipos de carguío.

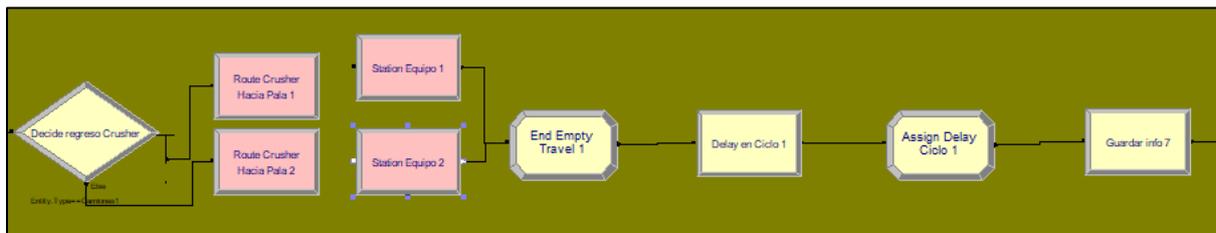


Figura 15. Descripción del proceso de viaje de retorno desde la chancadora.

En primer lugar, se añade un bloque *DECIDE* llamado “*Decide regreso Crusher*”. La lógica empleada es regresar a los camiones en base al equipo de carguío asignado a inicio de turno. Es así que, de acuerdo a la simulación del día, los camiones se dirigen desde la chancadora hacia las palas 1 o 2. De acuerdo al origen al que se dirijan, a los camiones les tomará determinado tiempo, el cual se registra en el bloque *ROUTE*. En similitud con el proceso de viaje de un camión cargado, el tiempo de retorno es obtenido mediante la macro en Excel con el algoritmo de Dijkstra. Por último, se añade la estación de origen a la que llegarán los camiones, las cuales serán para el caso de la pala 1 los bloques “*Station Equipo 1*”; y para la pala 2, “*Station Equipo 2*”. Posterior a ello, se añade el bloque *ASSIGN*, denominado “*End Empty Travel 1*”, el cual registra el tiempo tomado en el viaje de regreso. Al final del ciclo de retorno se añade el tiempo de retraso producto de las paradas no programadas en el turno. Ello se logra al incorporar el bloque “*Delay en Ciclo 1*”. También se registra el tiempo tomado hasta el momento mediante el bloque “*Assign Delay Ciclo 1*”. Finalmente, todos los tiempos y tonelajes anteriores son grabados en el bloque *READWRITE* denominado “*Guardar info 7*”.

Todos los procesos descritos anteriormente se repiten para los equipos de carguío y destinos restantes.

#### **4.2.6 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

Tanto en el proceso de viaje de ida como de regreso, la información se almacena en un bloque *READWRITE* como un archivo de texto. Dado que los camiones siguen acarreado material y no se estacionan una vez que termina el tiempo de la simulación, entonces no todos los viajes deben ser considerados como ciclo completo, sino solo aquellos que hayan finalizado el viaje de regreso. Por otro lado, con respecto al número de repeticiones en la simulación, si bien Rosetti menciona que una regla general de pulgar considera un rango de repeticiones entre 10 y 30 para obtener un margen de error del 5% (Rosetti, 2021), en el presente trabajo se trabaja con 100 repeticiones a fin de obtener un margen de error por debajo del 5%.

Ahora bien, producto del alto número de simulaciones, la cantidad de datos recolectados se cuenta por decenas de miles, por lo que se decide trabajar con el lenguaje de programación Python. A partir del script desarrollado se incorpora la creación de gráficos y obtención de tonelajes movidos en el día simulado. La visualización y desarrollo del script se trabaja con la aplicación web *Jupyter Notebook*.

### 4.3 RESULTADOS DEL MODELO DE CALIBRACIÓN

El número de camiones asignado para cada equipo de carguío varía hasta que se logre alcanzar el tonelaje movido en el día a simular luego de 100 simulaciones hechas a lo largo de 20 horas al día. Así, los resultados obtenidos fueron los siguientes.

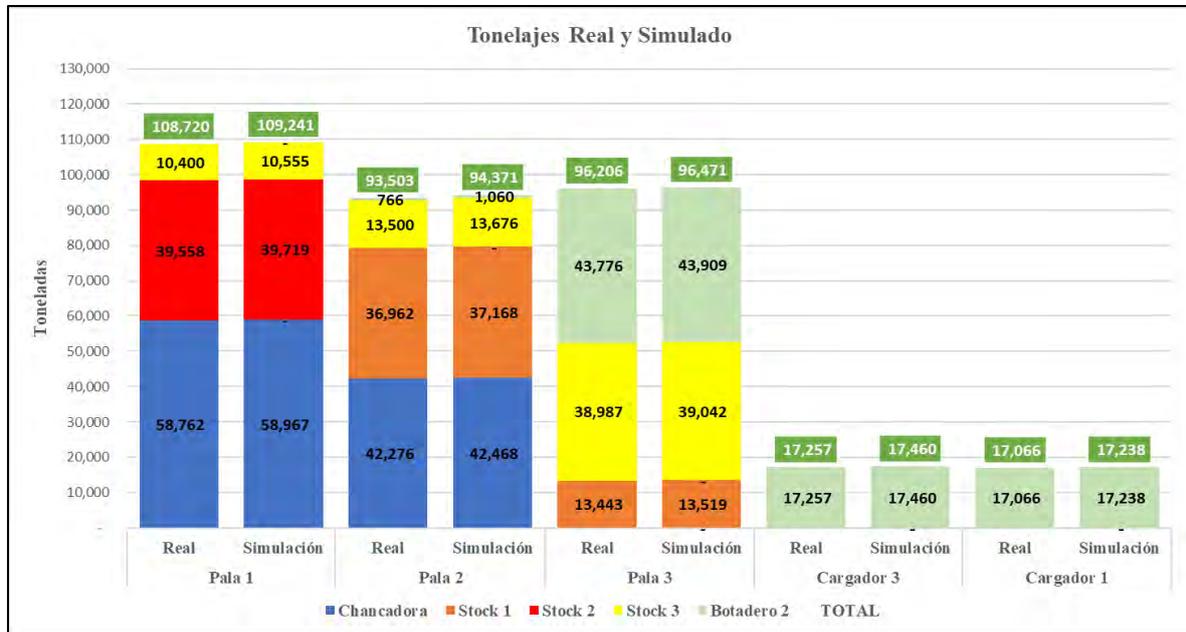


Figura 16. Resultados reales del día versus la simulación.

En la figura 16 se observa que los tonelajes totales reales movidos por cada equipo contra los obtenidos por la simulación son muy parecidos. De hecho, el tonelaje total real acumulado entre todos los equipos en el día fue de 332,752.3 toneladas versus las 334,781.7 movidas por la simulación, por lo que el error es de 0.61%. Este porcentaje podría reducirse aún más si en lugar de trabajar con tonelaje total cargado por ciclo de carguío se añadiera el tonelaje por cucharada, pues habría una restricción adicional y el tonelaje total a alcanzar por la simulación sería mucho más cercano al tonelaje real.

Con respecto al número de camiones empleado en la simulación por cada equipo de carguío para cumplir con el tonelaje movido en el día, se empleó 24 camiones distribuidos como se muestra en la figura 17.

Equipo	# de camiones
Pala 1	6
Pala 2	7
Pala 3	7
Cargador 3	2
Cargador 1	2

Figura 17. Distribución de camiones para cada equipo de carguío.

En base a lo mostrado en la figura 16 es posible calcular el requerimiento de camiones para garantizar cumplir con el tonelaje a mover en el día, pues se divide el número de camiones disponibles entre la disponibilidad mecánica de la flota.

$$\text{N}^{\circ} \text{ Total Camiones Requeridos} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ Camiones Disponibles}}{\text{Disponibilidad Mecánica (\%)}}$$

Así, con una disponibilidad de flota igual al 83.43% y un número de camiones de 24 unidades en la simulación, el número total de camiones requeridos es igual a 29, lo cual concuerda con la flota empleada en la simulación.

Por otro lado, los tiempos promedios por cada camión en la simulación son los mostrados a continuación en la figura 18.

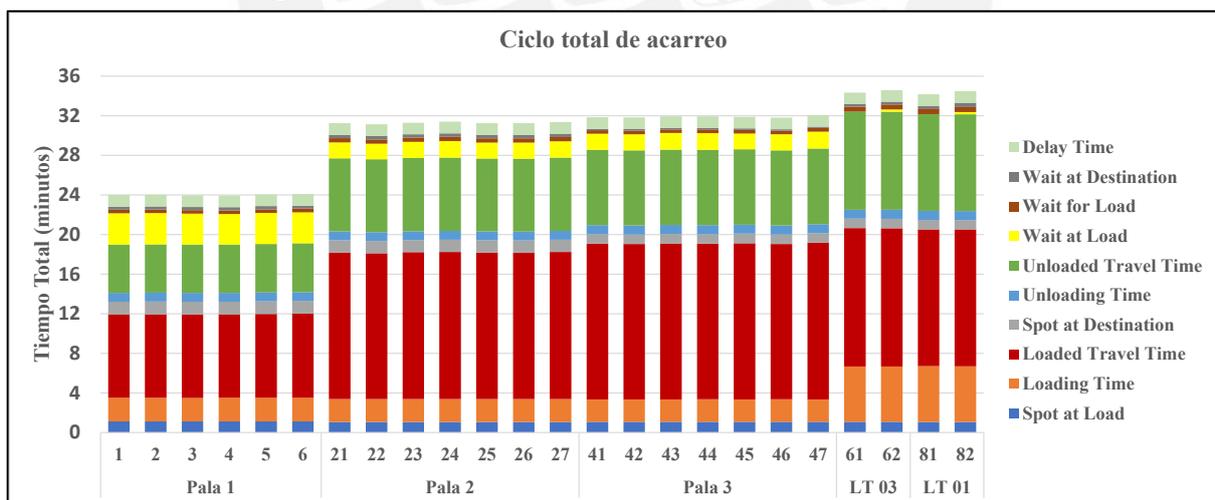


Figura 18. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Finalmente, se revisan los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino con la finalidad de comprobar si los valores generados en el modelo son representaciones precisas de la realidad. A continuación, se detallan estos tiempos.

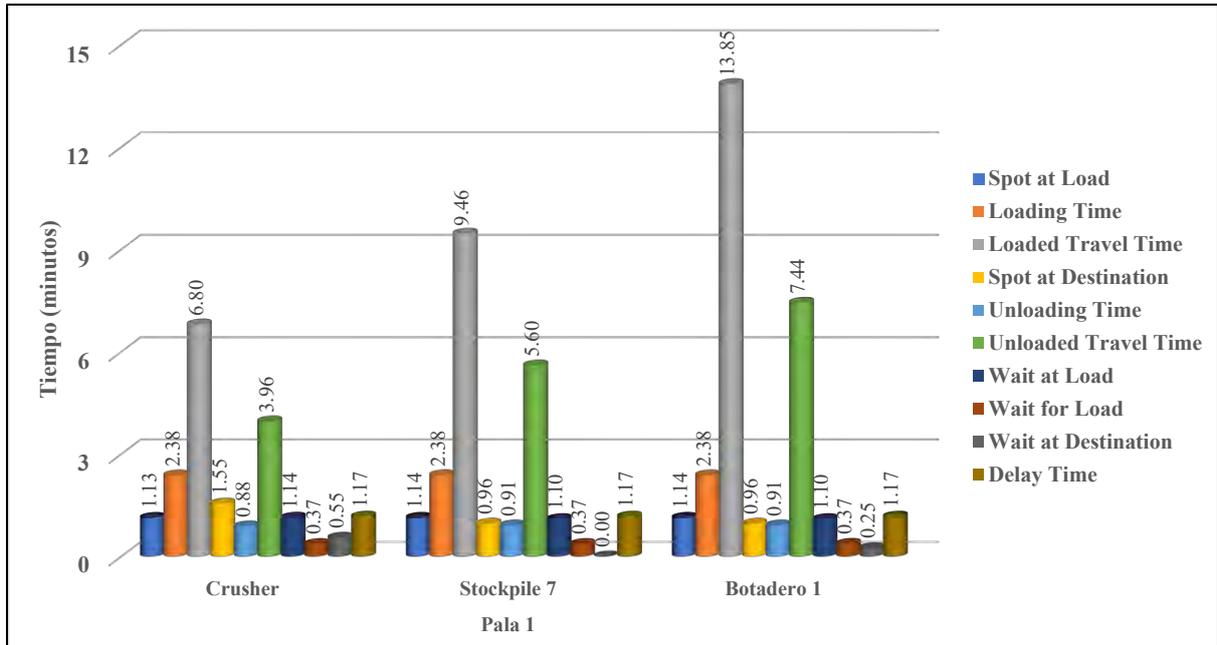


Figura 19. Ciclo total de acarreo para la flota asignada a pala 1.

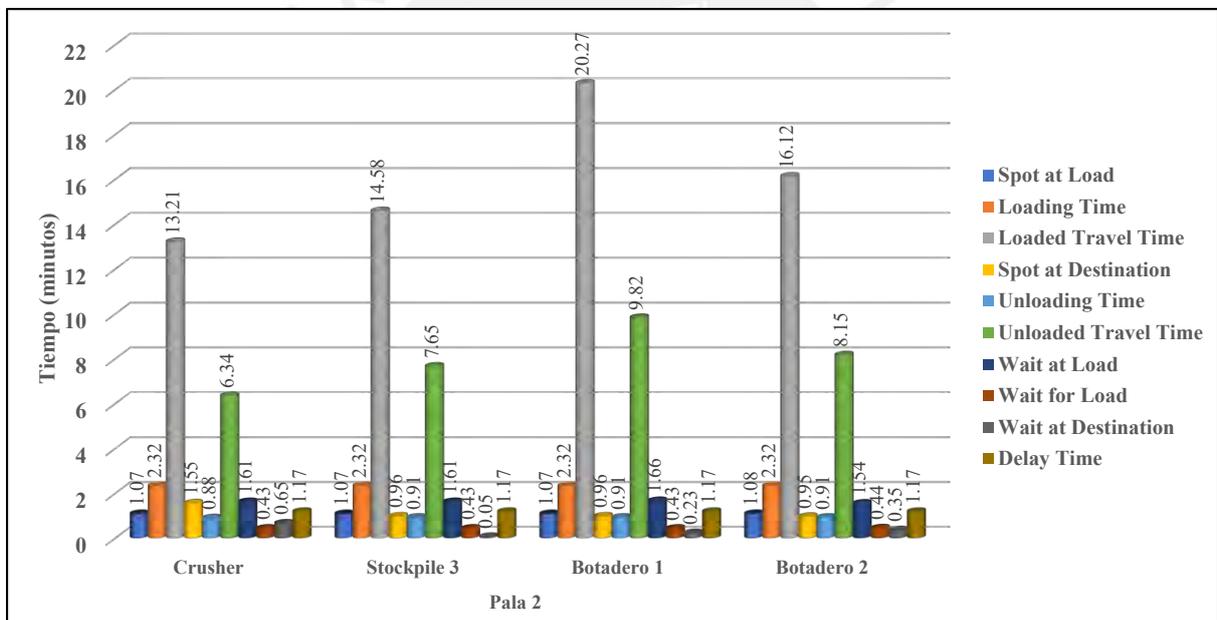


Figura 20. Ciclo total de acarreo para la flota asignada a pala 2.

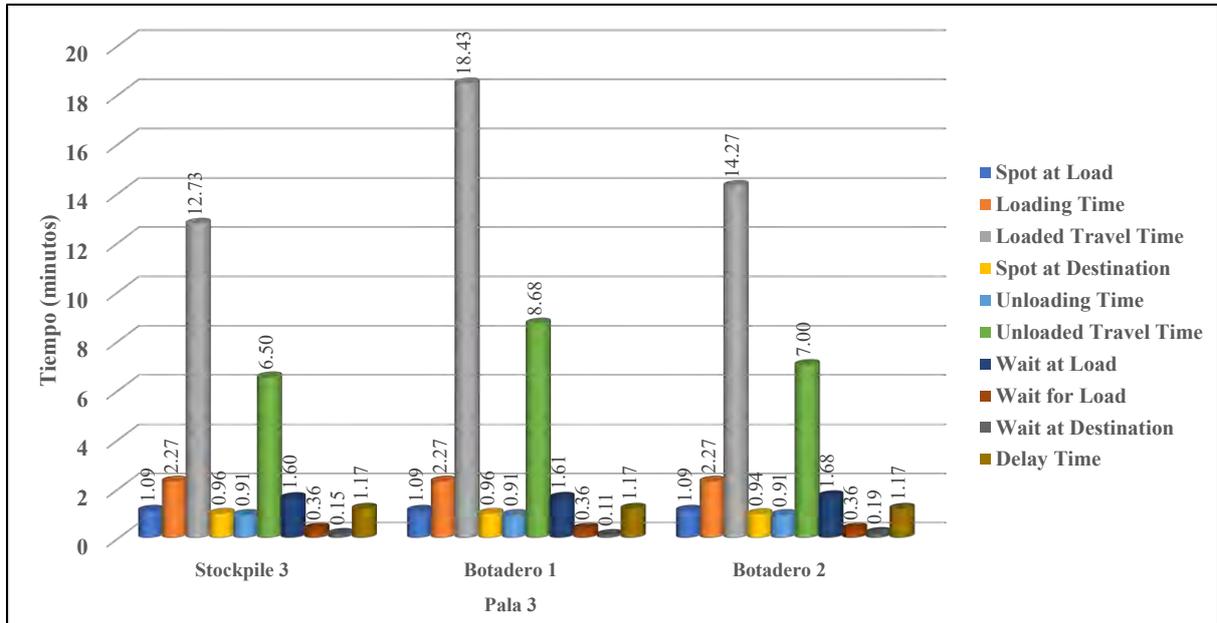


Figura 21. Ciclo total de acarreo para la flota asignada a pala 3.

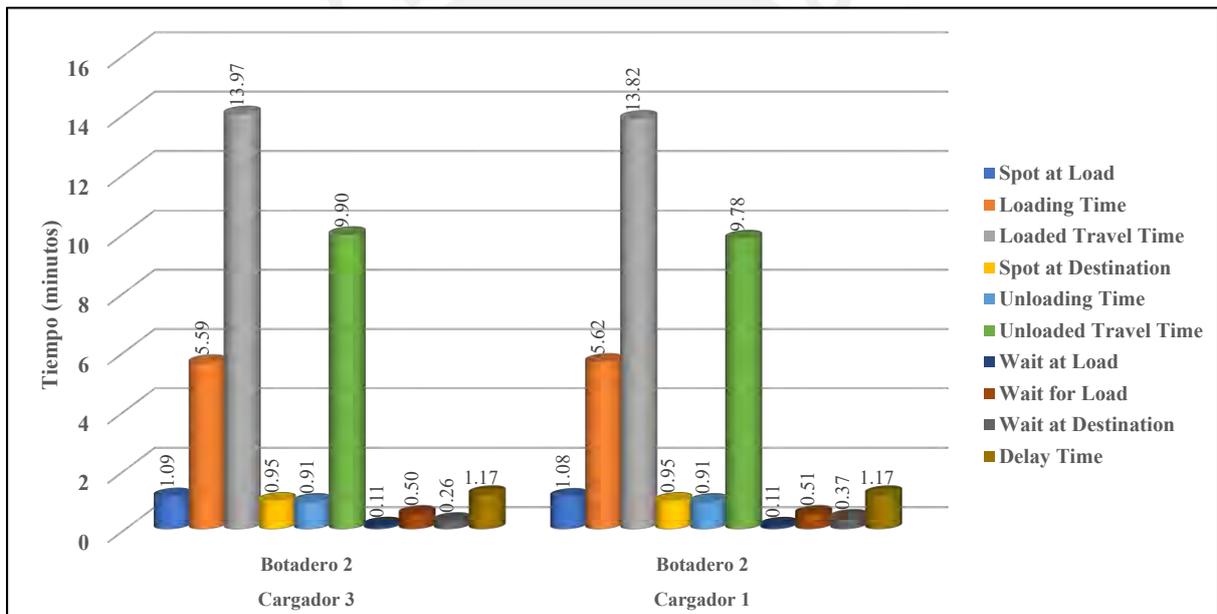


Figura 22. Ciclo total de acarreo para la flota asignada a cargadores.

De las figuras 19 hasta 22 se comprueba que los promedios de tiempos en la simulación se comportan acorde al margen de error del 5% con respecto a los tiempos presentes en el reporte con los ciclos de acarreo. Luego de haber revisado los resultados generados de la simulación, se continúa con el desarrollo del plan anual.

#### 4.4 DESARROLLO DEL PLAN ANUAL MEDIANTE UN MODELO ESTOCÁSTICO

Habiendo desarrollado el modelo de calibración, se procede a recrear cada uno de los meses descritos en el plan anual aplicando en primer lugar una metodología estocástica. Dentro del plan se señala el tonelaje depositado a los diferentes destinos, el número de días que contiene cada mes y la disponibilidad mecánica de los camiones. Asimismo, por un cambio en la gestión de materiales, los *stockpiles* 1 y 2 dejan de recibir mineral, y solo se empieza a depositar en las pilas 3 y 7 teniendo nuevos diseños que permiten incrementar la capacidad de ambas.

##### 4.4.1 MES DE ENERO

Dentro del primer mes del año se contempla mover en 25 días un total de 8'127,586 toneladas métricas repartidas en cinco destinos correspondientes a la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botaderos 1 y 2. La siguiente tabla recopila el tonelaje asignado a cada destino.

Tabla 10. *Tonelaje planificado para el mes de enero.*

<b>Equipo\Destino</b>	<b>Chancadora</b>	<b>Stock 3</b>	<b>Stock 7</b>	<b>Botadero 1</b>	<b>Botadero 2</b>
<b>Pala 1</b>	522,850	837,780	155,557	601,046	
<b>Pala 2</b>	1,358,492	699,872	164,550		51,121
<b>Pala 3</b>	133,748	1,627,901	93,441		638,525
<b>Cargador 3</b>	695,934				
<b>Cargador 1</b>	21,721	431,762	26,284	67,002	
<b>Tonelaje Total</b>	2,732,745	3,597,314	439,832	668,048	689,646

Las modificaciones que sufre el modelo de calibración implican cambiar los tonelajes por los mostrados en la tabla 10, actualizar los tiempos de ida y regreso de los camiones, y añadir los nuevos materiales movidos.

Luego de las 100 réplicas simuladas, se obtienen los tonelajes mostrados a continuación.

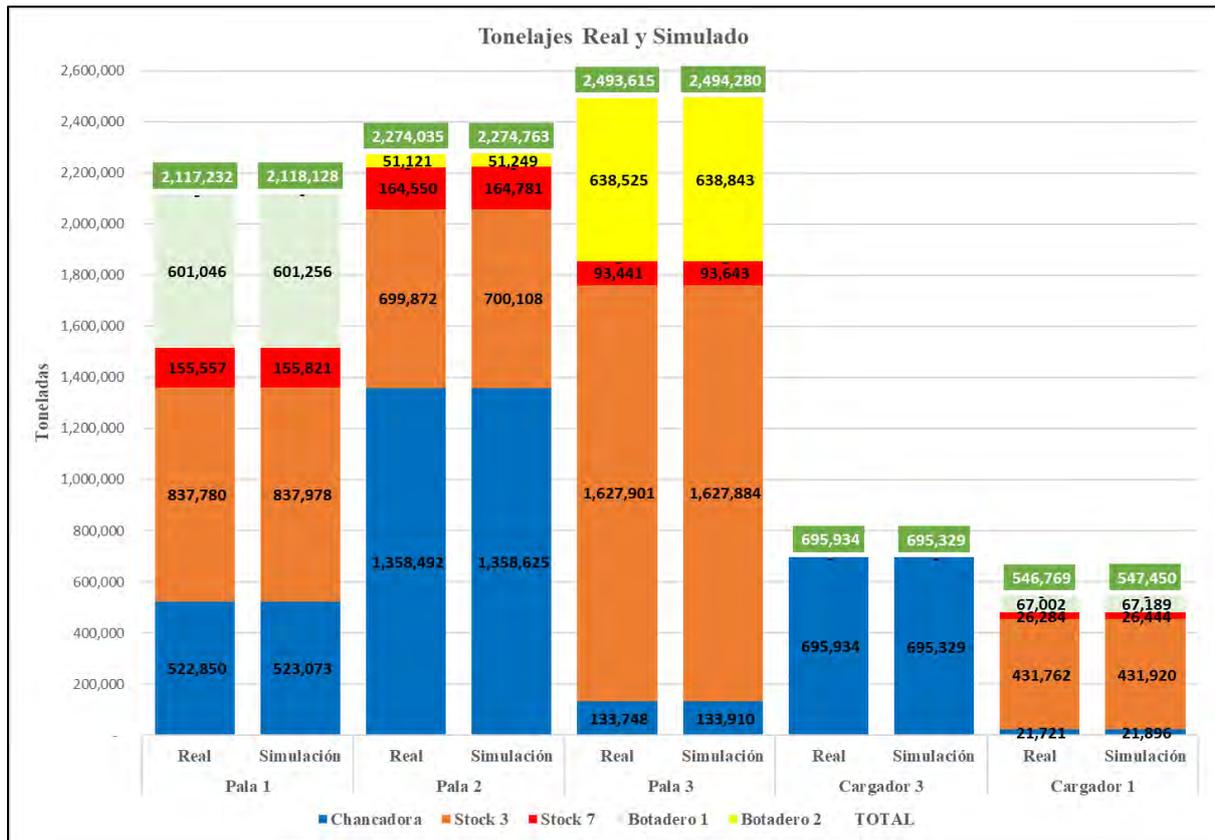


Figura 23. Resultados del tonelaje planeado versus la simulación.

Además, el tonelaje total acumulado en la simulación fue de 8'129,949, por lo que se produjo 0.029% sobre lo estimado en el plan.

Con respecto al número de camiones empleado en la simulación por cada equipo de carguío para cumplir con el tonelaje movido en el mes, se emplearon 24 camiones distribuidos como se muestra en la figura 24.

Equipo	# de camiones
<b>Pala 1</b>	6
<b>Pala 2</b>	8
<b>Pala 3</b>	7
<b>Cargador 3</b>	1
<b>Cargador 1</b>	2

Figura 24. Distribución de camiones para el mes de enero.

Entonces, contando con 24 camiones de la simulación y una disponibilidad de flota igual al 80.55%, el número total de camiones requeridos en el mes es igual a 30.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 25 grafica estos valores a continuación.

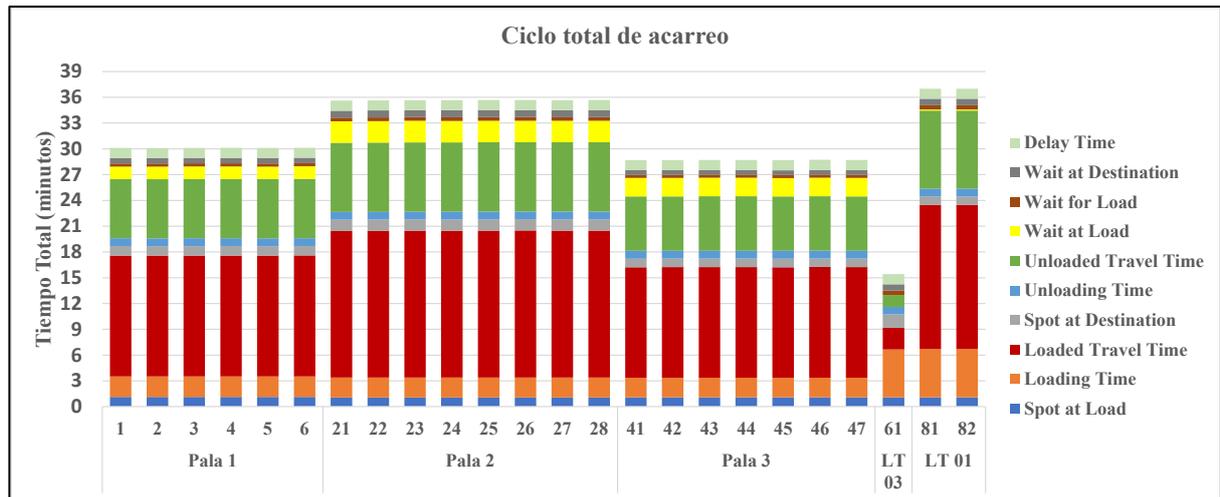


Figura 25. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 1.

#### 4.4.2 MES DE FEBRERO

En el segundo mes del año se planea mover un total de 9'066,673 toneladas métricas a lo largo de 31 días, enviándolas a cuatro destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botadero 1. La siguiente tabla recopila el tonelaje asignado a cada destino.

Tabla 11. Tonelaje planificado para el mes de febrero.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1
<b>Pala 1</b>	558,173	1,274,166	211,487	879,108
<b>Pala 2</b>	1,673,243	915,246	259,037	47,517
<b>Pala 3</b>	700,307	657,725	82,251	416,560
<b>Cargador 3</b>	612,101		752	137,993
<b>Cargador 1</b>	2,183	34,186	3,735	600,904
<b>Tonelaje Total</b>	3,546,006	2,881,323	557,261	2,082,083

Al comparar los tonelajes planeados con los obtenidos con la simulación, se encuentra lo siguiente.

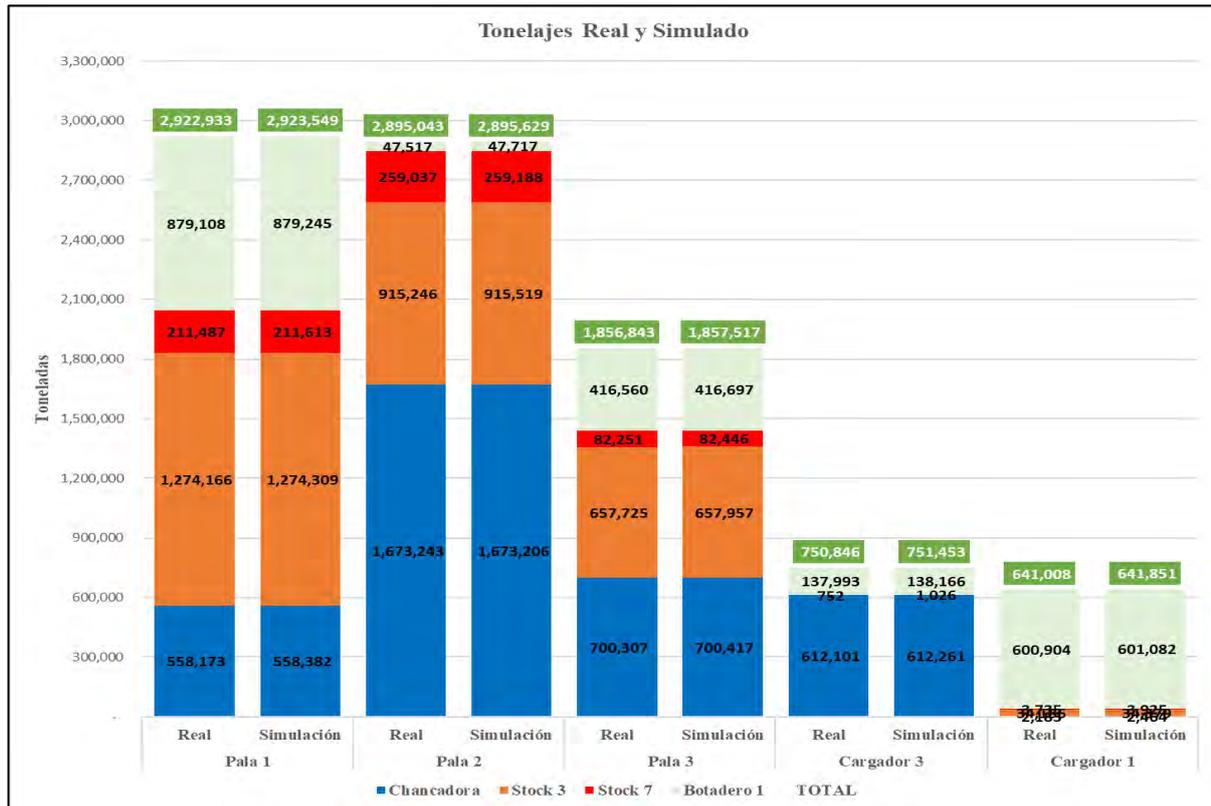


Figura 26. Resultados del tonelaje planeado de febrero versus la simulación.

De la figura 26, el tonelaje total acumulado en la simulación fue de 9'069,999, por lo que se produjo 0.037% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 25 camiones como se muestra en la figura 27.

Equipo	# de camiones
Pala 1	7
Pala 2	9
Pala 3	5
Cargador 3	2
Cargador 1	2

Figura 27. Distribución de camiones para el mes de febrero.

Dado que la simulación emplea 25 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 80.35%, el número total de camiones requeridos es igual a 32.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 28 grafica estos valores a continuación.

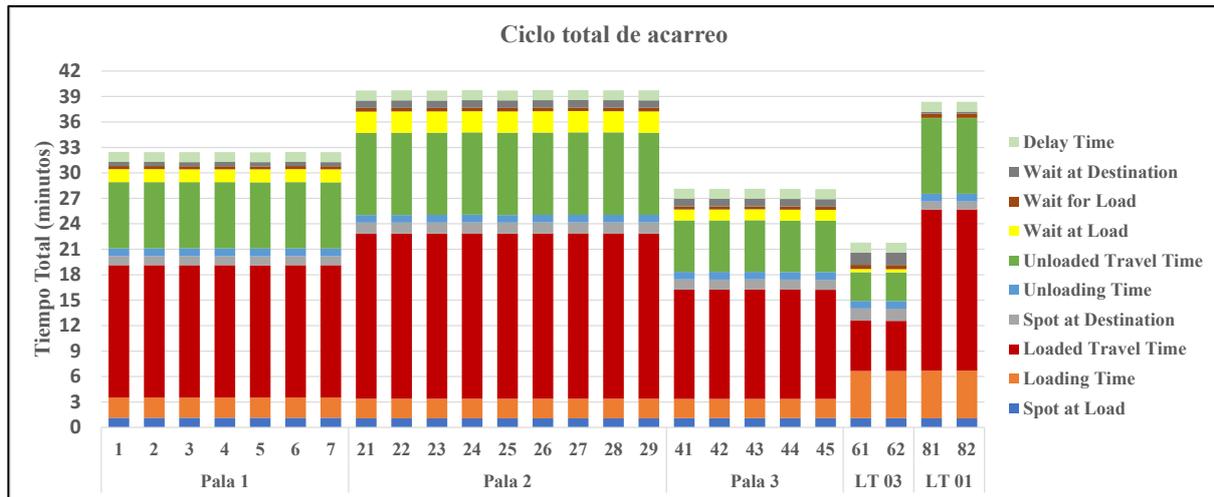


Figura 28. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 2.

#### 4.4.3 MES DE MARZO

Durante el tercer mes del año se planea mover un total de 8'984,728 toneladas métricas a lo largo de 29 días, enviándolas a cuatro destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botadero 1. La siguiente tabla recopila el tonelaje asignado a cada destino.

Tabla 12. Tonelaje planificado para el mes de marzo.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1
<b>Pala 1</b>	389,401	541,832	95,203	1,438,129
<b>Pala 2</b>	1,404,542	622,140	374,473	13,810
<b>Pala 3</b>	592,559	980,761	439,331	727,814
<b>Cargador 3</b>	412,343	119,429	121,764	111,194
<b>Cargador 1</b>		229,980	298,173	71,851
<b>Tonelaje Total</b>	2,798,845	2,494,142	1,328,943	2,362,798

Al comparar los tonelajes planeados con los obtenidos con la simulación, se encuentra lo siguiente.

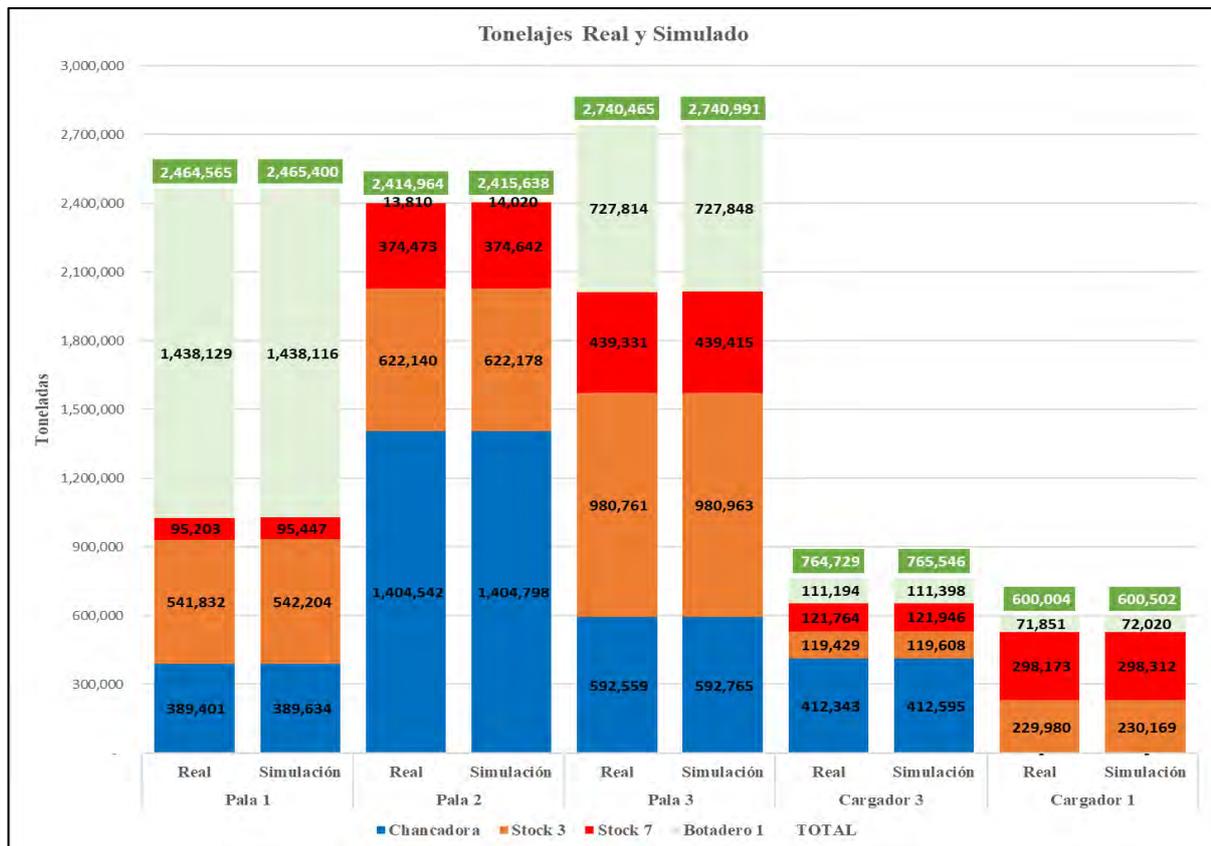


Figura 29. Resultados del tonelaje planeado de marzo versus la simulación.

El tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 29 fue de 8'988,077, por lo que se produjo 0.037% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 27 camiones como se muestra en la figura 30.

Equipo	# de camiones
Pala 1	7
Pala 2	8
Pala 3	8
Cargador 3	2
Cargador 1	2

Figura 30. Distribución de camiones para el mes de marzo.

Dado que la simulación emplea 27 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 82.08%, el número total de camiones requeridos es igual a 33.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 31 grafica estos valores a continuación

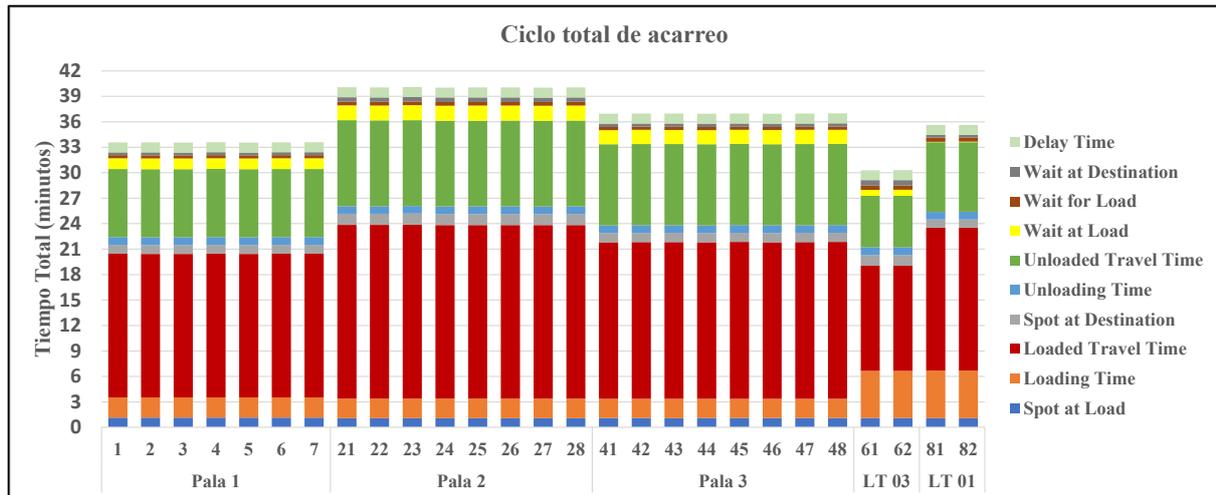


Figura 31. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 3.

#### 4.4.4 MES DE ABRIL

Durante el cuarto mes del año se planea mover un total de 10'984,636 toneladas métricas a lo largo de 31 días, enviándolas a cinco destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botaderos 1 y 2. La siguiente tabla recopila el tonelaje estimado a mover hacia cada destino.

Tabla 13. Tonelaje planificado para el mes de abril.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1	Botadero 2
<b>Pala 1</b>	1,141,326	1,686,960	70,745	198,263	
<b>Pala 2</b>	2,152,830	893,337	8,678		
<b>Pala 3</b>	515,867	2,059,461	8,548		216,526
<b>Cargador 3</b>	250,180	129,735	27,673		385,464
<b>Cargador 1</b>	4,401	340,987	171,282		91,390
<b>Cargador 2</b>	8,440		63,539	559,006	
<b>Tonelaje Total</b>	4,073,044	5,110,481	350,464	757,268	693,379

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planeados con los de la simulación se muestran a continuación.

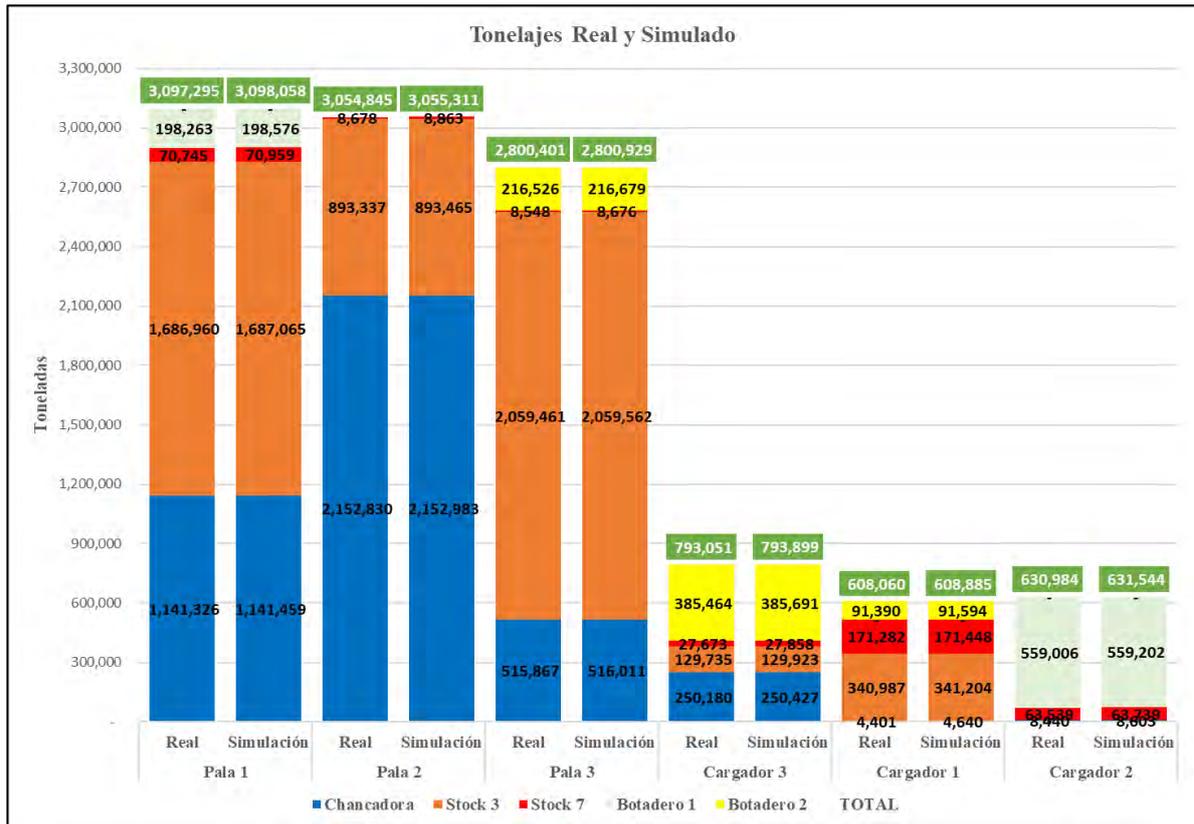


Figura 32. Resultados del tonelaje planeado de abril versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 32 fue de 10'988,626, por lo que se produjo 0.036% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 31 camiones como se muestra en la figura 33.

Equipo	# de camiones
Pala 1	8
Pala 2	9
Pala 3	8
Cargador 3	2
Cargador 1	2
Cargador 2	2

Figura 33. Distribución de camiones para el mes de abril.

Dado que la simulación emplea 31 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.92%, el número total de camiones requeridos es igual a 38.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 34 grafica estos valores a continuación.

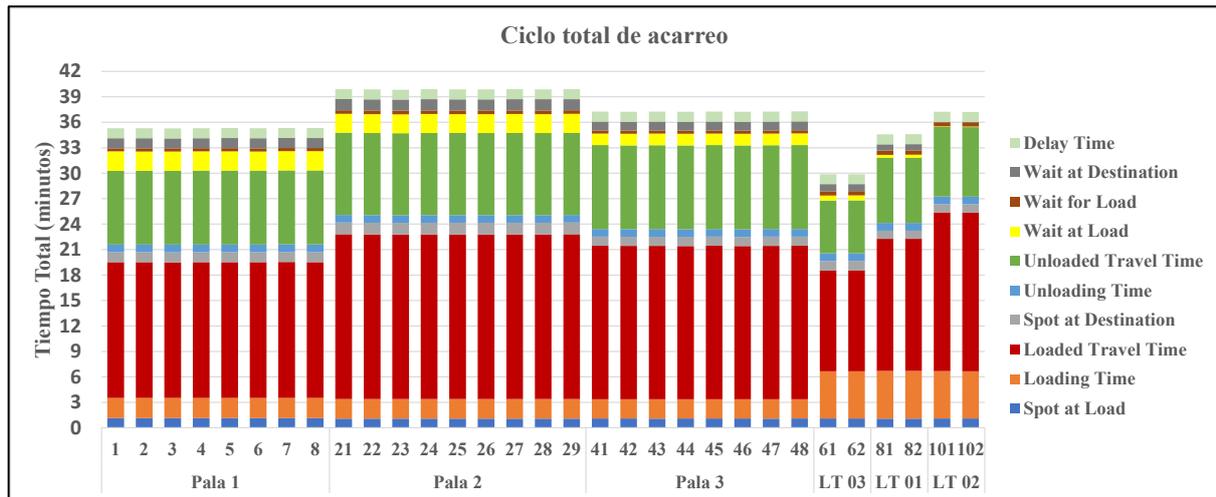


Figura 34. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 4.

#### 4.4.5 MES DE MAYO

Durante el quinto mes del año se planea mover un total de 11'249,513 toneladas métricas a lo largo de 30 días, enviándolas a cinco destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botaderos 1 y 2. La siguiente tabla recopila el tonelaje estimado a mover hacia cada destino.

Tabla 14. Tonelaje planificado para el mes de mayo.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1	Botadero 2
<b>Pala 1</b>	635,680	567,793	764,445	756,275	
<b>Pala 2</b>	1,675,510	1,211,937	252,632		
<b>Pala 3</b>	489,829	1,260,483	1,083,141	213,915	
<b>Cargador 3</b>	309,725	506,120	4,210		30,702
<b>Cargador 1</b>	140,095	85,583	285,254	156,788	
<b>Cargador 2</b>	456,611	55,809	60,823		246,152
<b>Tonelaje Total</b>	3,707,450	3,687,725	2,450,506	1,126,978	276,854

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planeados con los de la simulación se muestran a continuación.

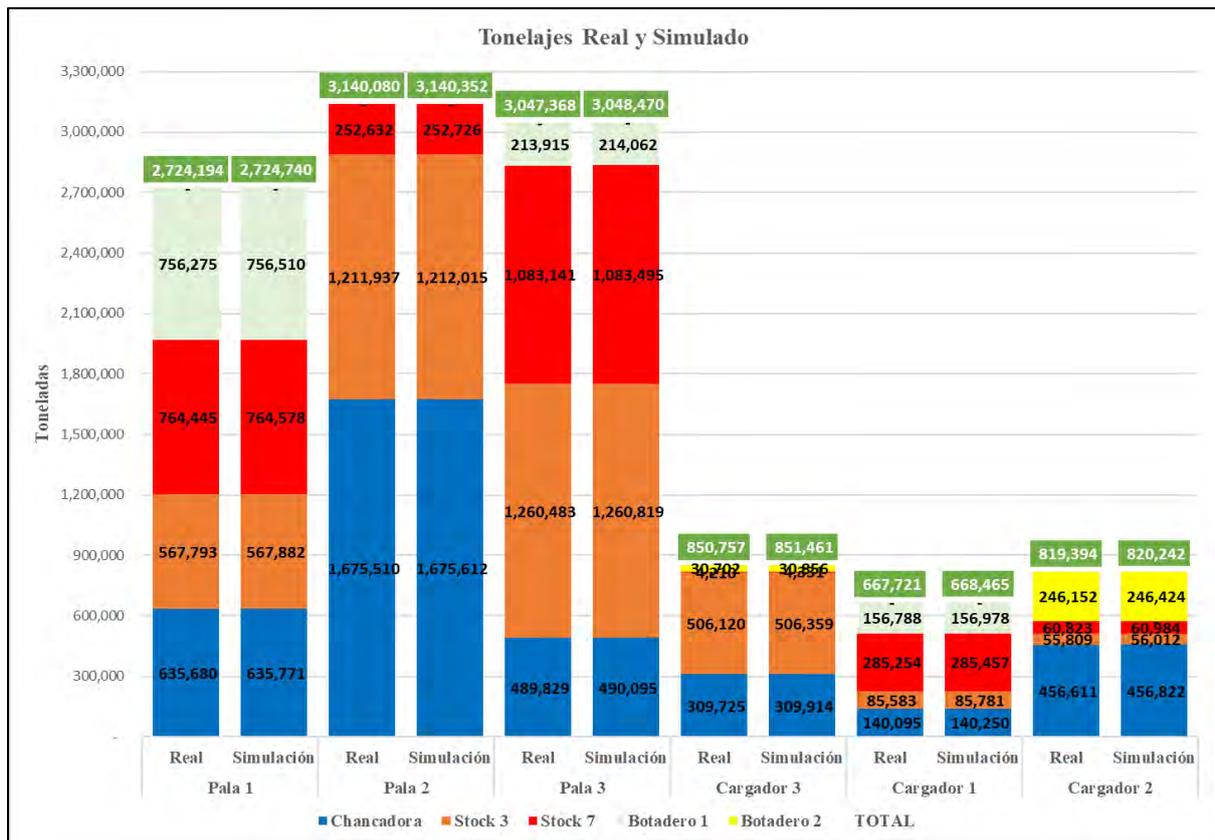


Figura 35. Resultados del tonelaje planeado de mayo versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 35 fue de 11'253,731, por lo que se produjo 0.037% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 33 camiones como se muestra en la figura 36.

Equipo	# de camiones
Pala 1	8
Pala 2	10
Pala 3	8
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	2

Figura 36. Distribución de camiones para el mes de mayo.

Dado que la simulación emplea 33 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.90%, el número total de camiones requeridos es igual a 41.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 37 grafica estos valores a continuación.

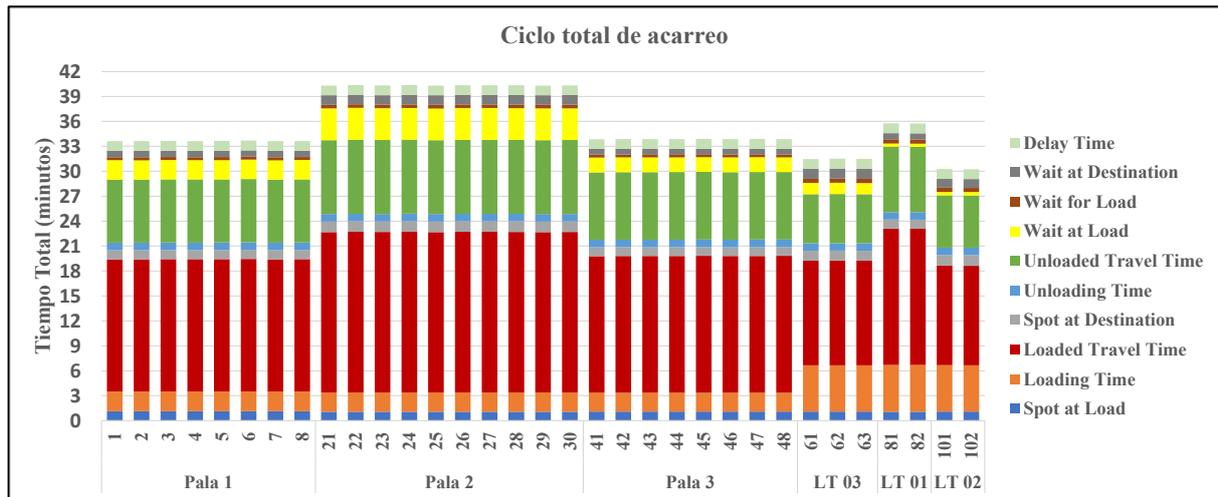


Figura 37. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 5.

#### 4.4.6 MES DE JUNIO

Durante el mes de junio se planea mover un total de 11'516,943 toneladas métricas a lo largo de 31 días, enviándolas a cinco destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botaderos 1 y 2. La siguiente tabla recopila el tonelaje estimado a mover hacia cada destino.

Tabla 15. Tonelaje planificado para el mes de junio.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1	Botadero 2
<b>Pala 1</b>	1,417,400	958,022	3,338	336,139	
<b>Pala 2</b>	1,771,041	1,039,132	371,209		
<b>Pala 3</b>	204,219	1,403,929	836,040	682,438	
<b>Cargador 3</b>	387	906,221	1,094		
<b>Cargador 1</b>		132,692	142,458		436,210
<b>Cargador 2</b>	37,881	465,143	144,579		227,370
<b>Tonelaje Total</b>	3,430,929	4,905,139	1,498,717	1,018,577	663,580

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planeados con los de la simulación se muestran a continuación.

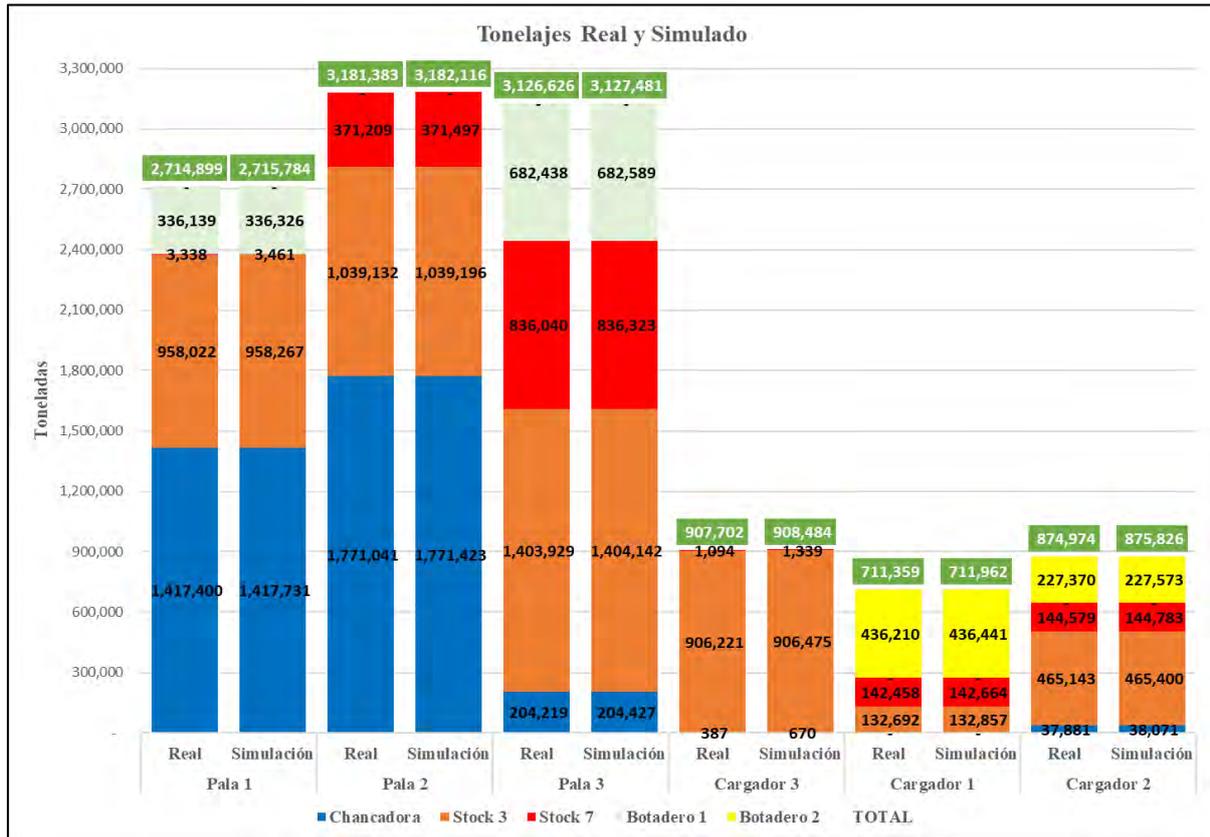


Figura 38. Resultados del tonelaje planeado de junio versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 38 fue de 11'521,653, por lo que se produjo 0.041% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 33 camiones como se muestra en la figura 39.

Equipo	# de camiones
Pala 1	7
Pala 2	10
Pala 3	8
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	3

Figura 39. Distribución de camiones para el mes de junio.

Dado que la simulación emplea 33 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.96%, el número total de camiones requeridos es igual a 41.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 40 grafica estos valores a continuación.

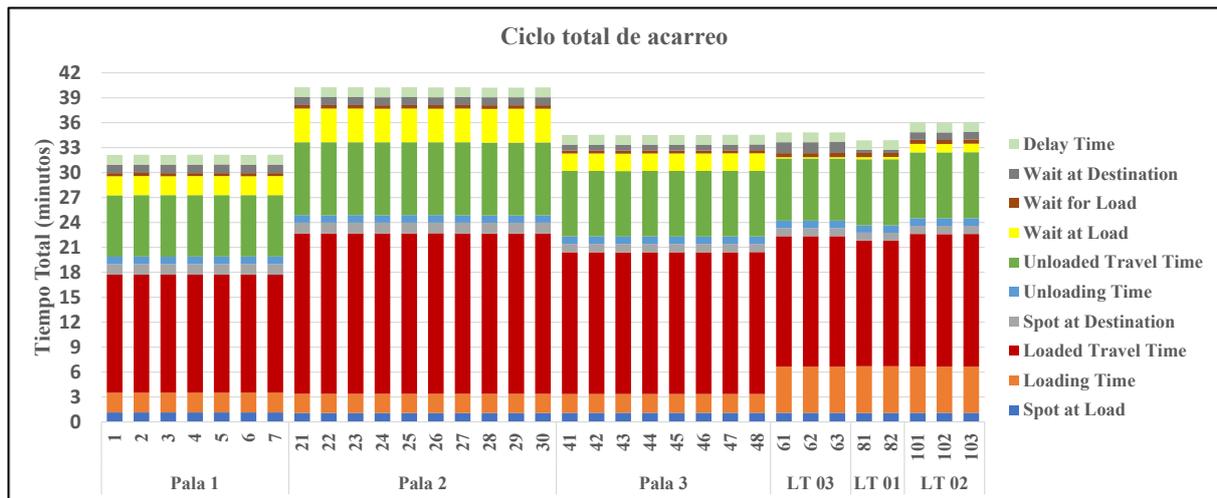


Figura 40. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 6.

#### 4.4.7 MES DE JULIO

Durante el mes de junio se planea mover un total de 11'505,751 toneladas métricas a lo largo de 30 días, enviándolas a cinco destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botaderos 1 y 2. La siguiente tabla recopila el tonelaje estimado a mover hacia cada destino.

Tabla 16. Tonelaje planificado para el mes de julio.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1	Botadero 2
<b>Pala 1</b>	1,456,840	938,191	337,429	427,152	
<b>Pala 2</b>	1,511,801	1,179,287	210,201		
<b>Pala 3</b>	435,041	1,978,153	414,347		200,856
<b>Cargador 3</b>		23,874	18,726	836,500	
<b>Cargador 1</b>	149,027	111,609	326,929		103,102
<b>Cargador 2</b>	185,789	332,861	282,024		46,012
<b>Tonelaje Total</b>	3,738,498	4,563,975	1,589,657	1,263,652	349,969

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planeados con los de la simulación se muestran a continuación.

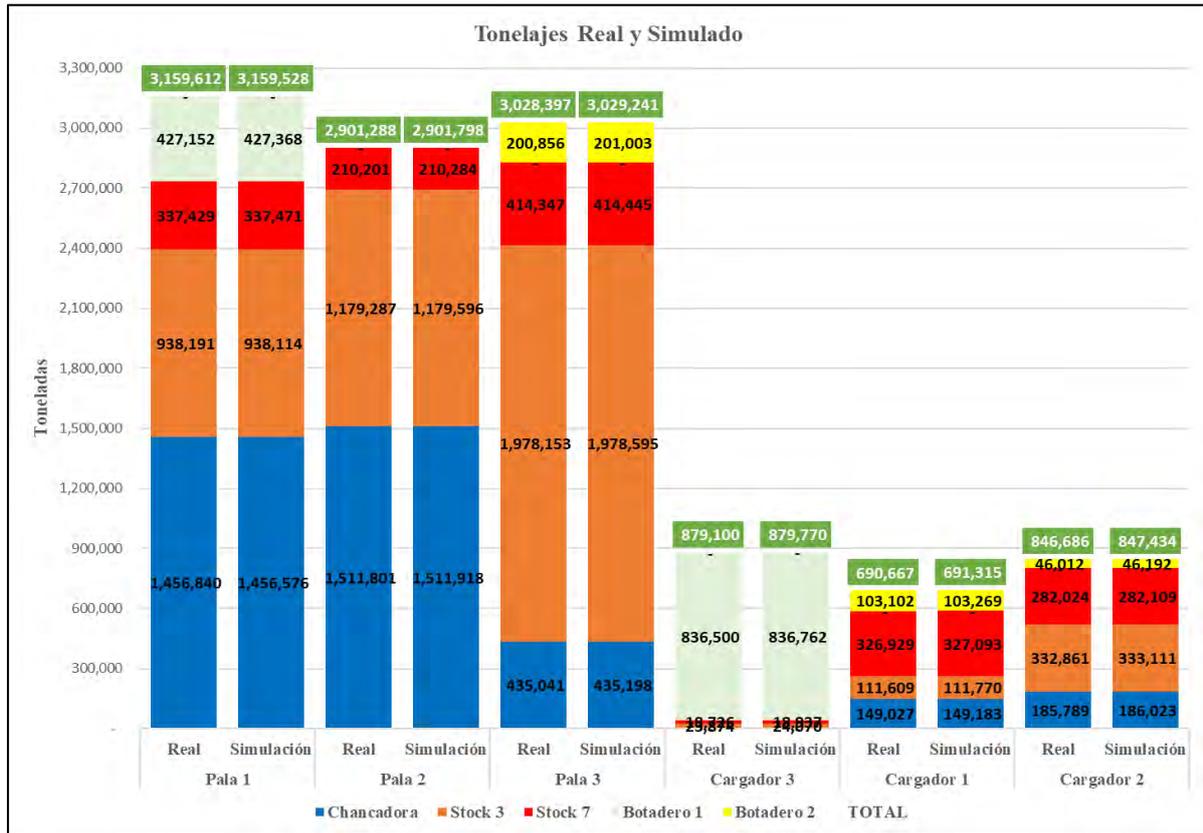


Figura 41. Resultados del tonelaje planeado de julio versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 41 fue de 11'509,086, por lo que se produjo 0.029% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 34 camiones como se muestra en la figura 42.

Equipo	# de camiones
Pala 1	8
Pala 2	10
Pala 3	8
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	3

Figura 42. Distribución de camiones para el mes de julio.

Dado que la simulación emplea 34 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.82%, el número total de camiones requeridos es igual a 42.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 43 grafica estos valores a continuación

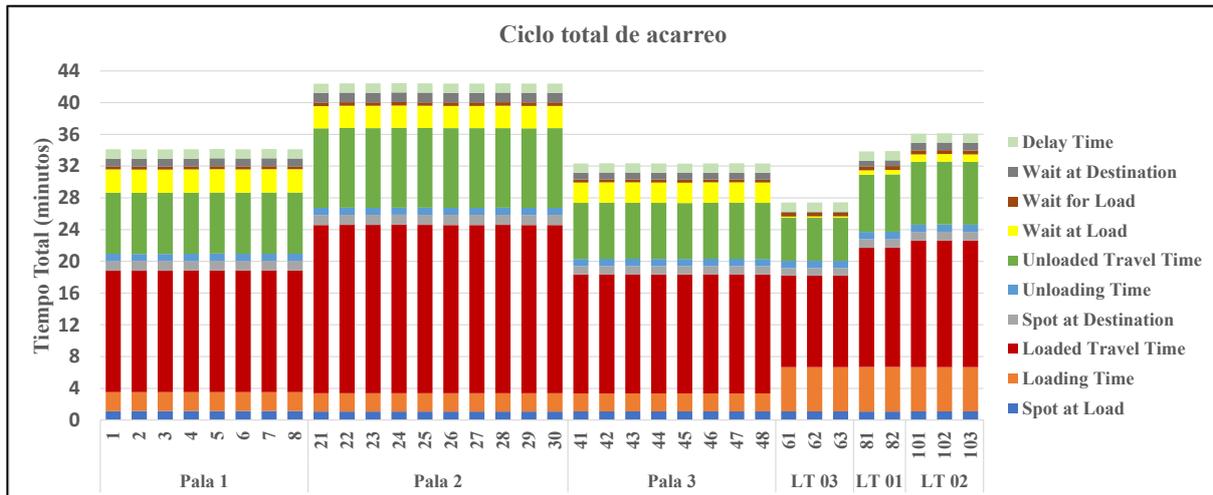


Figura 43. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 7.

#### 4.4.8 MES DE AGOSTO

Durante el mes de agosto se planea mover un total de 11'708,980 toneladas métricas a lo largo de 31 días, enviándolas a cinco destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botaderos 1 y 2. La siguiente tabla recopila el tonelaje estimado a mover hacia cada destino.

Tabla 17. Tonelaje planificado para el mes de agosto.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1	Botadero 2
<b>Pala 1</b>	1,759,338	1,078,591	169,521	112,094	
<b>Pala 2</b>	931,709	687,816	861,840	295,977	419,481
<b>Pala 3</b>	389,282	1,818,852	682,760		351,240
<b>Cargador 3</b>	361,363	392,297			
<b>Cargador 1</b>	6,664	123,455	4,117	388,529	
<b>Cargador 2</b>	491,293	382,763			
<b>Tonelaje Total</b>	3,939,649	4,483,773	1,718,237	796,601	770,721

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planeados con los de la simulación se muestran a continuación.

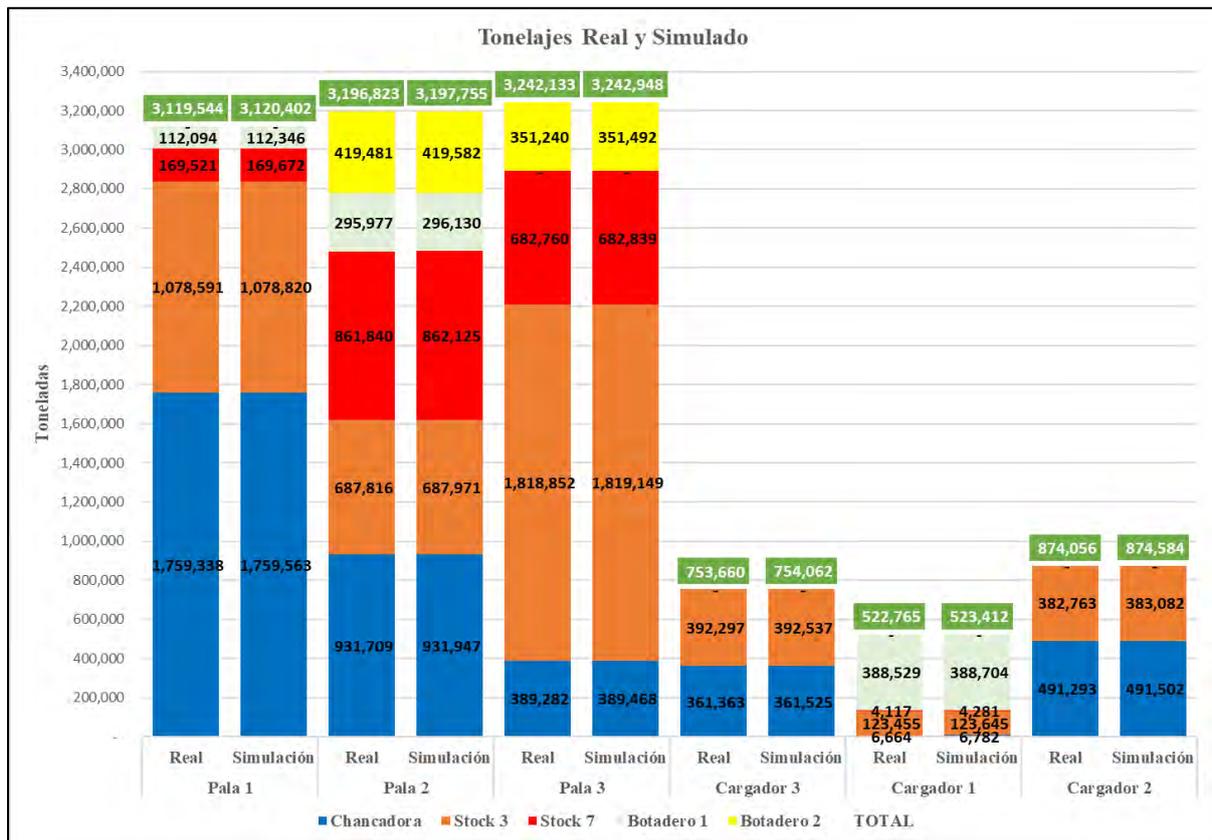


Figura 44. Resultados del tonelaje planeado de agosto versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 44 fue de 11'712,876, por lo que se produjo 0.036% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 34 camiones como se muestra en la figura 45.

Equipo	# de camiones
Pala 1	8
Pala 2	9
Pala 3	8
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	4

Figura 45. Distribución de camiones para el mes de agosto.

Dado que la simulación emplea 34 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 82.06%, el número total de camiones requeridos es igual a 42.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 46 grafica estos valores a continuación

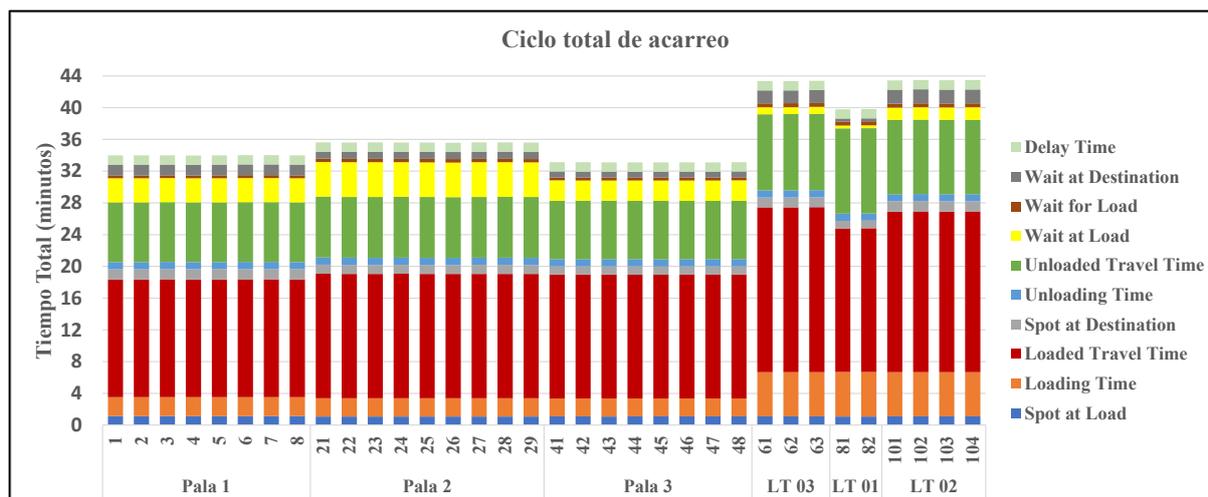


Figura 46. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 8.

#### 4.4.9 MES DE SEPTIEMBRE

Durante el mes de septiembre se planea mover un total de 11'767,825 toneladas métricas a lo largo de 31 días, enviándolas a cinco destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botaderos 1 y 2. La siguiente tabla recopila el tonelaje estimado a mover hacia cada destino.

Tabla 18. Tonelaje planificado para el mes de septiembre.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1	Botadero 2
<b>Pala 1</b>	1,997,047	1,219,431	1,845	47,760	
<b>Pala 2</b>	971,983	961,315	661,182		532,236
<b>Pala 3</b>	234,827	1,780,244	476,536		457,062
<b>Cargador 3</b>	438,790	407,035			
<b>Cargador 1</b>		70,758	49,807	591,714	
<b>Cargador 2</b>	109,798	758,457			
<b>Tonelaje Total</b>	3,752,444	5,197,240	1,189,370	639,474	989,298

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planeados con los de la simulación se muestran a continuación.

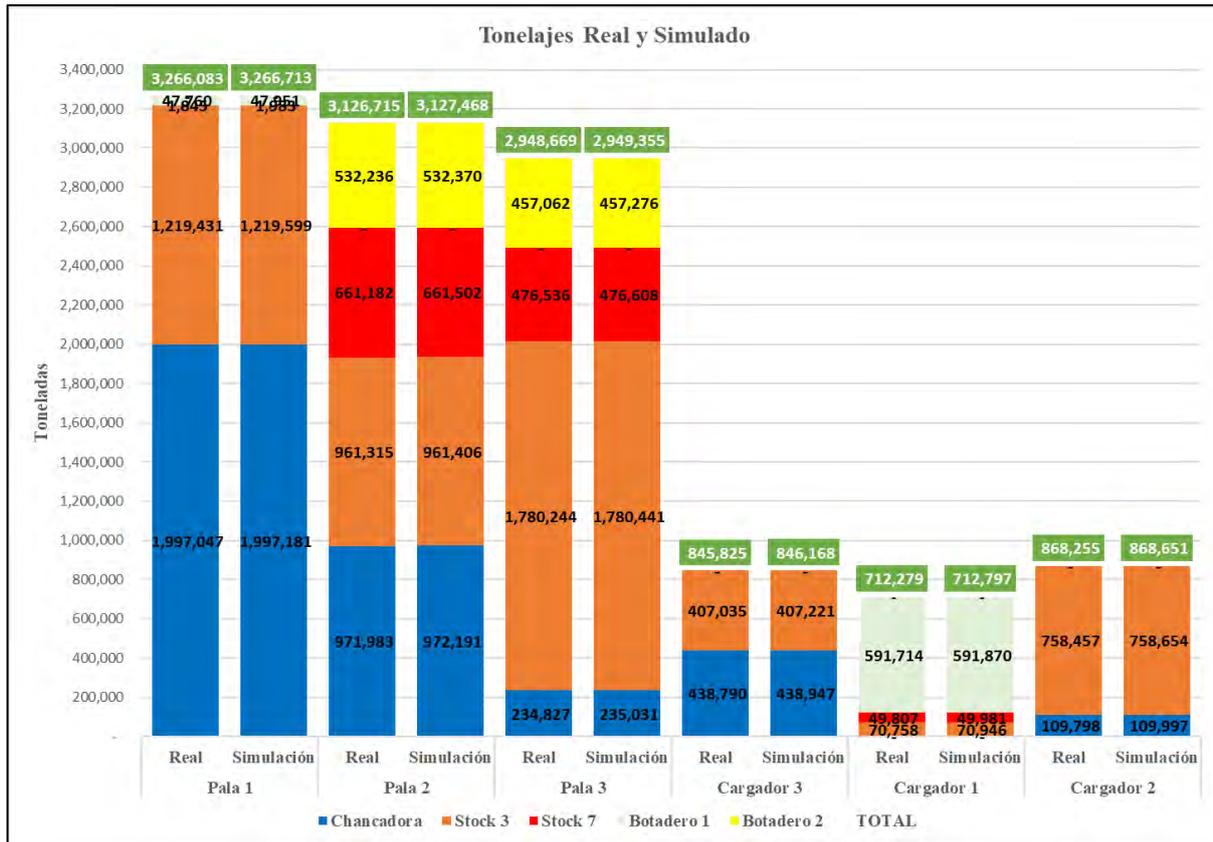


Figura 47. Resultados del tonelaje planeado de septiembre versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 47 fue de 11'771,152, por lo que se produjo 0.028% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 34 camiones como se muestra en la figura 48.

Equipo	# de camiones
Pala 1	9
Pala 2	9
Pala 3	8
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	3

Figura 48. Distribución de camiones para el mes de septiembre.

Dado que la simulación emplea 34 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.94%, el número total de camiones requeridos es igual a 42.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 49 grafica estos valores a continuación.

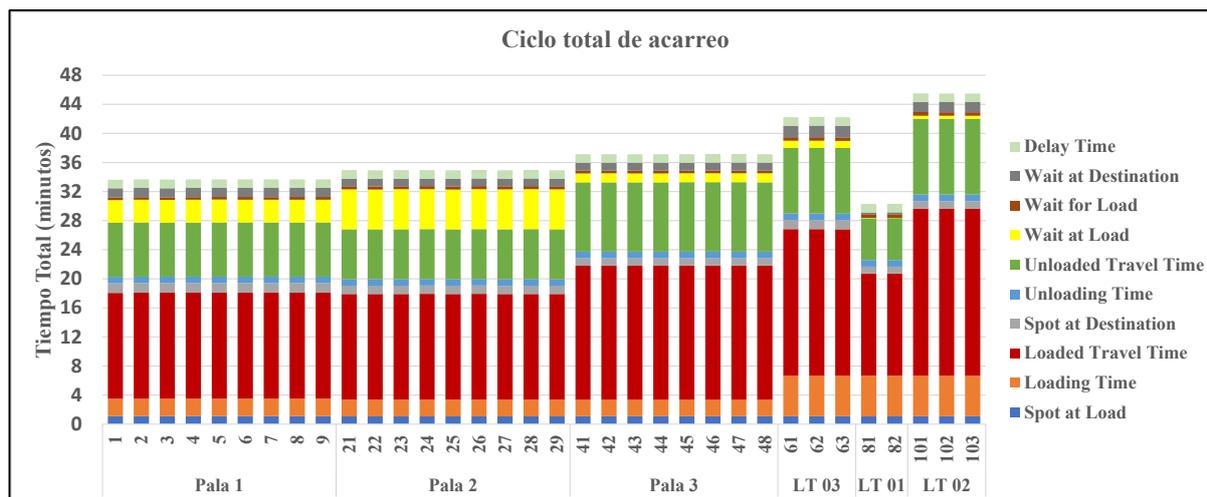


Figura 49. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 9.

#### 4.4.10 MES DE OCTUBRE

Durante el mes de octubre se planea mover un total de 11'528,962 toneladas métricas a lo largo de 30 días, enviándolas a cinco destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botaderos 1 y 2. La siguiente tabla recopila el tonelaje estimado a mover hacia cada destino.

Tabla 19. Tonelaje planificado para el mes de octubre.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1	Botadero 2
<b>Pala 1</b>	1,311,902	1,568,920	160,379	20,278	
<b>Pala 2</b>	1,039,175	1,162,582	388,678		299,578
<b>Pala 3</b>	171,505	1,265,964	1,089,319		566,745
<b>Cargador 3</b>	826,214	92,945			
<b>Cargador 1</b>		74,335	24,391	591,618	
<b>Cargador 2</b>	589,673	284,760			
<b>Tonelaje Total</b>	3,938,470	4,449,505	1,662,767	611,896	866,324

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planeados con los de la simulación se muestran a continuación.

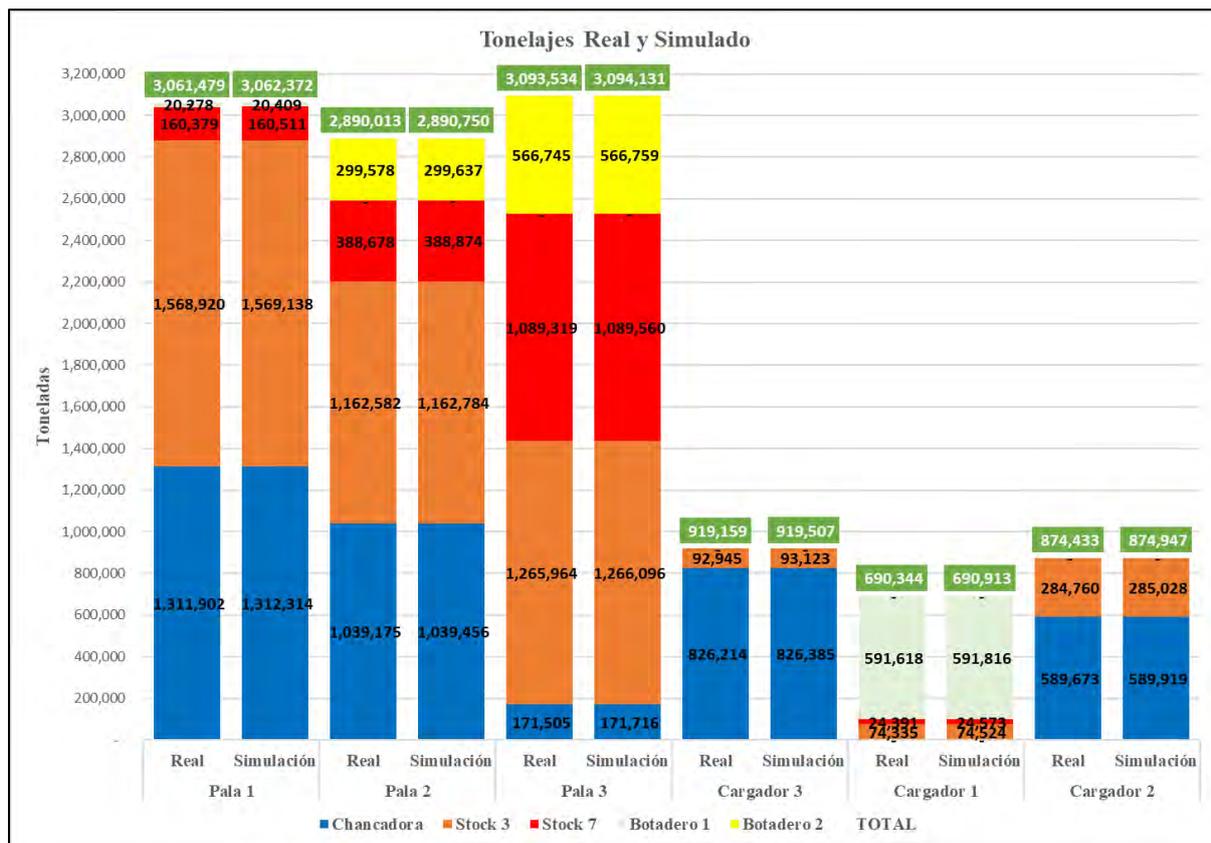


Figura 50. Resultados del tonelaje planeado de octubre versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 50 fue de 11'532,620, por lo que se produjo 0.032% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 34 camiones como se muestra en la figura 51.

Equipo	# de camiones
<b>Pala 1</b>	9
<b>Pala 2</b>	9
<b>Pala 3</b>	8
<b>Cargador 3</b>	3
<b>Cargador 1</b>	2
<b>Cargador 2</b>	3

Figura 51. Distribución de camiones para el mes de octubre.

Dado que la simulación emplea 34 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.84%, el número total de camiones requeridos es igual a 42.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 52 grafica estos valores a continuación.

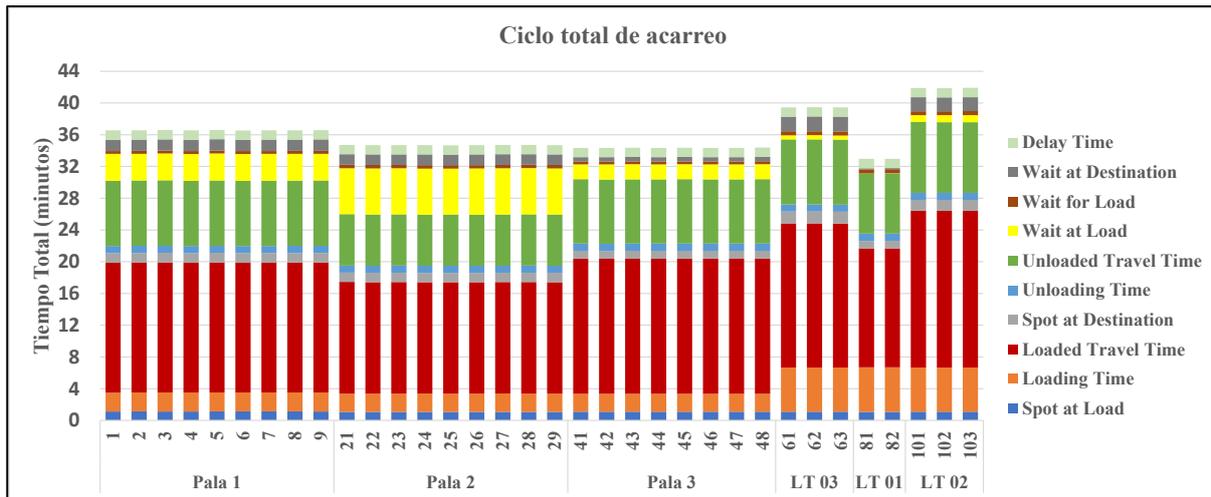


Figura 52. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 10.

#### 4.4.11 MES DE NOVIEMBRE

Durante el mes de agosto se planea mover un total de 11'962,507 toneladas métricas a lo largo de 31 días, enviándolas a cinco destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botaderos 1 y 2. La siguiente tabla recopila el tonelaje estimado a mover hacia cada destino.

Tabla 20. Tonelaje planificado para el mes de noviembre.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1	Botadero 2
<b>Pala 1</b>	1,693,377	1,337,763	88,366	31,449	
<b>Pala 2</b>	626,747	1,029,961	1,115,599	458,345	271,563
<b>Pala 3</b>	817,416	1,925,116	181,923		337,695
<b>Cargador 3</b>	356,936	89,880	85,796		119,329
<b>Cargador 1</b>		20,594		500,726	
<b>Cargador 2</b>	857,872	16,052			
<b>Tonelaje Total</b>	4,352,348	4,419,367	1,471,684	990,521	728,587

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planeados con los de la simulación se muestran a continuación.

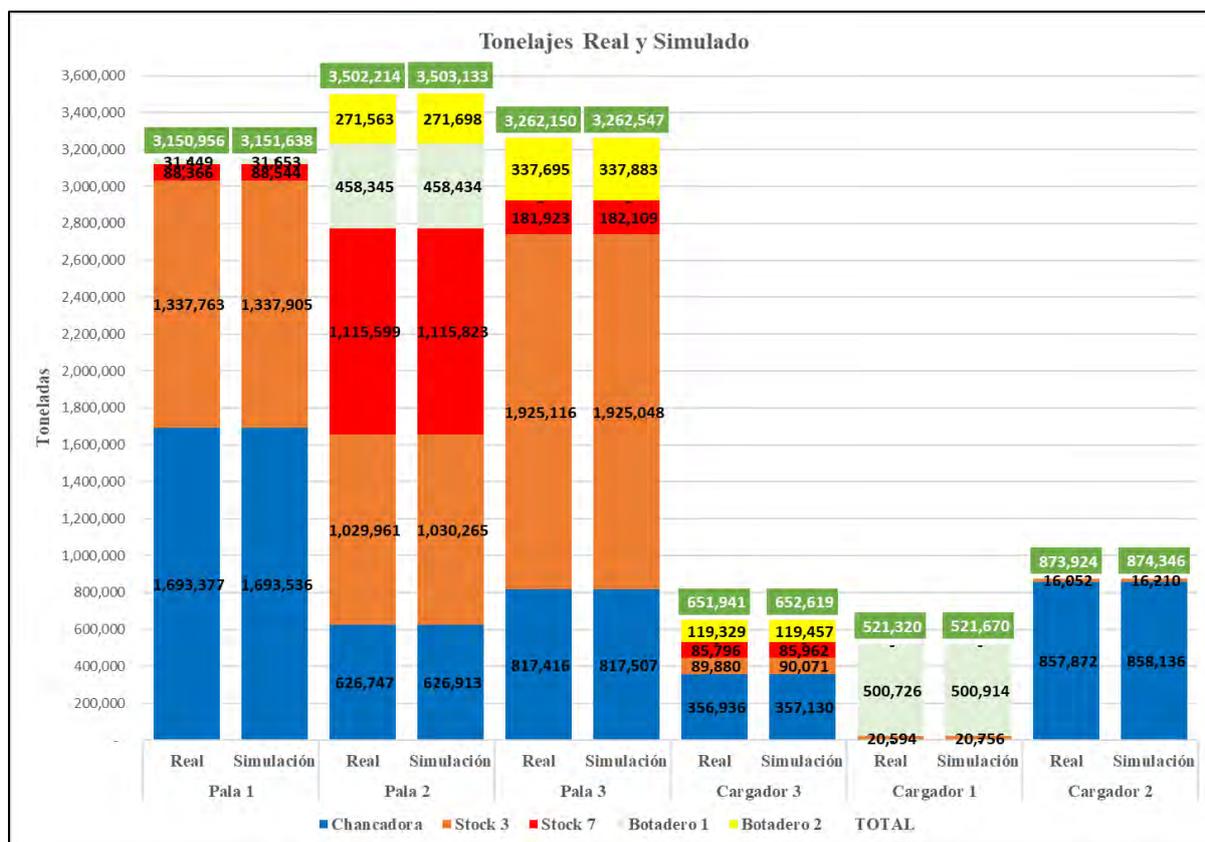


Figura 53. Resultados del tonelaje planeado de noviembre versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 53 fue de 11'965,953, por lo que se produjo 0.029% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 34 camiones como se muestra en la figura 54.

Equipo	# de camiones
Pala 1	8
Pala 2	10
Pala 3	8
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	3

Figura 54. Distribución de camiones para el mes de noviembre.

Dado que la simulación emplea 34 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.82%, el número total de camiones requeridos es igual a 42.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 55 grafica estos valores a continuación.

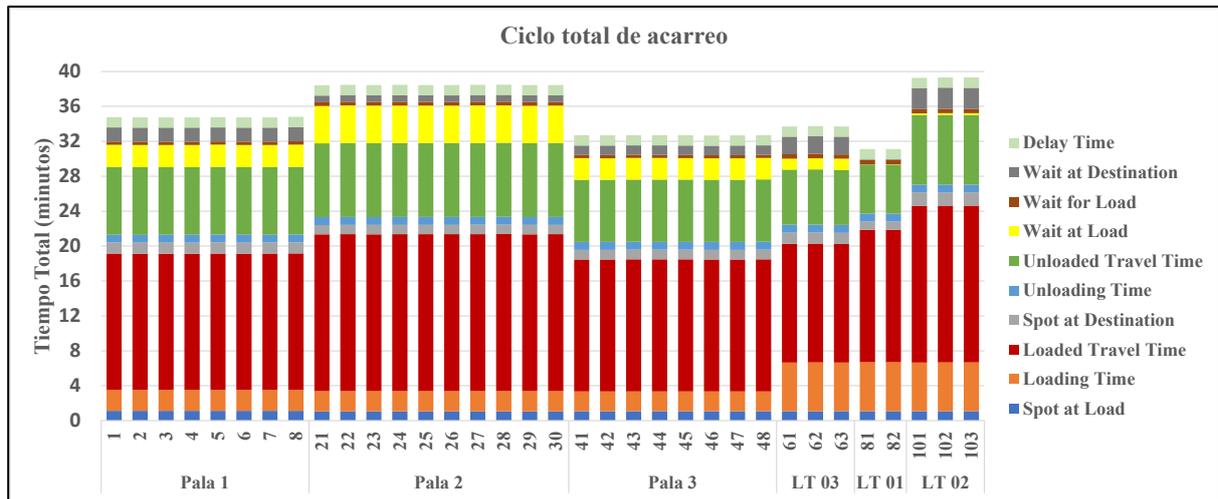


Figura 55. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 11.

#### 4.4.12 MES DE DICIEMBRE

Durante el mes de agosto se planea mover un total de 13'897,687 toneladas métricas a lo largo de 36 días, enviándolas a cinco destinos como la chancadora, *stockpiles* 3 y 7, y botaderos 1 y 2. La siguiente tabla recopila el tonelaje estimado a mover hacia cada destino.

Tabla 21. Tonelaje planificado para el mes de diciembre.

Equipo\Destino	Chancadora	Stock 3	Stock 7	Botadero 1	Botadero 2
<b>Pala 1</b>	1,943,377	1,537,763	88,366	61,449	
<b>Pala 2</b>	382,826	1,195,282	749,640	1,094,125	
<b>Pala 3</b>	1,709,743	1,510,853	390,271	369,567	
<b>Cargador 3</b>	139,942	536,537	247,494		129,980
<b>Cargador 1</b>		84,116	71,821	718,142	
<b>Cargador 2</b>	866,118	70,277			
<b>Tonelaje Total</b>	5,042,006	4,934,828	1,547,591	2,243,282	129,980

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planeados con los de la simulación se muestran a continuación

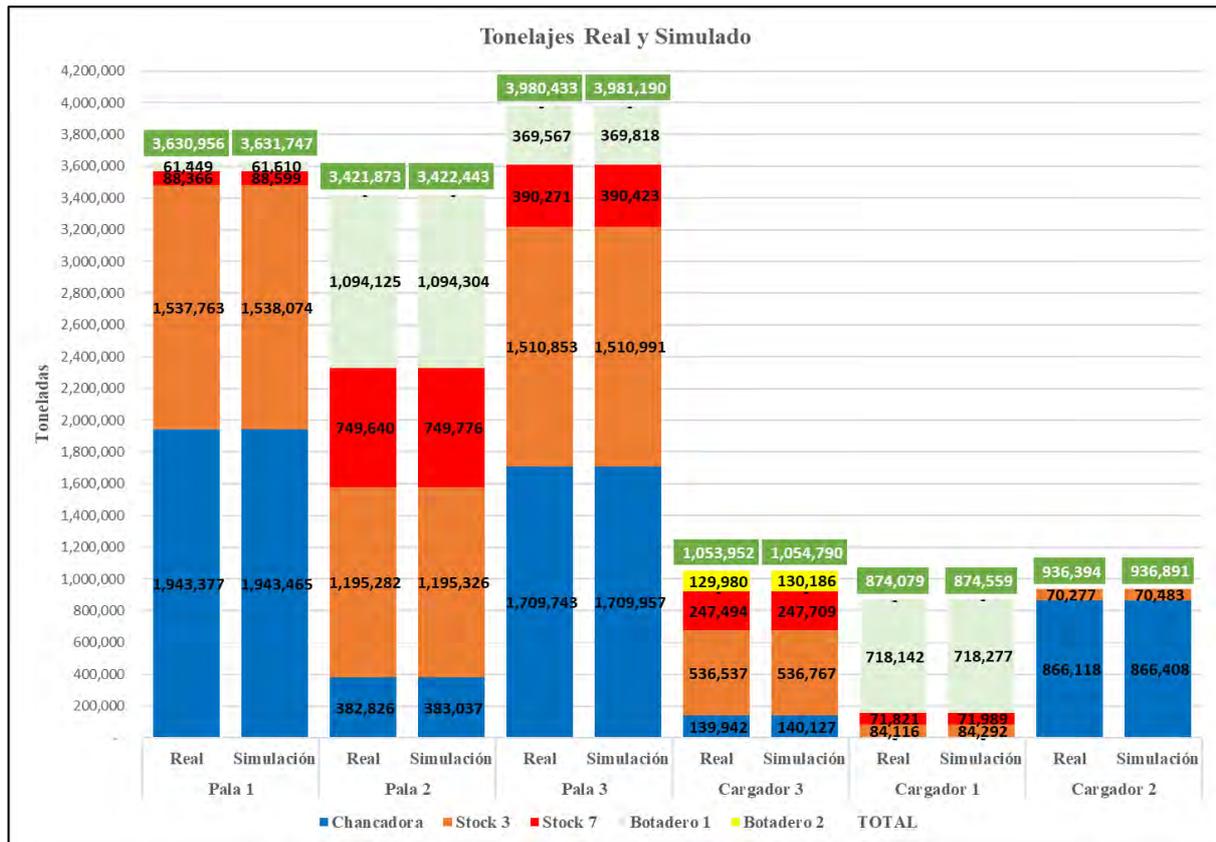


Figura 56. Resultados del tonelaje planeado de diciembre versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 56 fue de 13'901,619, por lo que se produjo 0.028% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 34 camiones como se muestra en la figura 57.

Equipo	# de camiones
Pala 1	8
Pala 2	9
Pala 3	9
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	3

Figura 57. Distribución de camiones para el mes de diciembre.

Dado que la simulación emplea 34 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.49%, el número total de camiones requeridos es igual a 42.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 58 grafica estos valores a continuación.

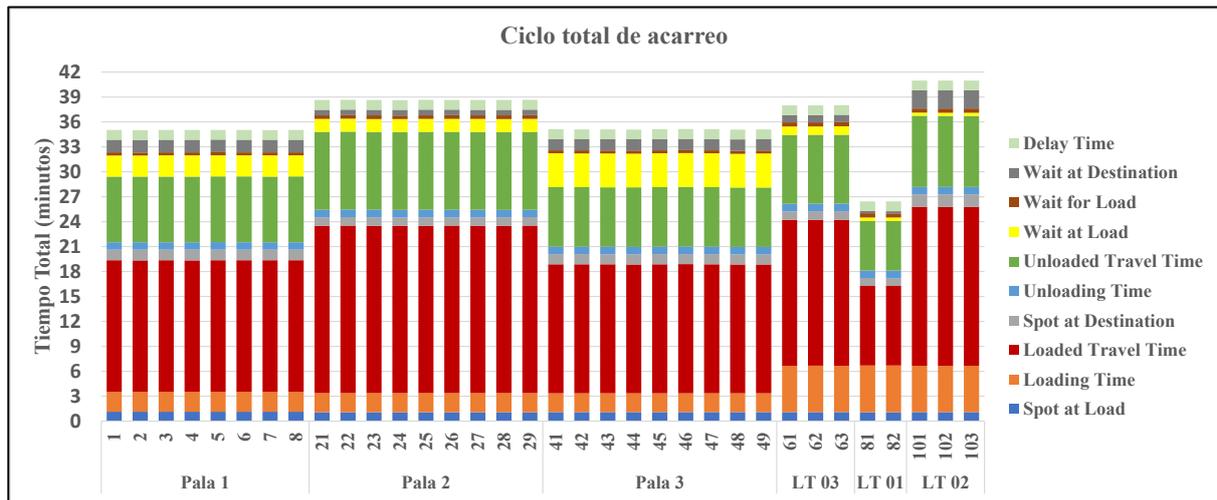


Figura 58. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 12.

#### 4.5 DESARROLLO DEL PLAN ANUAL MEDIANTE UN MODELO DETERMINÍSTICO

A diferencia del modelo estocástico, cada una de las funciones de distribución de los parámetros de la simulación es reemplazada por sus valores de media. Así también, se repiten 100 simulaciones para cada uno de los meses.

#### 4.5.1 MES DE ENERO

Luego de las 100 simulaciones se obtienen los tonelajes mostrados a continuación.

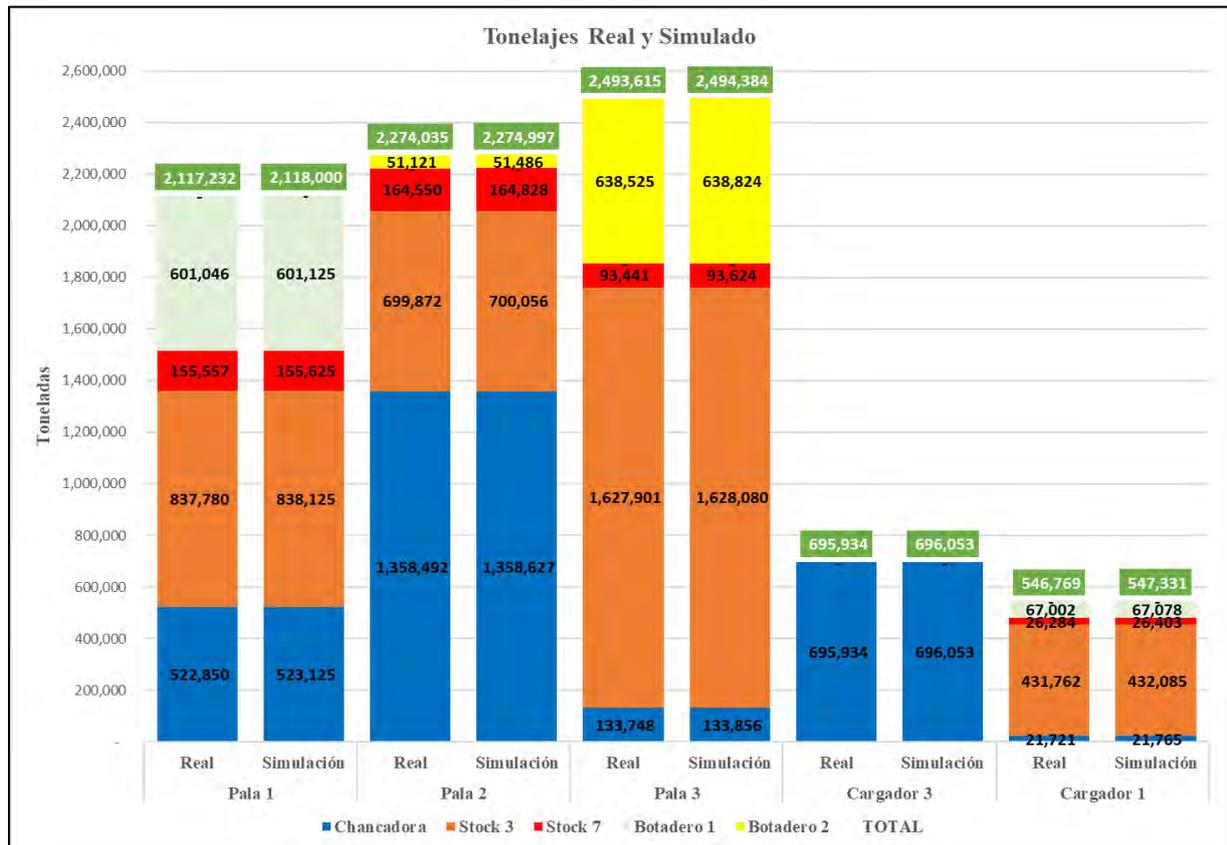


Figura 59. Resultados del tonelaje planeado versus la simulación.

Además, el tonelaje total acumulado en la simulación fue de 8'130,765, por lo que se produjo 0.039% sobre lo estimado en el plan.

Con respecto al número de camiones empleado en la simulación por cada equipo de carguío para cumplir con el tonelaje movido en el mes, se emplearon 24 camiones distribuidos como se muestra en la figura 60.

Equipo	# de camiones
Pala 1	6
Pala 2	8
Pala 3	7
Cargador 3	1
Cargador 1	2

Figura 60. Distribución de camiones para el mes de enero.

Entonces, contando con 24 camiones de la simulación y una disponibilidad de flota igual al 80.55%, el número total de camiones requeridos en el mes es igual a 30.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 61 grafica estos valores a continuación.

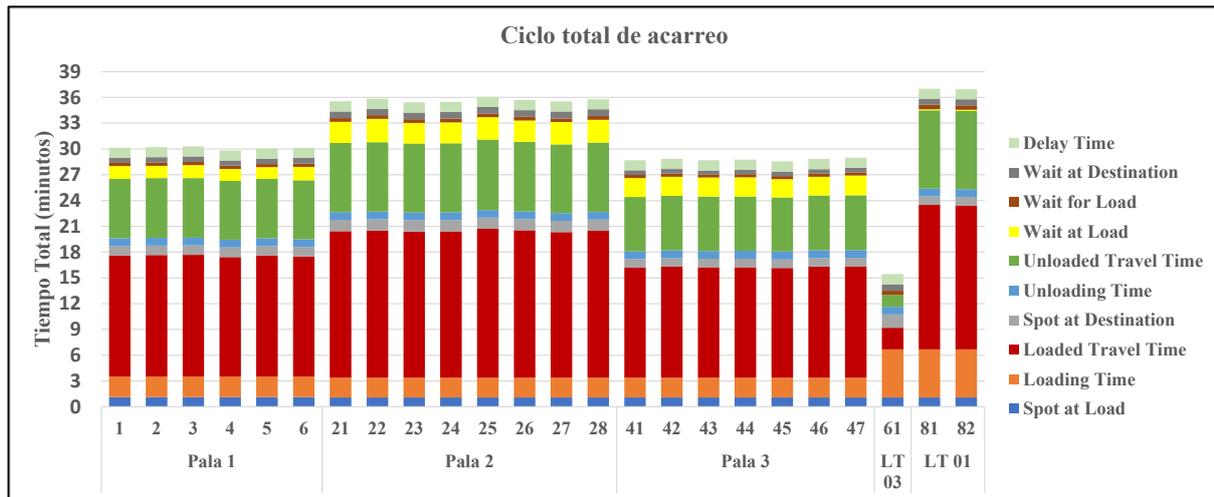


Figura 61. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 13.

#### 4.5.2 MES DE FEBRERO

Al comparar los tonelajes planificados con los obtenidos con la simulación, se encuentra lo siguiente.

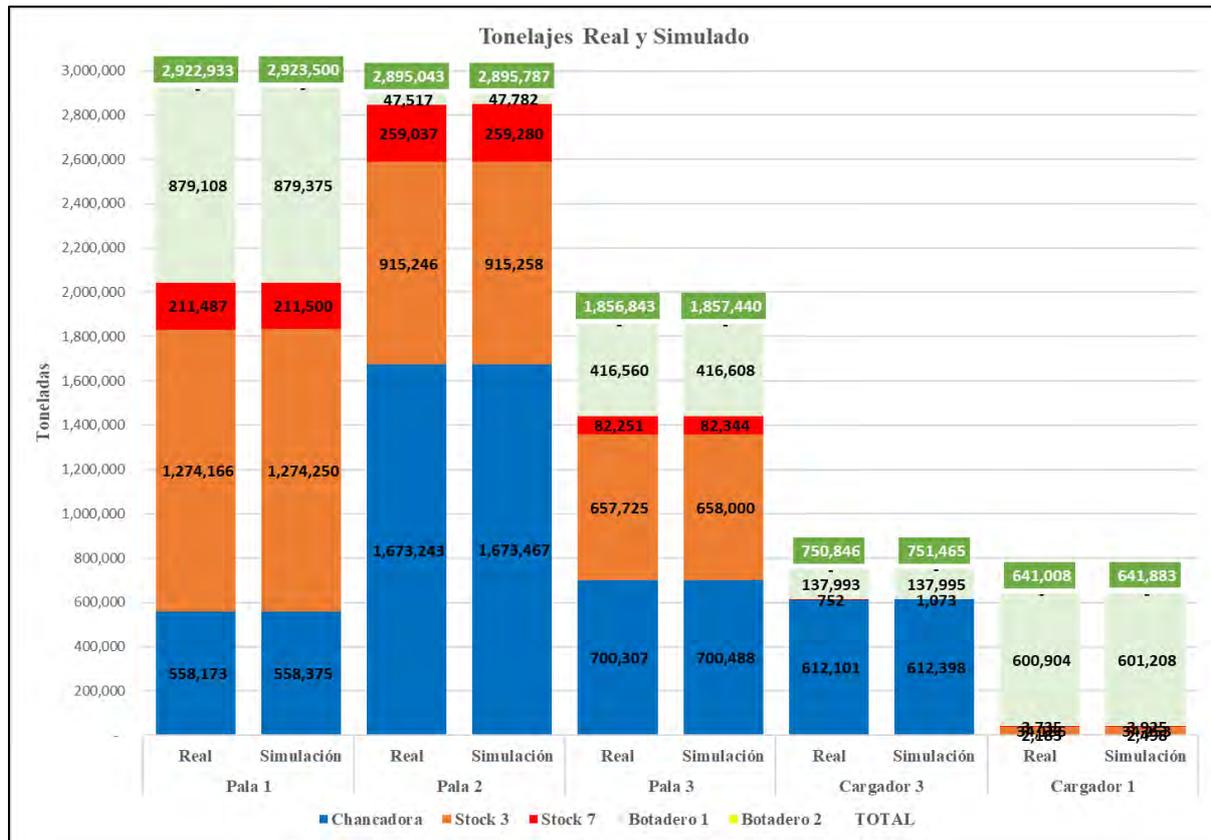


Figura 62. Resultados del tonelaje planeado de febrero versus la simulación.

Además, el tonelaje total acumulado en la simulación fue de 9'070,075, por lo que se produjo 0.038% sobre lo estimado en el plan.

Con respecto al número de camiones empleado en la simulación por cada equipo de carguío para cumplir con el tonelaje movido en el mes, se emplearon 24 camiones distribuidos como se muestra en la figura 63.

Equipo	# de camiones
<b>Pala 1</b>	7
<b>Pala 2</b>	9
<b>Pala 3</b>	4
<b>Cargador 3</b>	2
<b>Cargador 1</b>	2

Figura 63. Distribución de camiones para el mes de febrero.

Dado que la simulación emplea 24 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 80.35%, el número total de camiones requeridos es igual a 30.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 64 grafica estos valores a continuación.

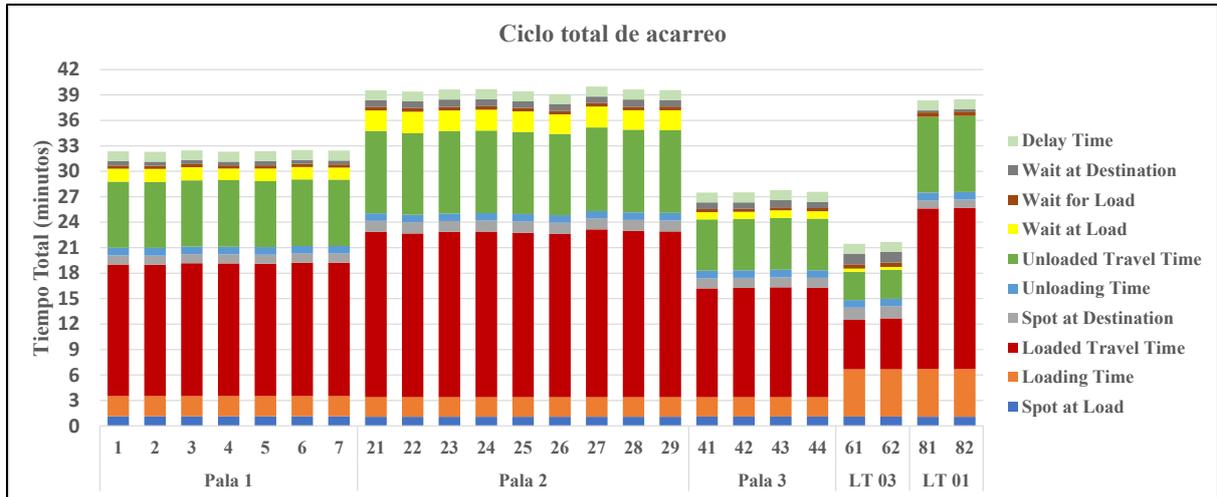


Figura 64. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 14.

#### 4.5.3 MES DE MARZO

Al comparar los tonelajes planeados con los obtenidos con la simulación, se encuentra lo siguiente.

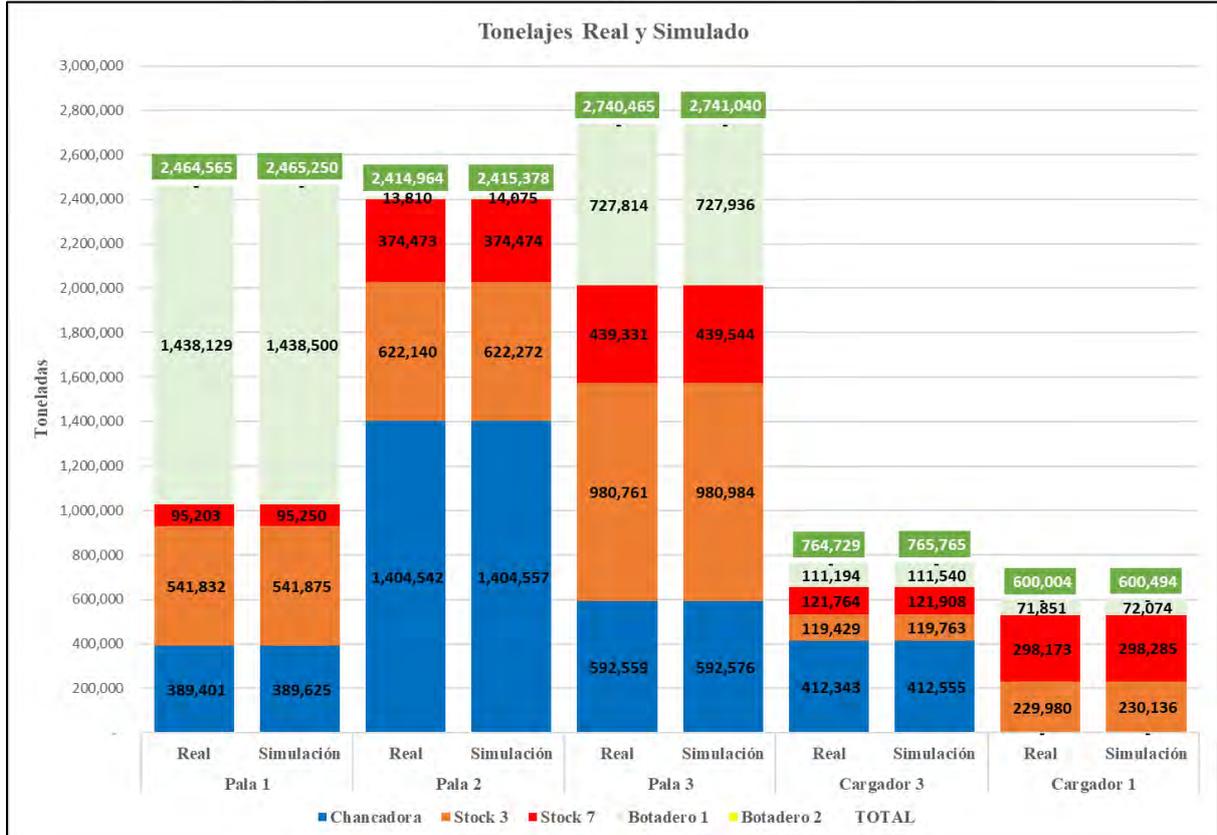


Figura 65. Resultados del tonelaje planeado de marzo versus la simulación.

El tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 64 fue de 8'987,928, por lo que se produjo 0.036% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 27 camiones como se muestra en la figura 66.

Equipo	# de camiones
<b>Pala 1</b>	7
<b>Pala 2</b>	8
<b>Pala 3</b>	8
<b>Cargador 3</b>	2
<b>Cargador 1</b>	2

Figura 66. Distribución de camiones para el mes de marzo.

Dado que la simulación emplea 27 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 82.08%, el número total de camiones requeridos es igual a 33.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 67 grafica estos valores a continuación.

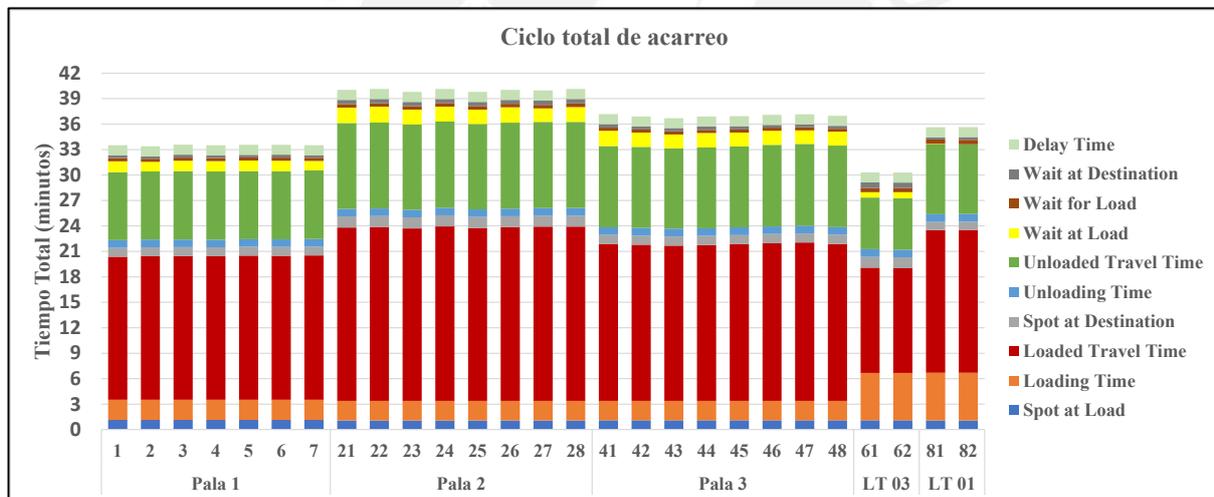


Figura 67. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 15.

#### 4.5.4 MES DE ABRIL

Al comparar los tonelajes planificados con los obtenidos con la simulación, se encuentra lo siguiente.

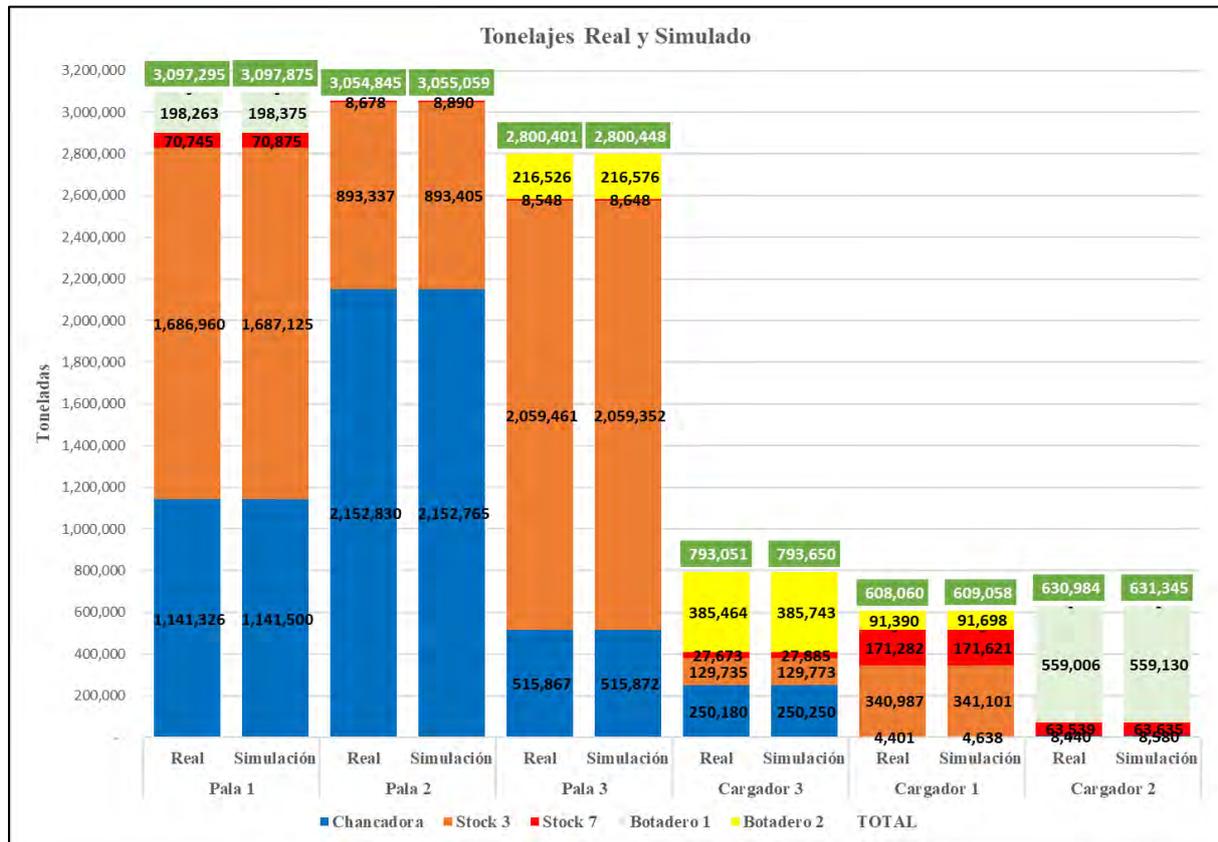


Figura 68. Resultados en tonelaje reales de abril versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 68 fue de 10'987,435, por lo que se produjo 0.025% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 31 camiones como se muestra en la figura 69.

Equipo	# de camiones
Pala 1	8
Pala 2	9
Pala 3	8
Cargador 3	2
Cargador 1	2
Cargador 2	2

Figura 69. Distribución de camiones para el mes de abril.

Dado que la simulación emplea 31 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.92%, el número total de camiones requeridos es igual a 38.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 70 grafica estos valores a continuación.

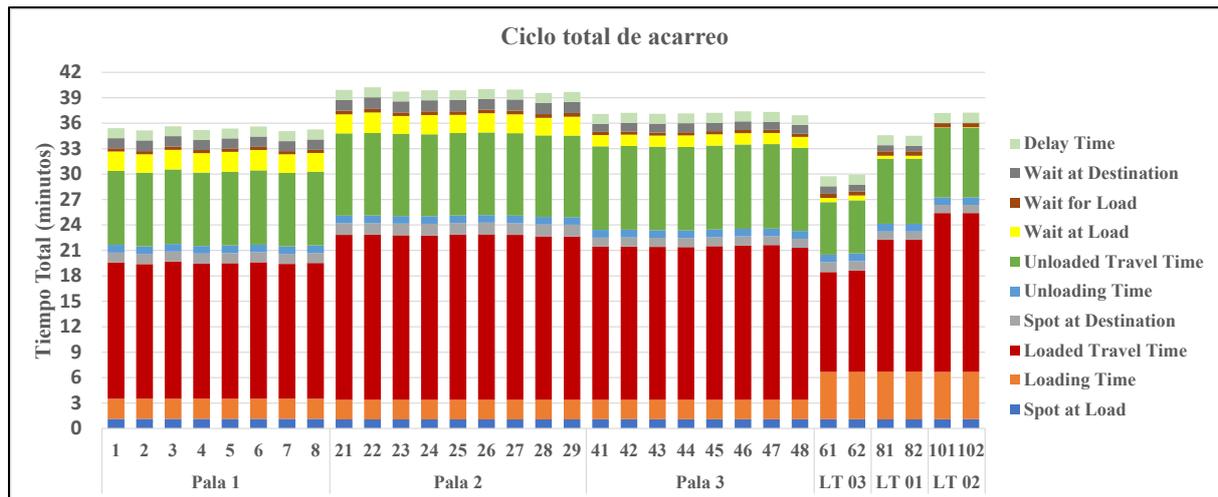


Figura 70. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 16.

#### 4.5.5 MES DE MAYO

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planificados con los de la simulación se muestran a continuación.

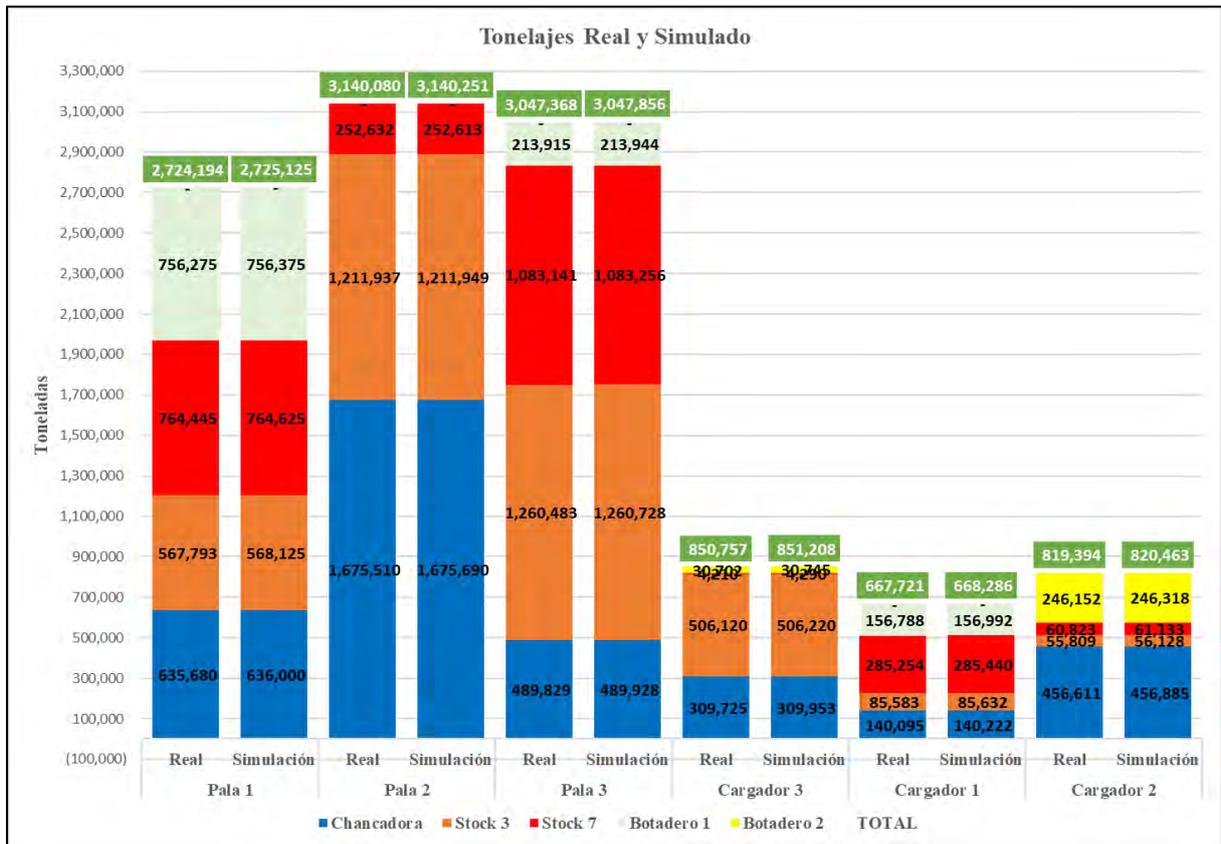


Figura 71. Resultados del tonelaje planeado de mayo versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 71 fue de 11'253,189, por lo que se produjo 0.033% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 32 camiones como se muestra en la figura 72.

Equipo	# de camiones
Pala 1	7
Pala 2	10
Pala 3	8
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	2

Figura 72. Distribución de camiones para el mes de mayo.

Dado que la simulación emplea 32 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.90%, el número total de camiones requeridos es igual a 40.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 73 grafica estos valores a continuación.

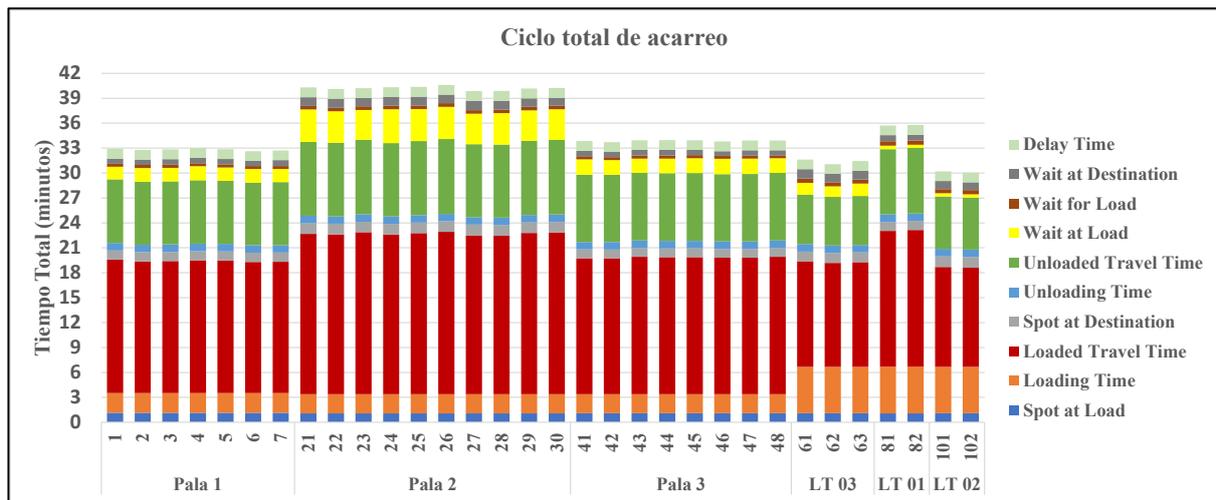


Figura 73. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 17.

#### 4.5.6 MES DE JUNIO

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planificados con los de la simulación se muestran a continuación.

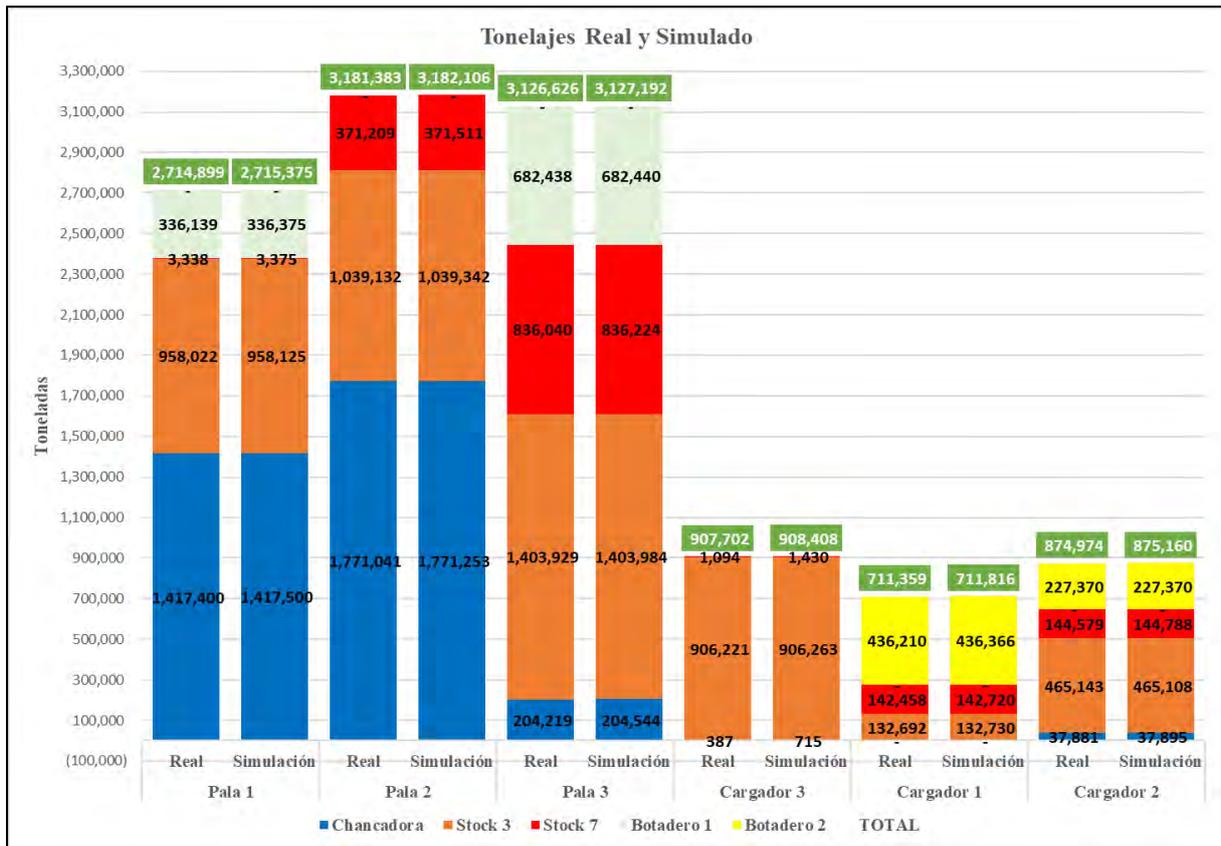


Figura 74. Resultados del tonelaje planeado de junio versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 74 fue de 11'520,057, por lo que se produjo 0.027% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 33 camiones como se muestra en la figura 75.

Equipo	# de camiones
Pala 1	7
Pala 2	10
Pala 3	8
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	3

Figura 75. Distribución de camiones para el mes de junio.

Dado que la simulación emplea 33 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.96%, el número total de camiones requeridos es igual a 41.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 76 grafica estos valores a continuación.

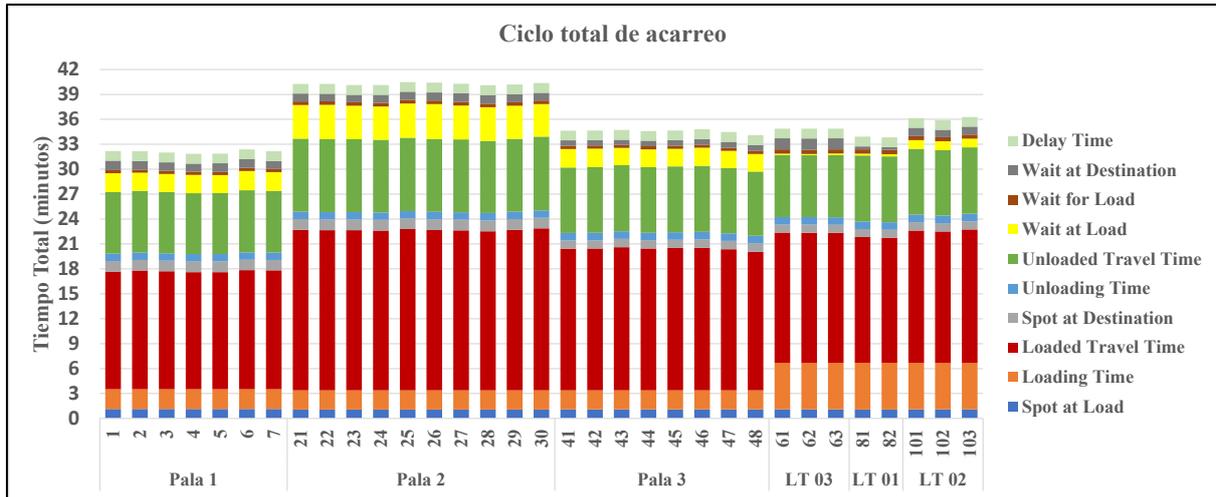


Figura 76. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 18.

#### 4.5.7 MES DE JULIO

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planeados con los de la simulación se muestran a continuación.

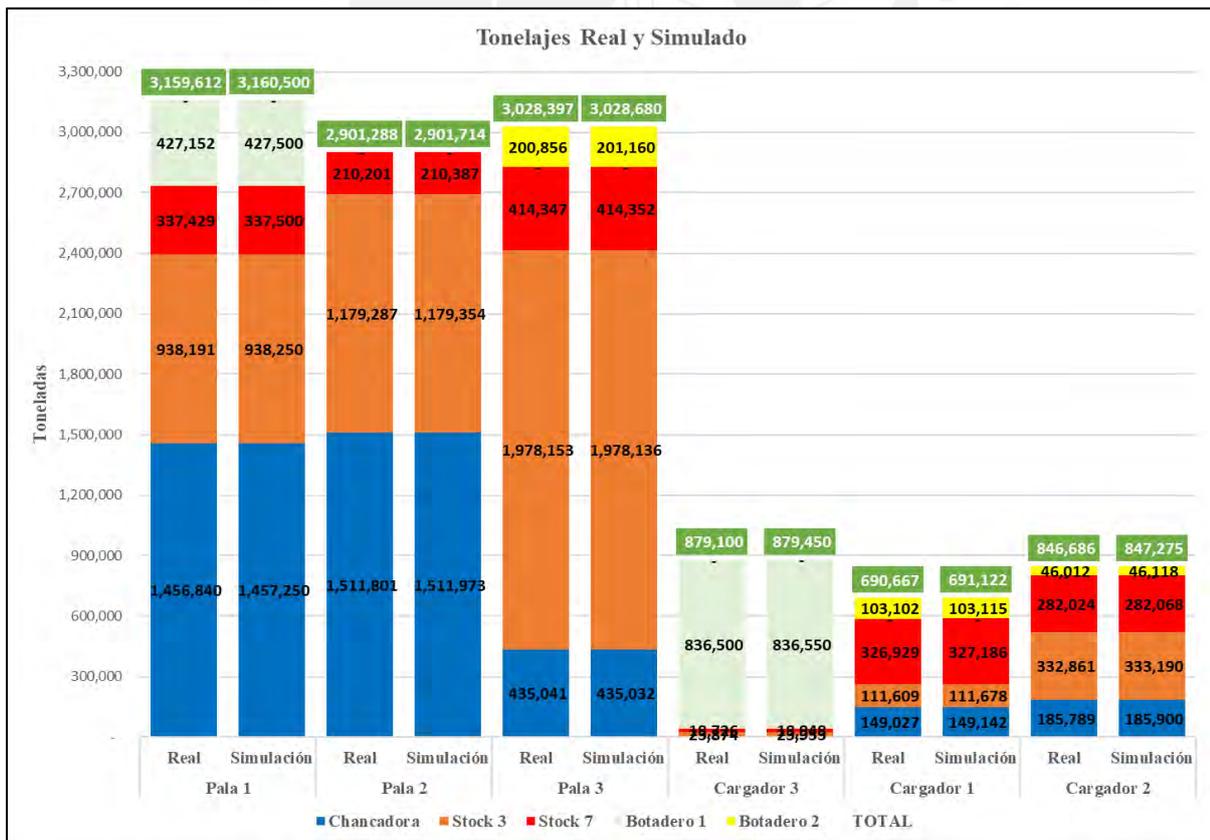


Figura 77. Resultados del tonelaje planeado de julio versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 77 fue de 11'508,740, por lo que se produjo 0.026% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 33 camiones como se muestra en la figura 78.

Equipo	# de camiones
<b>Pala 1</b>	8
<b>Pala 2</b>	10
<b>Pala 3</b>	8
<b>Cargador 3</b>	2
<b>Cargador 1</b>	2
<b>Cargador 2</b>	3

Figura 78. Distribución de camiones para el mes de julio.

Dado que la simulación emplea 33 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.82%, el número total de camiones requeridos es igual a 41.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 79 grafica estos valores a continuación.

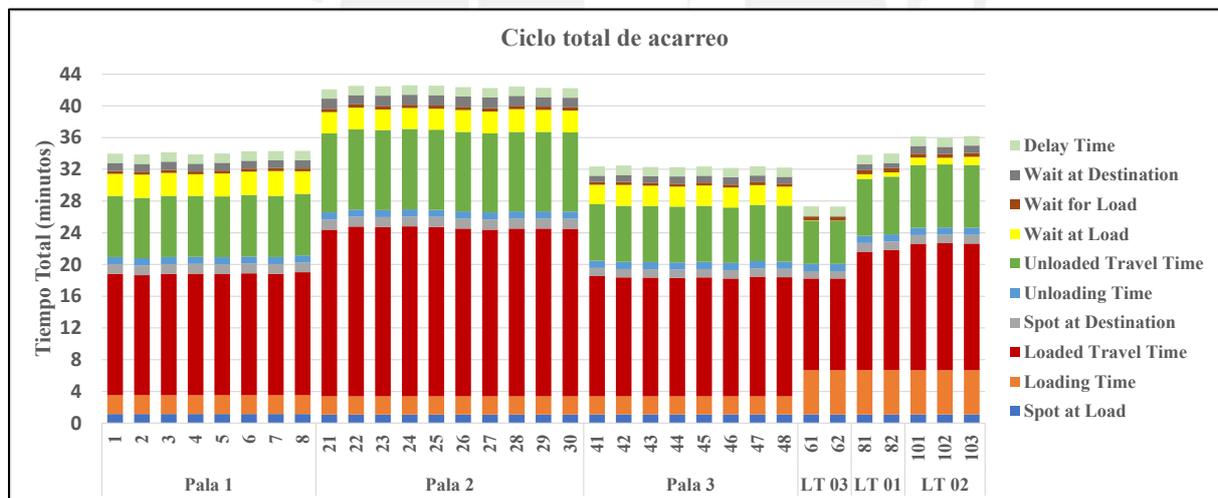


Figura 79. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 19.

#### 4.5.8 MES DE AGOSTO

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planificados con los de la simulación se muestran a continuación.

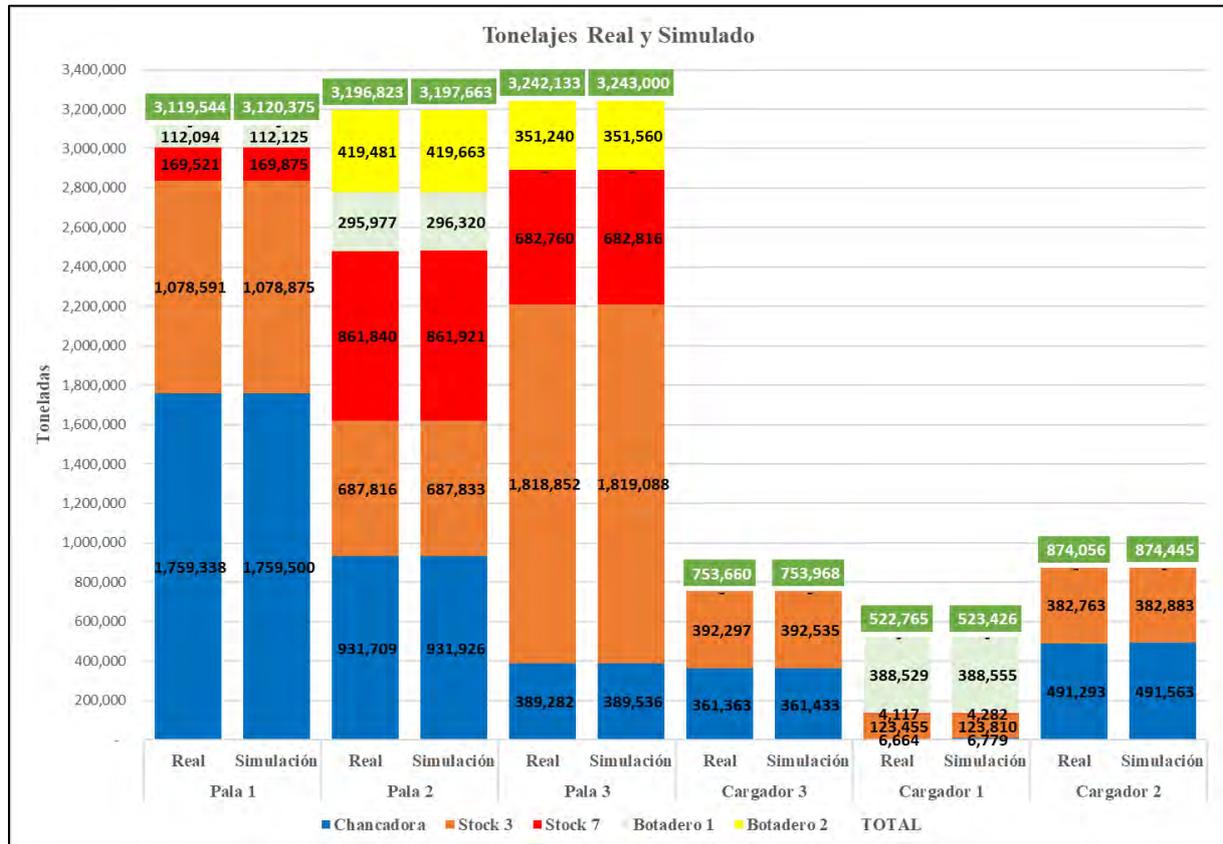


Figura 80. Resultados del tonelaje planeado de agosto versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 80 fue de 11'712,876, por lo que se produjo 0.033% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 33 camiones como se muestra en la figura 81.

Equipo	# de camiones
<b>Pala 1</b>	8
<b>Pala 2</b>	9
<b>Pala 3</b>	8
<b>Cargador 3</b>	3
<b>Cargador 1</b>	2
<b>Cargador 2</b>	3

Figura 81. Distribución de camiones para el mes de agosto.

Dado que la simulación emplea 33 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 82.06%, el número total de camiones requeridos es igual a 41.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 82 grafica estos valores a continuación.

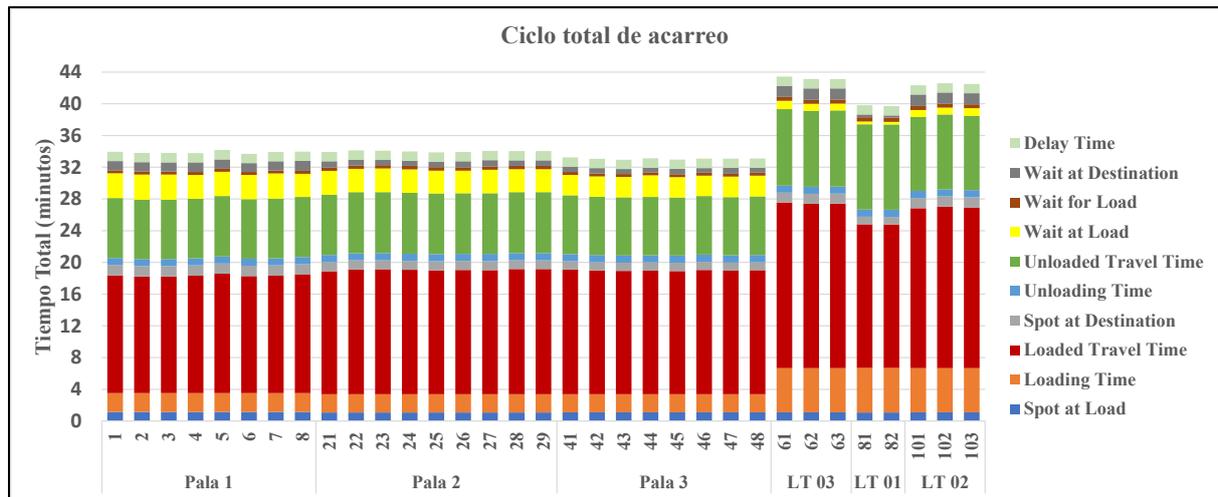


Figura 82. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 20.

#### 4.5.9 MES DE SEPTIEMBRE

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planificados con los de la simulación se muestran a continuación.

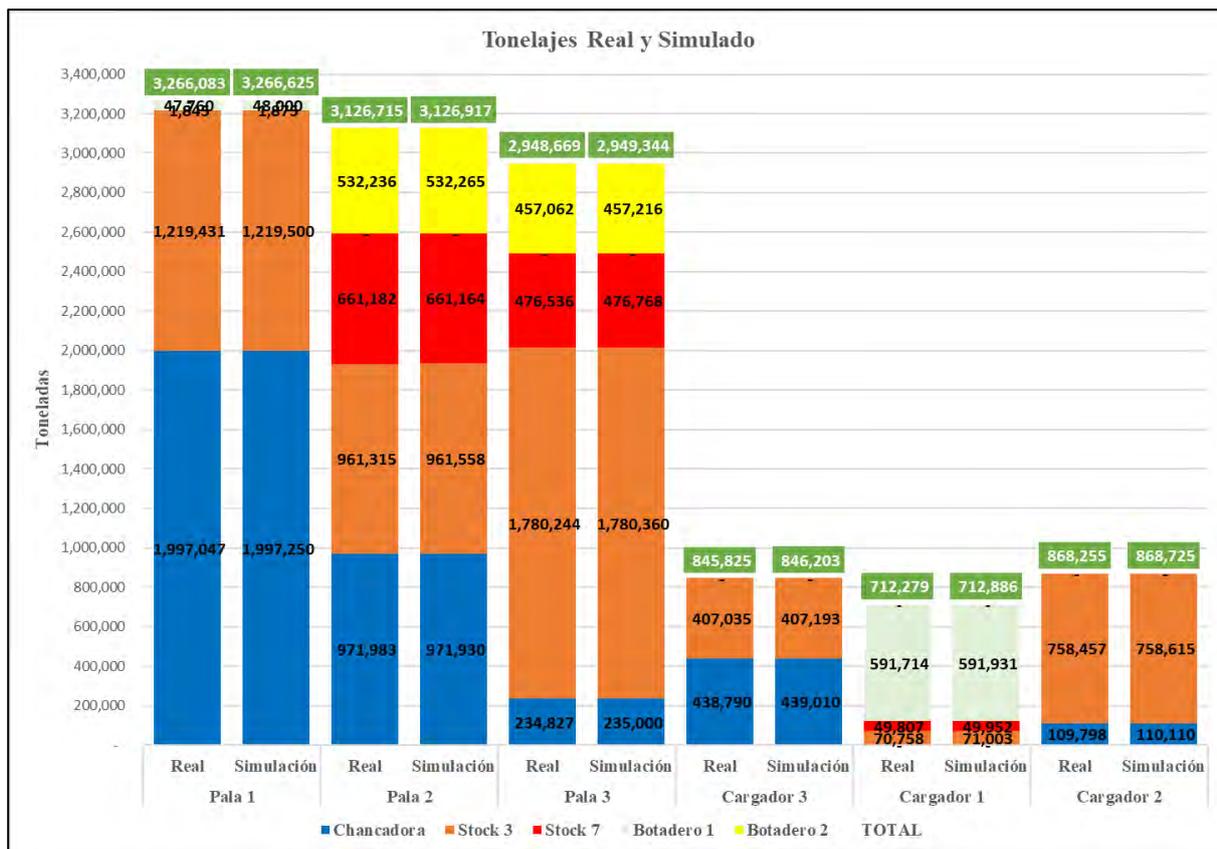


Figura 83. Resultados del tonelaje planeado de septiembre versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 83 fue de 11'770,700, por lo que se produjo 0.024% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 33 camiones como se muestra en la figura 84.

Equipo	# de camiones
Pala 1	8
Pala 2	9
Pala 3	8
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	3

Figura 84. Distribución de camiones para el mes de septiembre.

Dado que la simulación emplea 33 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.94%, el número total de camiones requeridos es igual a 41.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 85 grafica estos valores a continuación.

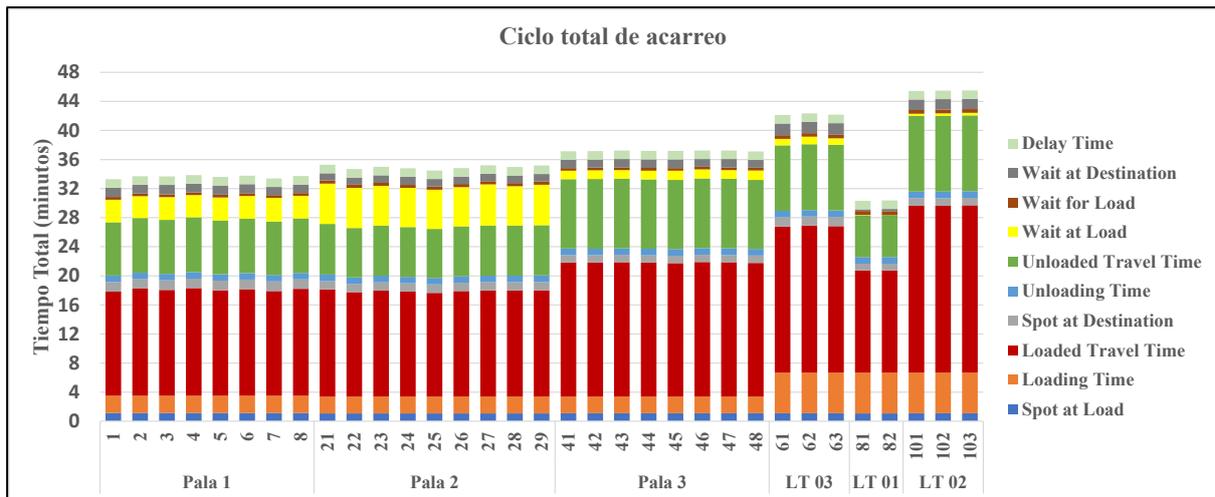


Figura 85. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 21.

#### 4.5.10 MES DE OCTUBRE

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planificados con los de la simulación se muestran a continuación.

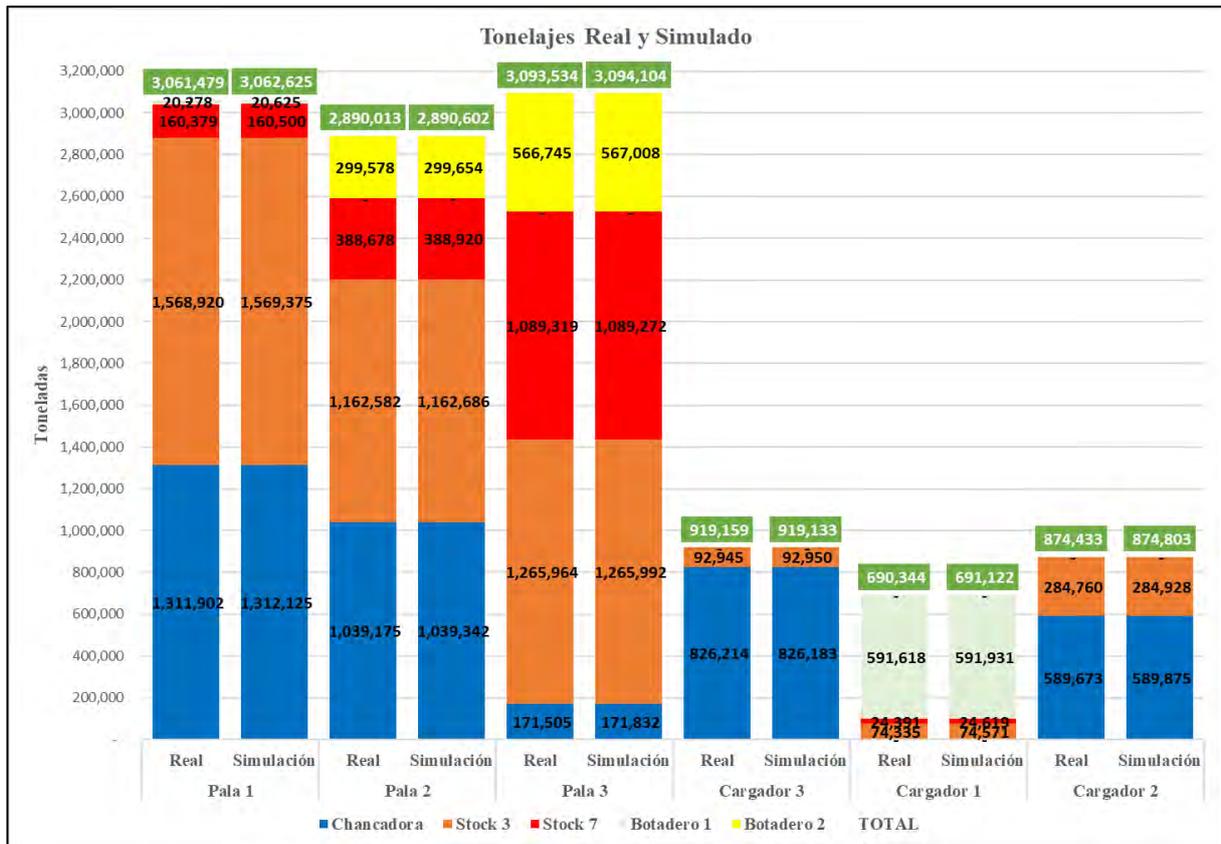


Figura 86. Resultados del tonelaje planeado de octubre versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 86 fue de 11'532,387, por lo que se produjo 0.030% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 33 camiones como se muestra en la figura 87.

Equipo	# de camiones
<b>Pala 1</b>	9
<b>Pala 2</b>	8
<b>Pala 3</b>	8
<b>Cargador 3</b>	3
<b>Cargador 1</b>	2
<b>Cargador 2</b>	3

Figura 87. Distribución de camiones para el mes de octubre.

Dado que la simulación emplea 33 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.84%, el número total de camiones requeridos es igual a 41.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 88 grafica estos valores a continuación.

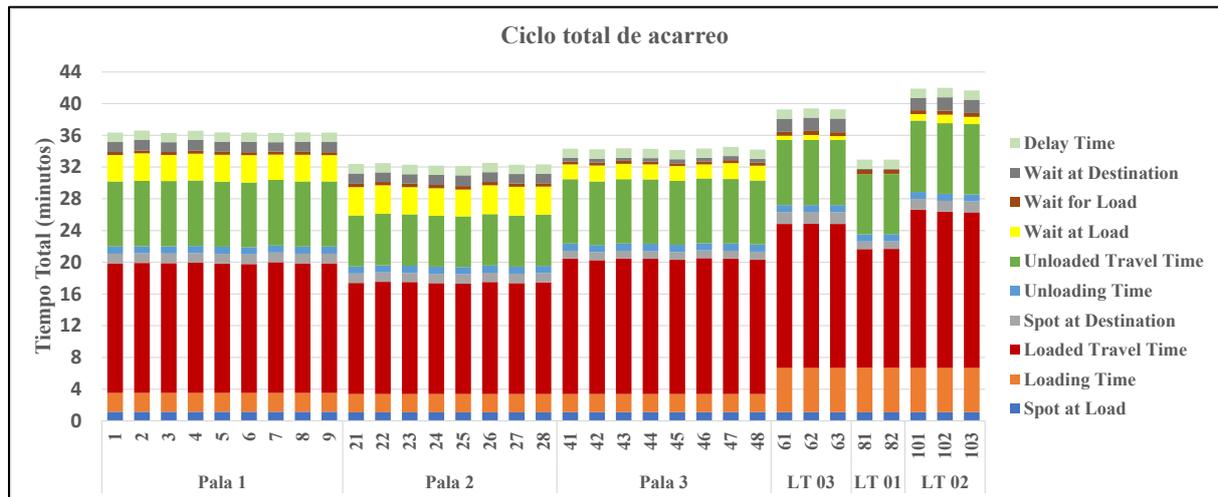


Figura 88. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con relación a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 22.

#### 4.5.11 MES DE NOVIEMBRE

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planificados con los de la simulación se muestran a continuación.

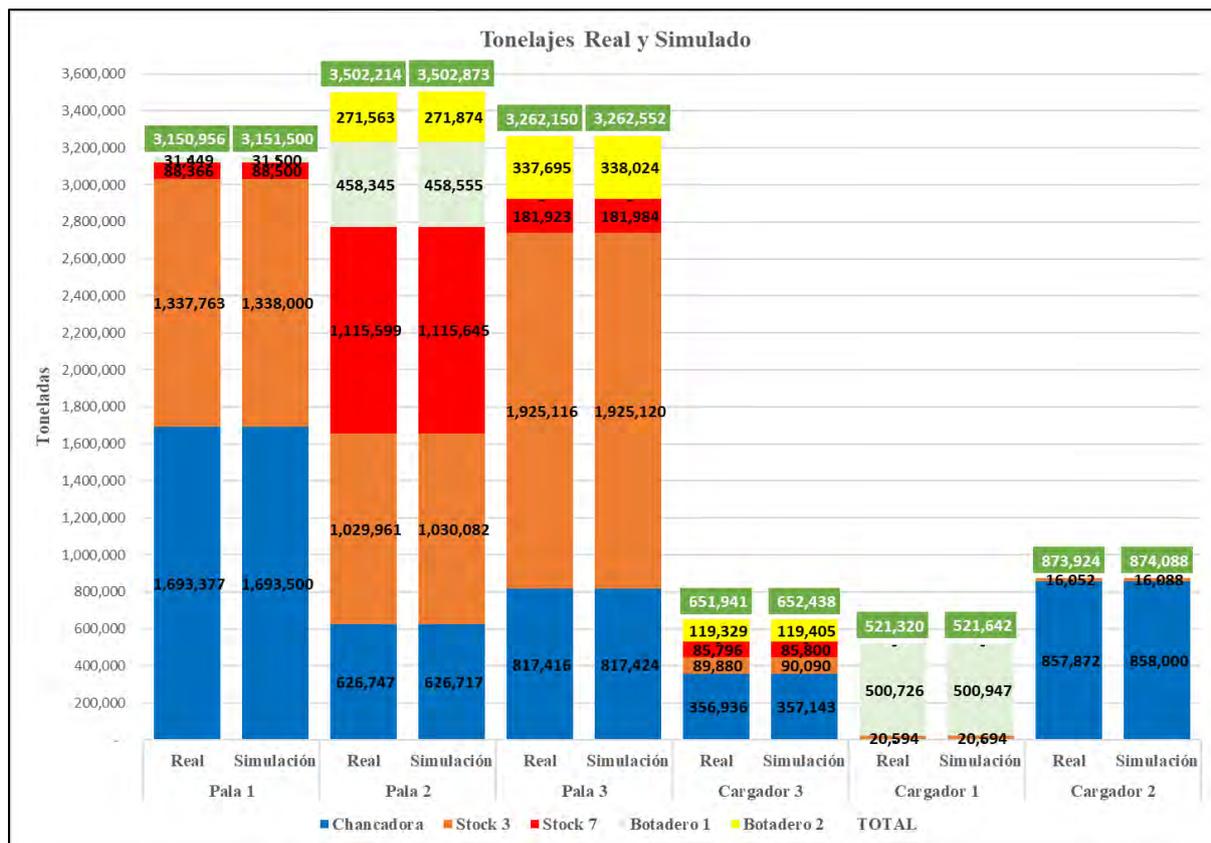


Figura 89. Resultados del tonelaje planeado de noviembre versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 89 fue de 11'965,091, por lo que se produjo 0.022% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 33 camiones como se muestra en la figura 90.

Equipo	# de camiones
Pala 1	8
Pala 2	10
Pala 3	8
Cargador 3	2
Cargador 1	2
Cargador 2	3

Figura 90. Distribución de camiones para el mes de noviembre.

Dado que la simulación emplea 33 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.82%, el número total de camiones requeridos es igual a 41.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 91 grafica estos valores a continuación.

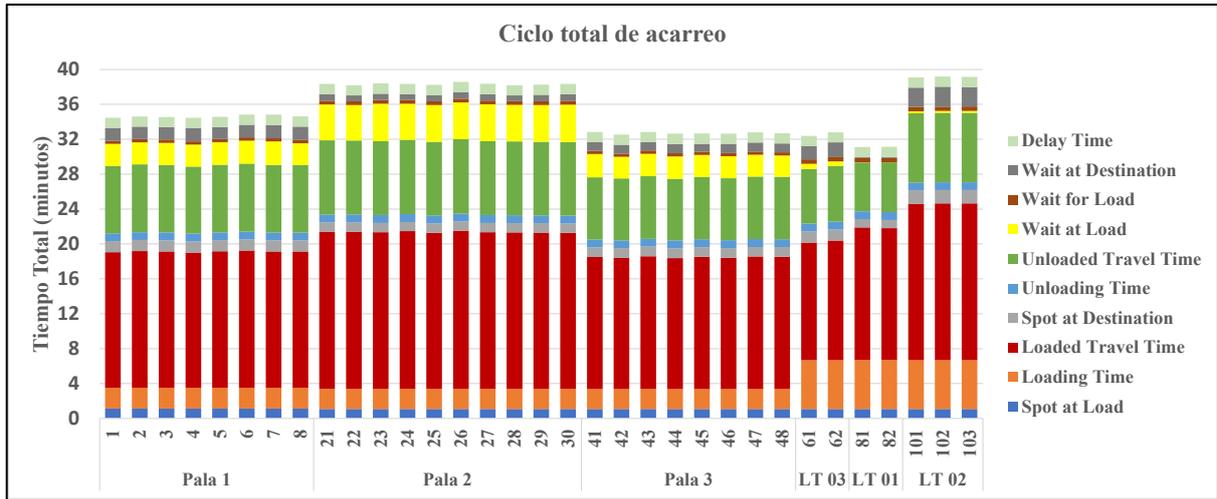


Figura 91. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 23.

#### 4.5.12 MES DE DICIEMBRE

Los resultados obtenidos al comparar los tonelajes planificados con los de la simulación se muestran a continuación.

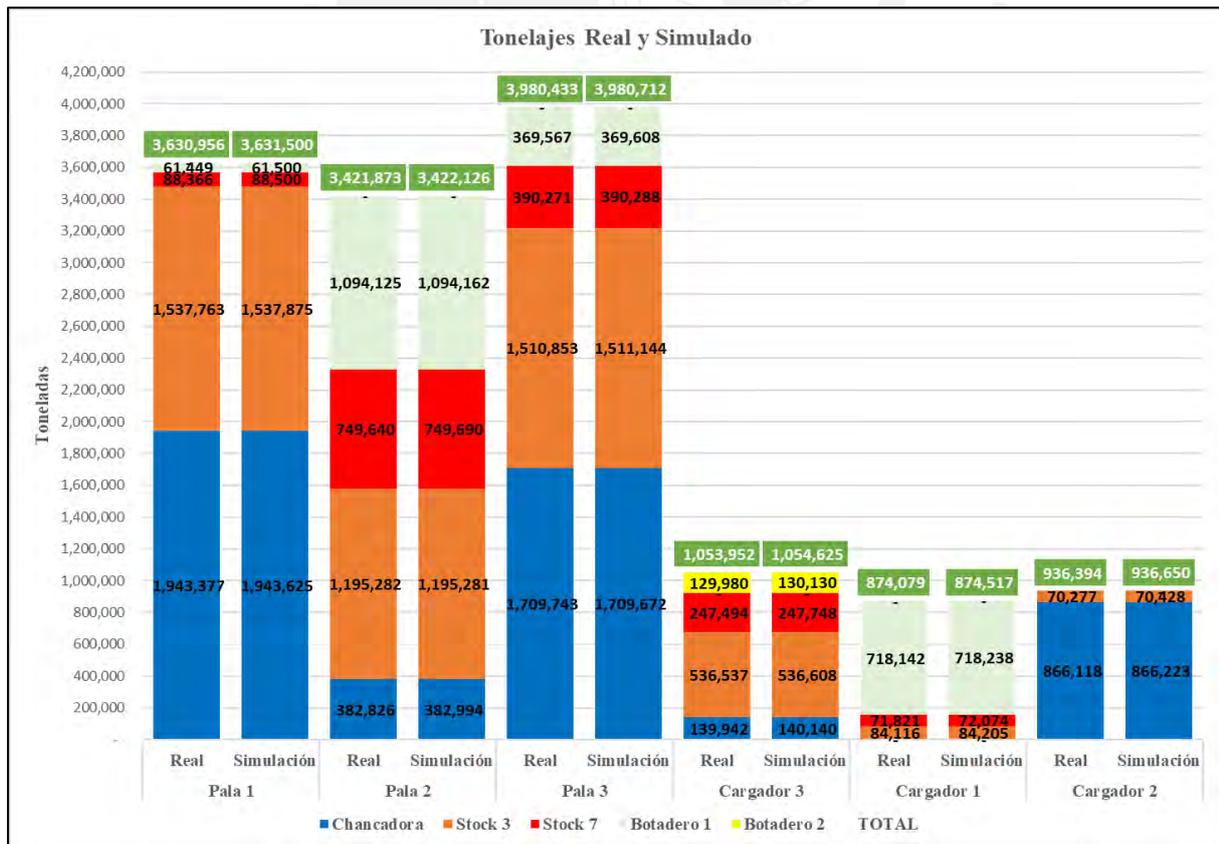


Figura 92. Resultados del tonelaje planeado de diciembre versus la simulación.

Asimismo, el tonelaje total acumulado en la simulación mostrado en la figura 92 fue de 13'900,129, por lo que se produjo 0.018% sobre lo estimado en el plan. Por otro lado, el número de camiones empleado en la simulación fue de 34 camiones como se muestra en la figura 93.

Equipo	# de camiones
Pala 1	8
Pala 2	9
Pala 3	9
Cargador 3	3
Cargador 1	2
Cargador 2	3

Figura 93. Distribución de camiones para el mes de diciembre.

Dado que la simulación emplea 34 camiones y que la disponibilidad mecánica de flota igual al 81.49%, el número total de camiones requeridos es igual a 42.

Con respecto a los tiempos promedios por cada camión en la simulación, la figura 94 grafica estos valores a continuación.

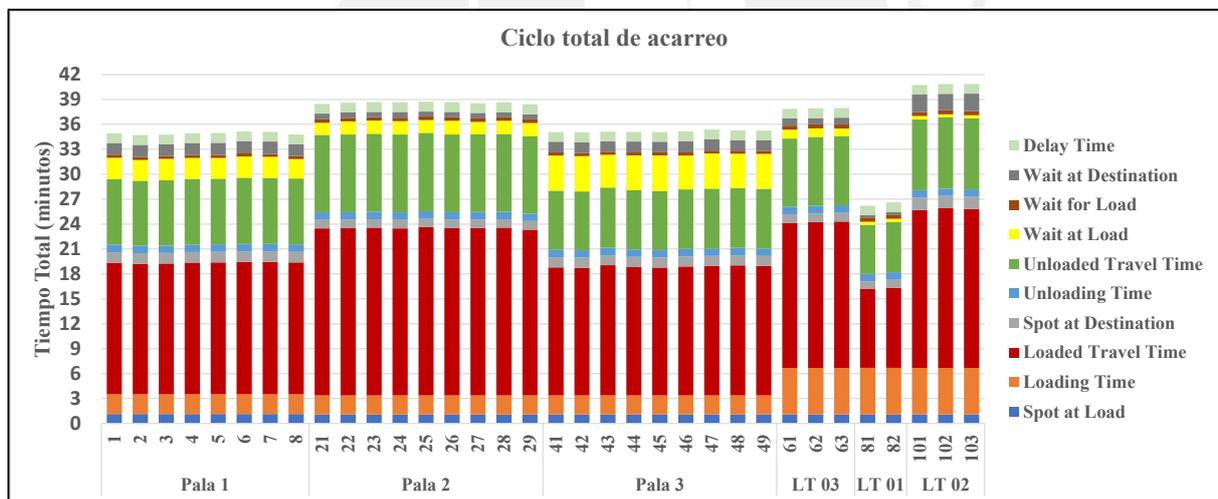


Figura 94. Ciclo total de acarreo por flota asignada a palas y cargadores.

Con respecto a los tiempos del ciclo de acarreo para cada equipo de carguío y destino, los resultados se muestran en el anexo 24.

#### 4.6 RESULTADOS FINALES

En la simulación de ambos modelos se observan variaciones en el número de la flota de camiones necesaria en algunos meses; sin embargo, estos cambios no son de gran magnitud a

simple vista, por lo que se analizan diversos indicadores para comprobar las diferencias presentes entre los modelos estocásticos y determinísticos.

Asimismo, cabe recordar que la producción en la mina aumenta de 100,000 toneladas a chancadora por día en el 2022 a 140,000 toneladas para el fin del año 2023. Por otro lado, el número de días de cada mes para la planificación de material a mover está basado en el sistema asiático, por lo que, a diferencia del calendario gregoriano, los meses no constan de 30 días en promedio.

Tabla 22. Número de días por mes en el sistema asiático.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Nº de días	25	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	36

Por otro lado, la cantidad promedio de toneladas a mover en el día al año pasa de 325,000 toneladas en el mes de enero hasta las 386,000 toneladas en el mes de diciembre, manteniéndose esta cantidad constante desde el mes de julio. A continuación, en la figura 95 se ilustra esta cantidad de toneladas planificadas en el año 2023.

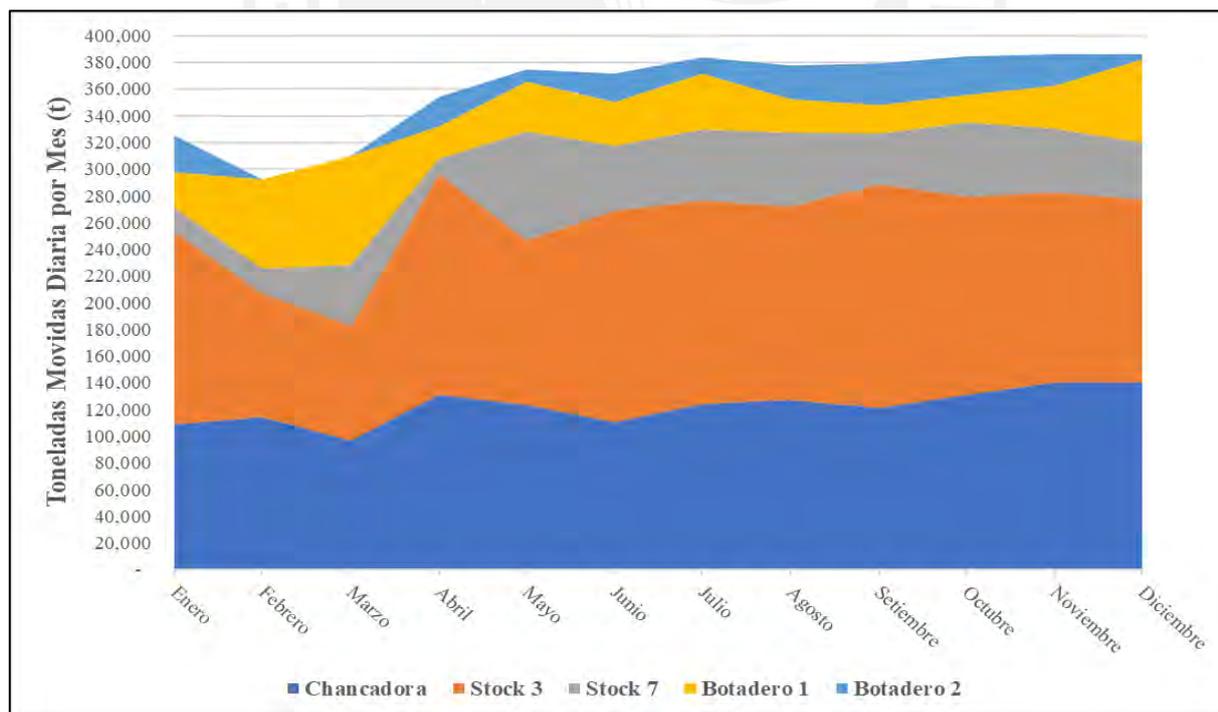


Figura 95. Tonelaje a mover diario promedio para el año 2023.

#### 4.6.1 NÚMERO DE CAMIONES

En la figura 96 se observa que se requerirá expandir la flota de 30 camiones hasta 42 al final de año 2023 para cumplir con la producción estimada. No obstante, el incremento mes a mes varía dependiendo del modelo. La diferencia entre mes a mes dependerá del ciclo promedio, la distancia media a recorrer y el tonelaje a mover. En la imagen inferior, la diferencia de volquetes más notable entre los modelos se encuentra en el mes de febrero, mientras que en los demás meses se aprecia una variación de un camión o ninguno.

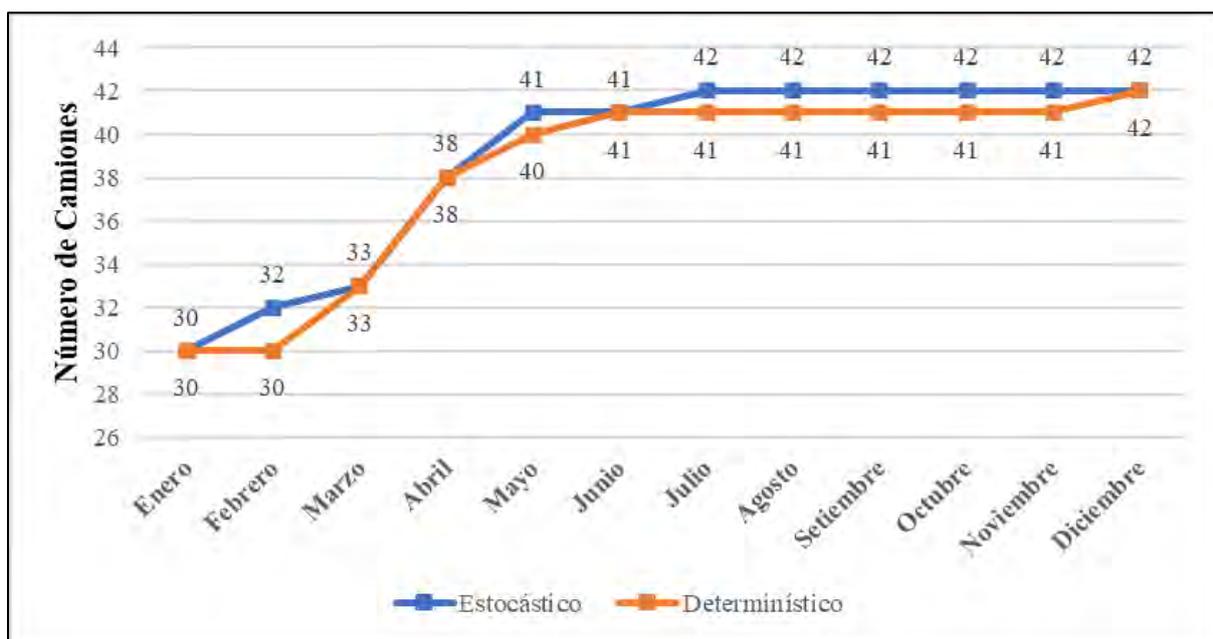


Figura 96. Número de volquetes necesarios en los modelos estocástico y determinístico.

Con respecto al mes de febrero, aunque el número de horas trabajadas y el promedio del ciclo de los camiones entre ambos modelos es muy similar, al aplicar la disponibilidad mecánica, la variación inicial de los modelos que era de un camión incrementa hasta dos.

#### 4.6.2 HORAS TRABAJADAS MES POR LA FLOTA DE CAMIONES

En la figura 97 existe un requerimiento similar de horas entre ambos modelos. Asimismo, existe un mayor requerimiento de horas en el mes de diciembre dado que el número de días a trabajar es de 36 días y que el ciclo de acarreo incrementa con respecto al mes de noviembre.

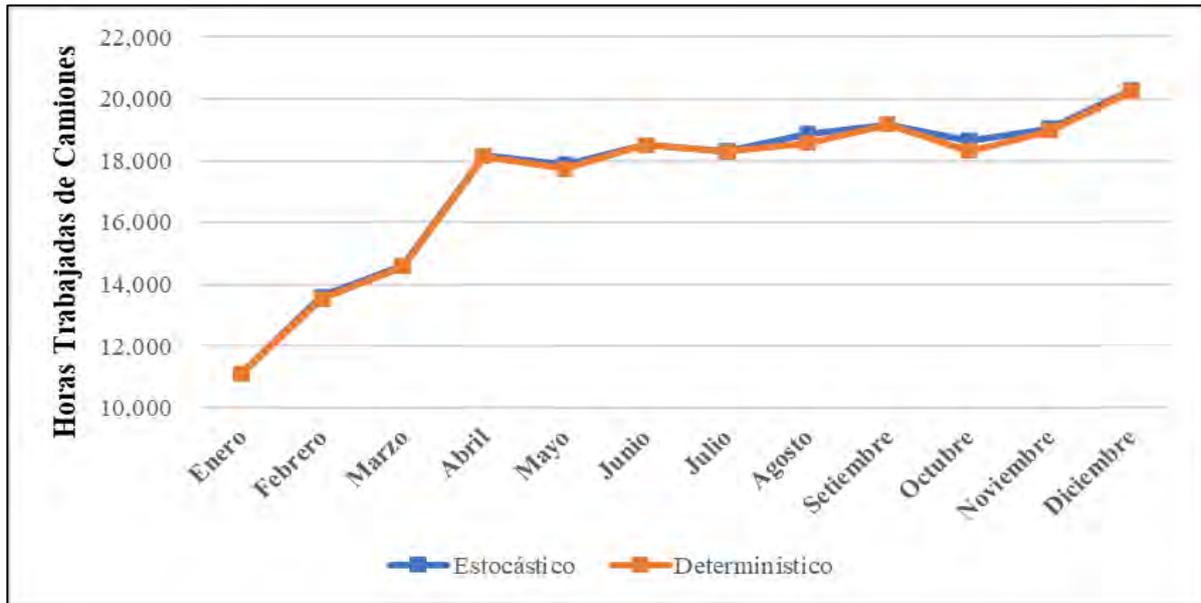


Figura 97. Horas de camiones trabajadas en los modelos estocástico y determinístico.

Las variaciones más notables se aprecian en los meses de agosto y octubre debido a que el ciclo de acarreo entre ambos meses varía dada la generación de mayores colas en el modelo estocástico. El incremento en el ciclo de acarreo también afectará la productividad de los camiones en esos meses para el modelo estocástico.

#### 4.6.3 PRODUCTIVIDAD DE CAMIONES

Al incrementarse el tiempo promedio de los ciclos de acarreo, por consiguiente, la productividad se ve mermada. En la figura 98 se aprecia que el mayor cambio ocurre del mes de enero hasta abril dado que el ciclo aumenta en seis minutos durante esos meses. Por otro lado, el tonelaje movido a diario en los meses posteriores a abril se mantiene casi constante, por lo que la productividad promedio casi se equilibra.

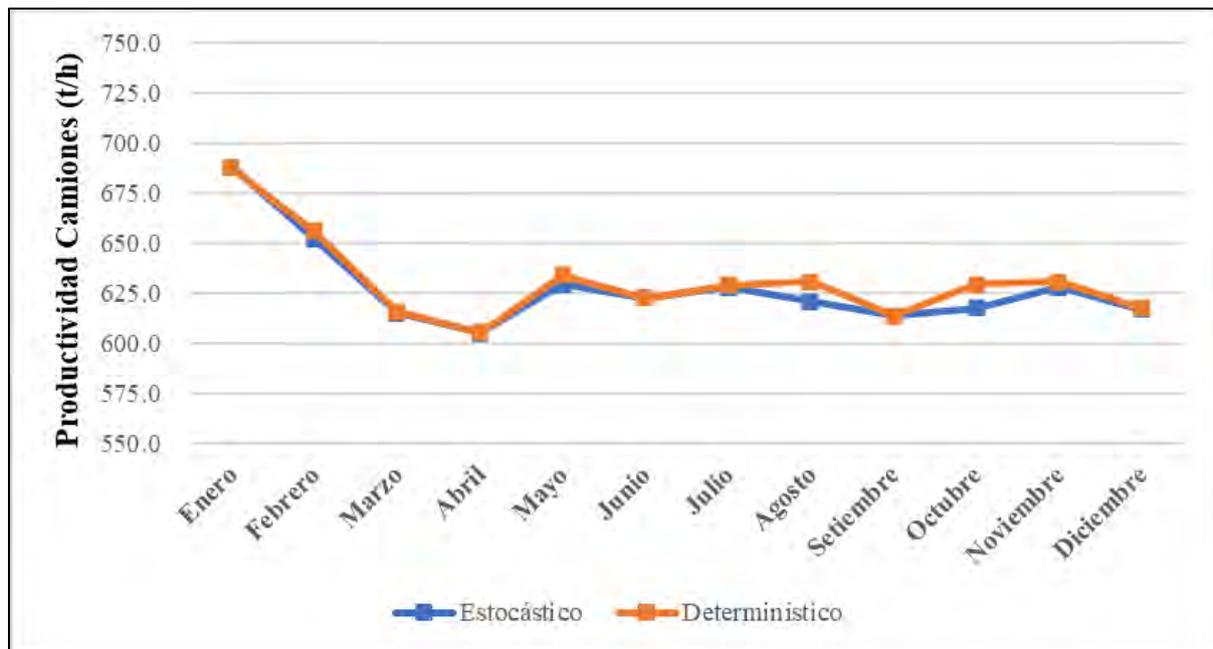


Figura 98. Productividad de camiones en los modelos estocástico y determinístico.

#### 4.6.4 TIEMPO PROMEDIO DEL CICLO

Dada la expansión de la mina en el año 2023, se observa que el tiempo promedio del ciclo de acarreo incrementa desde los 30.4 minutos en el mes de enero hasta los 36 minutos hacia el mes de diciembre. Además, en los meses de agosto y octubre se observa un ligero incremento de 30 segundos en el tiempo del ciclo de acarreo, y esto es debido a las colas generadas en el sistema.

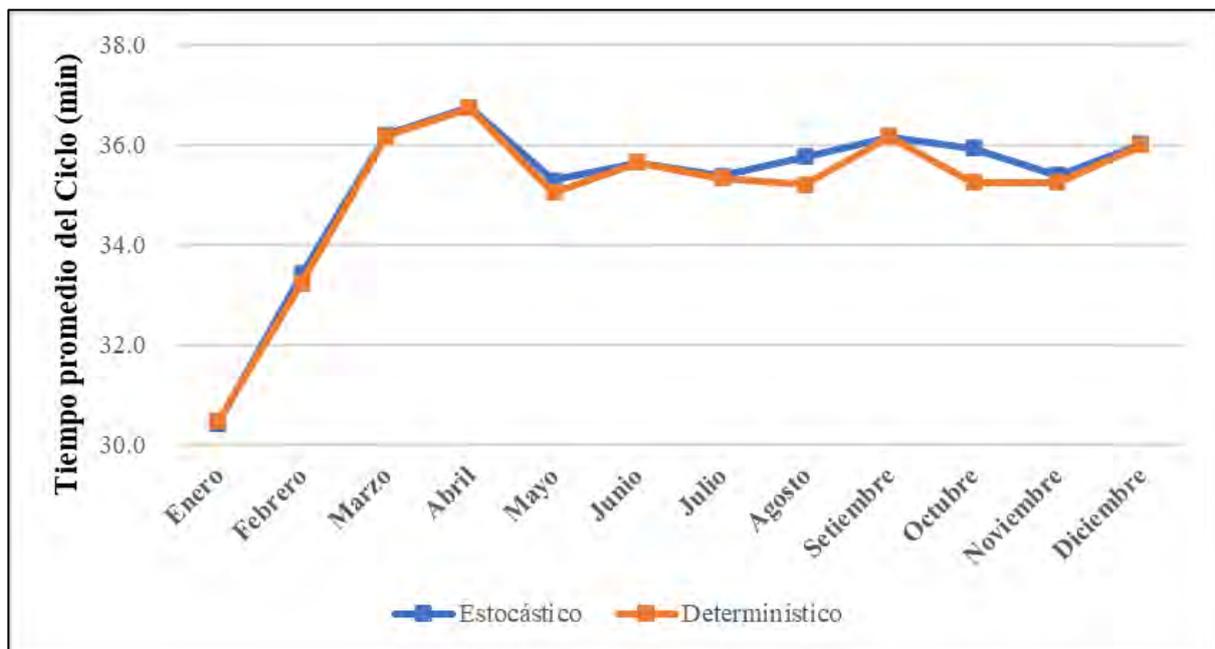


Figura 99. Ciclo promedio de los camiones en los modelos estocástico y determinístico.

#### 4.6.5 DISTANCIA PROMEDIO RECORRIDA

Dada la planificación para el año 2023 con el objetivo de cumplir con la producción de cobre, las distancias de acarreo promedio aumentan desde los 4 kilómetros en el mes de enero hasta los 4.8 en el mes de diciembre y alcanzando un pico de 5.4 kilómetros en los meses de marzo y abril.

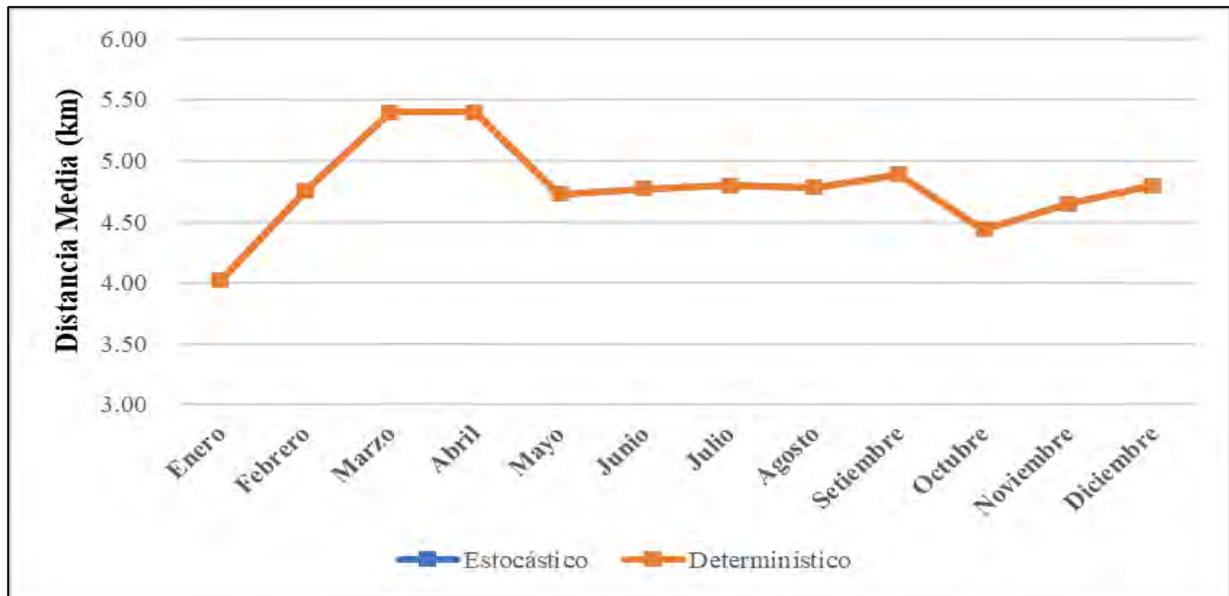


Figura 100. Distancia recorrida en promedio por los camiones en los modelos estocástico y determinístico.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

En el presente documento se logró estimar el número de camiones requeridos mediante la simulación un sistema de transporte en una mina de cobre a tajo abierto. Para ello se logró recopilar suficiente información y se generaron las funciones de probabilidad de las toneladas de carguío y tiempos del ciclo de acarreo, lo cual permitió generar un modelo de calibración y a partir del cual se desarrollaron los meses de enero hasta diciembre del 2023.

- La aplicación de modelos estocásticos impactó en la estimación del número de camiones dado que la variabilidad de las funciones afectó cada uno de los parámetros de la simulación. Así, se obtuvo que es necesario incorporar 13 camiones desde diciembre del 2022 hasta el final del año 2023 para cumplir con la producción de cobre planificada.
- En ambos modelos de simulación se necesitó 42 camiones para lograr satisfacer la producción de cobre del año 2023.
- El software Arena permitió replicar el comportamiento de los parámetros del sistema de carguío y acarreo, y ello se vio reflejado en los resultados de las simulaciones del modelo estocástico.
- Las aplicaciones de simulaciones replicaron las condiciones operativas de la mina y permitió estimar los tiempos de los ciclos de acarreo.
- La diferencia entre los modelos estocásticos y determinísticos se debió a la generación de mayores colas en los equipos de carguío.
- El modelo de calibración reflejó las condiciones operativas presentes en la mina y ello se observa en los tiempos promedios para cada uno de los equipos.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Existe una ventana en la optimización de las operaciones de carguío y acarreo dada la presencia de colas en las palas y cargadores, por lo que se sugiere incorporar una regla Dispatch o algoritmo que optimice el ciclo de acarreo en cada uno de los meses simulados para ambos modelos.
- La adición de mayor información es altamente recomendable dado que podrían generarse distintas funciones de distribución probabilística de los parámetros del ciclo de carguío y acarreo.
- En un futuro trabajo se deben incorporar escenarios que incluyan los mantenimientos correctivo y preventivo de los equipos de carguío y acarreo, así como de eventos planificados tales como el almuerzo, cambios de guardia, y no planificados como carguío de combustible o retrasos por voladuras.
- En un futuro trabajo se recomienda expandir el tamaño de muestra de los diversos parámetros de manera que se incluya la época de lluvias y nevadas.
- El presente trabajo que desarrolló un modelo de transporte en una mina a cobre a tajo abierto puede servir como base para la aplicación en otras unidades mineras dado que incorpora variables compartidas por muchas empresas en el sector.

## 5.3 OBSERVACIONES

- A lo largo de las simulaciones en distintos meses se observa la generación de colas en los ciclos de carguío y estos tiempos podrían reducirse mediante un algoritmo de optimización.
- Las colas producidas en promedio por los modelos durante los meses a futuro reflejarían las condiciones de trabajo debido al incremento de equipos de transporte, y ello abriría

una oportunidad para anticiparse a futuros problemas en el ciclo de transporte en la unidad minera.

- Se observa que existe una relación coherente entre los indicadores de ciclo promedio de acarreo, productividad de la flota de camiones y la distancia promedio recorrida mes a mes.



## REFERENCIAS

- Altiook, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with Arena*.
- Askari-nasab, H., & Tabesh, M. (2012). *Guidelines for Basic Truck-Shovel Simulation Modeling using Arena*.  
[https://sites.ualberta.ca/MOL/DataFiles/2012\\_Papers/401\\_Hooman\\_TruckShovelGuideline.pdf](https://sites.ualberta.ca/MOL/DataFiles/2012_Papers/401_Hooman_TruckShovelGuideline.pdf)
- Askari-Nasab, H., Torkamani, E., Badiozamani, M. M., & Tabesh, M. (2012). Alignment of short-term and operational plans using discrete event simulation. *2012 SME Annual Meeting and Exhibit 2012, SME 2012, Meeting Preprints*, 304–311.
- Ballantyne, R. (2019). “Challenging the Norms” *Time Usage Model For Mobile Underground Mining Equipment*.
- Batista de Souza, F. H. (2019). *Modeling , Simulation and Performance Analysis of Dispatch Policy for Open Pit Mines*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Cassandras, C. G., & Lafortune, S. (2021). *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72274-6>
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). Introduction to Algorithms, 3rd Edition. En *Discrete Mathematics for Computer Science*. Massachusetts Institute of Technology.
- Coronado, P. (2016). *Optimization of the Haulage Cycle Model for Open Pit Mining Using a Discrete-Event Simulator and a Context-Based Alert System*.
- Dammers, M., Barnewold, L., Merchiers, A., Jeschke, P., & Pütz, M. (2019). Development of an Underground Haulage System Evaluation Tool for Feasibility Studies. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 36(3), 487–494. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0055-9>
- Demaine, E., & Leiserson, C. (2005). *Introduction to Algorithms*. <https://ocw.mit.edu/courses/6-046j-introduction-to-algorithms-sma-5503-fall-2005/resources/lec17/>
- Dembetembe, G. G. (2017). *Nchanga Open Pit Fleet Optimization for Productivity Improvement*. January.
- Devore, J. (2012). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, Eighth Edition*.
- Dindarloo, S. R., & Siami-Lrdemoosa, E. (2016). Merits of discrete event simulation in modeling mining operations. *2016 SME Annual Conference and Expo: The Future for Mining in a Data-Driven World*, 171–173.
- IBM. (2021). *Prueba Kolmogorov-Smirnov para una muestra*. <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/SaaS?topic=tests-one-sample-kolmogorov-smirnov-test>
- Kaba, F. A., Temeng, V. A., & Eshun, P. A. (2014). Prediction of mining production using

- Arena simulation. *3rd UMa T Biennial international mining and mineral conference, August*, 169–177.
- Kim, A. (2020). *Beta Distribution — Intuition, Examples, and Derivation*. <https://towardsdatascience.com/beta-distribution-intuition-examples-and-derivation-cf00f4db57af>
- Konz, S. (2002). *Diseño de sistemas de trabajo*. Editorial Limusa S.A. De C.V.
- May, M. A. (2012). *Applications of Queuing Theory for Open-Pit Truck/Shovel Haulage Systems*. December, 79.
- Meza Castro, J. E. (2011). *Desarrollo de un modelo para la aplicación de simulación a un sistema de carguío y acarreo de desmonte en una operación minera a tajo abierto*.
- Montes Higueta, L. F. (2017). Open Pit Mine Loading and Haulage Simulation. *Doi.Org*. <https://era.library.ualberta.ca/files/c0p096712t#.Wg9DZkqnGHs>
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros*. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. DE C.V.
- Nel, S., Kizil, M. S., & Knights, P. (2011). *Improving Truck-Shovel Matching*. September 2011, 24–30.
- Niebel, B. W., & Freivalds, A. (2014). *Ingeniería industrial : métodos, estándares y diseño del trabajo*. 586. <http://www.gandhi.com.mx/ingenieria-industrial-metodos-estandares-y-dise-o-de-trabajo>
- Park, S., Choi, Y., & Park, H. S. (2016). Optimization of truck-loader haulage systems in an underground mine using simulation methods. <http://dx.doi.org/10.1080/12269328.2016.1176538>, 19(5), 222–231. <https://doi.org/10.1080/12269328.2016.1176538>
- Rossetti, M. (2021). *Simulation Modeling and Arena 3rd Edition*. <https://rossetti.github.io/RossettiArenaBook/>
- Stein, C. (2011). *Analysis of Algorithms I*. Columbia University. <http://www.columbia.edu/~cs2035/courses/csor4231.F11/sp.pdf>
- Sturgul, J. R. (2000). *Mine Design: Examples Using Simulation*.
- Tabesh, M., Upadhyay, S. P., & Askari-Nasab, H. (2016). *Discrete Event Simulation of Truck-Shovel Operations in Open Pit Mines*. 1–17.
- Torkamani, E. (2013). *Linkage of Truck-and-shovel Operations to Short-term Mine Plans Using Discrete Event Simulation*. University of Alberta.
- Valdez y Alfaro, I. (2015). *Pruebas de Bondad de Ajuste*. <http://www.dcb.unam.mx/profesores/irene/Notas/PruebaBondad.pdf>
- Vargas, X. (2005). *Modelos probabilísticos*. Pontificia Universidad Católica de Chile. [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/hidrologia/Capitulo\\_7/modulo7/cap2.pdf](http://www7.uc.cl/sw_educ/hidrologia/Capitulo_7/modulo7/cap2.pdf)

Wasserman, L. (2003). *All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference*.



ANEXOS

Anexo 1: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante enero.

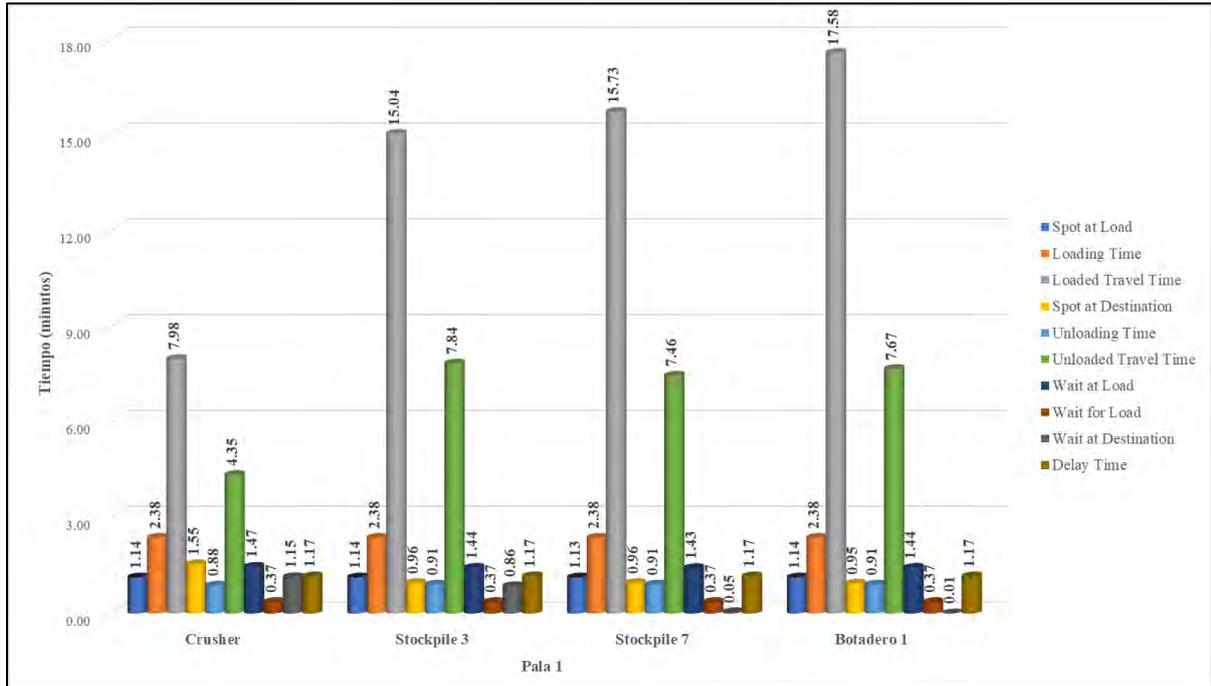


Figura 101. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 1.

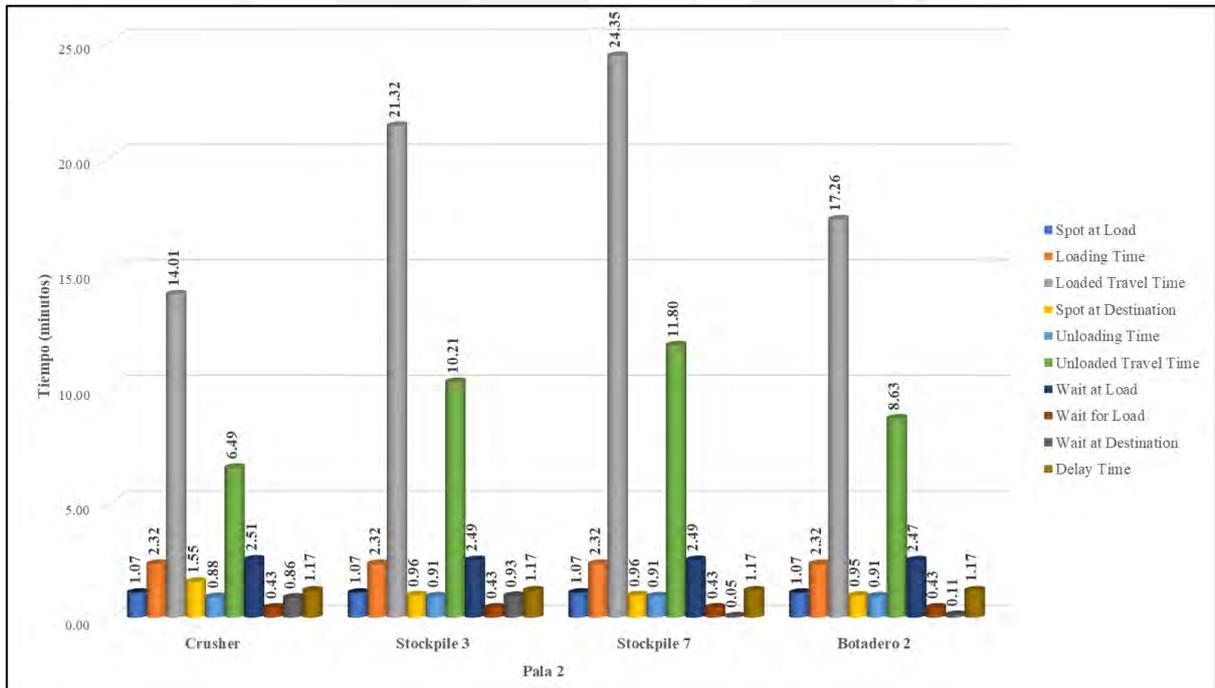


Figura 102. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 2.

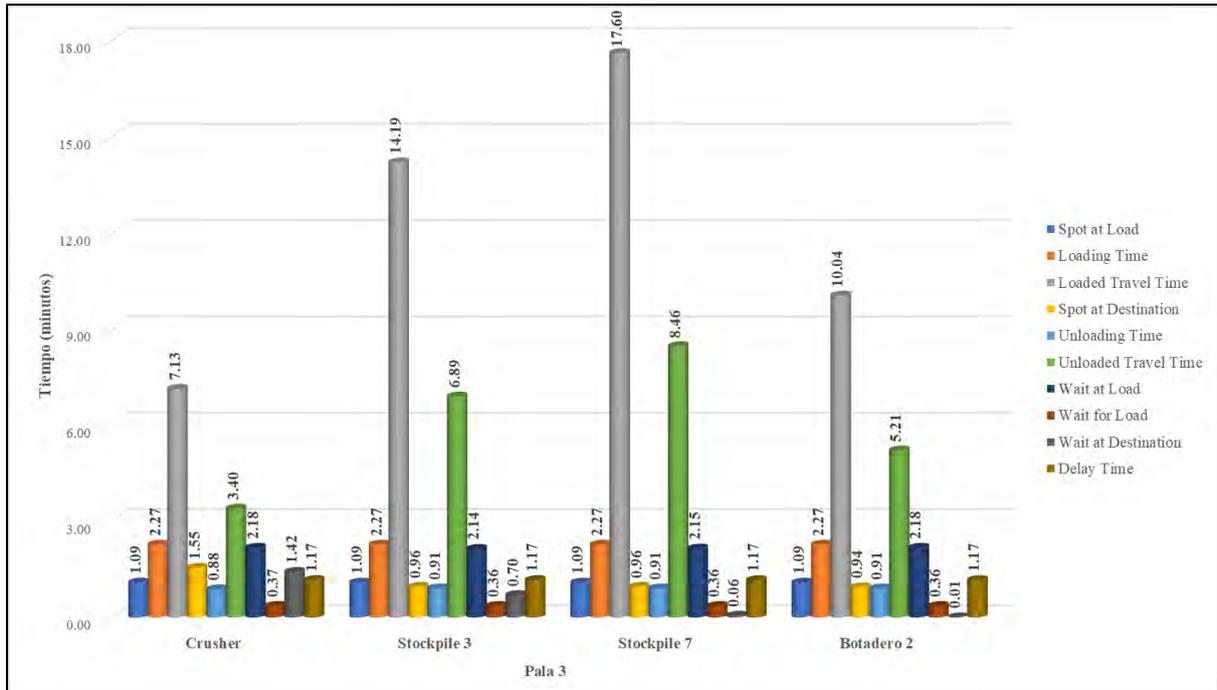


Figura 103. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 3.

De las figuras 102 y 103 se observa un incremento en los tiempos de colas con respecto al modelo de calibración en las palas 2 y 3. El incremento del tiempo de colas en la pala 2 se da por el aumento en el número de camiones asignados hasta 8, mientras que el aumento del tiempo de colas para la pala 3 es producto de la reducción del tiempo en el ciclo de transporte hasta los 26 minutos ya que los volquetes recorren 3.7 km por viaje.

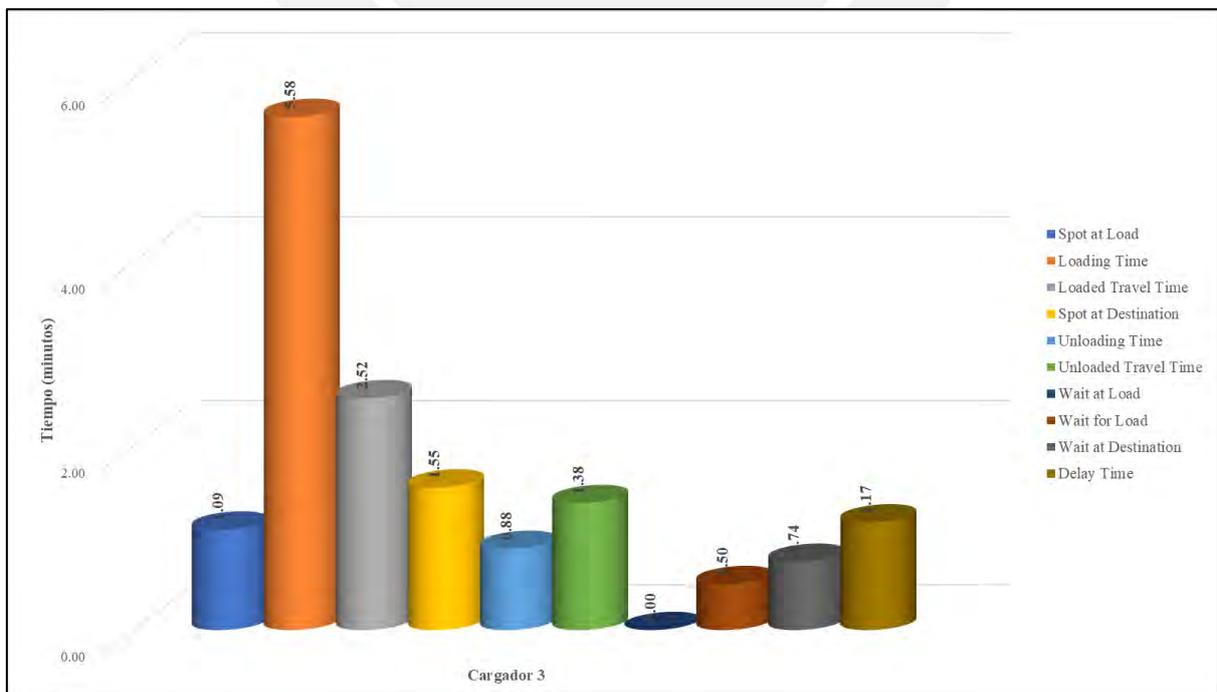


Figura 104. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada al cargador 3.

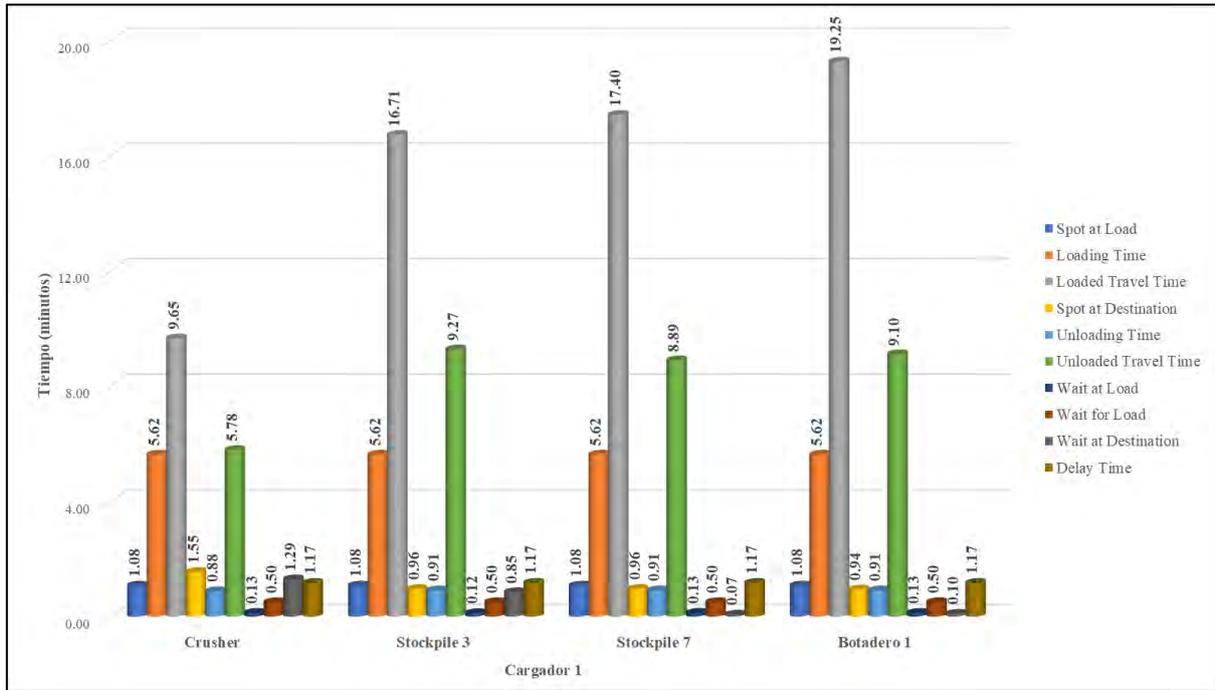


Figura 105. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada al cargador 1.

**Anexo 2: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante febrero.**

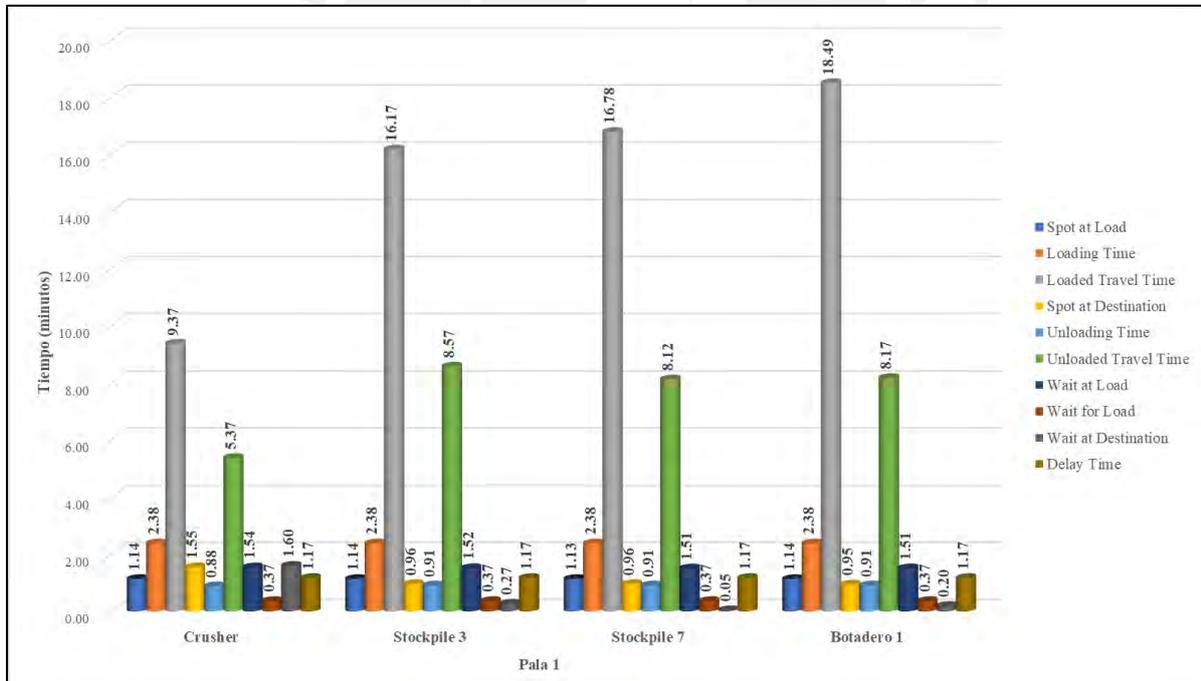


Figura 106. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 1.

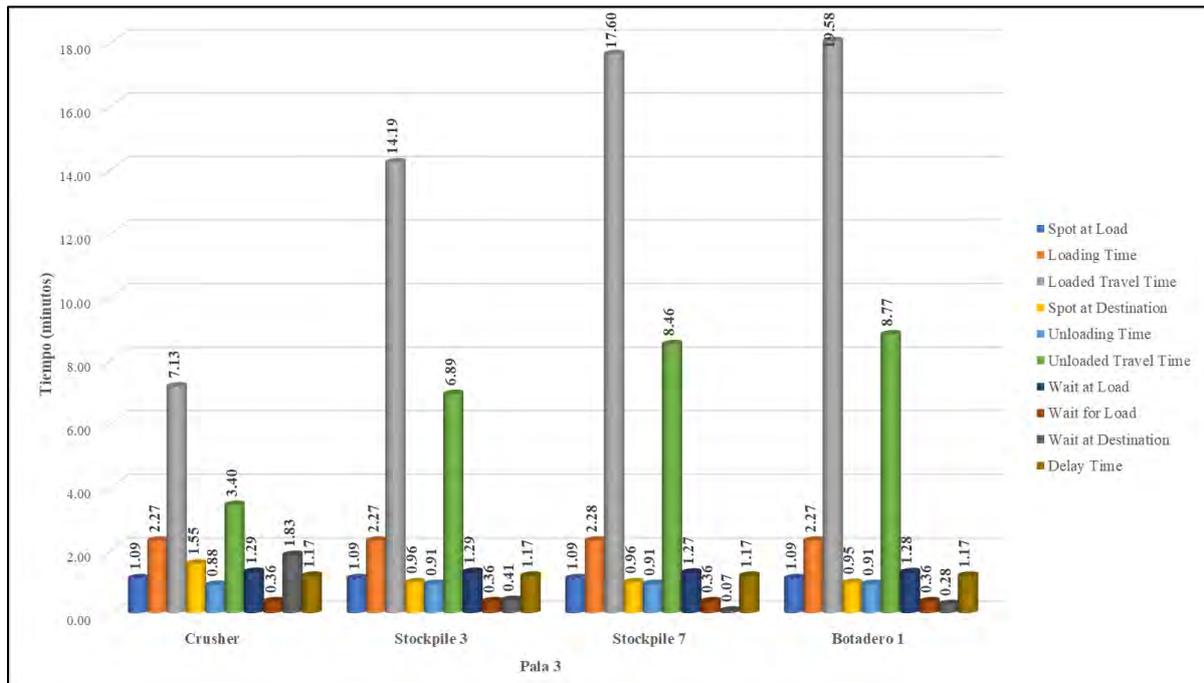


Figura 107. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 2.

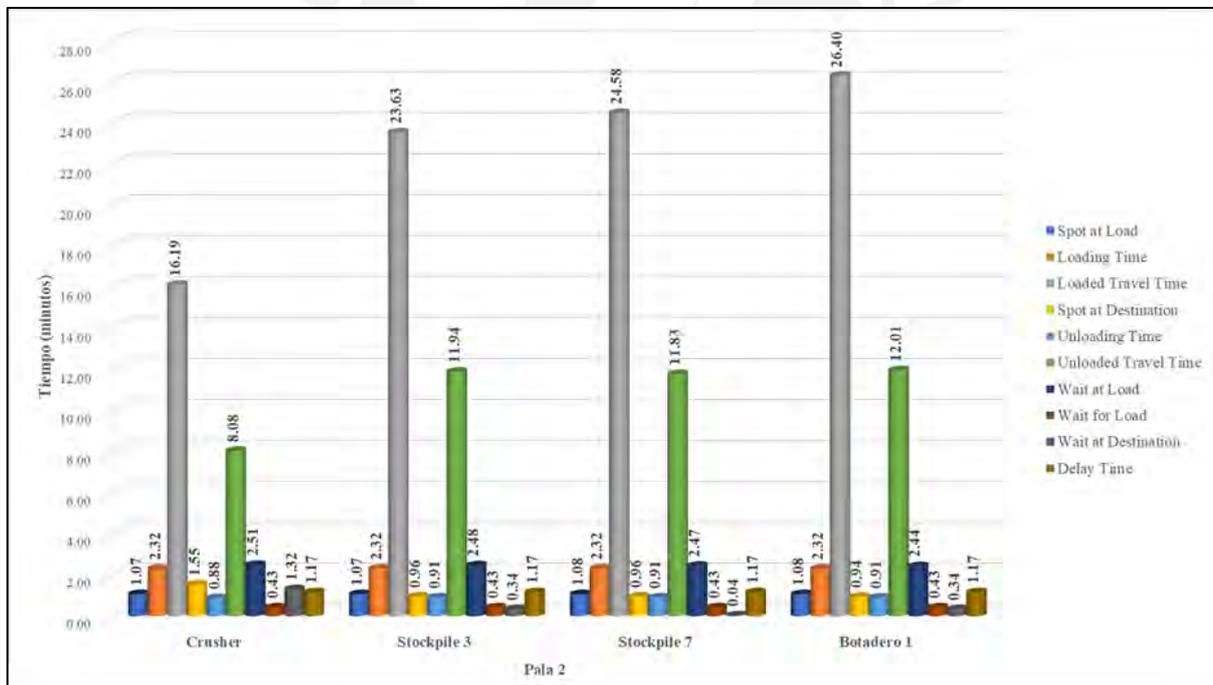


Figura 108. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 3.

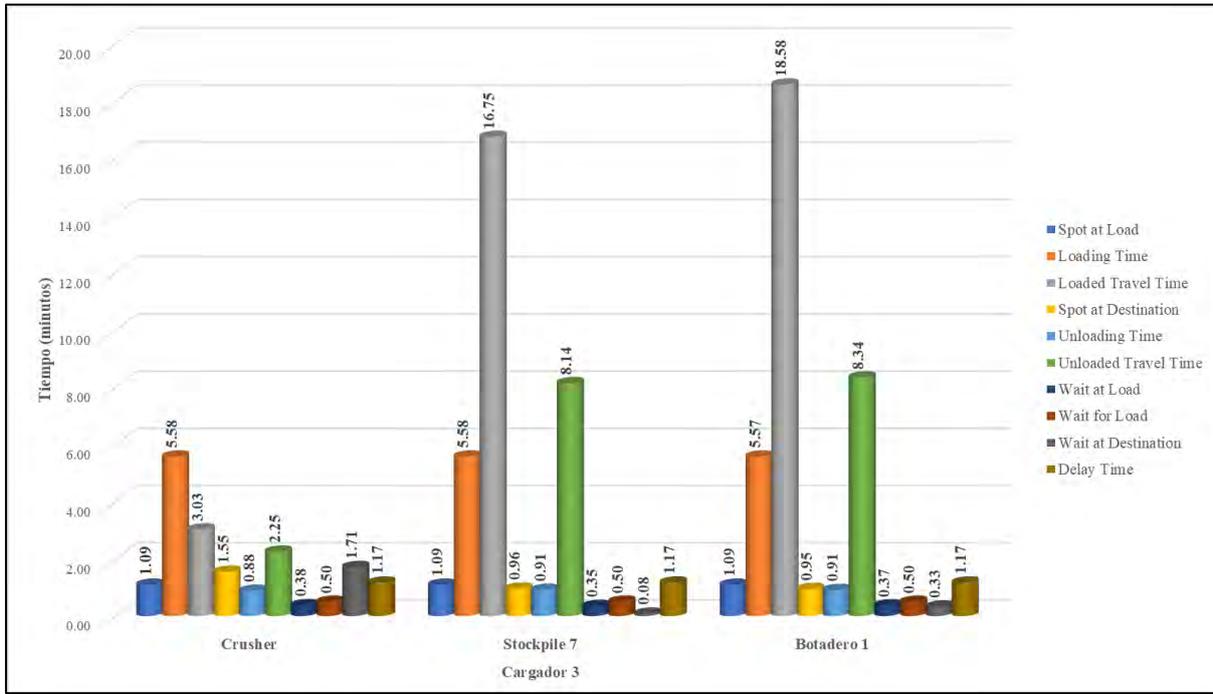


Figura 109. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada al cargador 3.

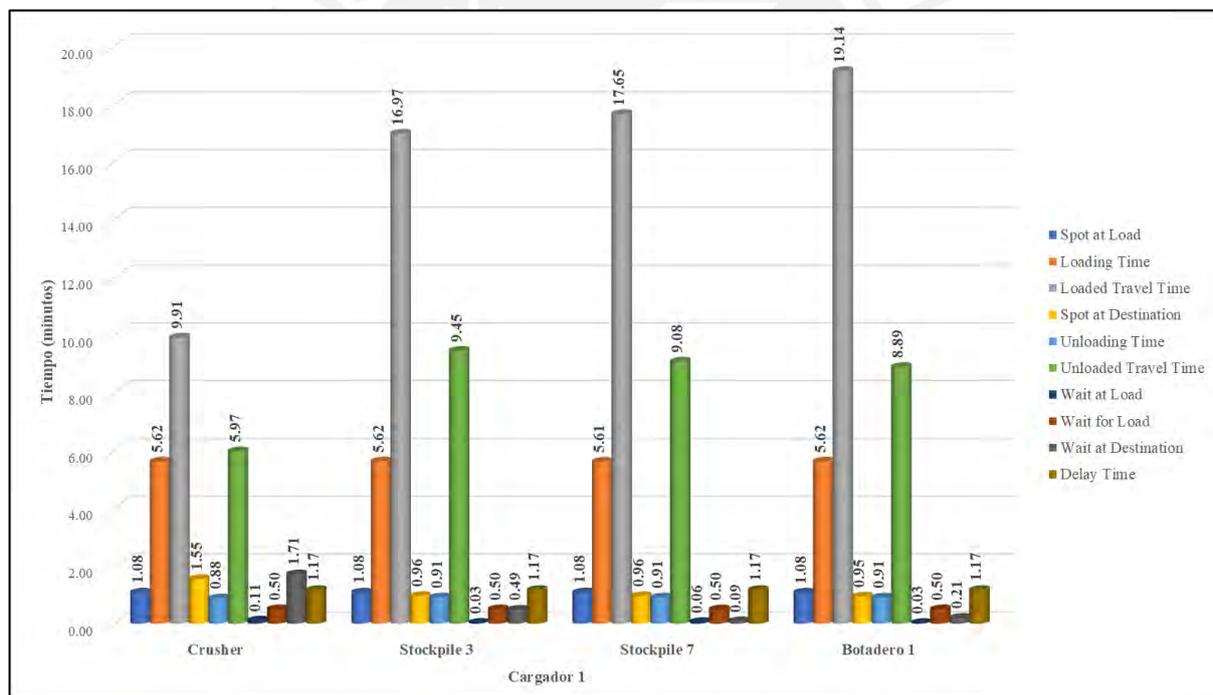


Figura 110. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada al cargador 1.

**Anexo 3: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante marzo.**

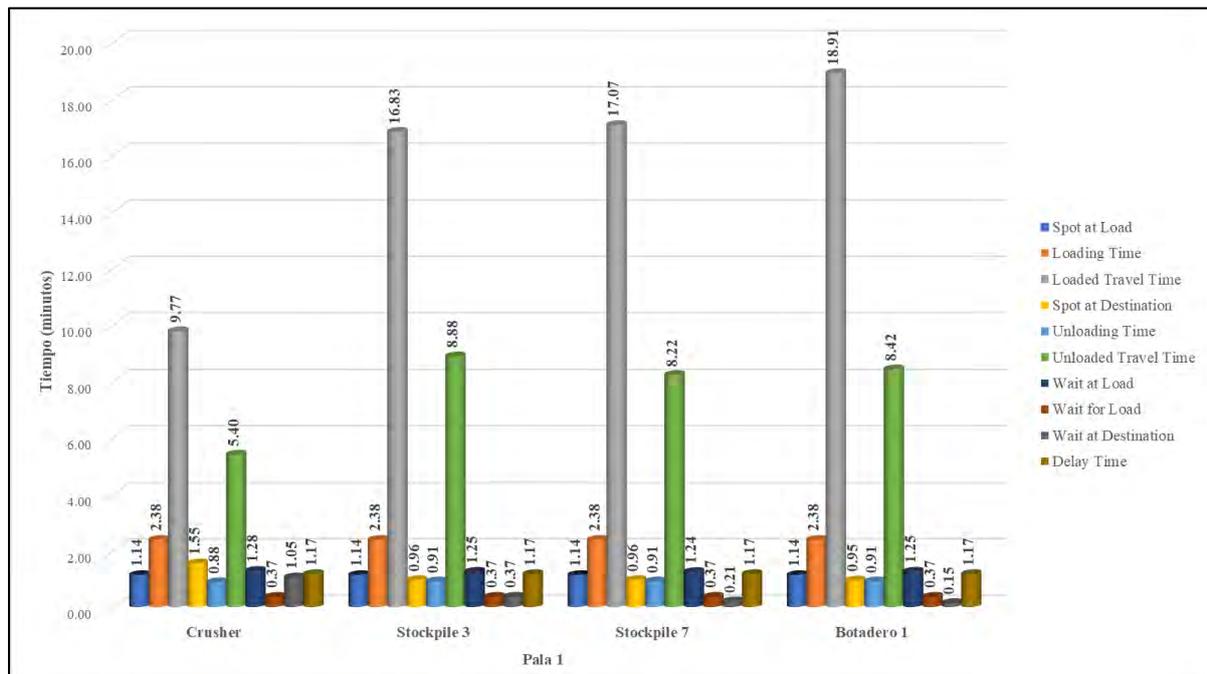


Figura 111. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 1.

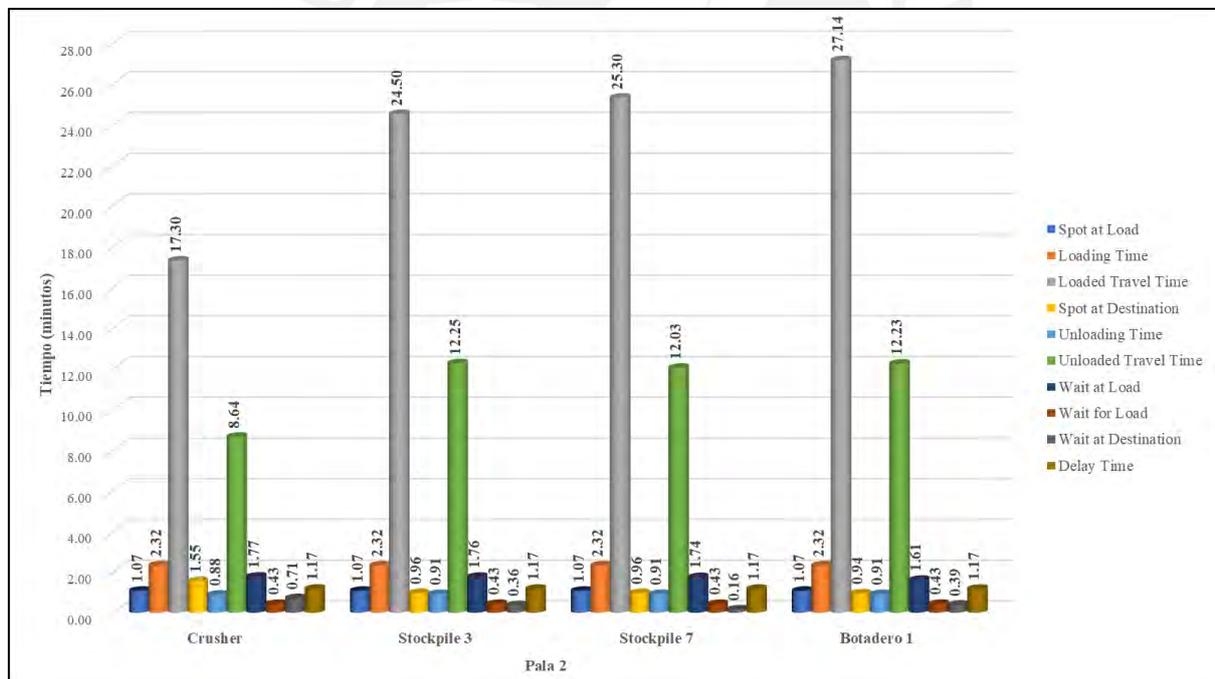


Figura 112. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 2.

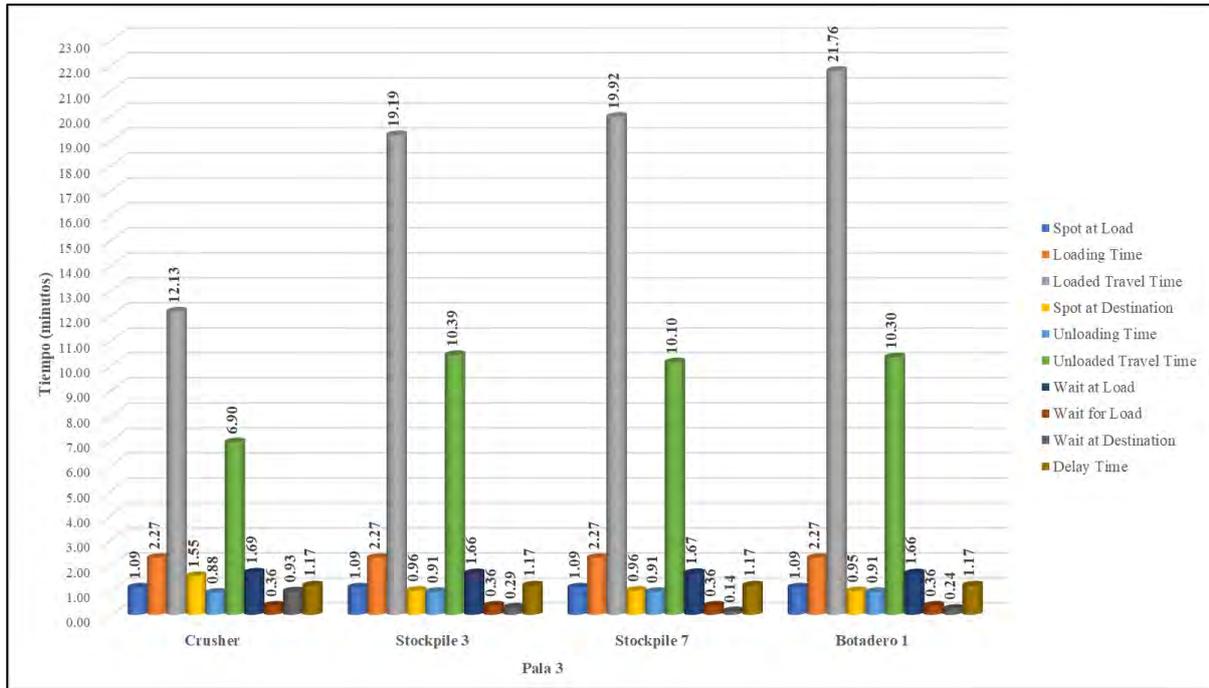


Figura 113. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 3.

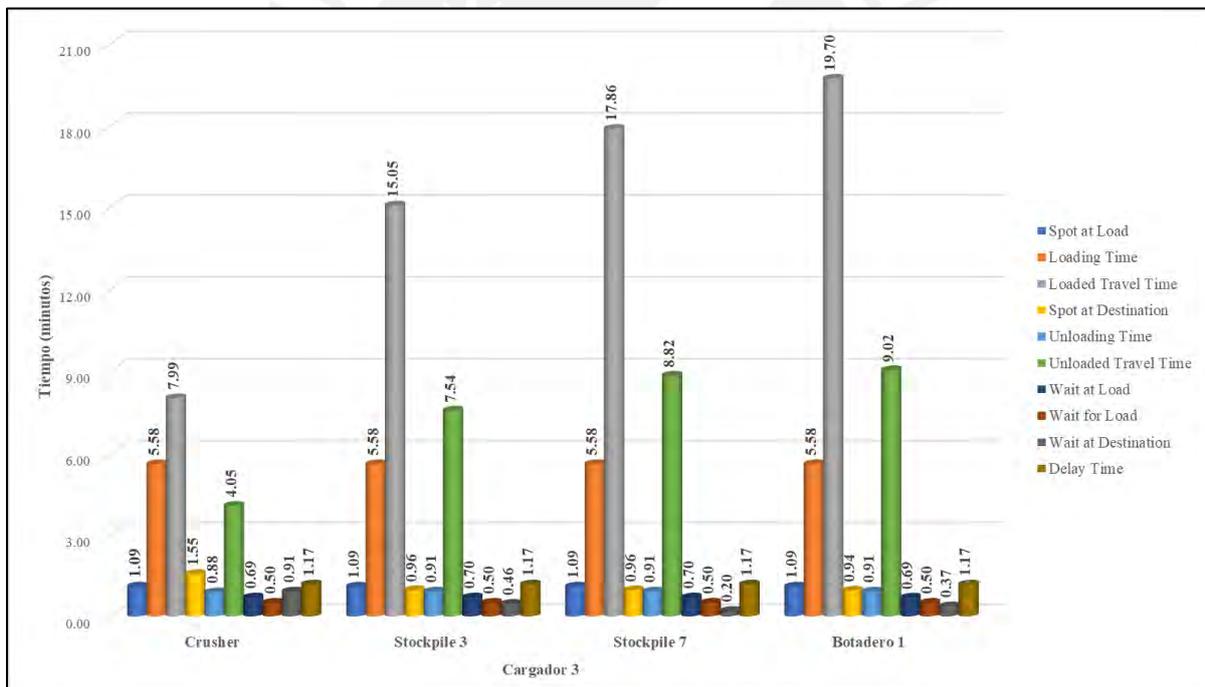


Figura 114. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada al cargador 3.

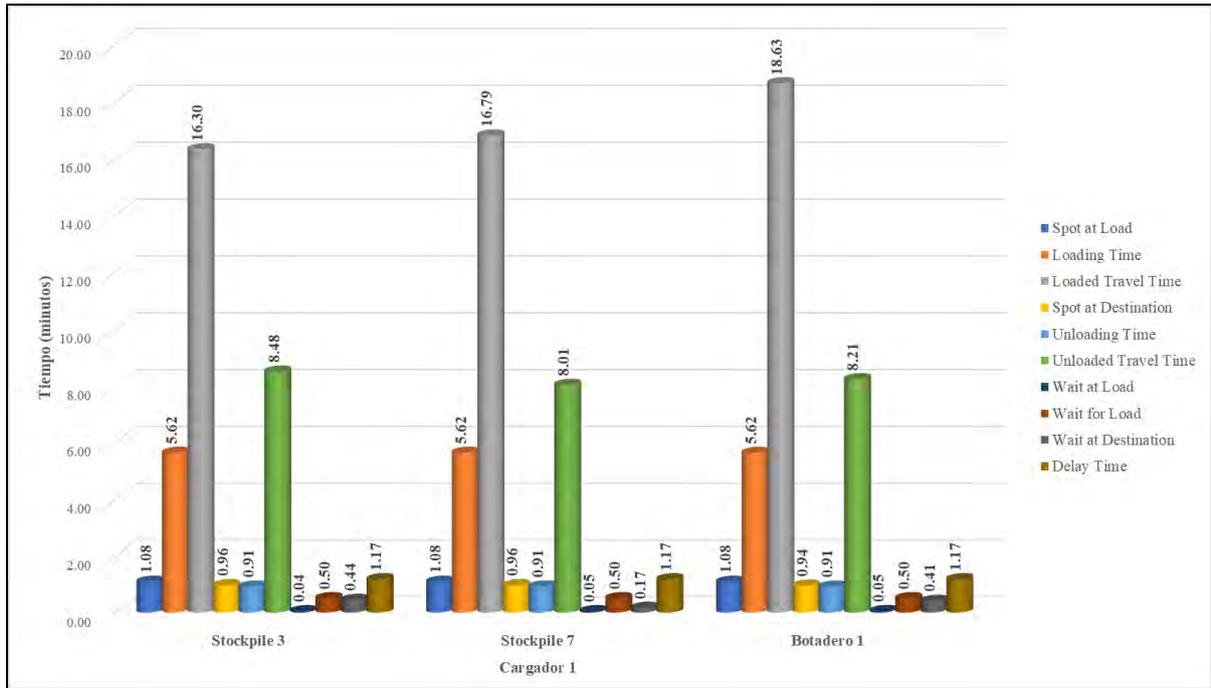


Figura 115. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada al cargador 1.

**Anexo 4: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante abril.**

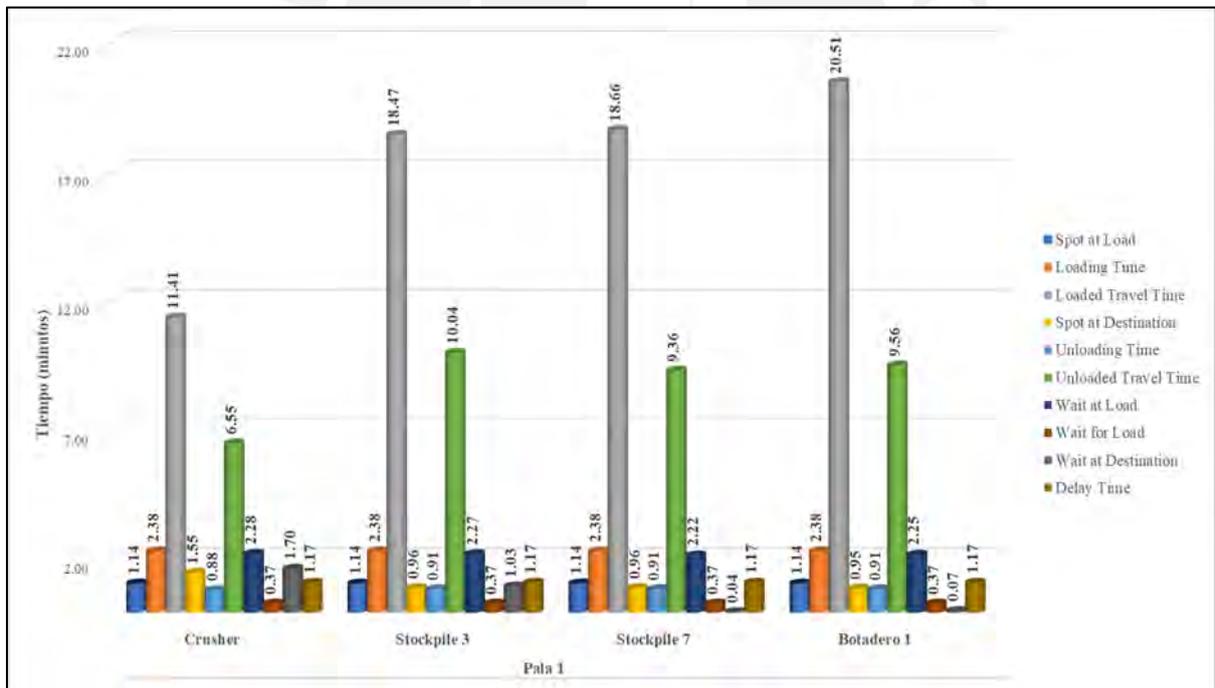


Figura 116. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 1.

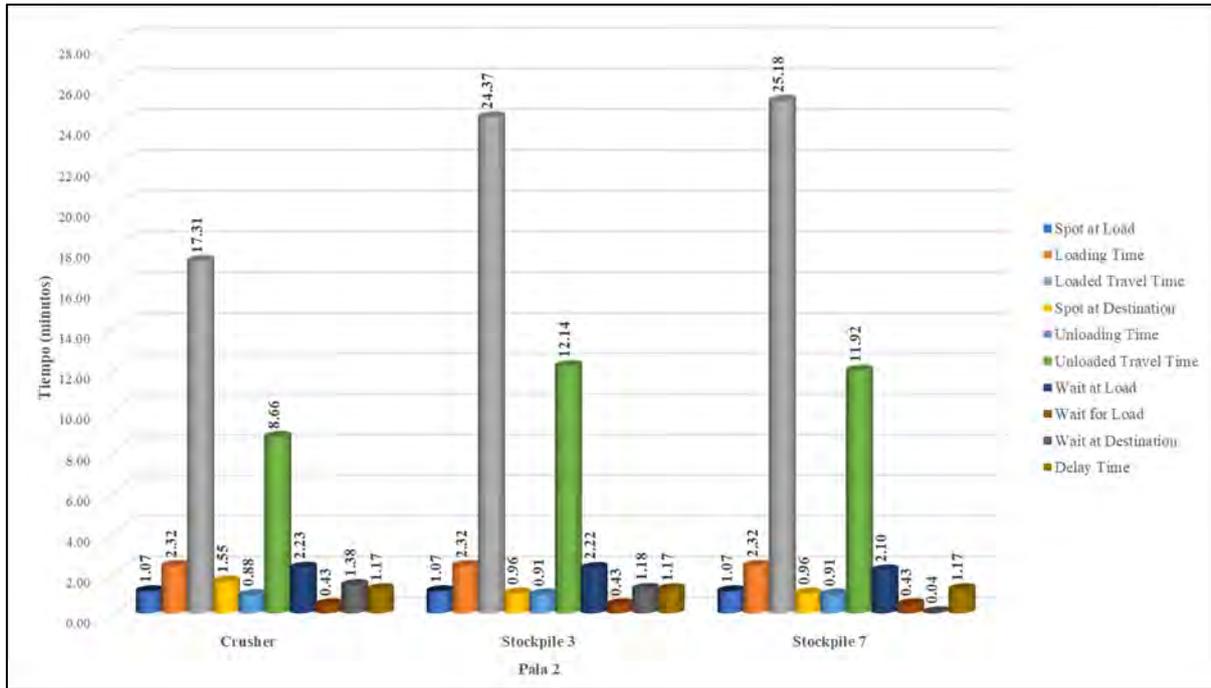


Figura 117. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 2.

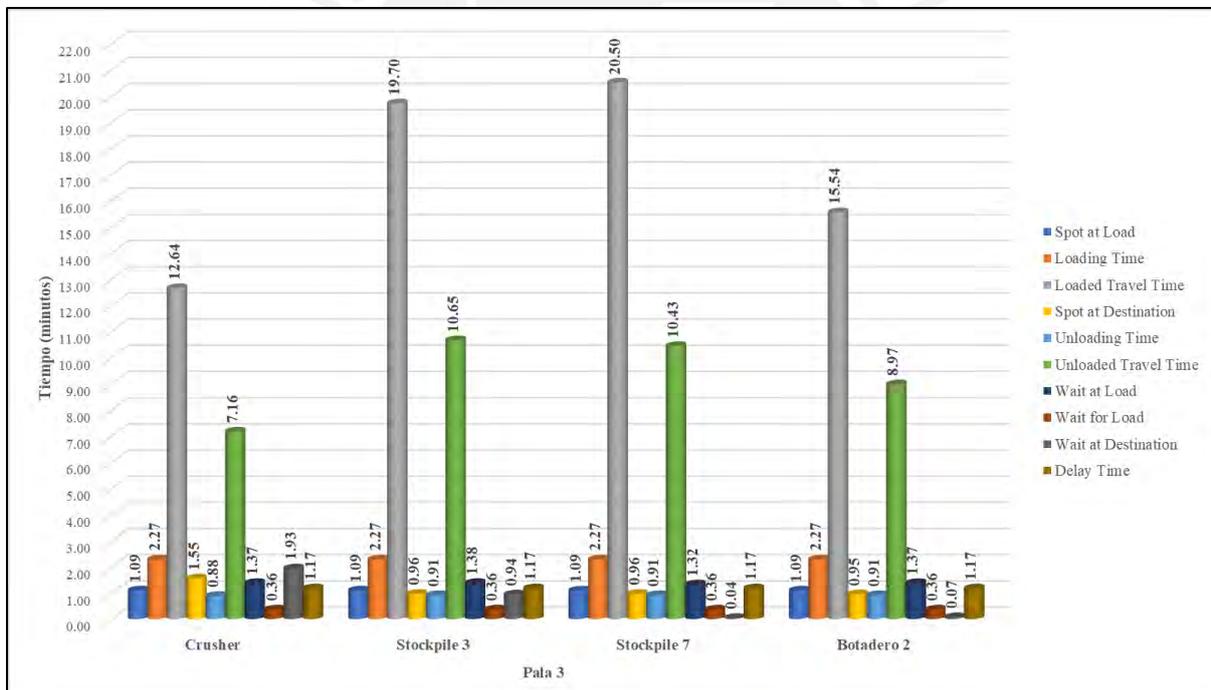


Figura 118. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 3.

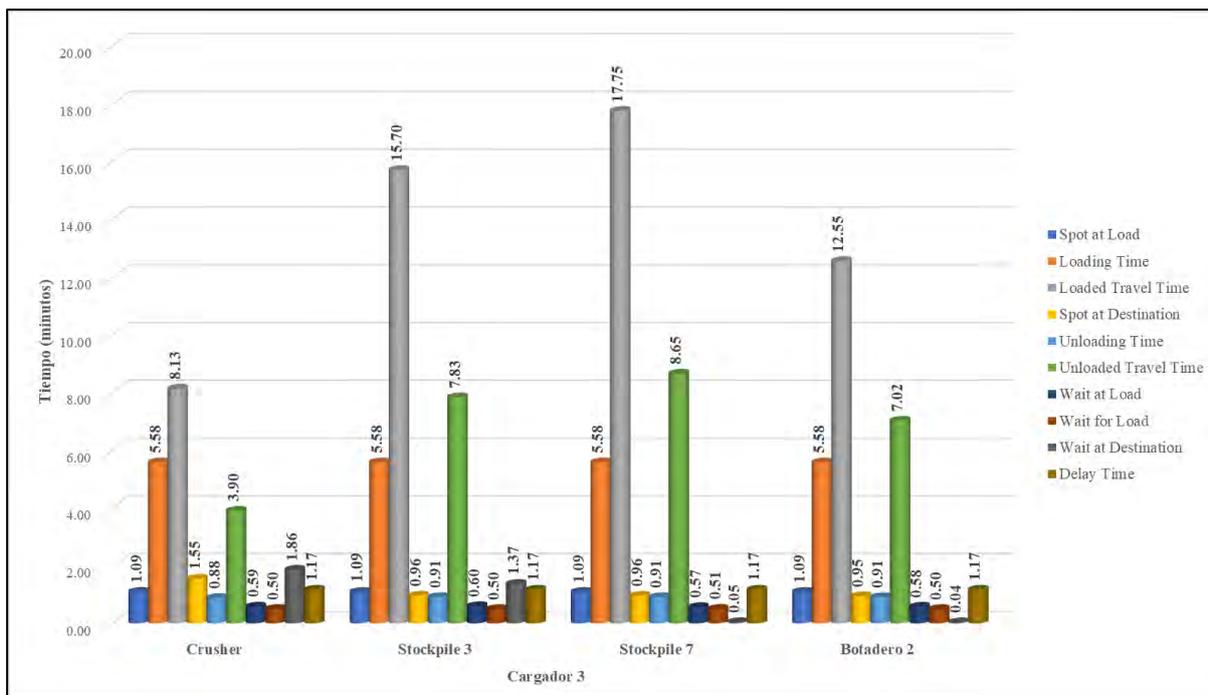


Figura 119. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 3.

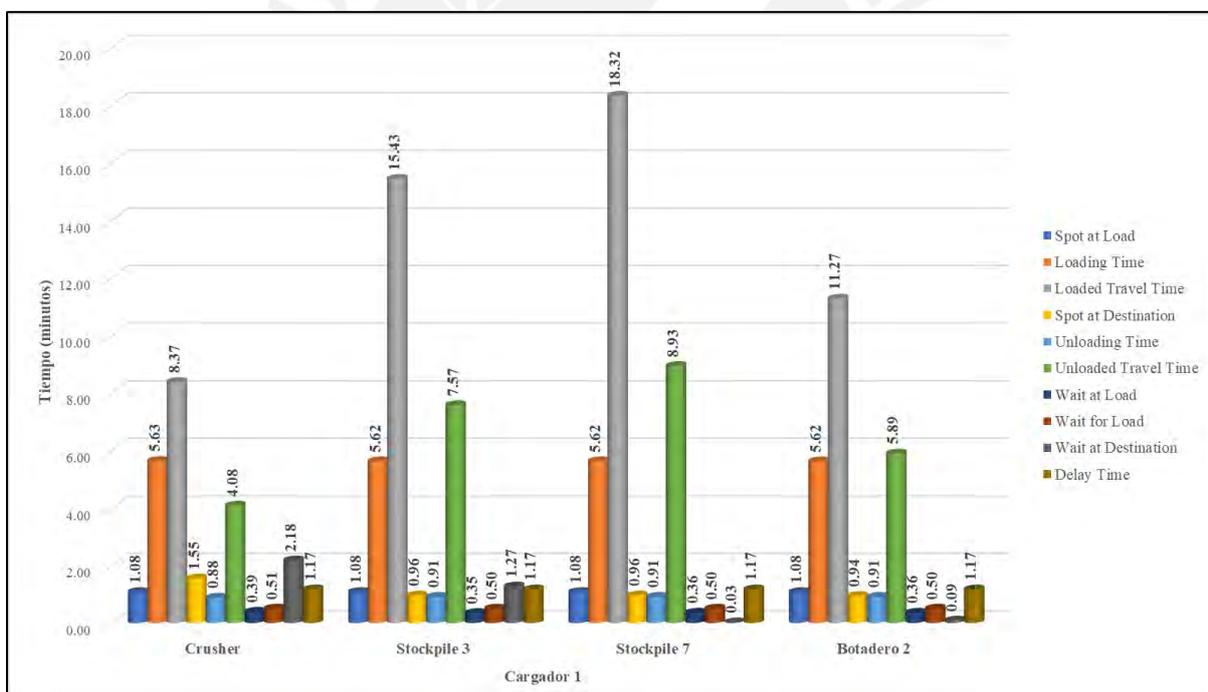


Figura 120. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 1.

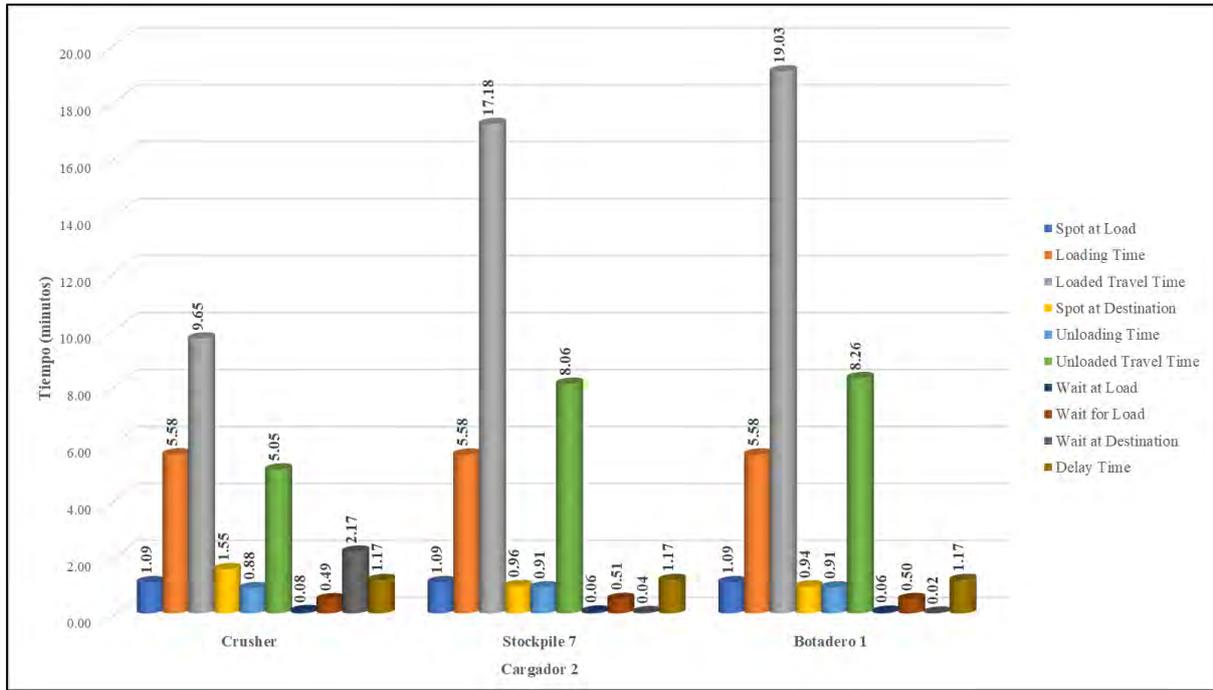


Figura 121. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 5: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante mayo.**

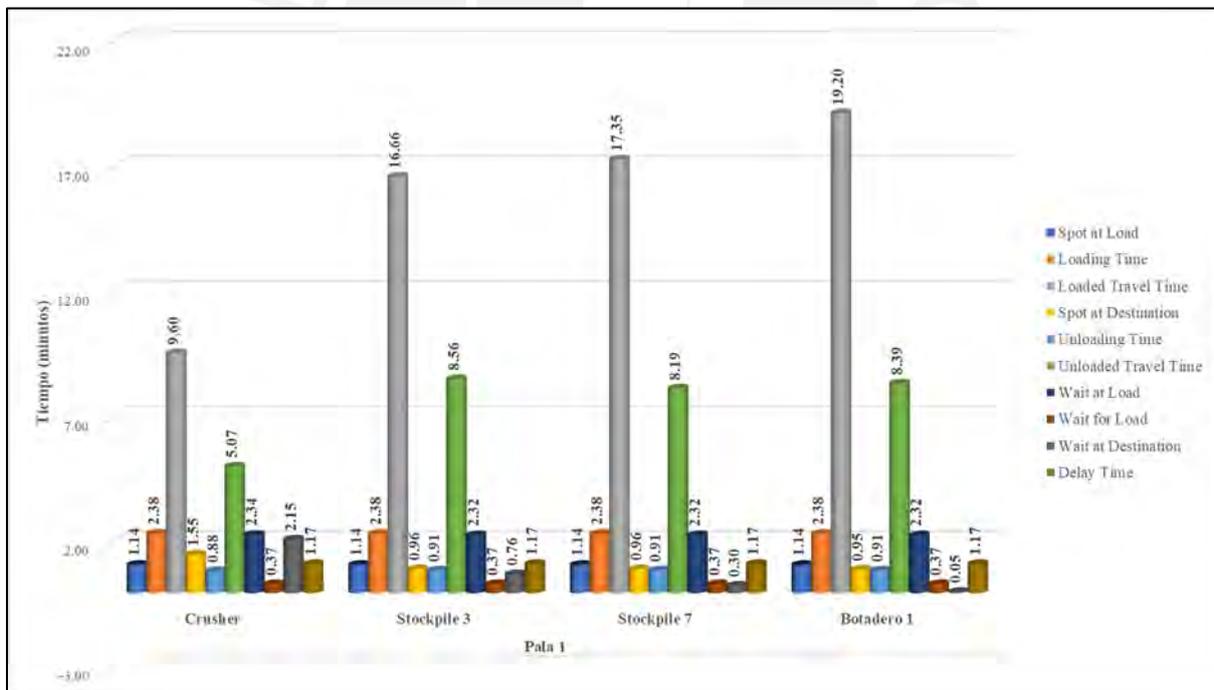


Figura 122. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 1.

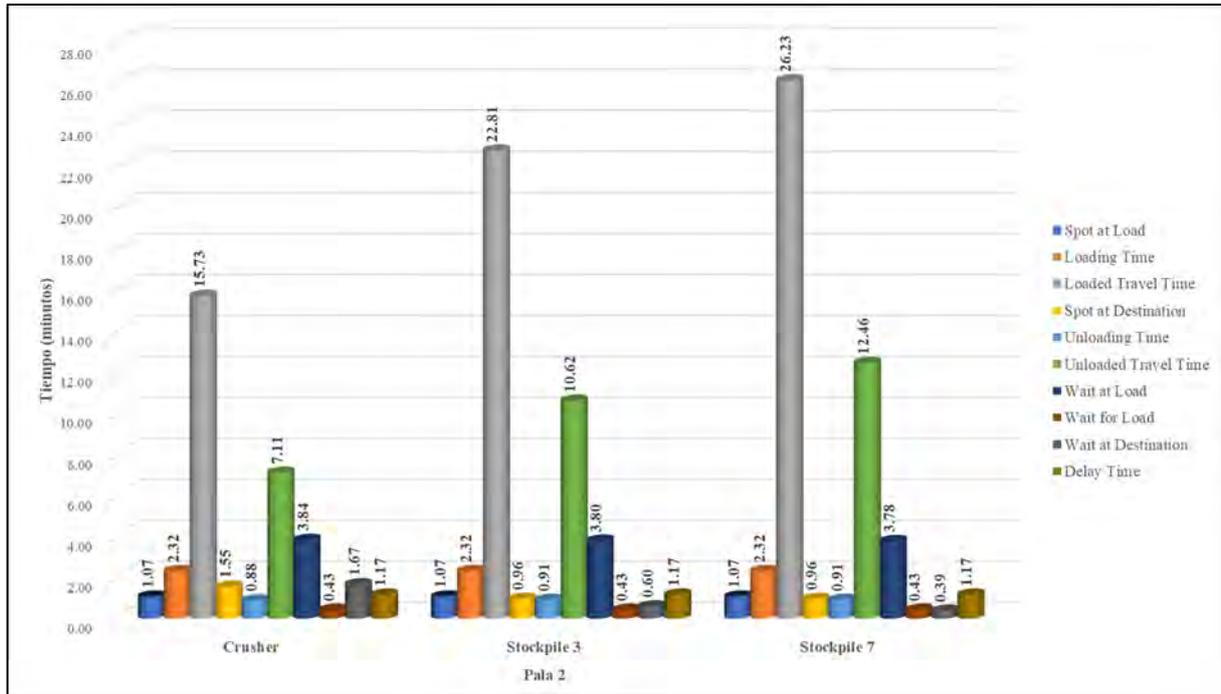


Figura 123. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 2.

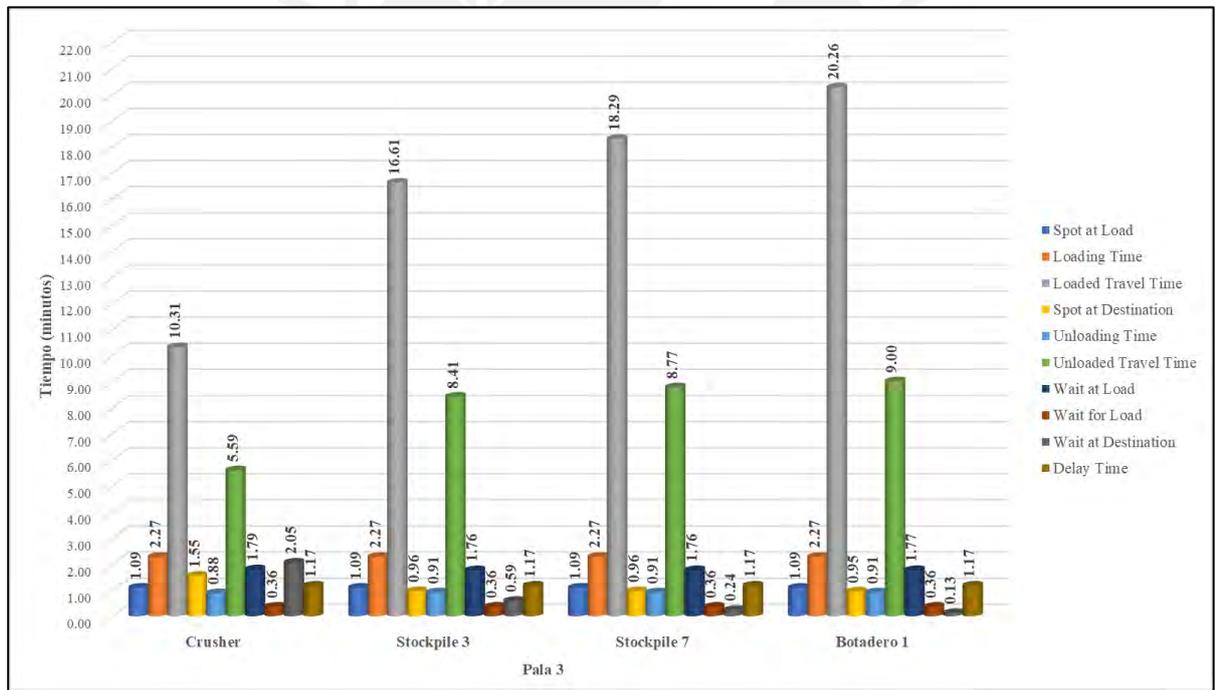


Figura 124. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 3.

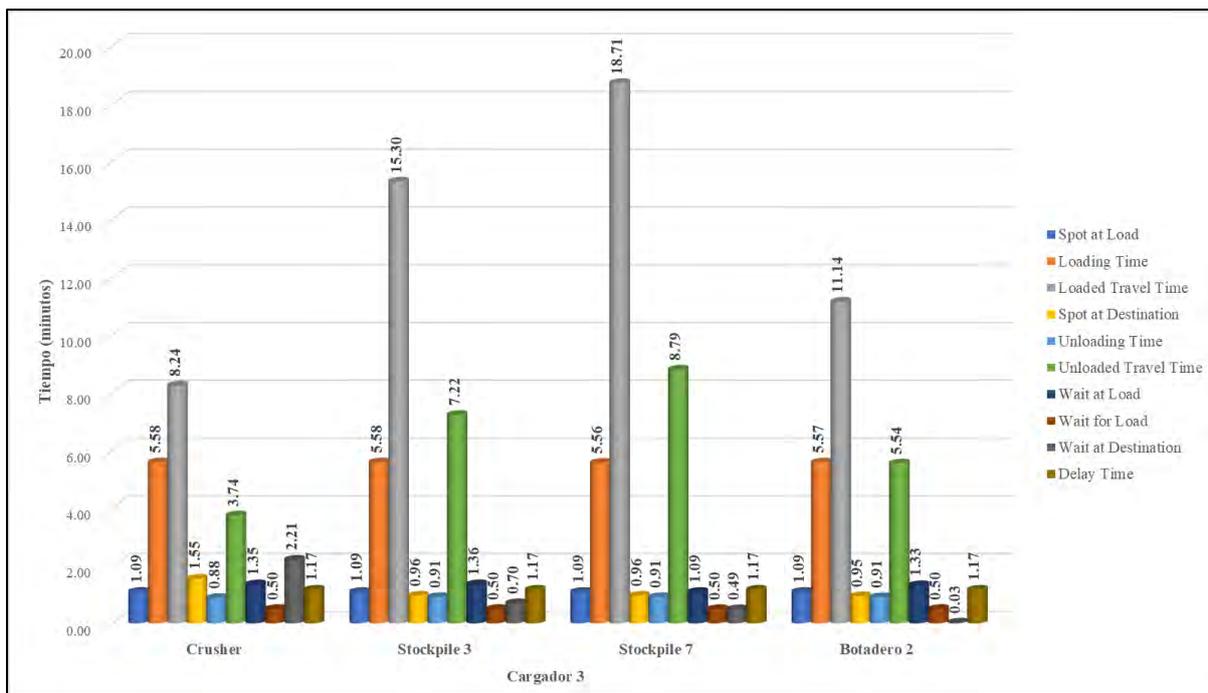


Figura 125. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 3.

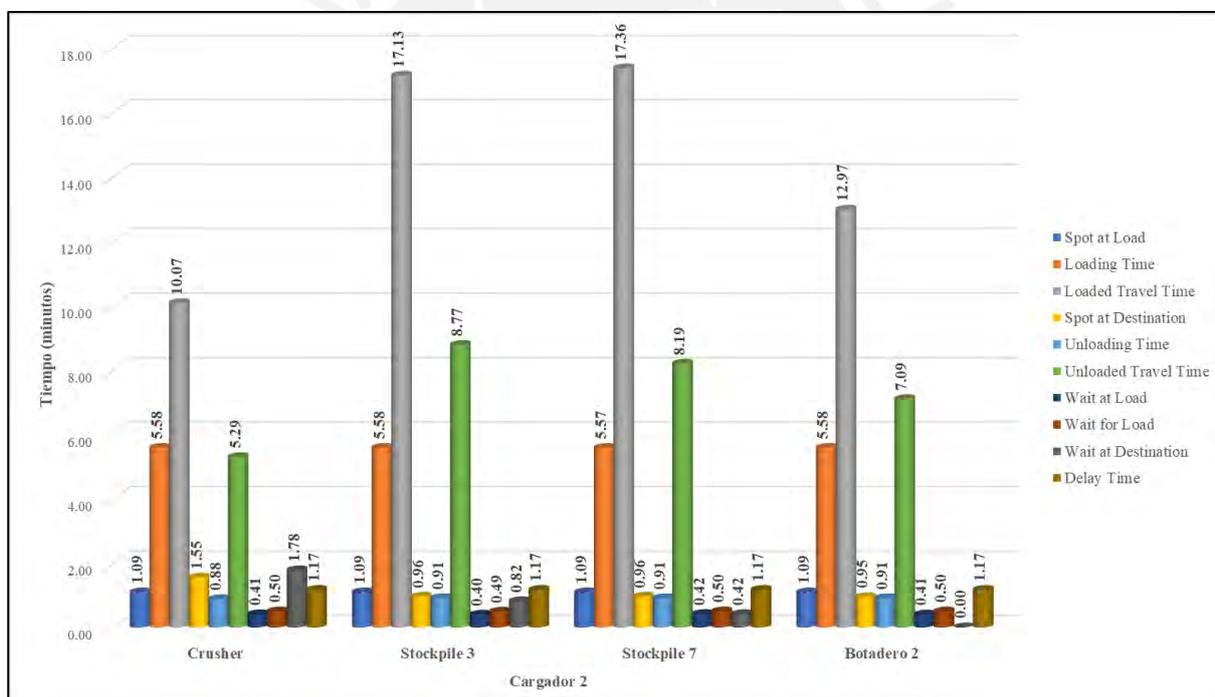


Figura 126. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 1.

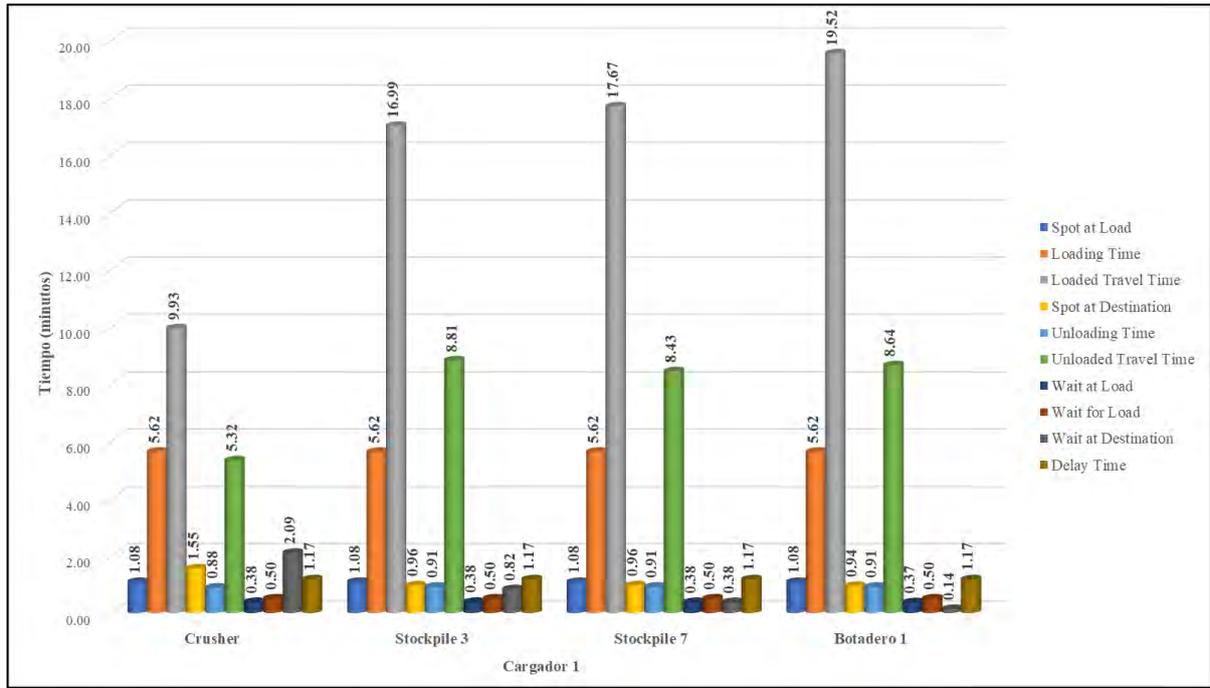


Figura 127. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 6: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante junio.**

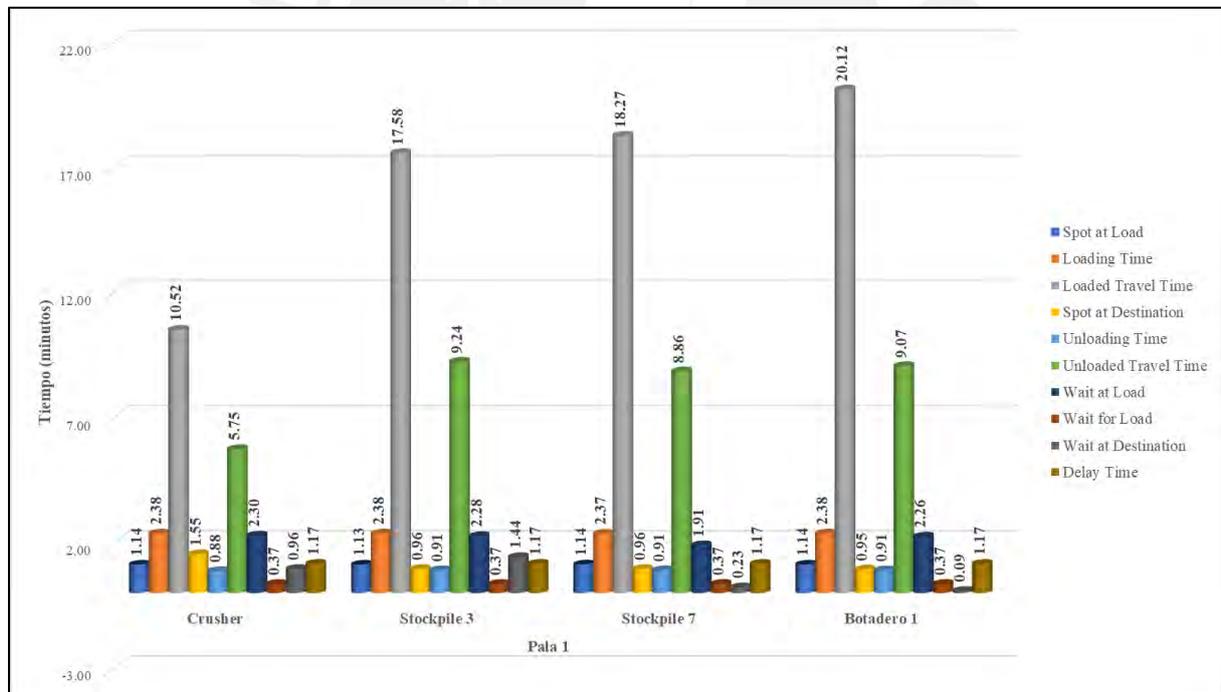


Figura 128. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 1.

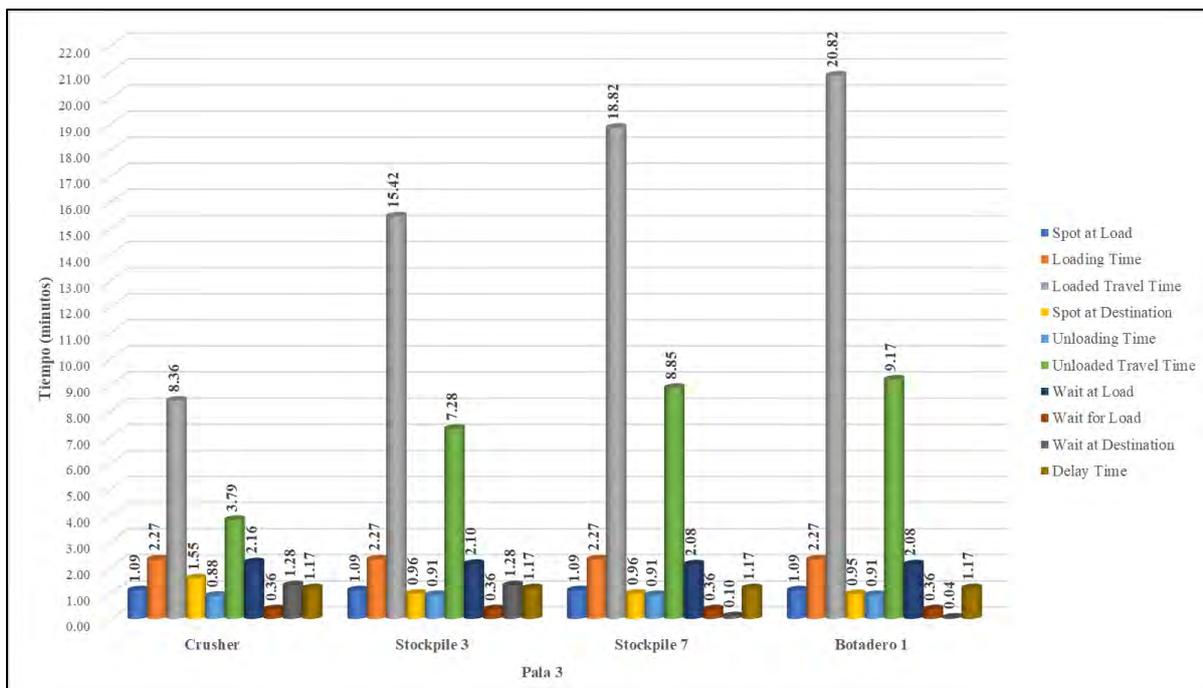


Figura 129. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 2.

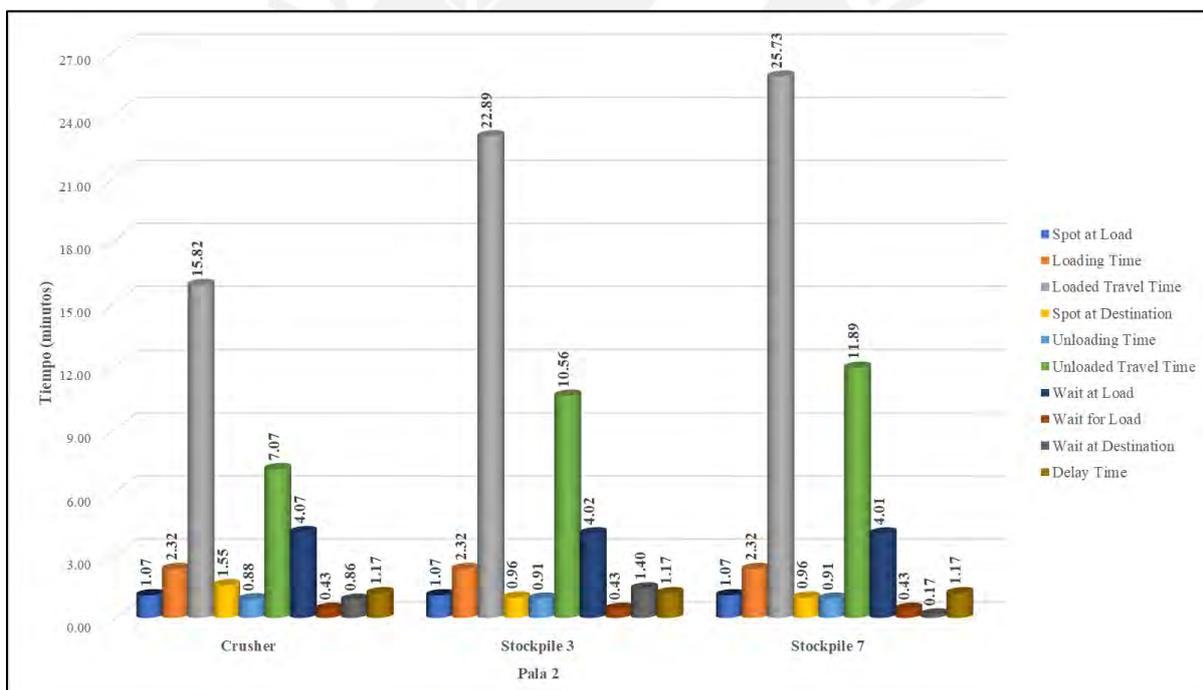


Figura 130. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 3.

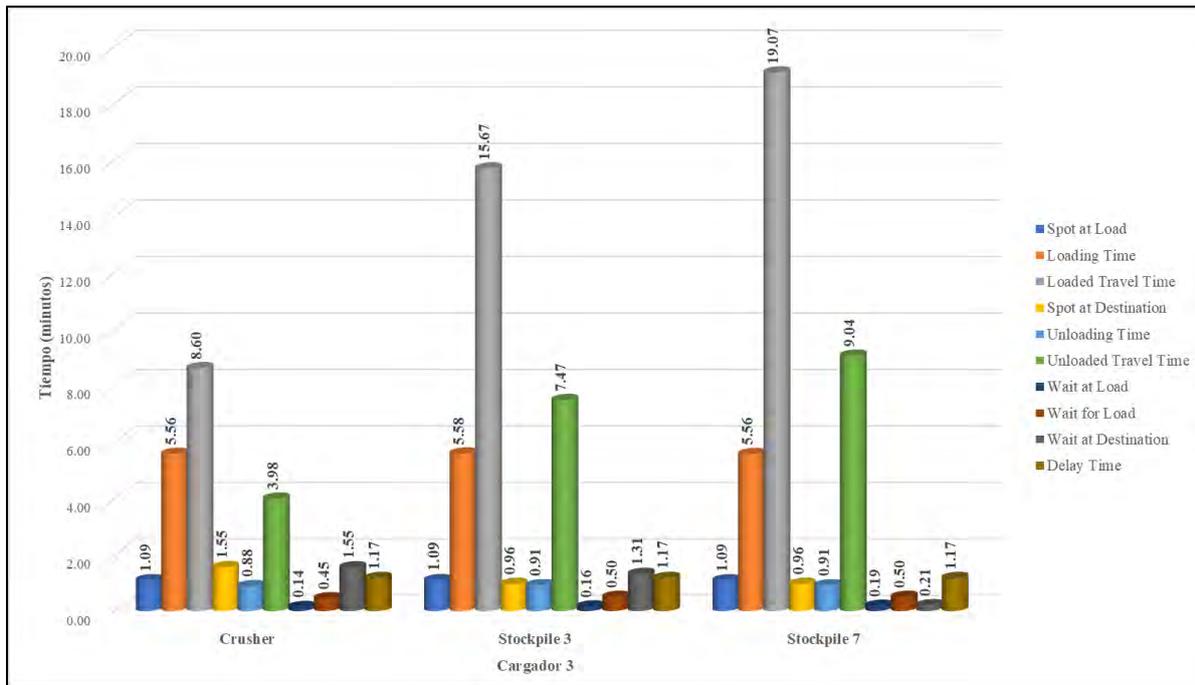


Figura 131. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 3.

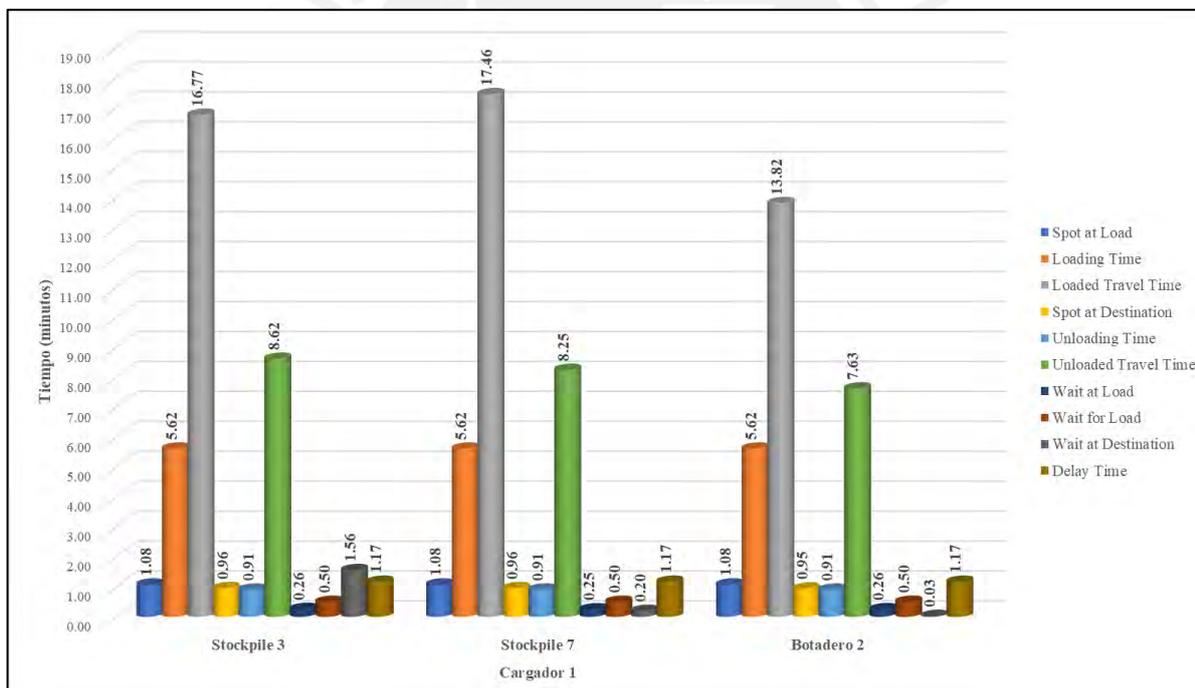


Figura 132. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 1.

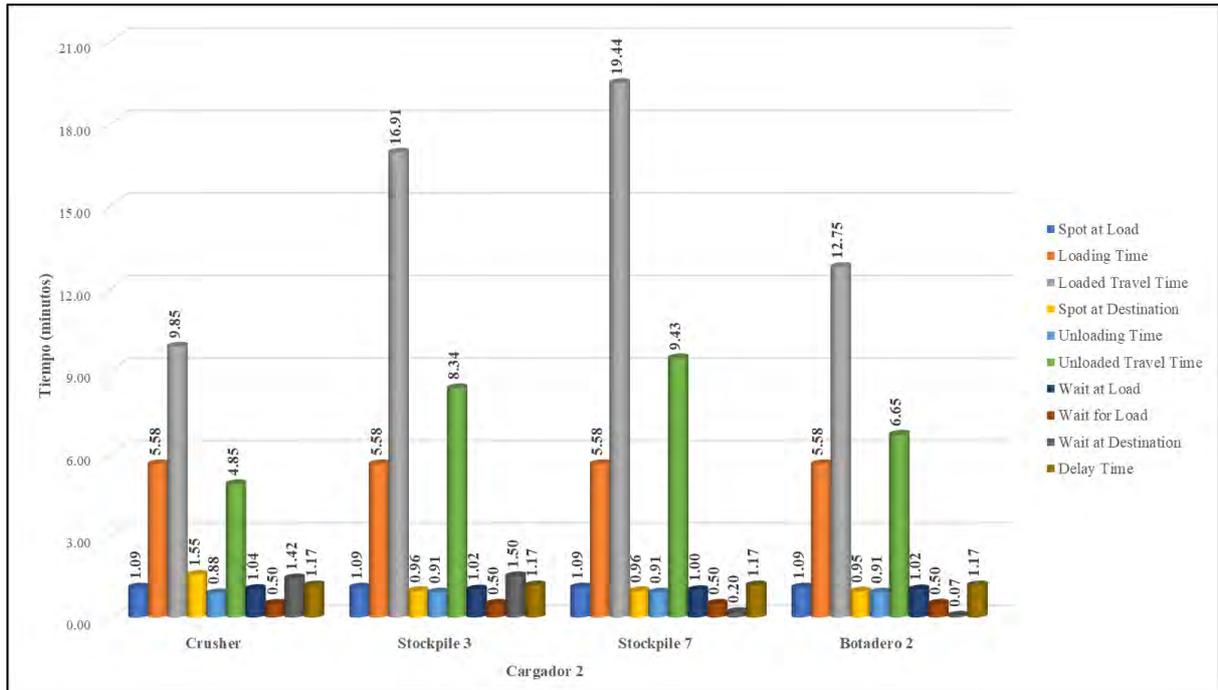


Figura 133. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 7: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante julio.**

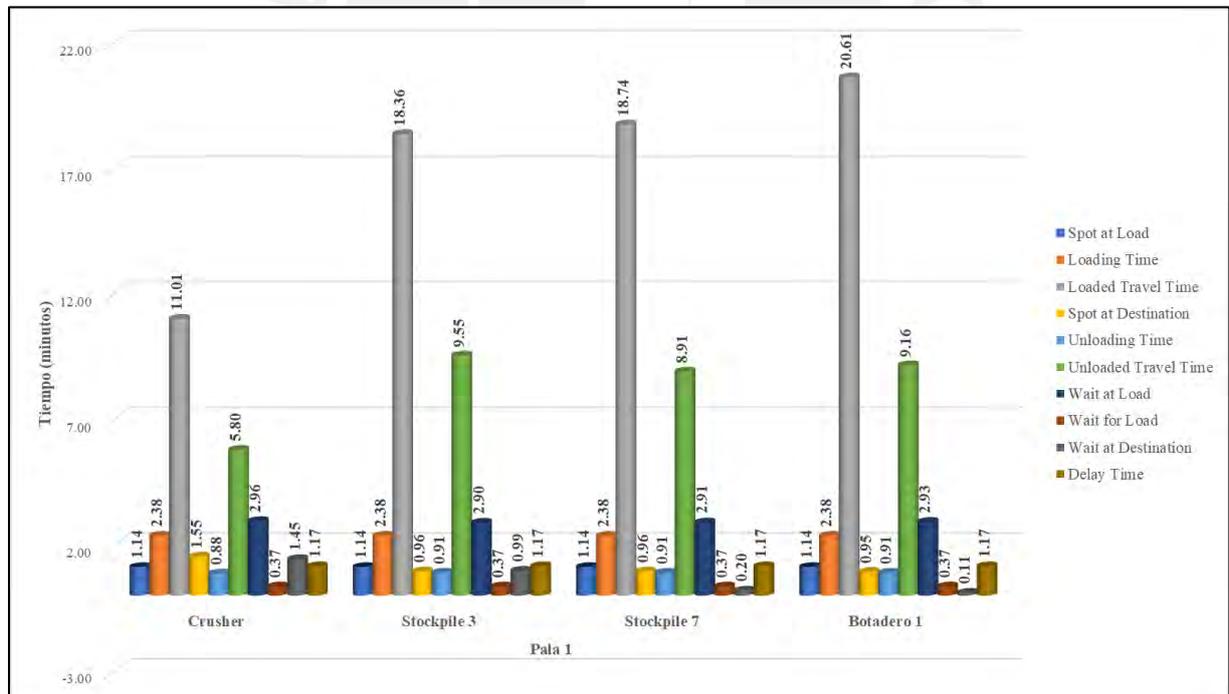


Figura 134. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 1.

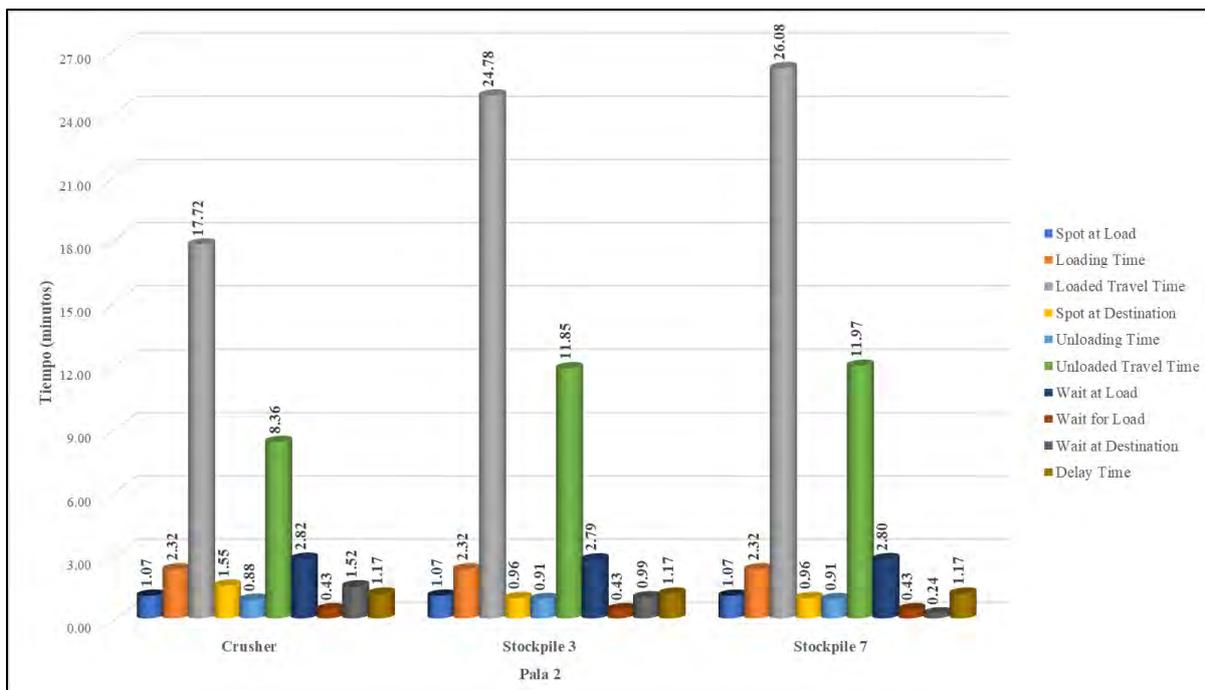


Figura 135. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 2.

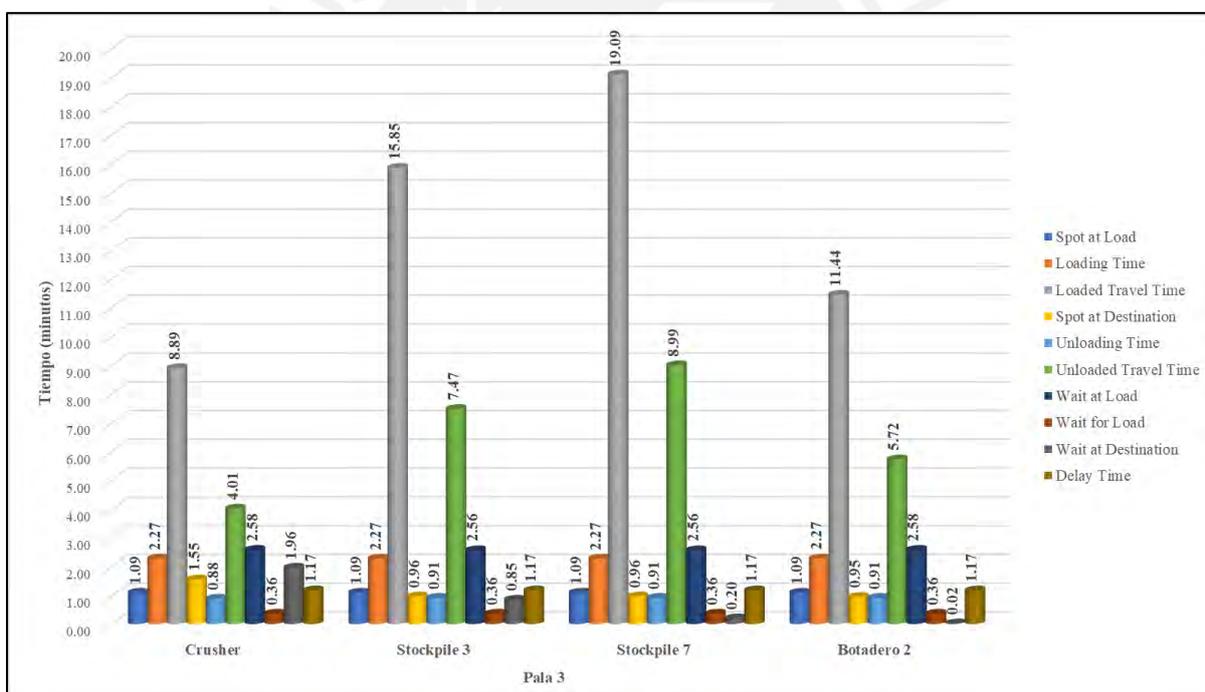


Figura 136. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 3.

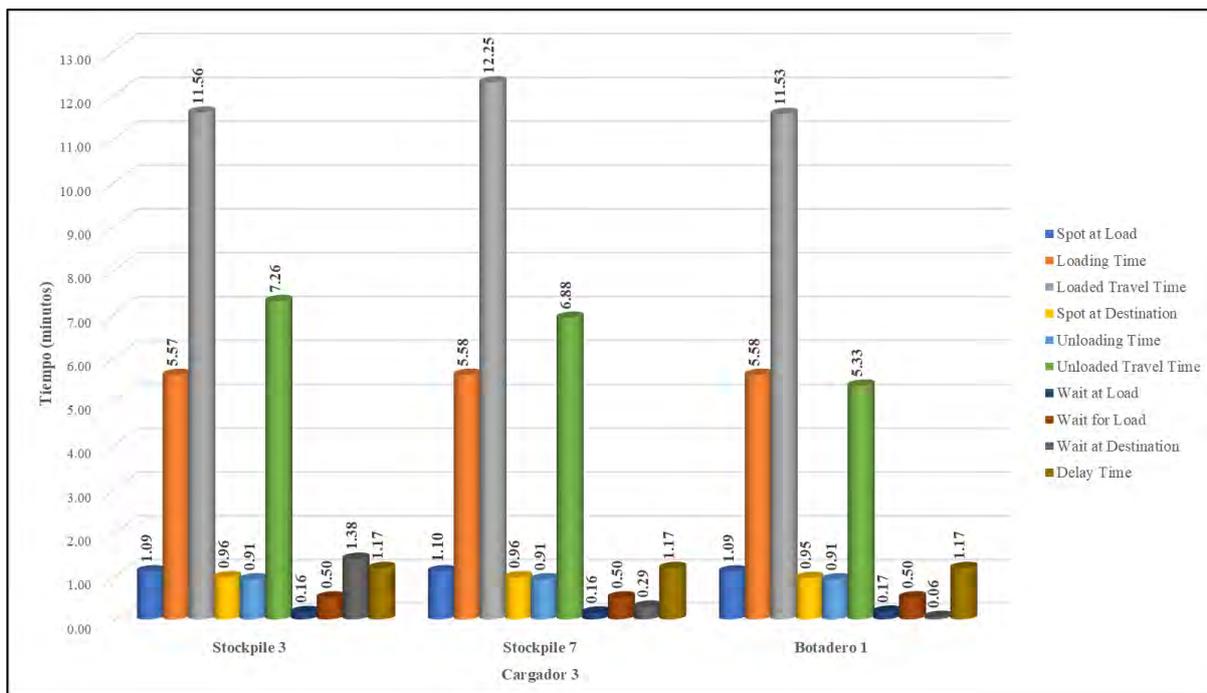


Figura 137. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 3.

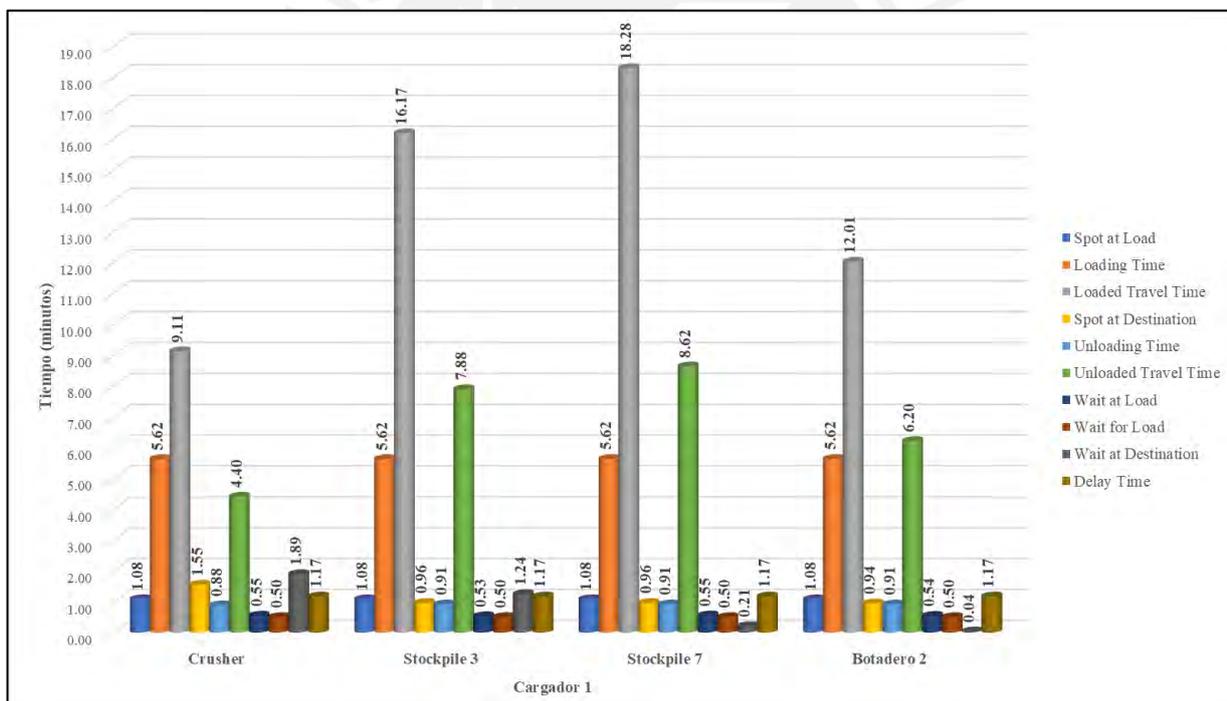


Figura 138. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 1.

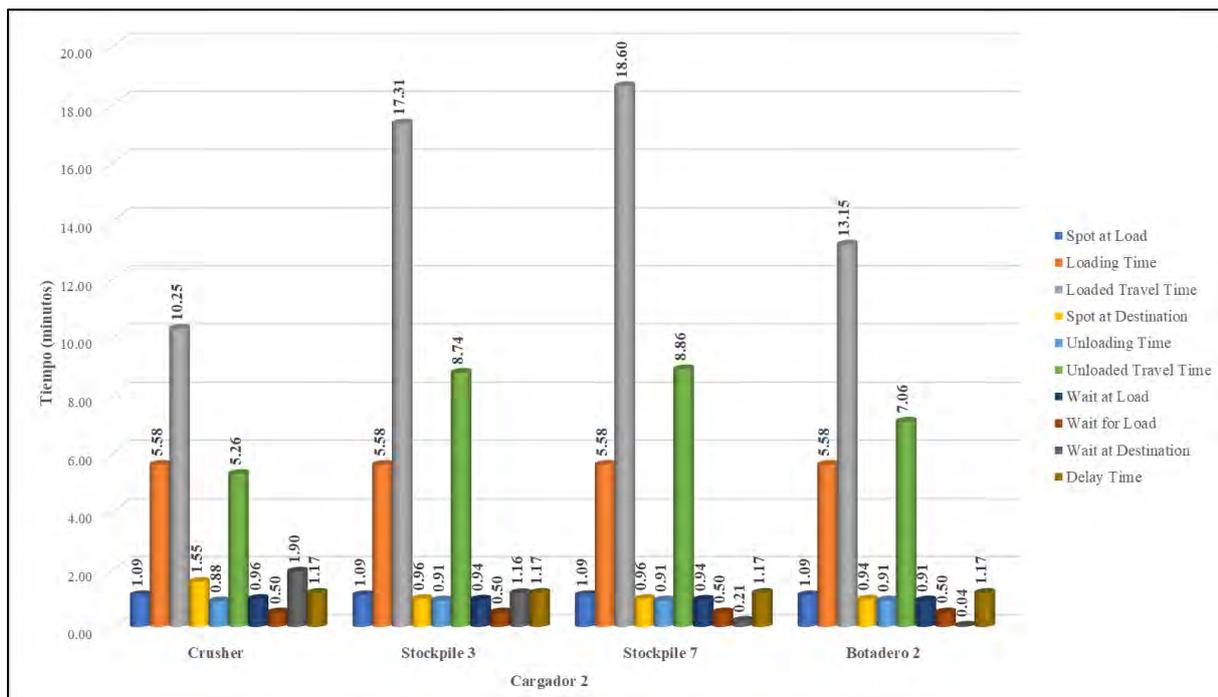


Figura 139. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 8: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante agosto.**

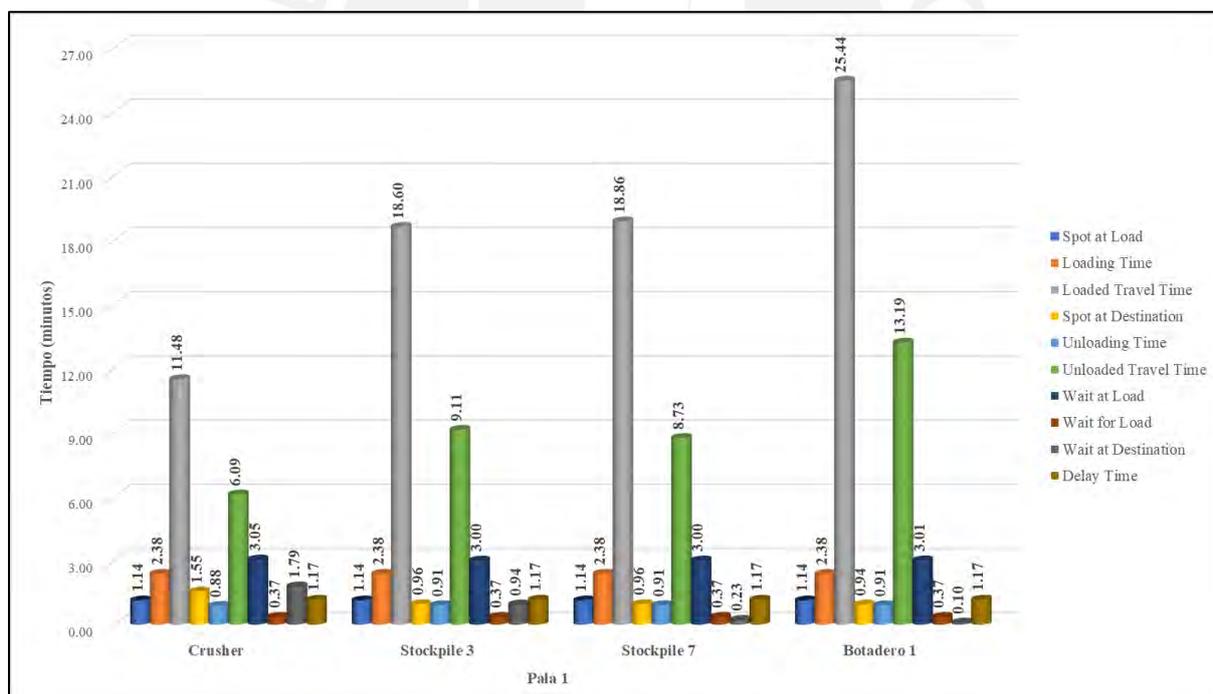


Figura 140. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 1.

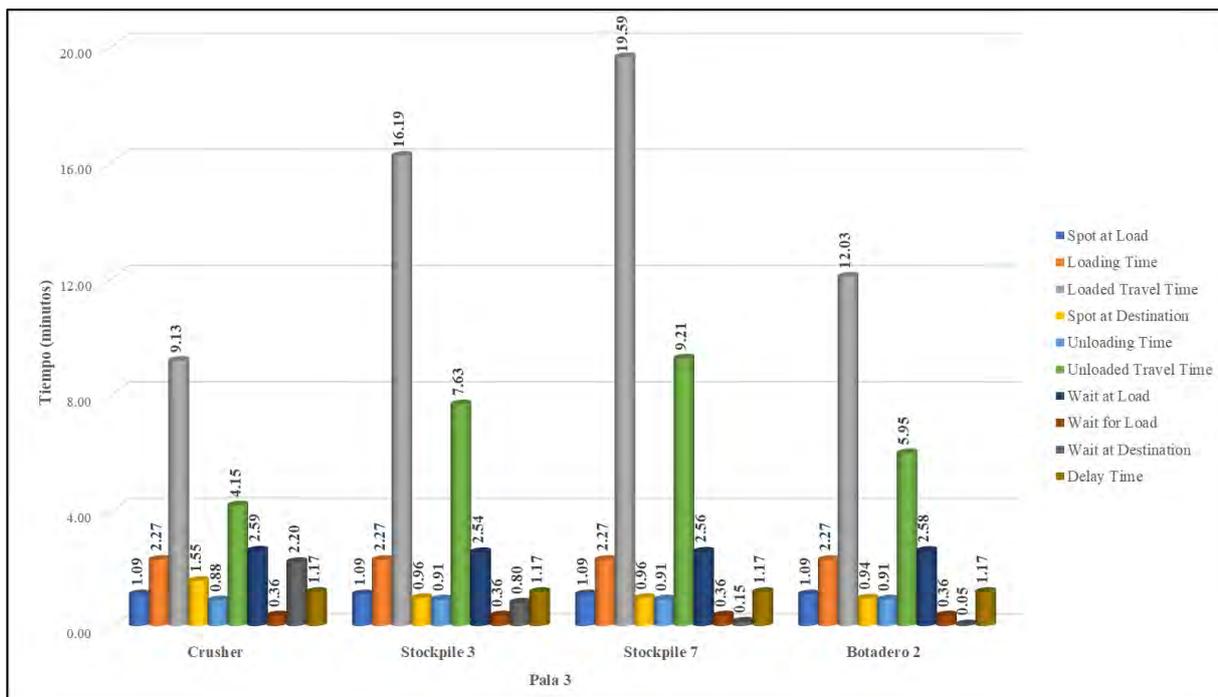


Figura 141. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 2.

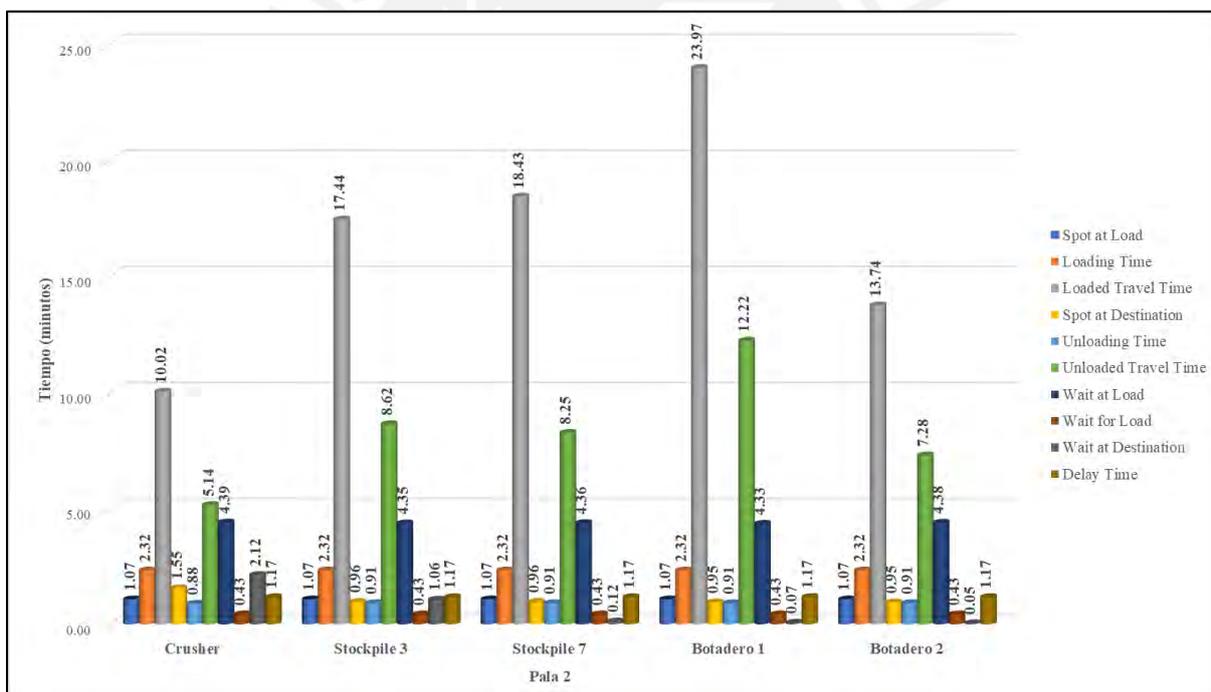


Figura 142. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 3.

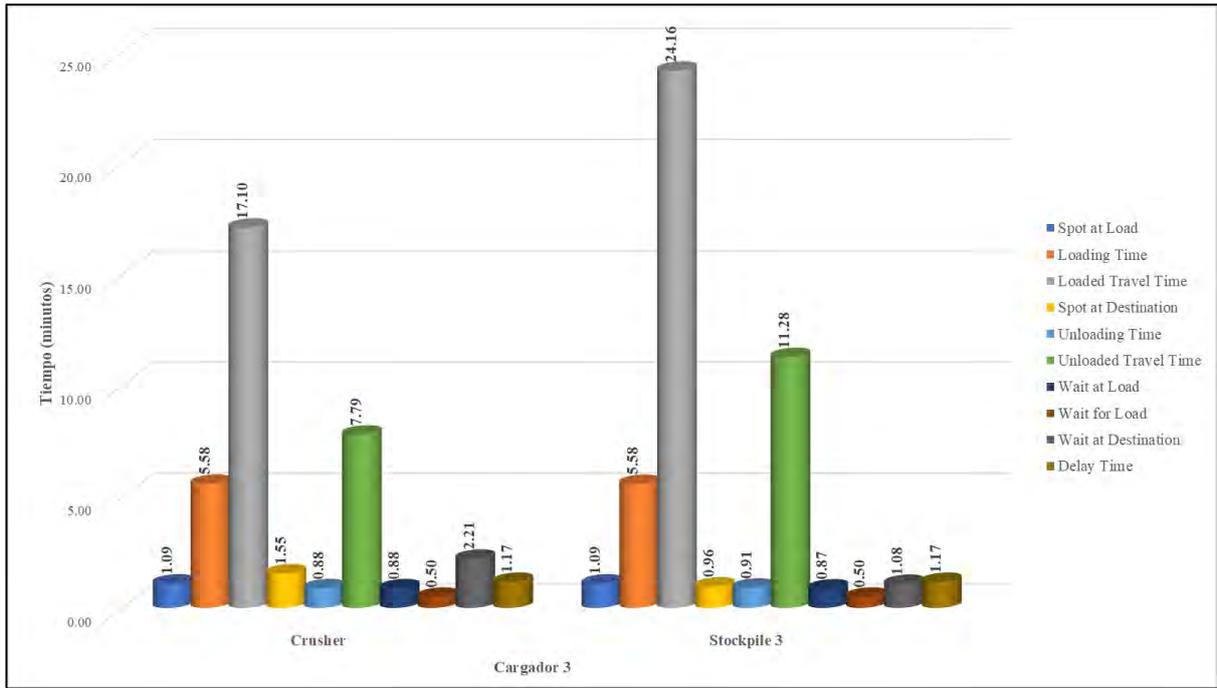


Figura 143. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 3.

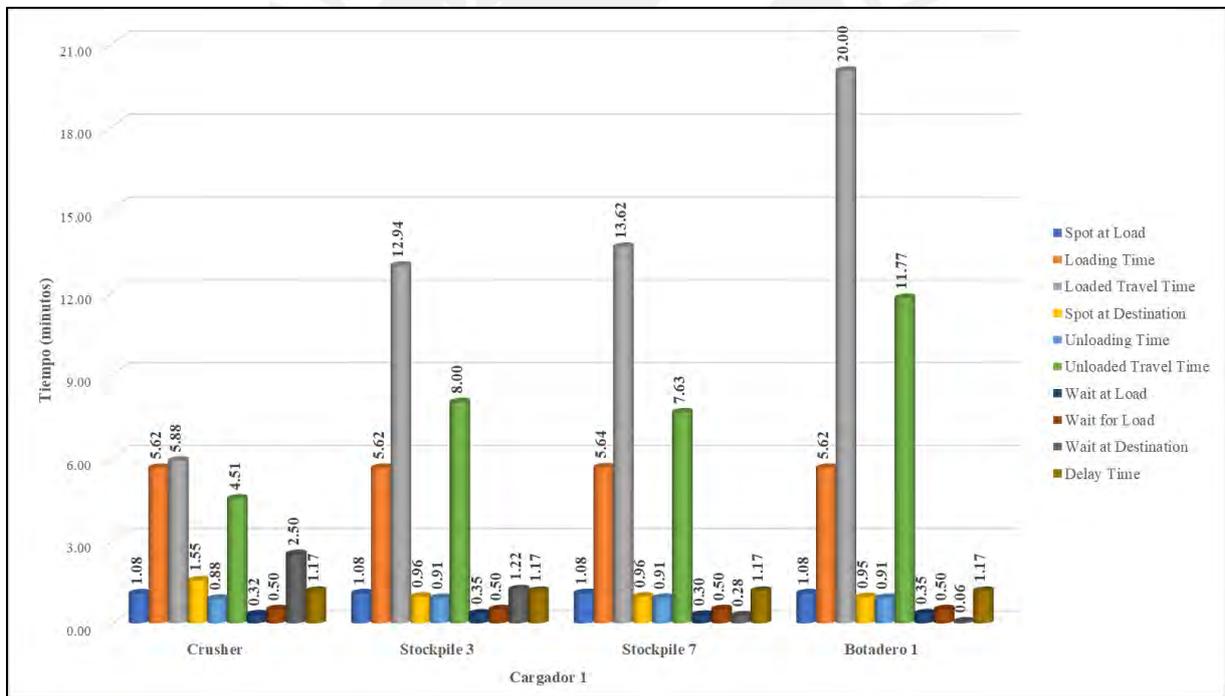


Figura 144. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 1.

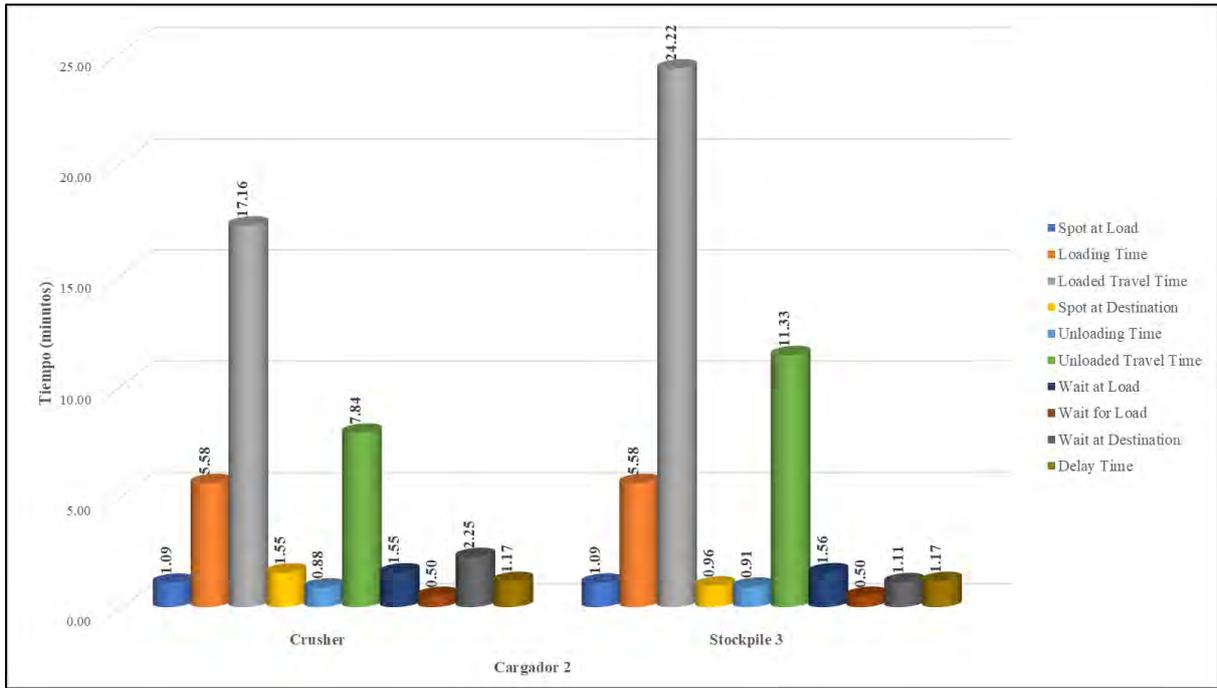


Figura 145. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 9: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante septiembre.**

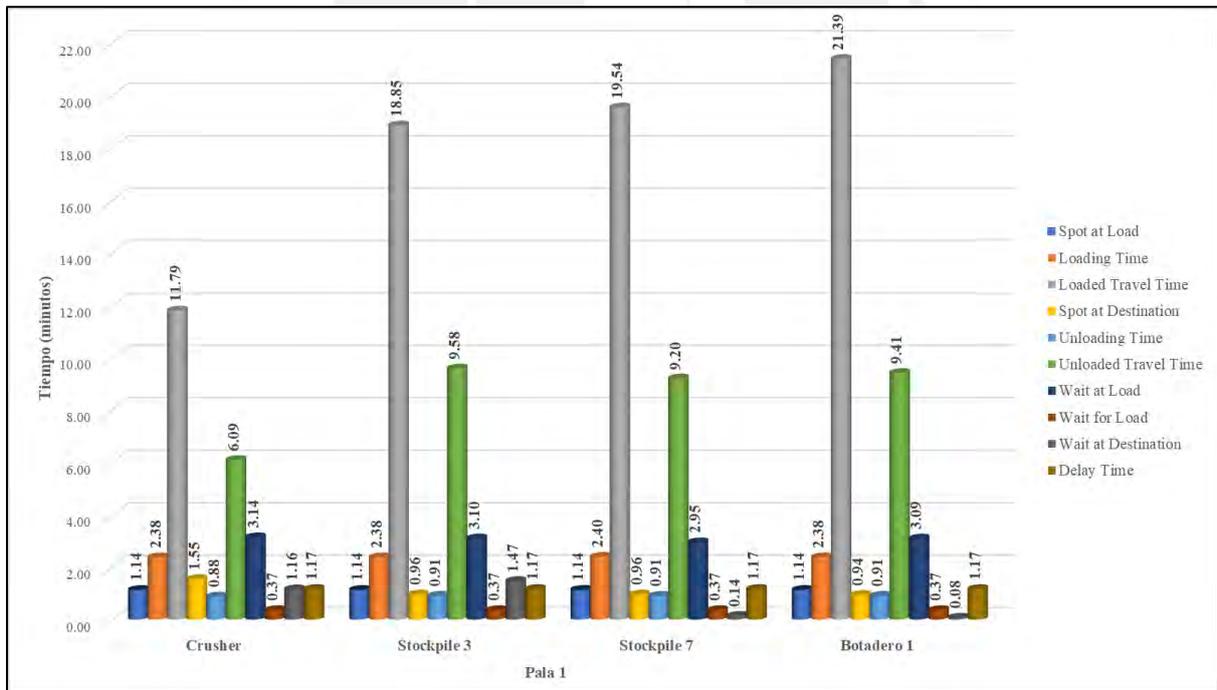


Figura 146. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 1.

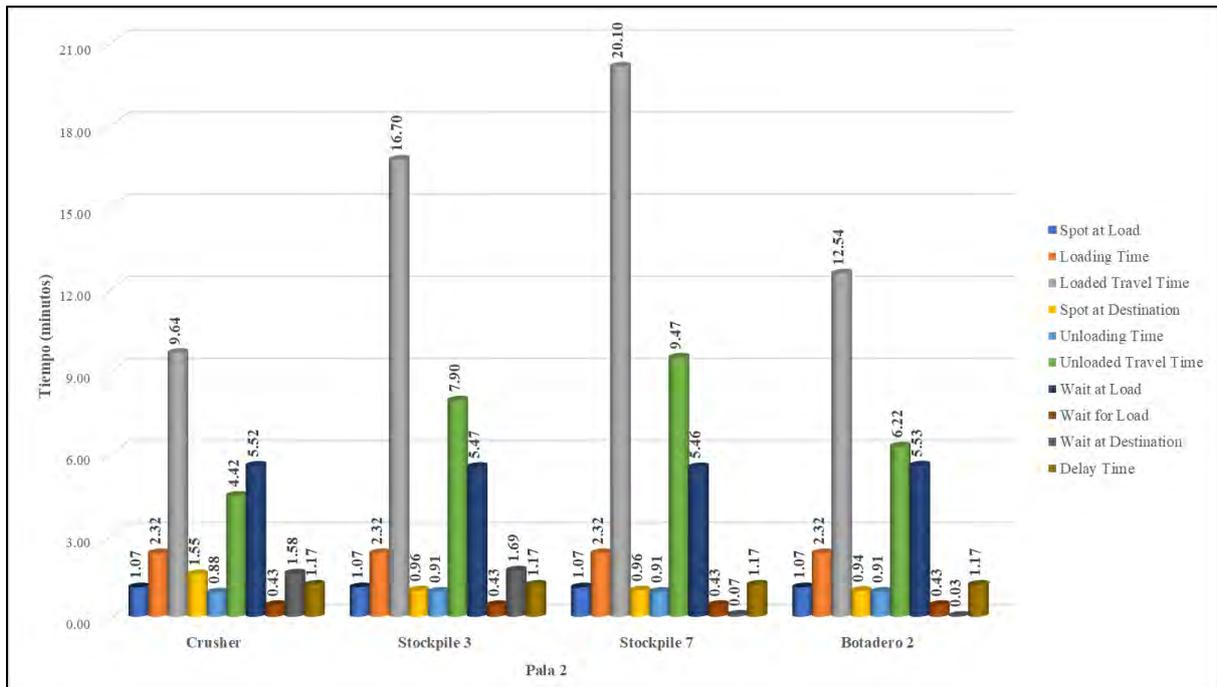


Figura 147. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 2.

Para la pala 2 se observa que el tiempo de cola alcanza los 5.8 minutos. Ello se debe a que el ciclo de los camiones asignados a esta pala en este mes toma alrededor de 29 minutos ya que los volquetes recorren una distancia aproximada de 3.91 km por viaje. Estos tiempos de recorrido son menores a meses anteriores y junto al incremento del número camiones asignados genera este resultado de tiempo de colas.

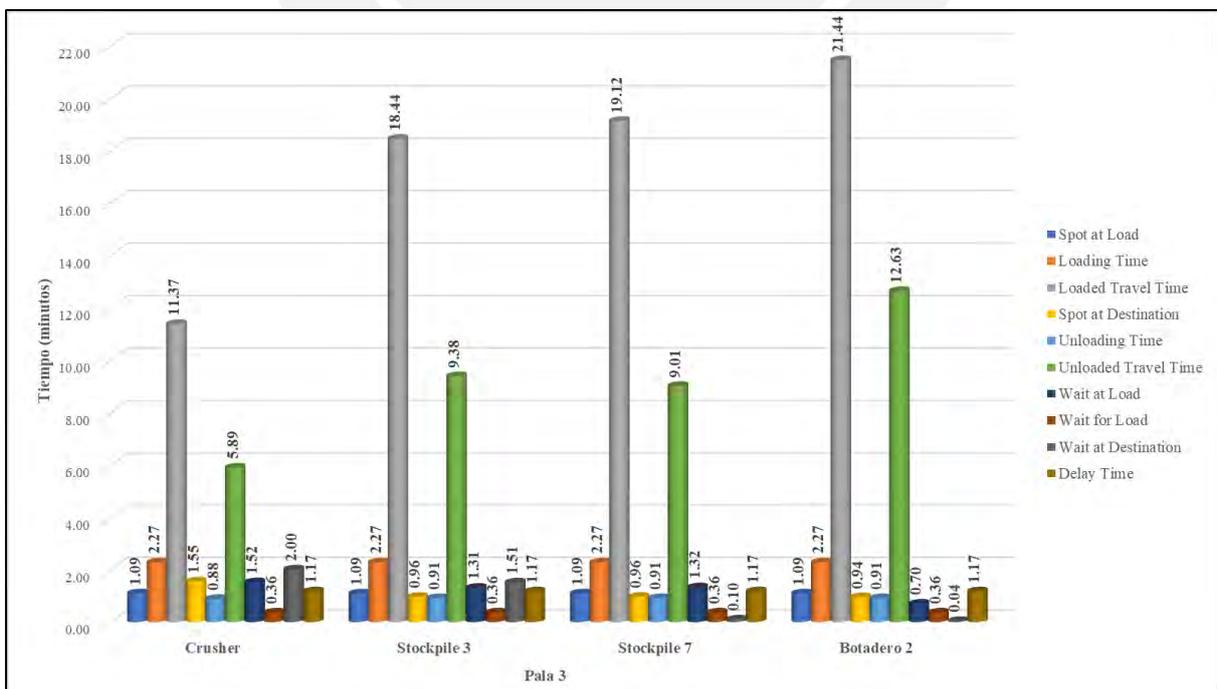


Figura 148. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 3.

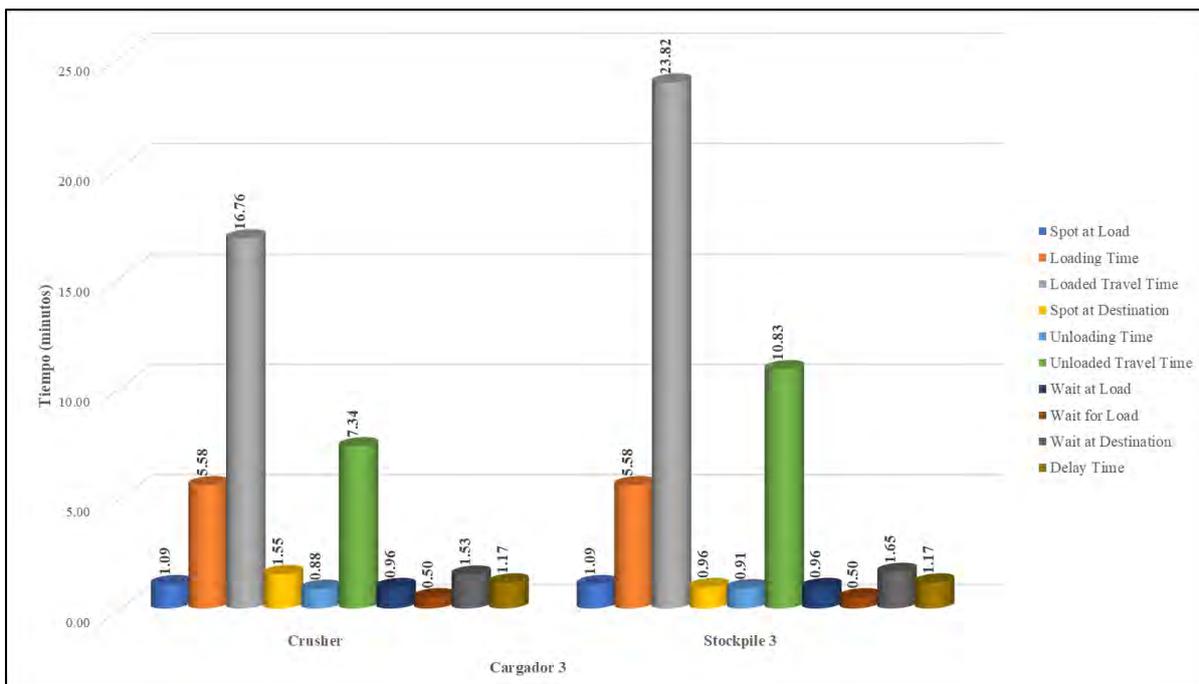


Figura 149. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 3.

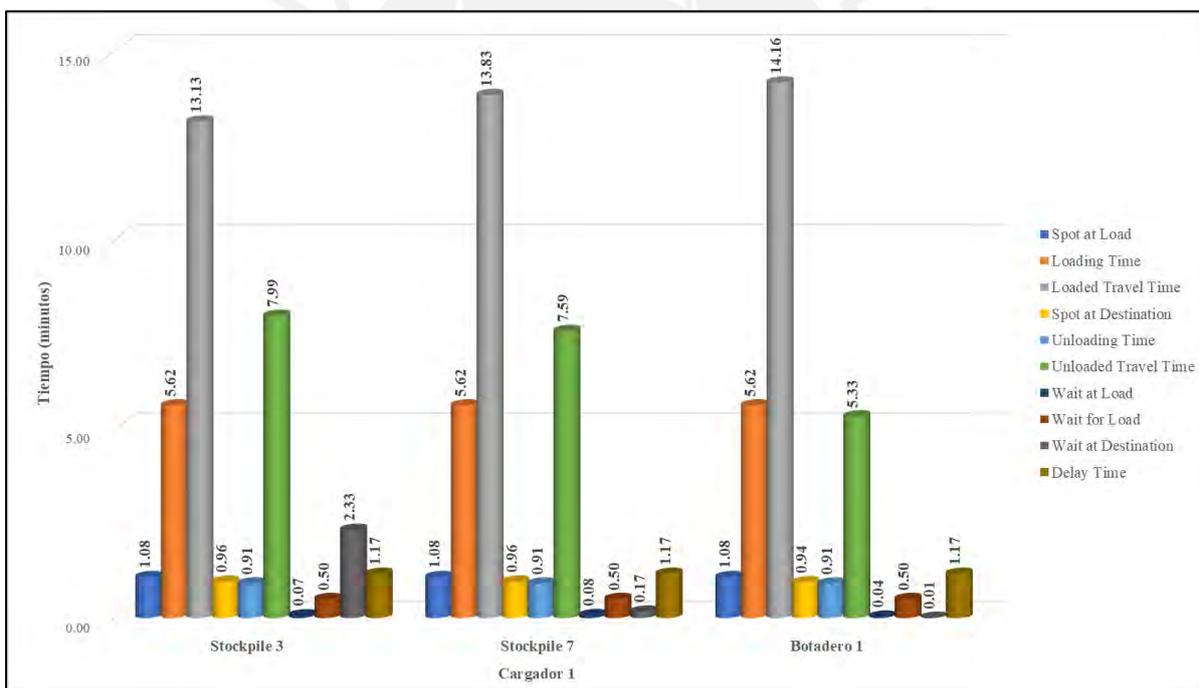


Figura 150. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 1.

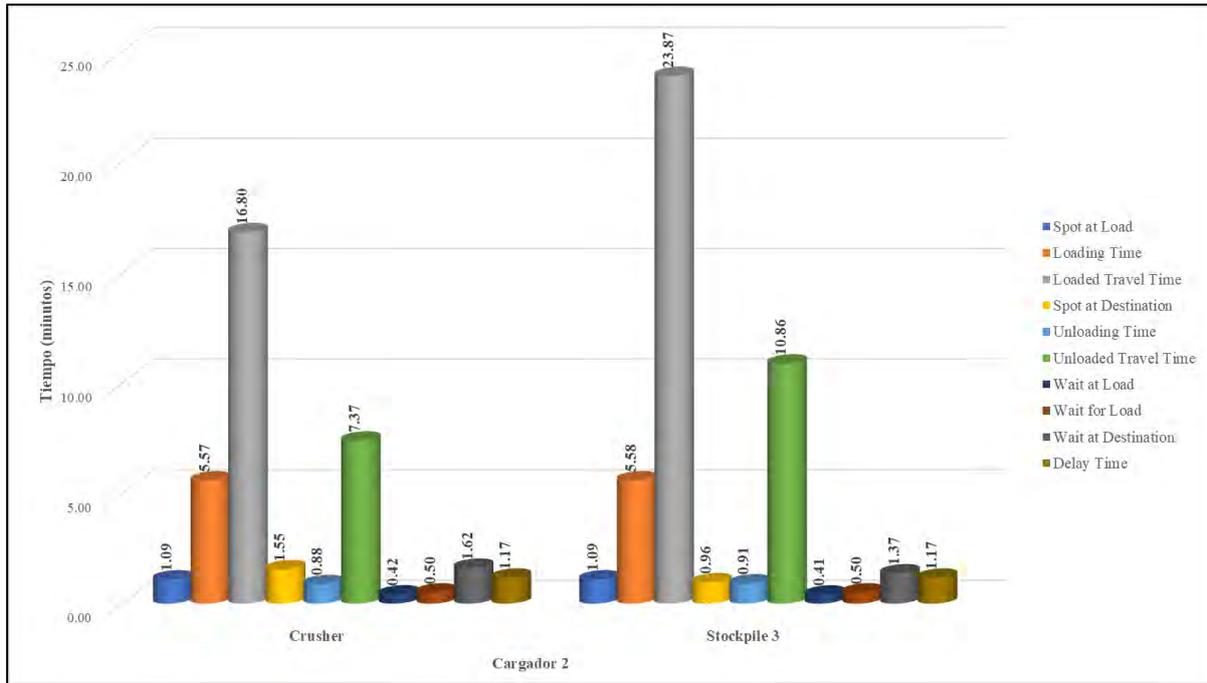


Figura 151. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 10: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante octubre.**

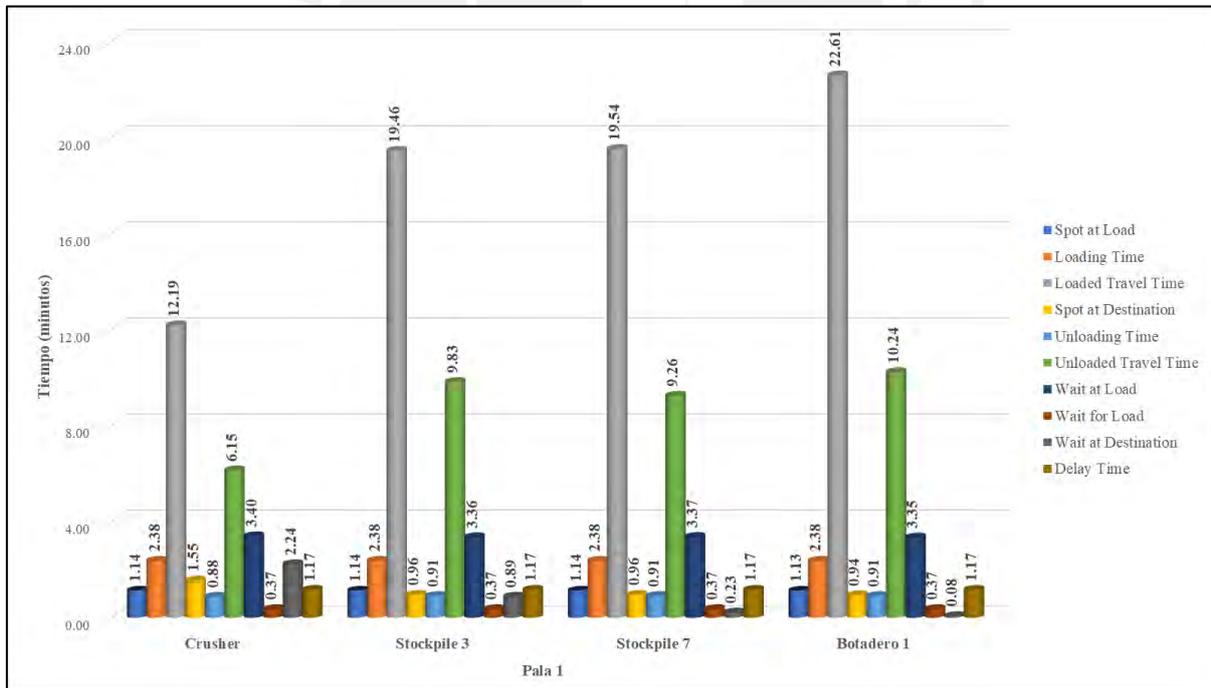


Figura 152. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 1.

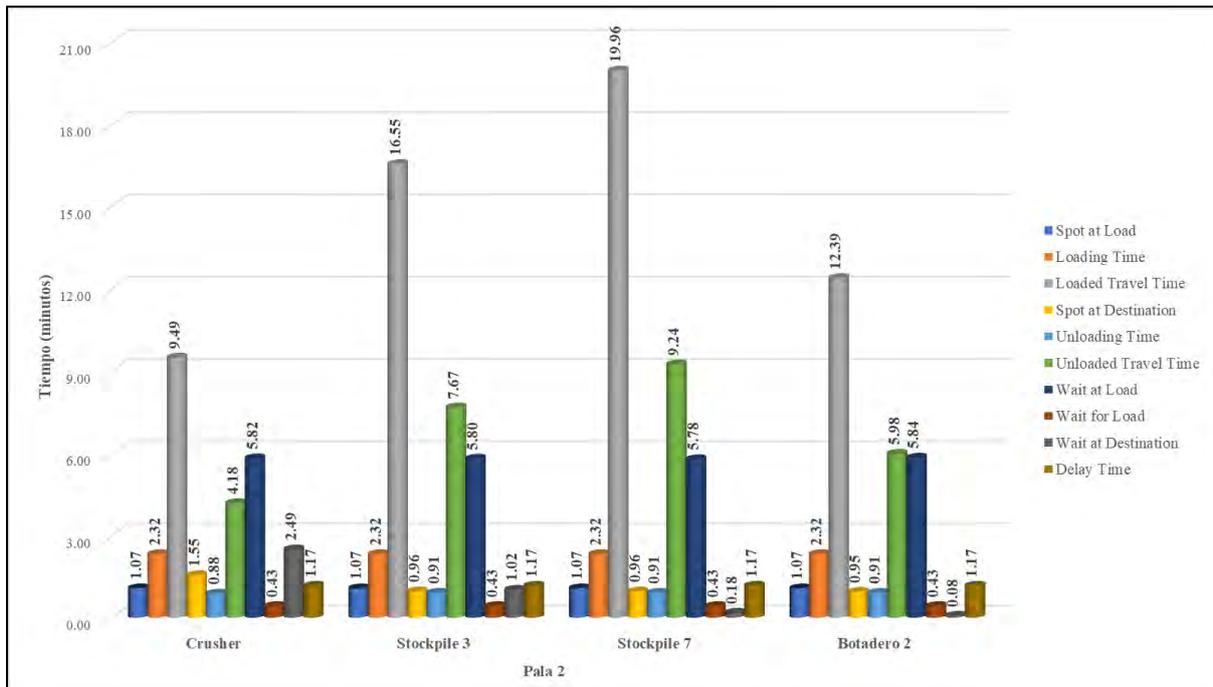


Figura 153. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 2.

Para la pala 2, al igual que el mes anterior, se observa que el tiempo de cola alcanza los 5.8 minutos. Ello es producto de que el tiempo del ciclo de los camiones asignados a esta pala se mantiene con respecto al mes anterior ya que los volquetes recorren una distancia aproximada de 3.74 km por viaje. Estos menores tiempo de recorrido junto al incremento del número camiones asignados genera este resultado de tiempo de colas.

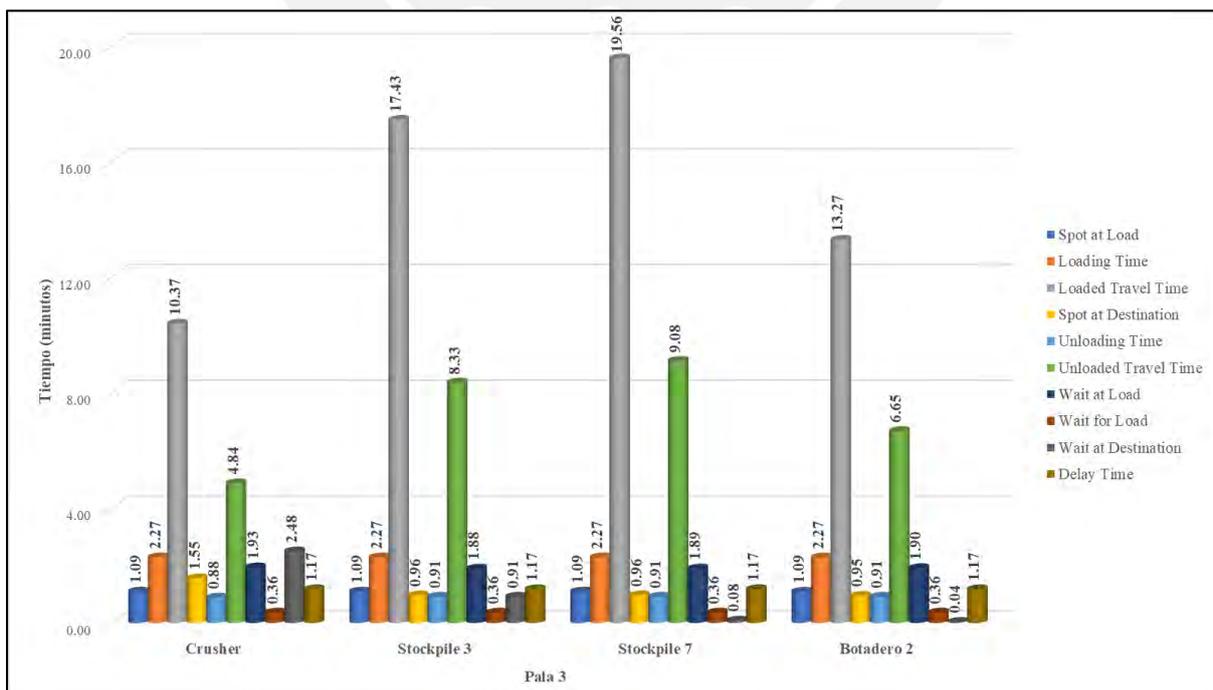


Figura 154. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 3.

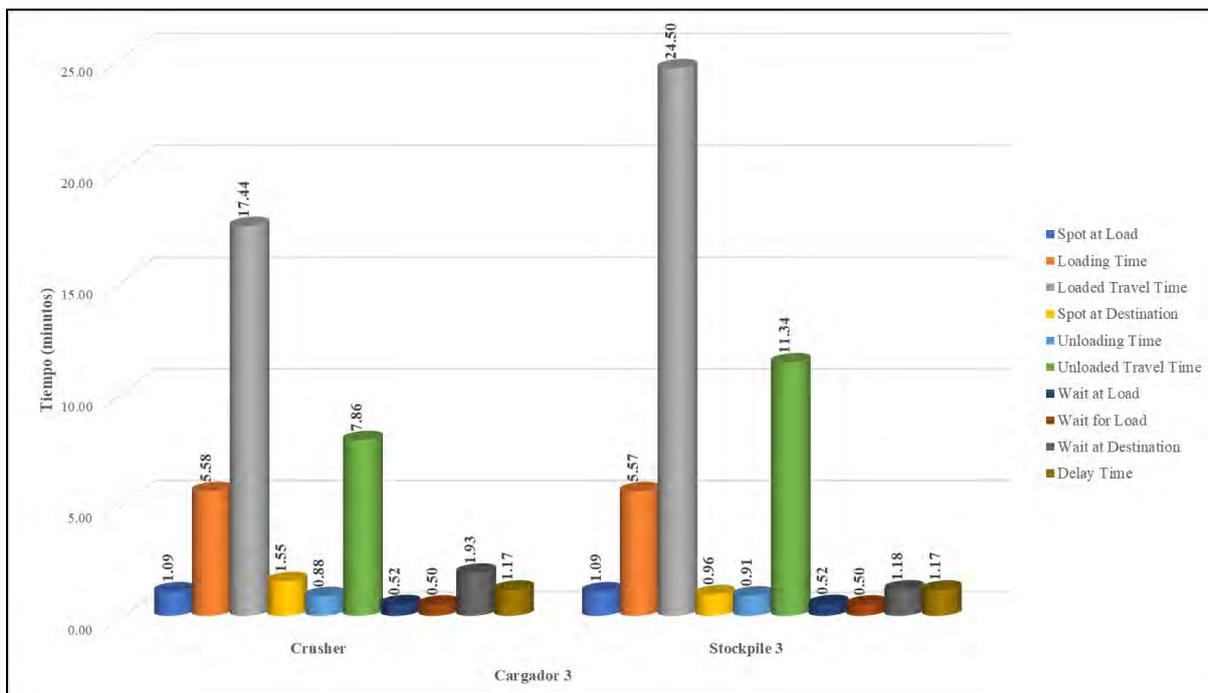


Figura 155. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 3.

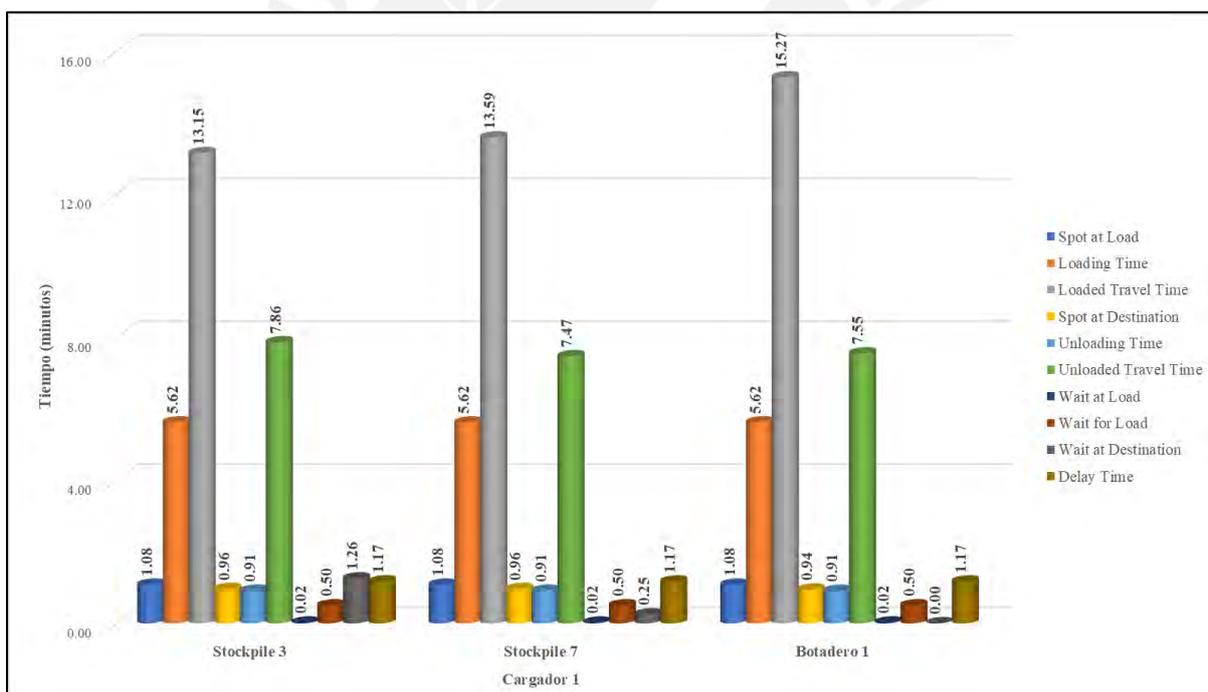


Figura 156. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 1.

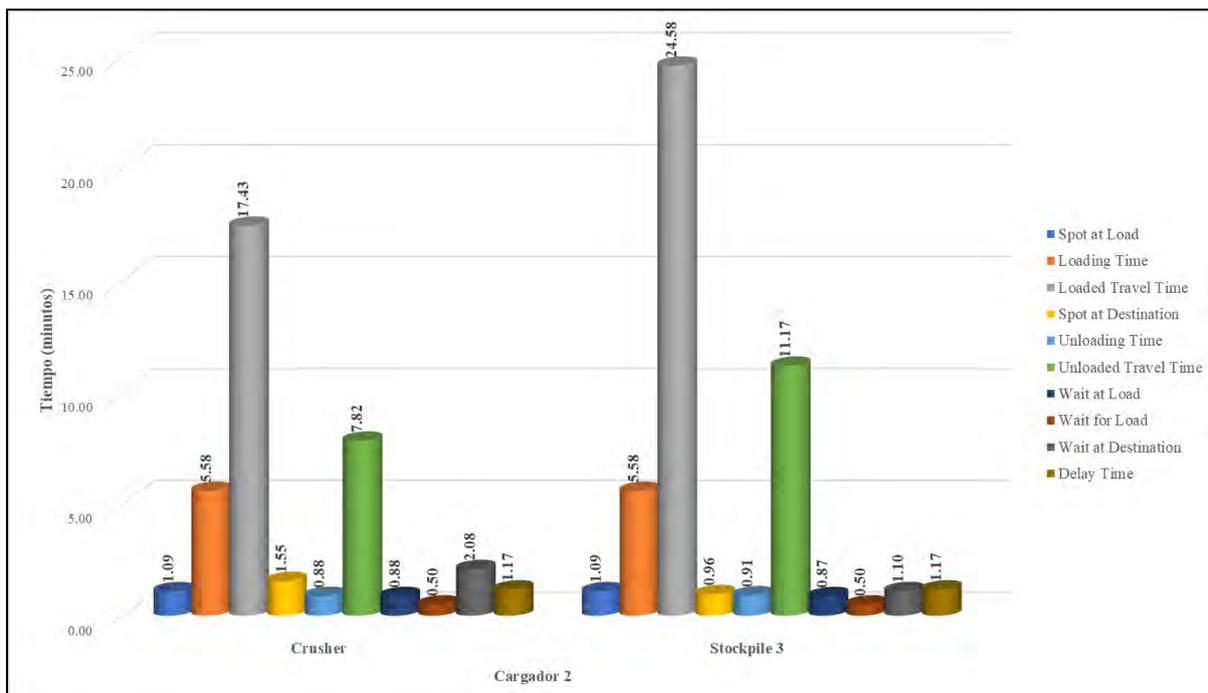


Figura 157. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 11: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante noviembre.**

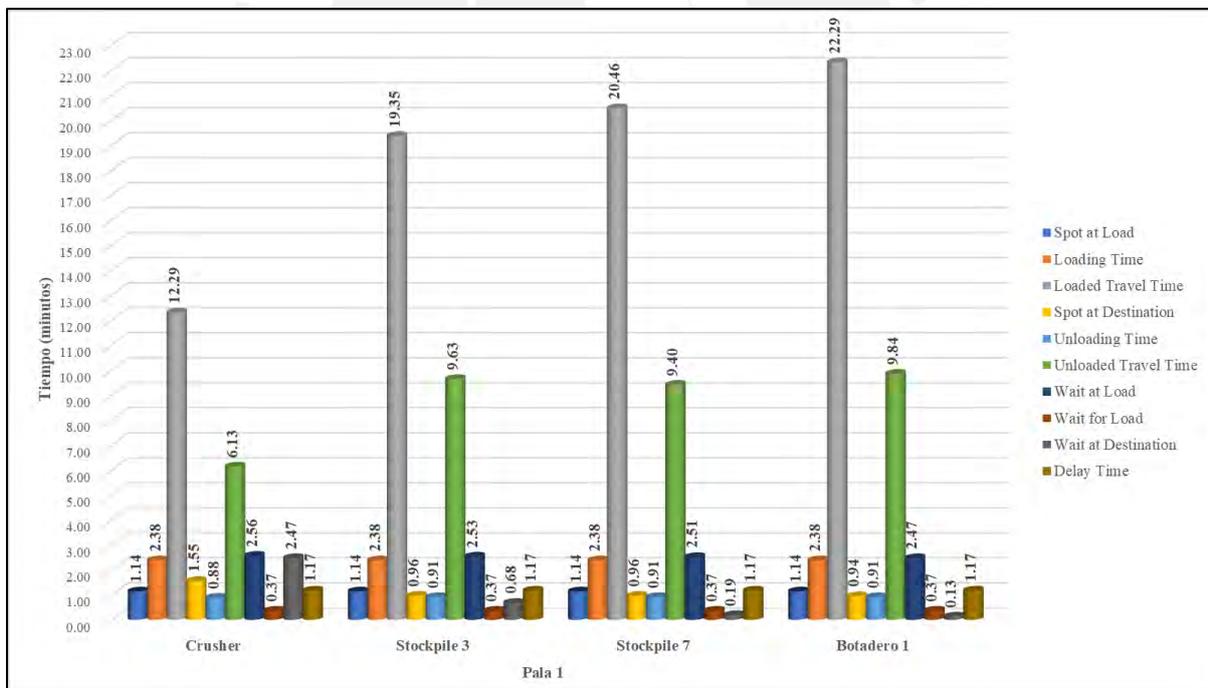


Figura 158. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 1.

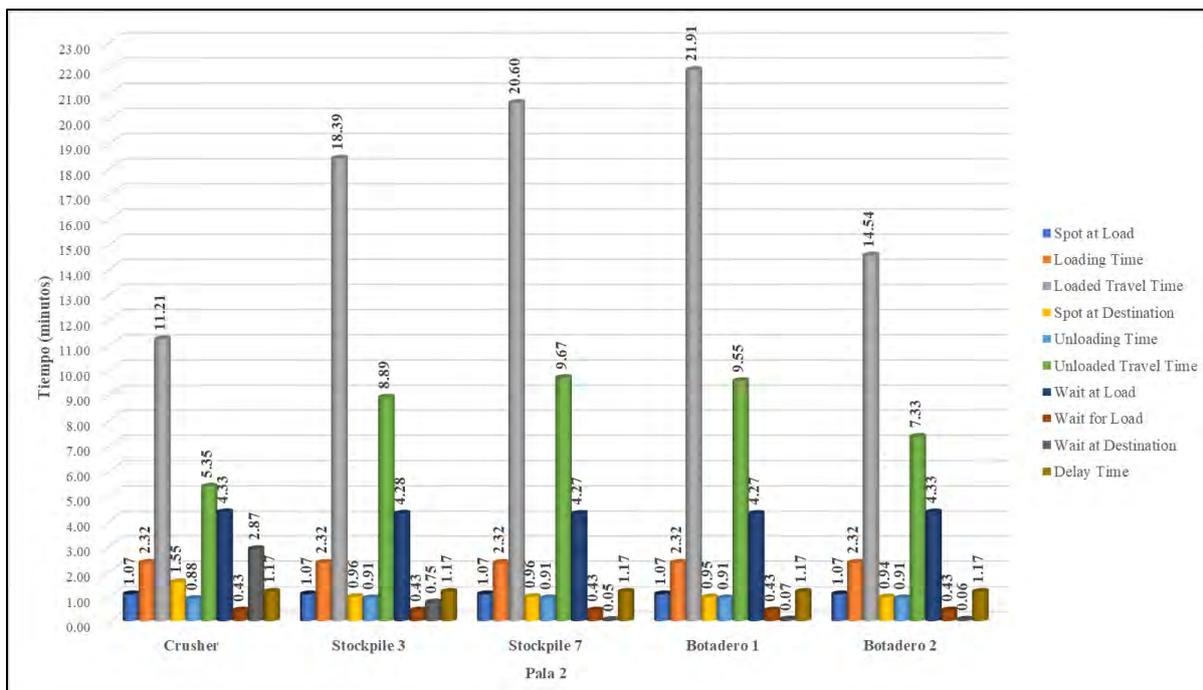


Figura 159. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 2.

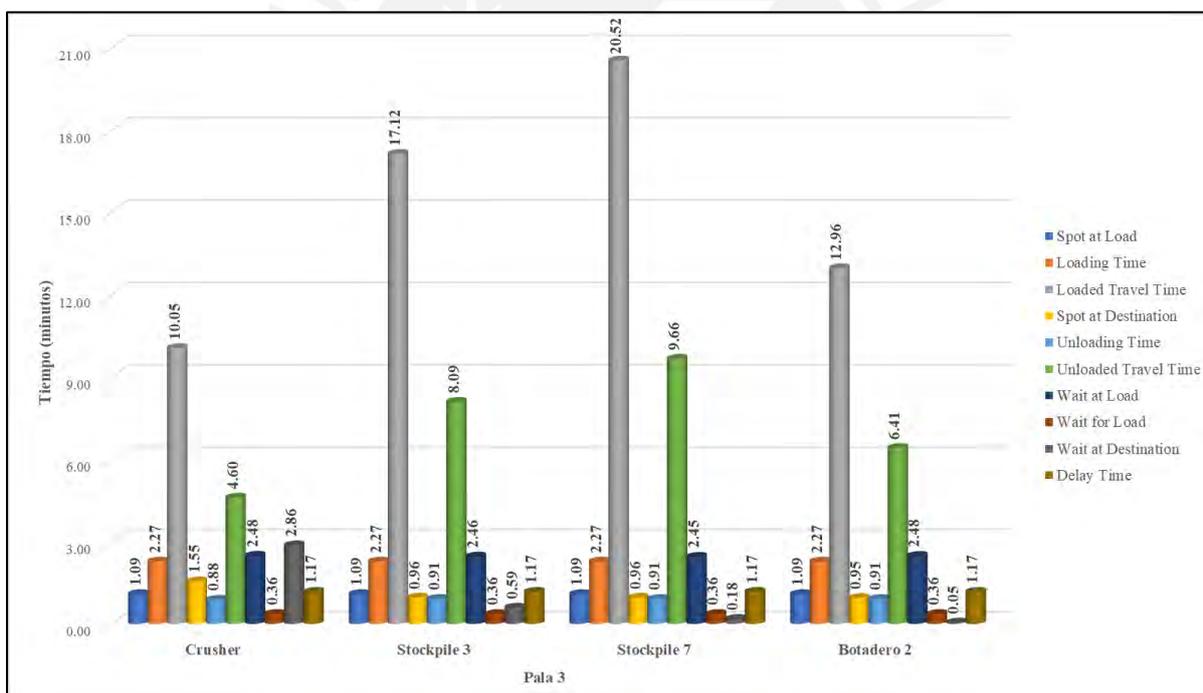


Figura 160. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 3.

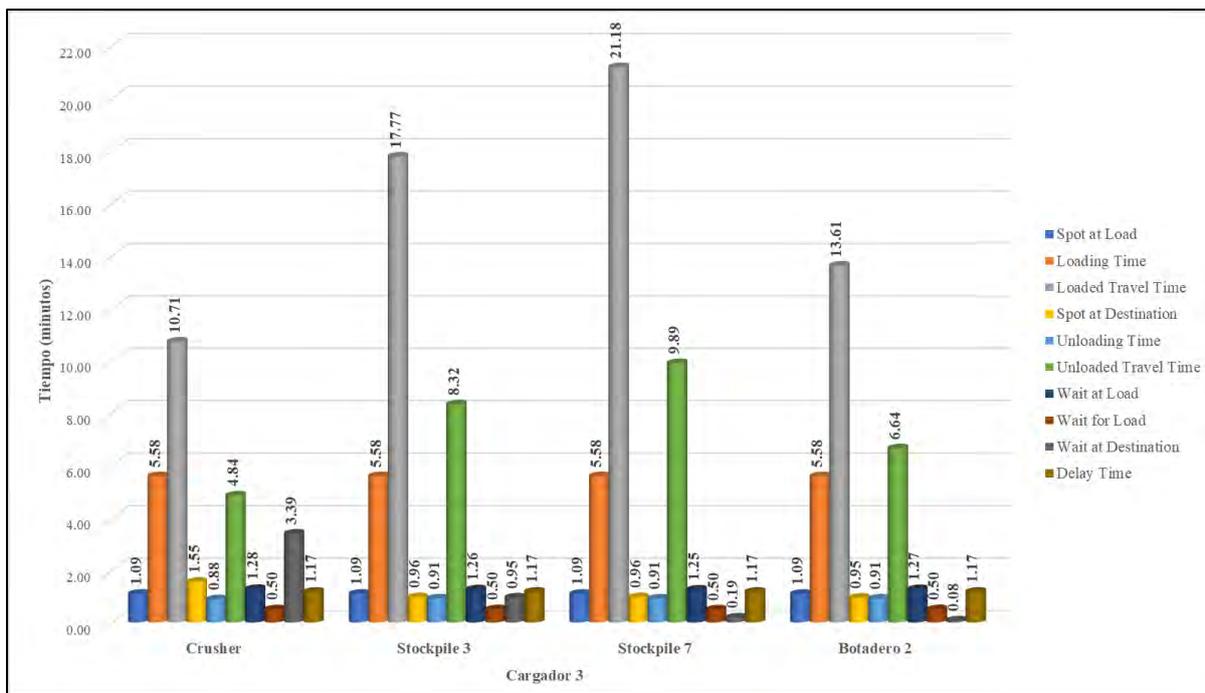


Figura 161. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 3.

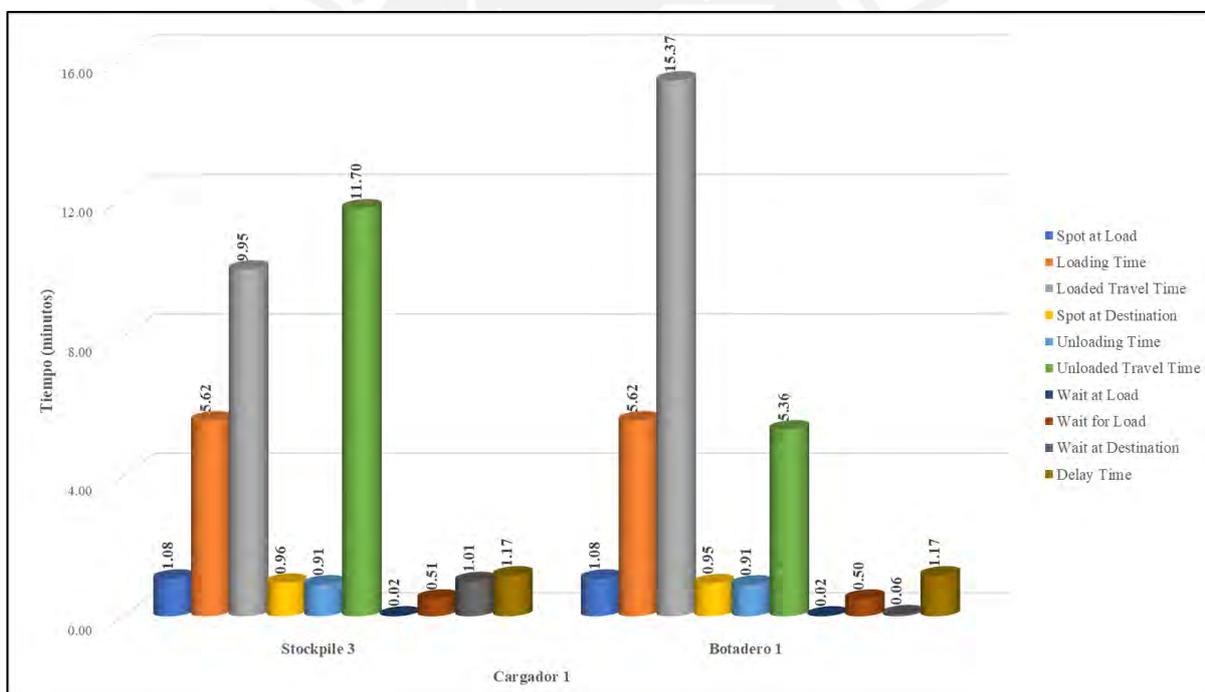


Figura 162. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 1.

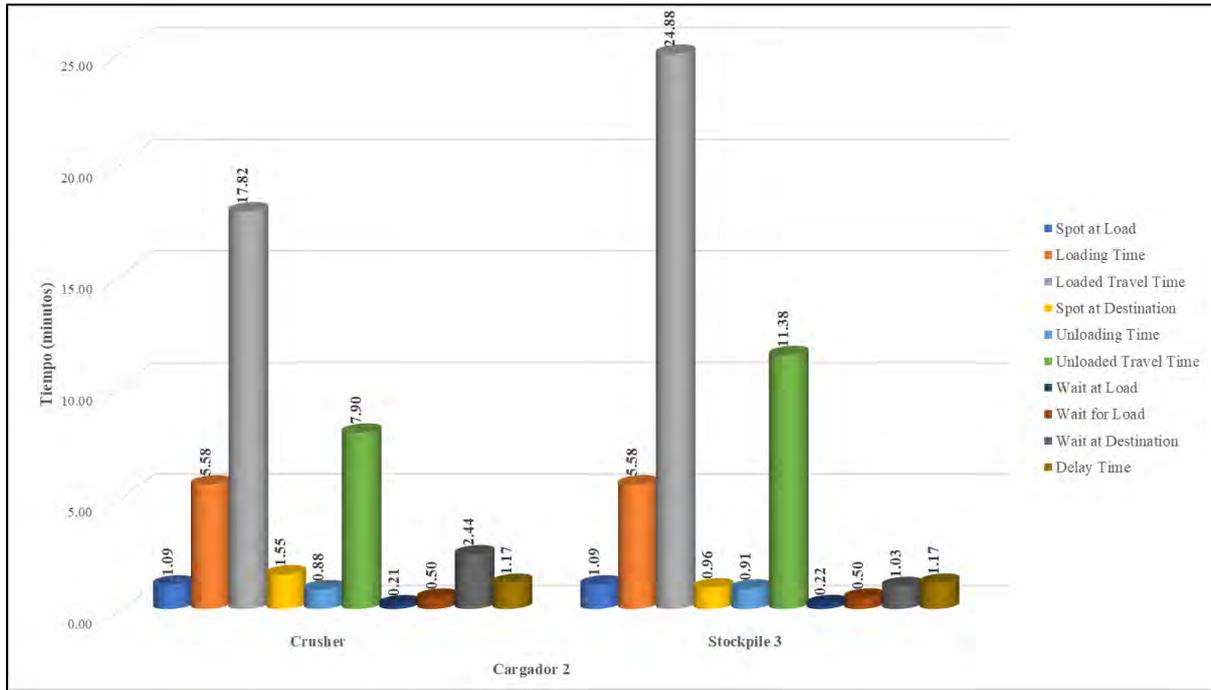


Figura 163. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 12: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo estocástico durante diciembre.**

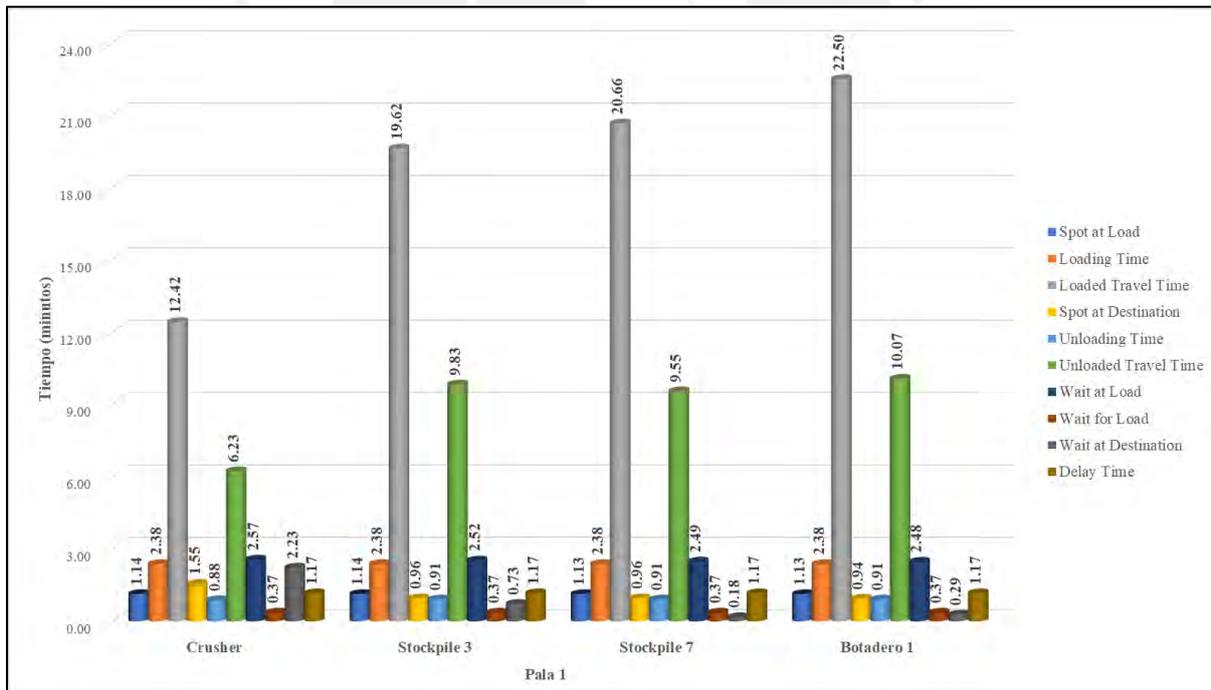


Figura 164. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 1.

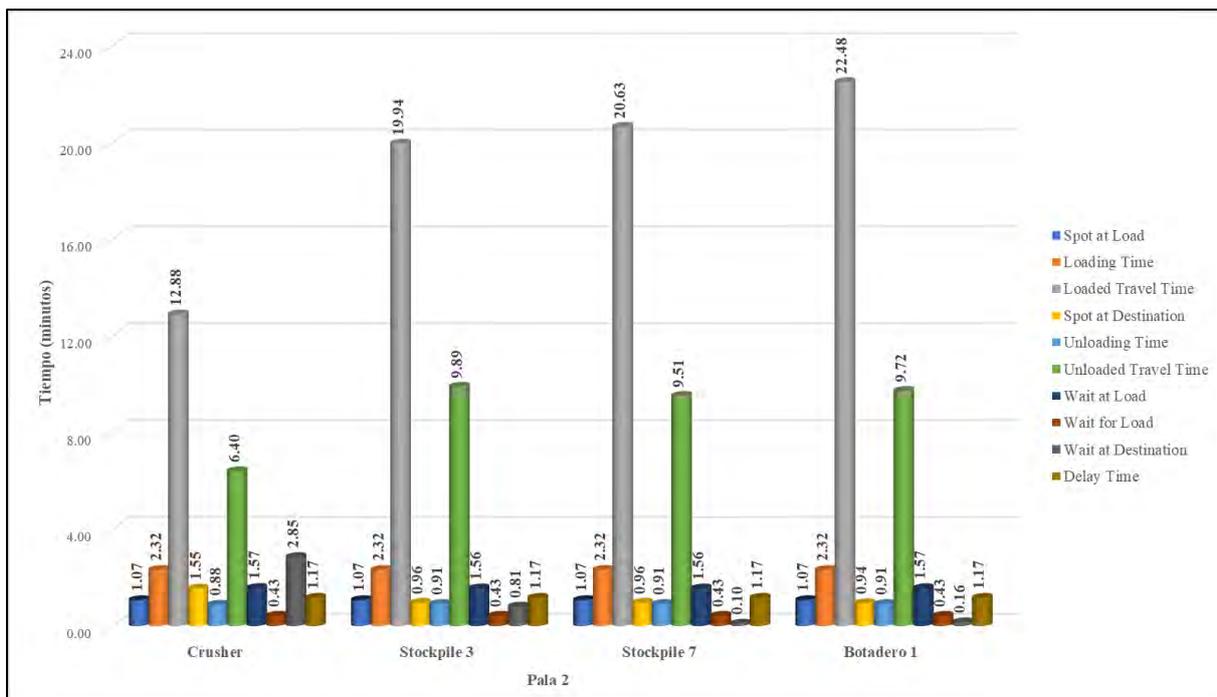


Figura 165. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 2.

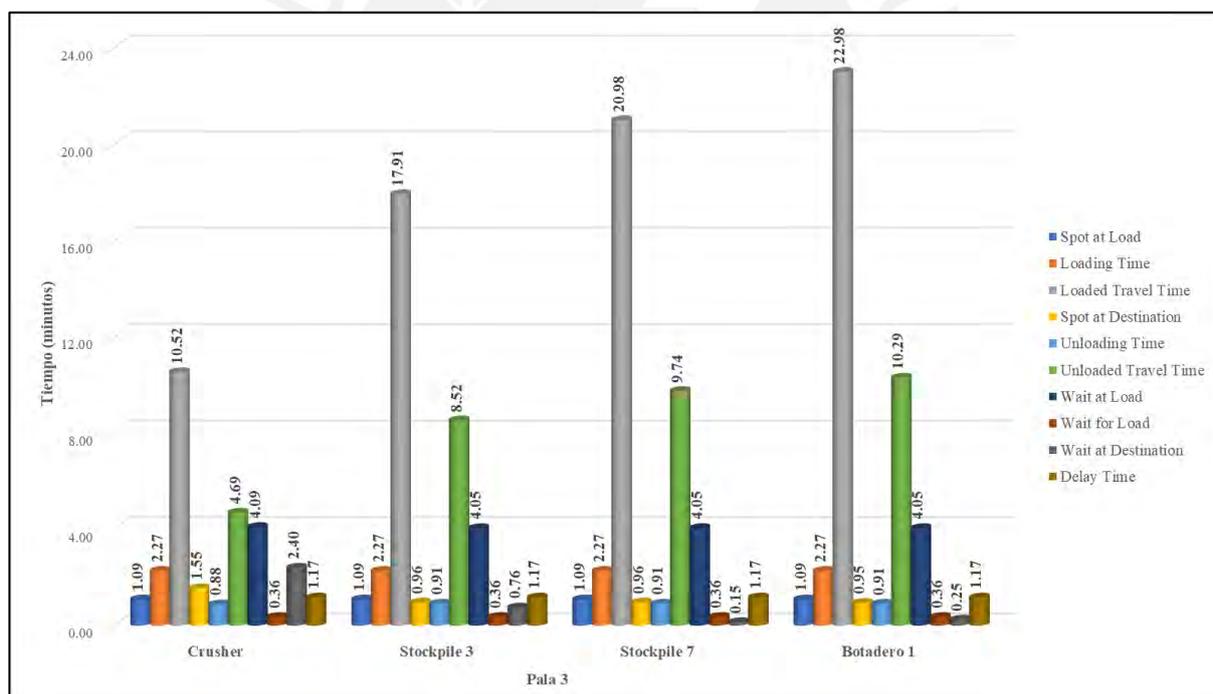


Figura 166. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 3.

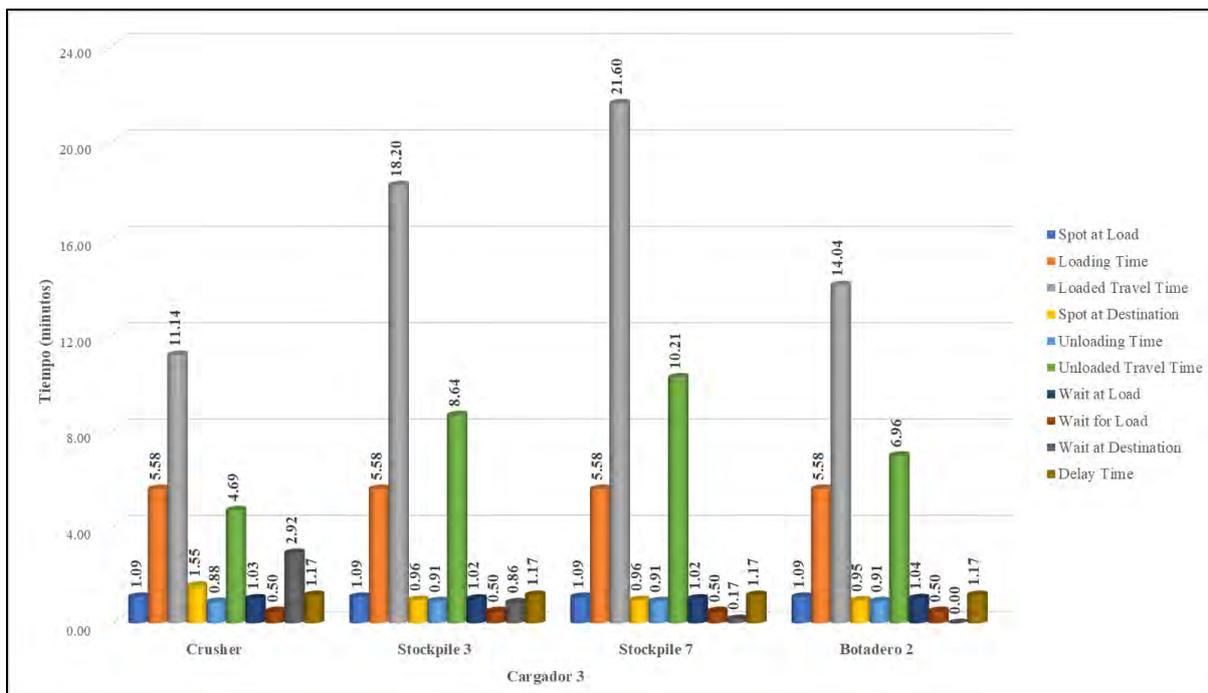


Figura 167. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 3.

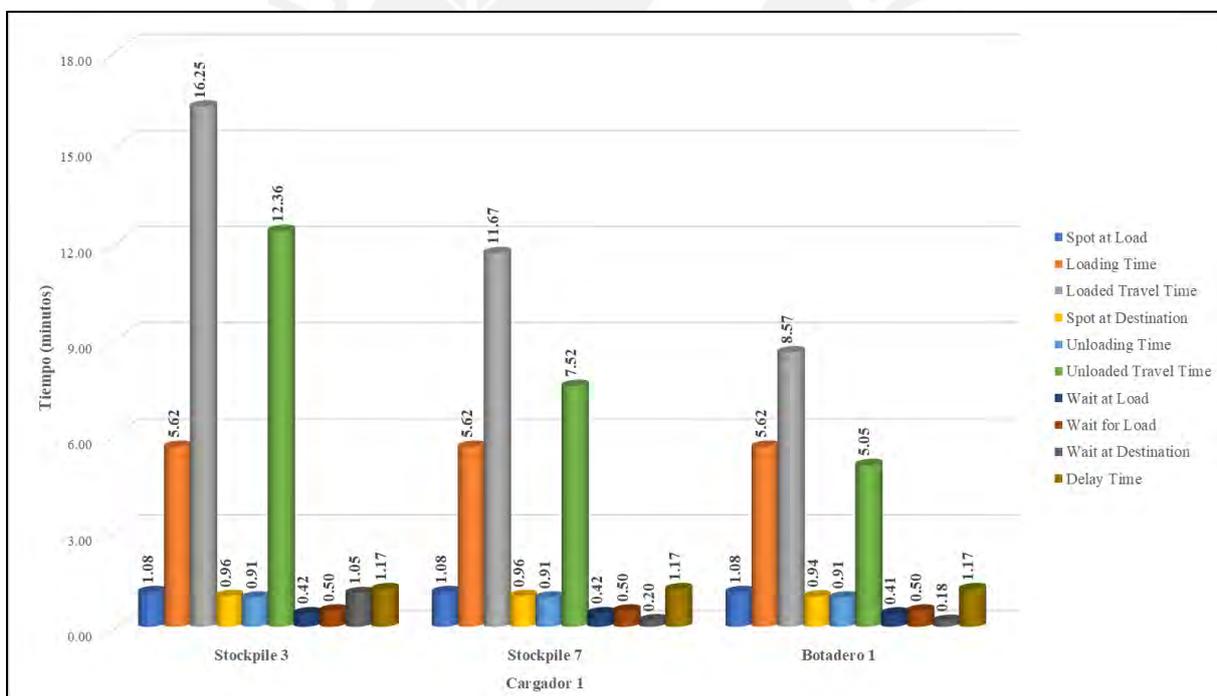


Figura 168. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 1.

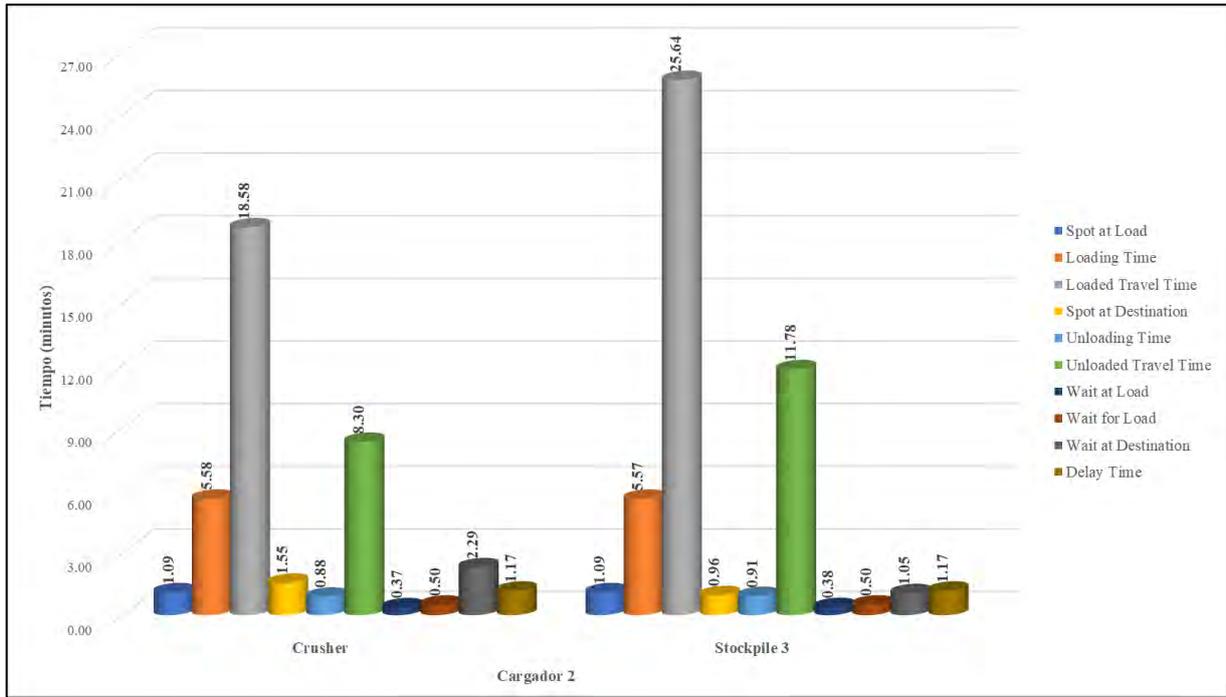


Figura 169. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 13: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante enero.**

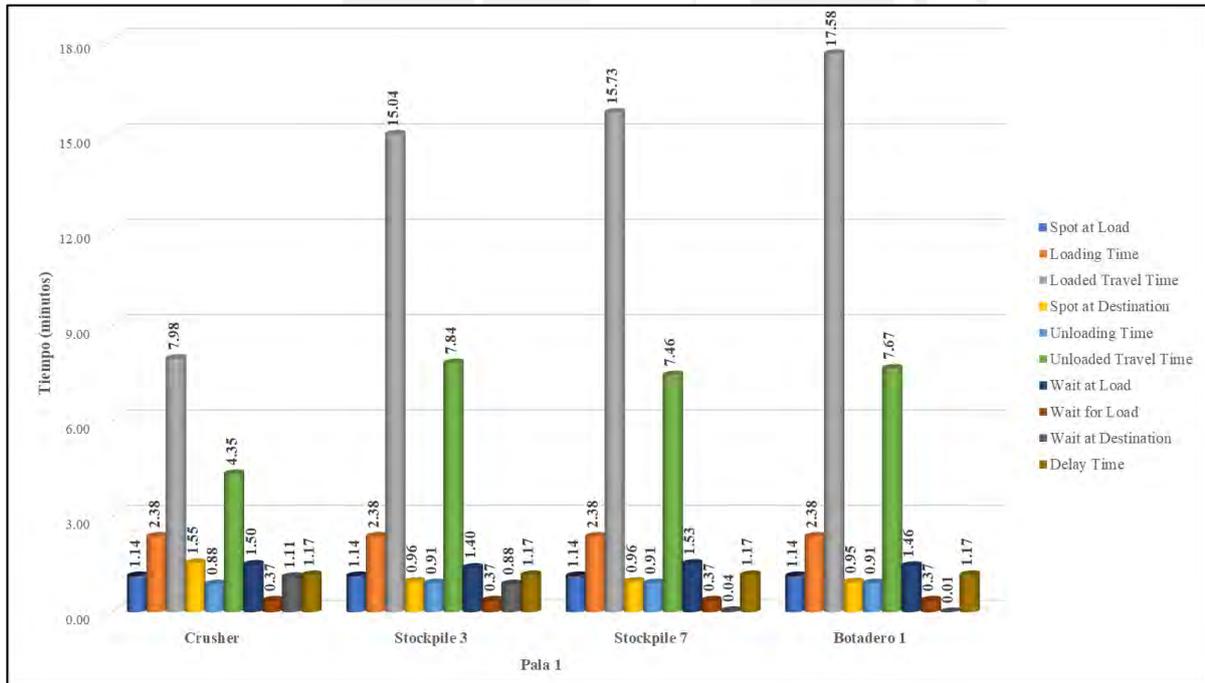


Figura 170. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 1.

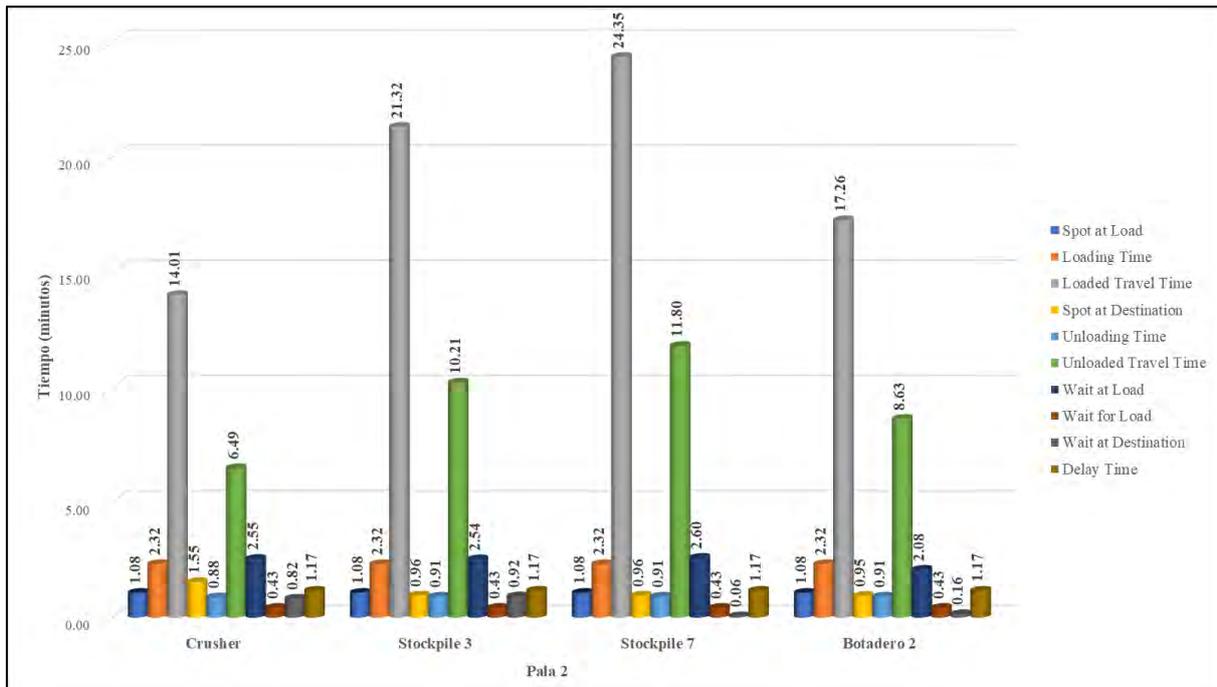


Figura 171. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 2.

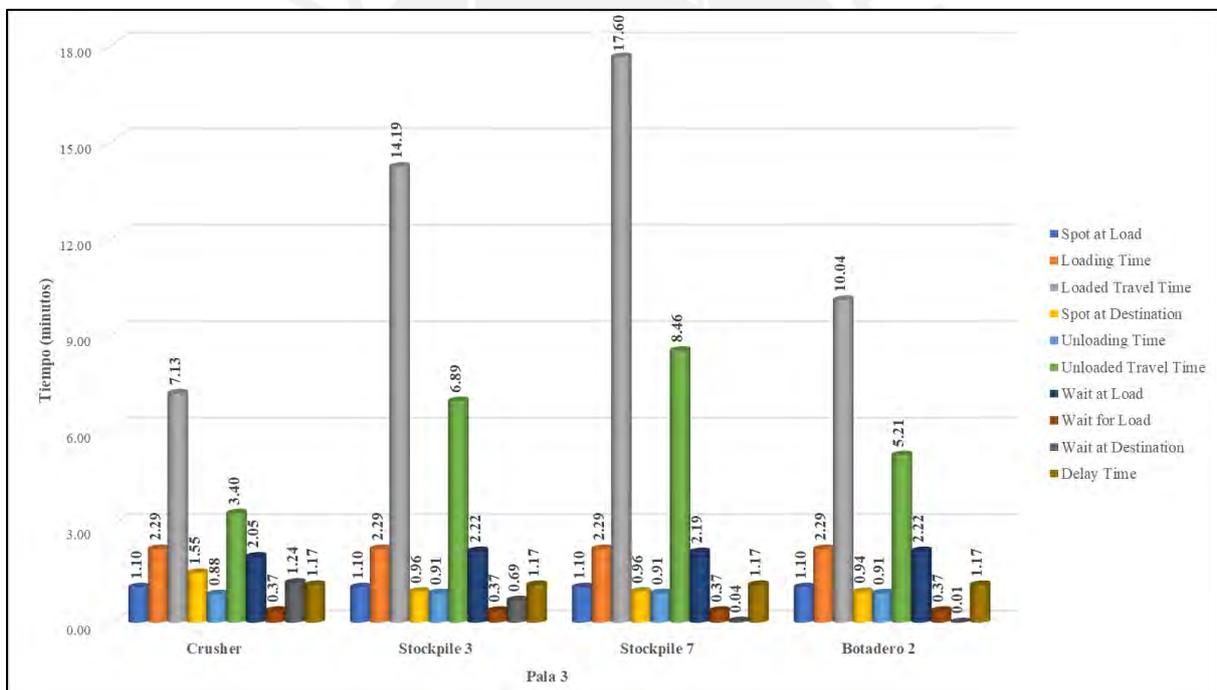


Figura 172. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada a pala 3.

Al igual que para el modelo estocástico, el incremento del tiempo de colas en la pala 2 se da por un aumento en el número de camiones asignados a esta pala dado que trabaja con 8 camiones, mientras que el aumento del tiempo de colas en la pala 3 se da por la reducción del tiempo en el ciclo de transporte hasta los 26 minutos ya que los volquetes recorren 3.7 km por viaje.

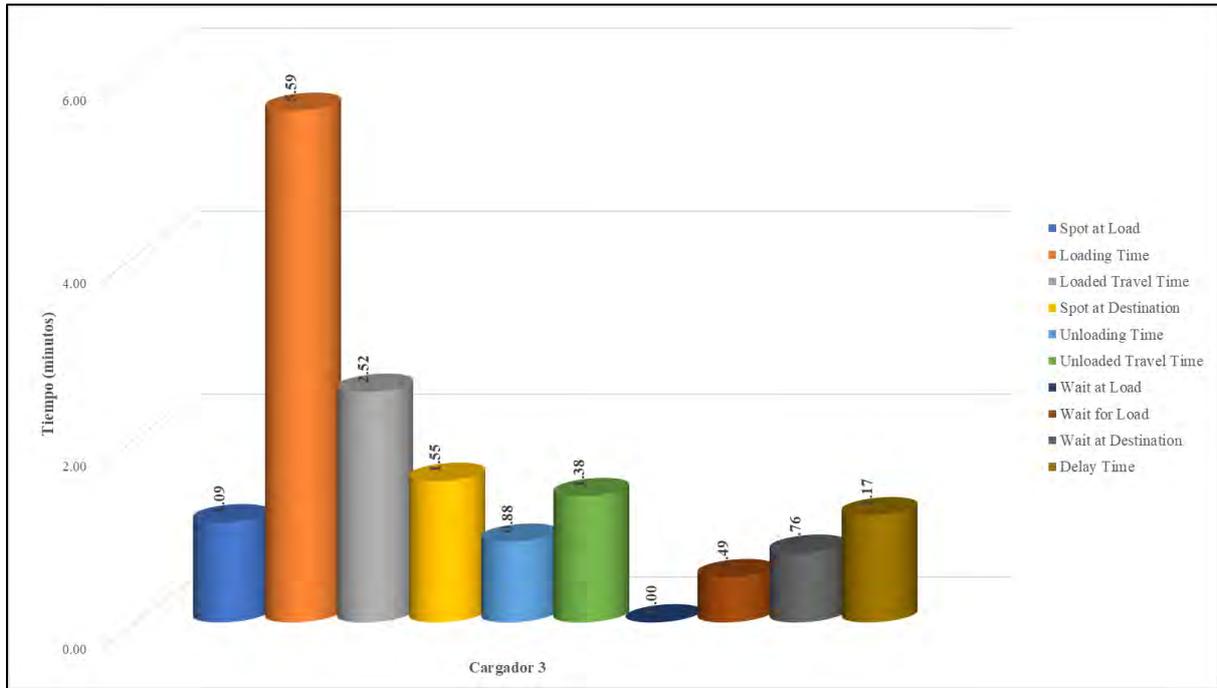


Figura 173. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada al cargador 3.

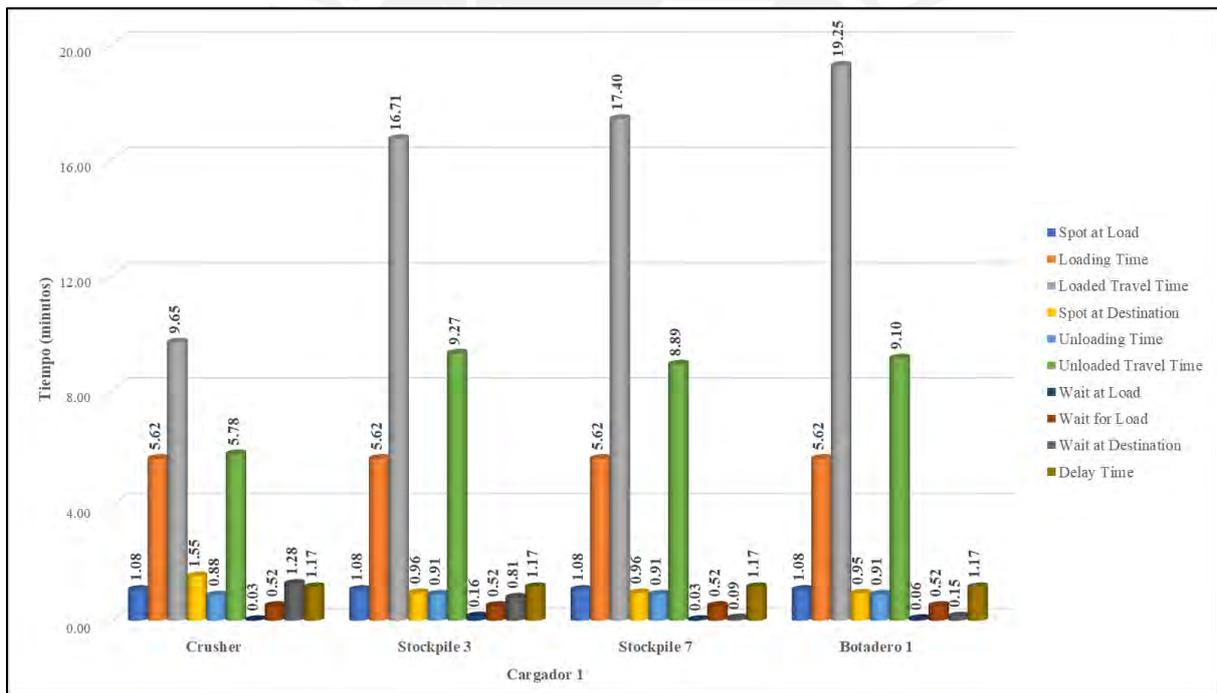


Figura 174. Ciclo total de acarreo en enero para la flota asignada al cargador 1.

**Anexo 14: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante febrero.**

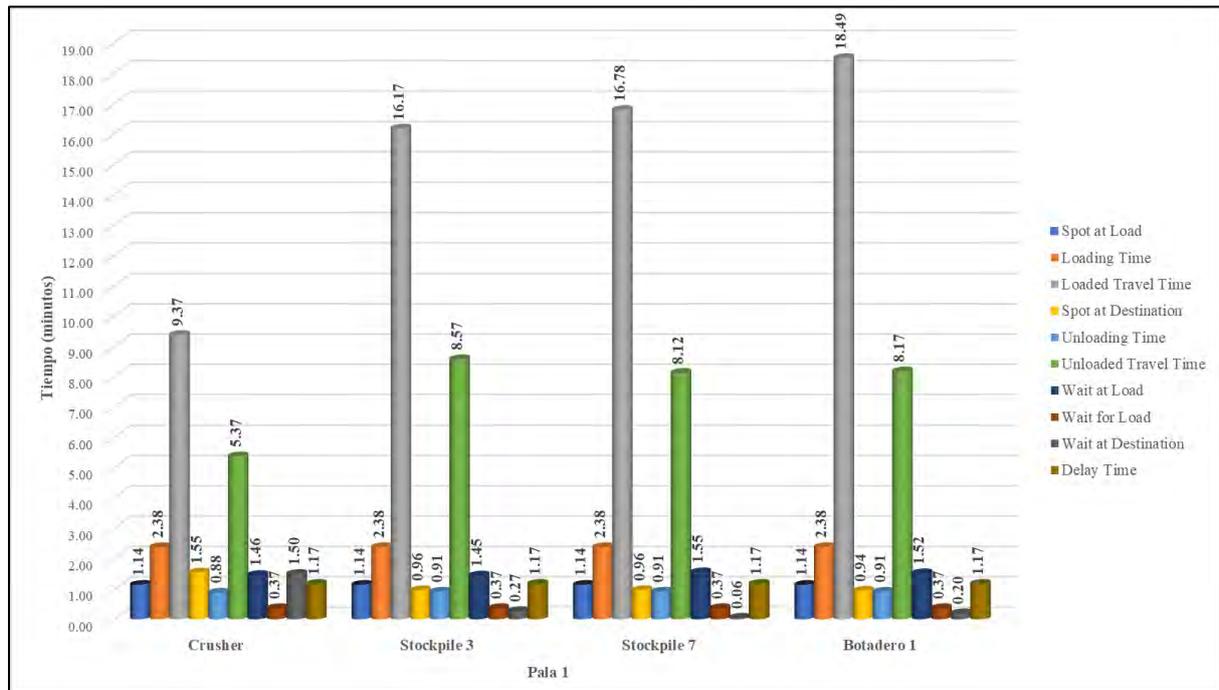


Figura 175. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 1.

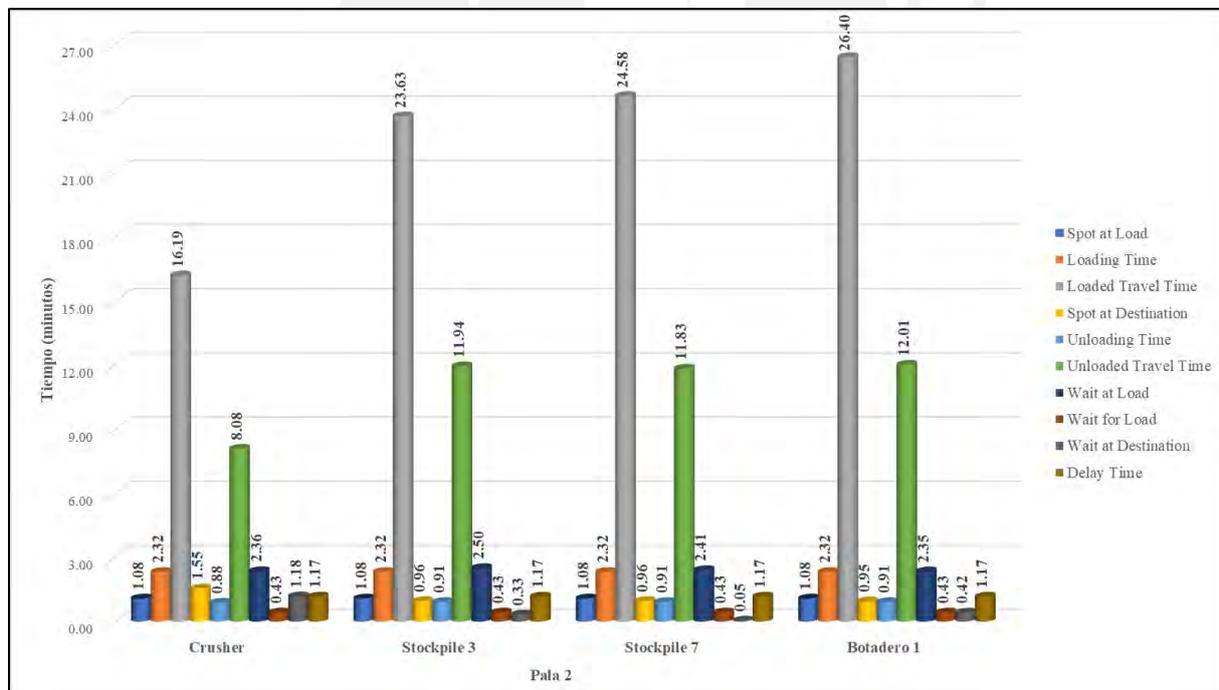


Figura 176. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 2.

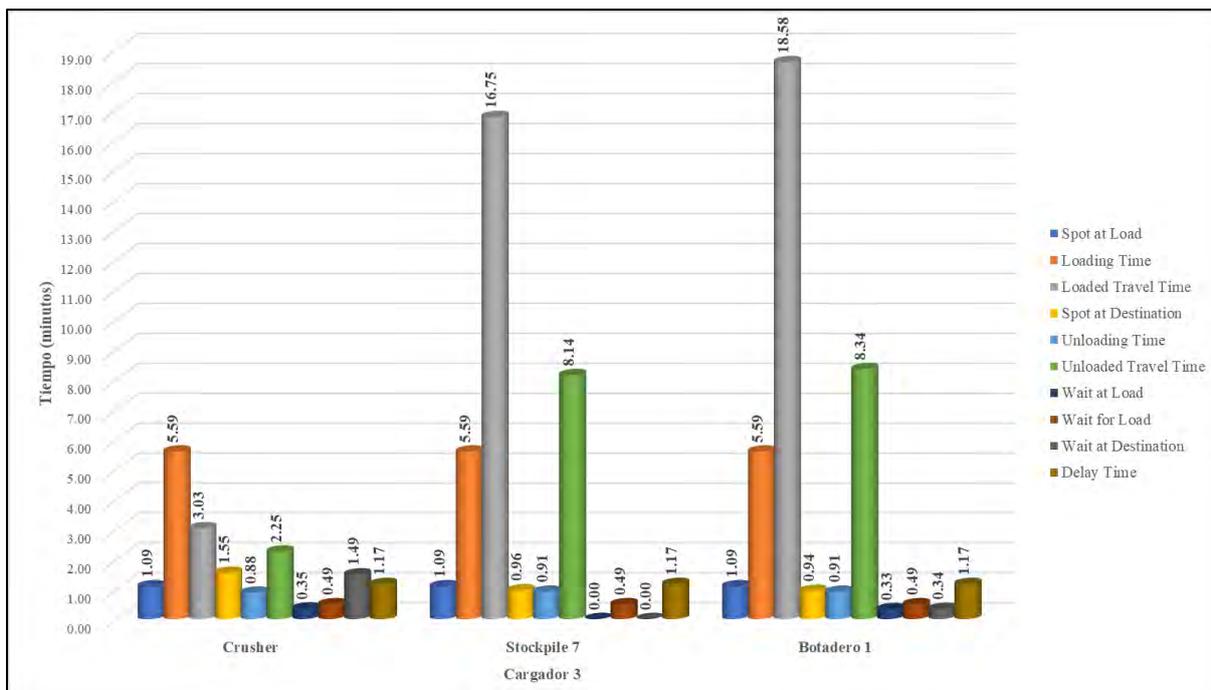


Figura 177. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada a pala 3.

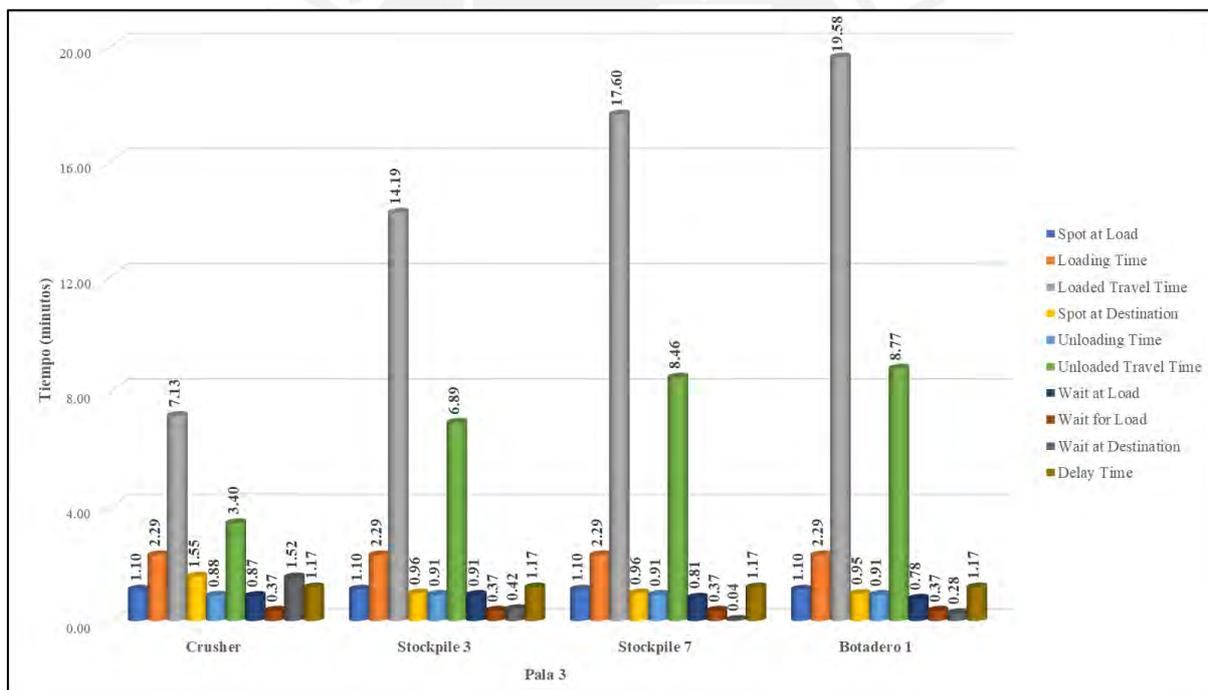


Figura 178. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada al cargador 3.

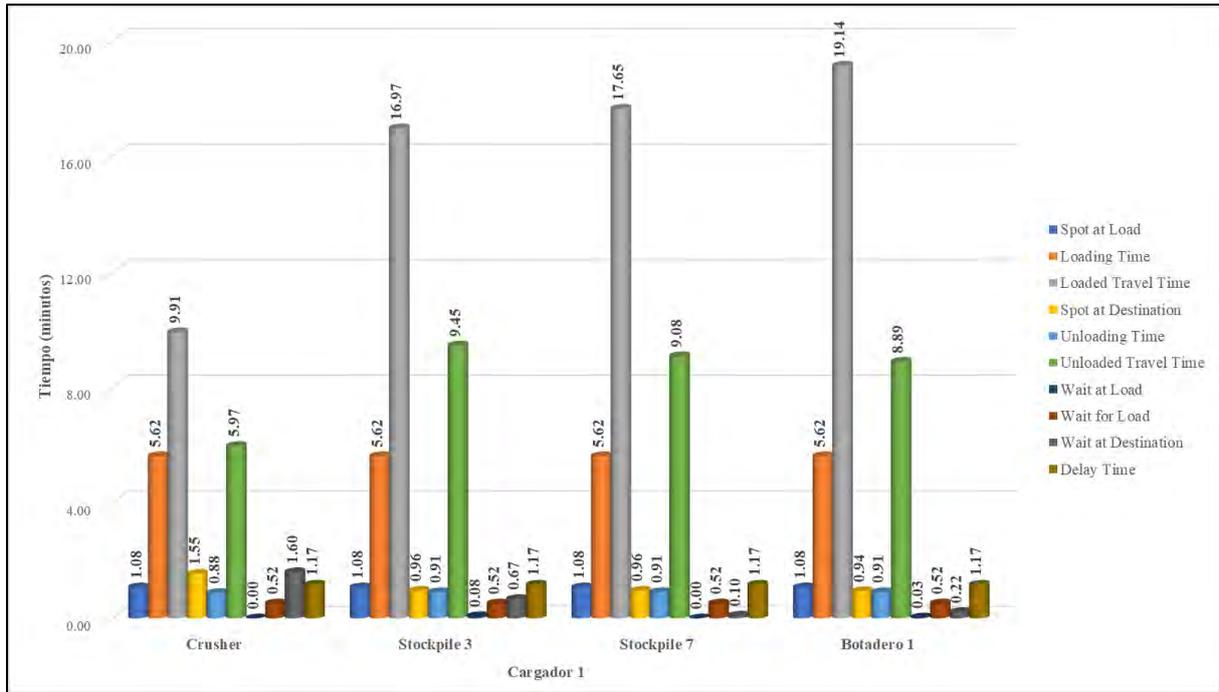


Figura 179. Ciclo total de acarreo en febrero para la flota asignada al cargador 1.

**Anexo 15: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante marzo.**

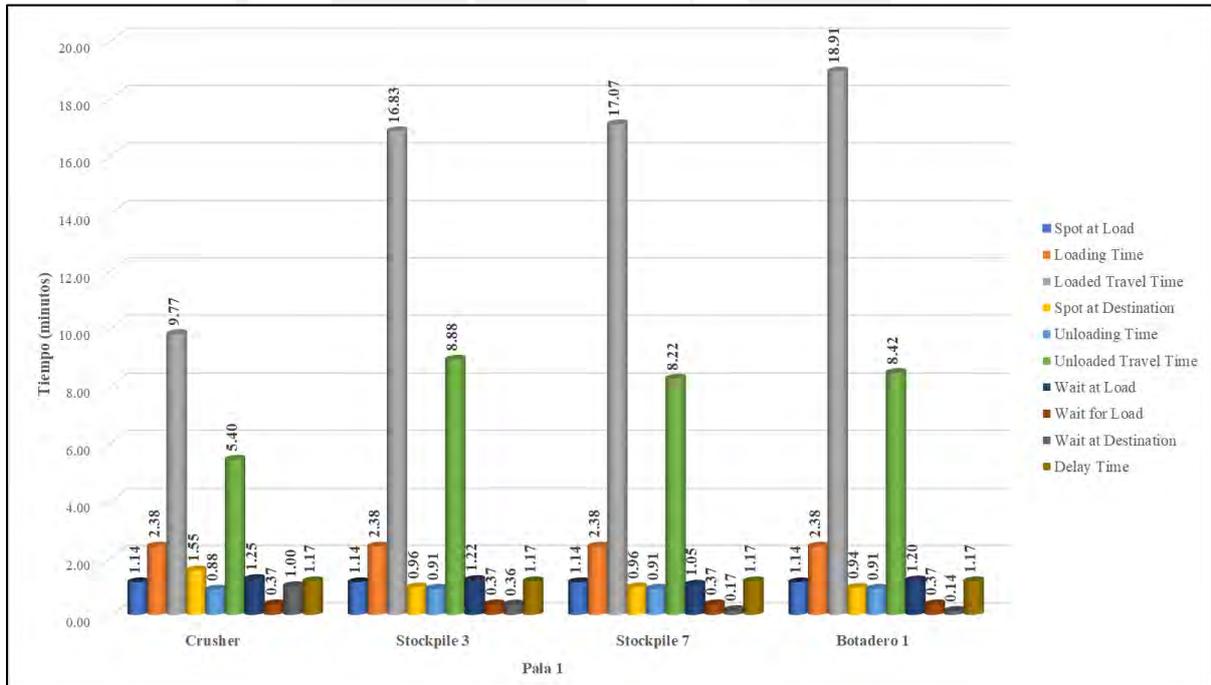


Figura 180. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 1.

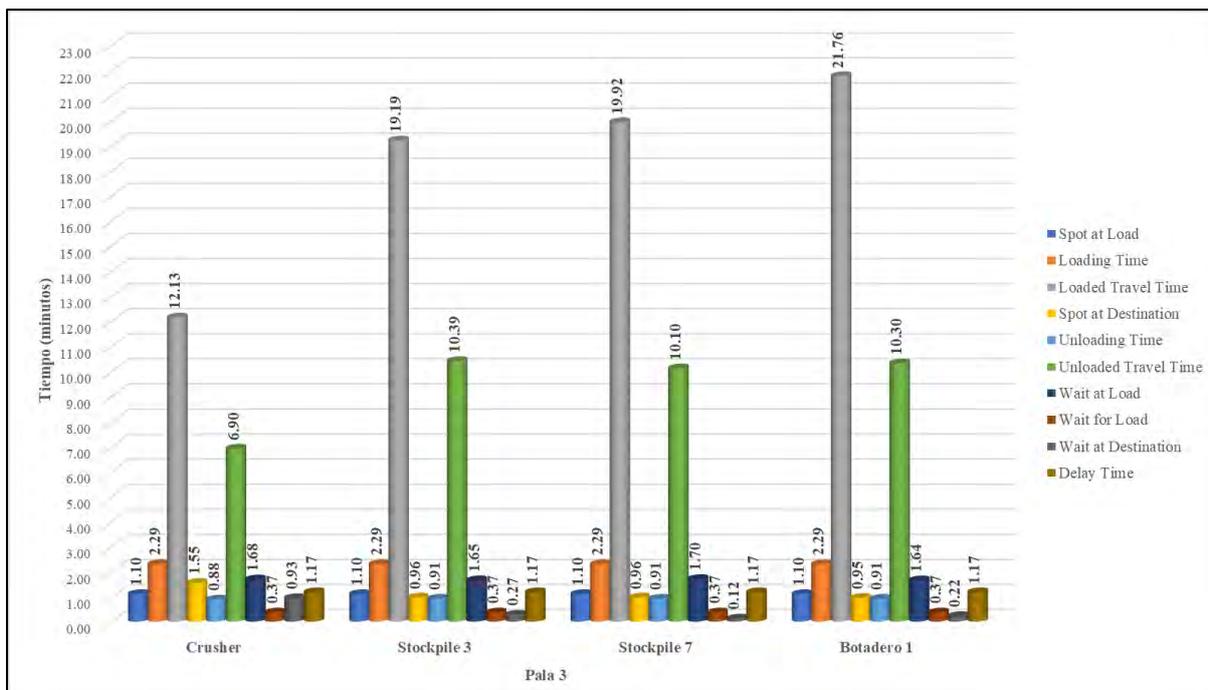


Figura 181. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 2.

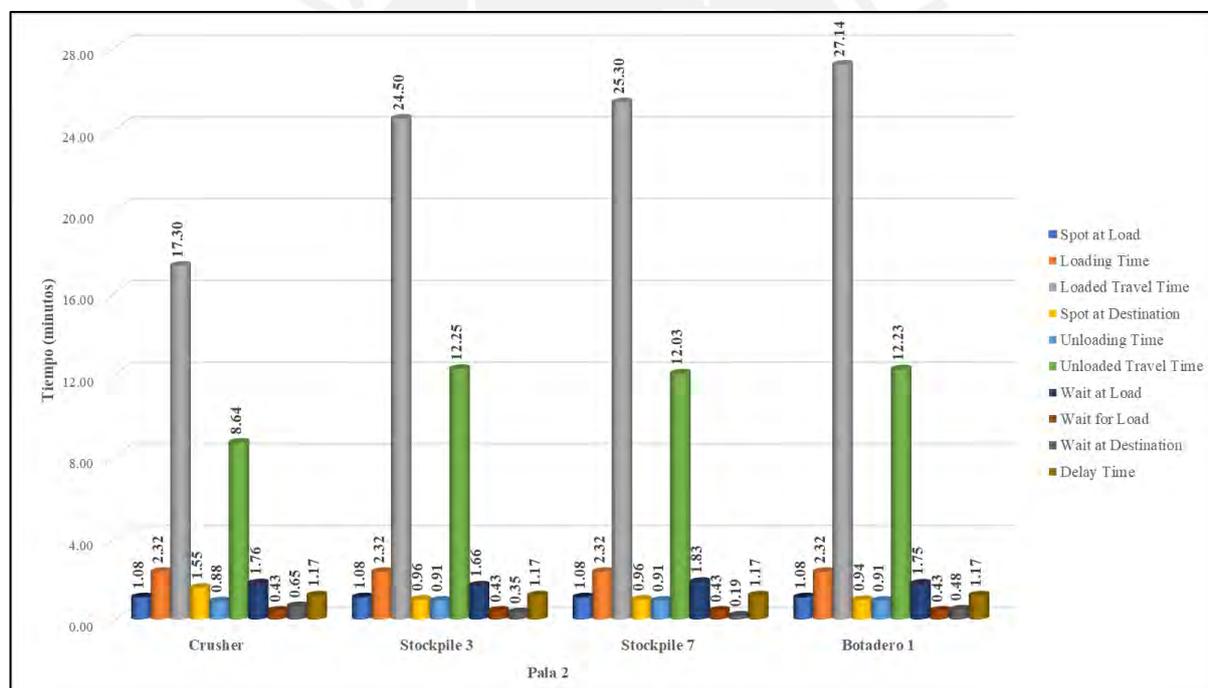


Figura 182. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada a pala 3.

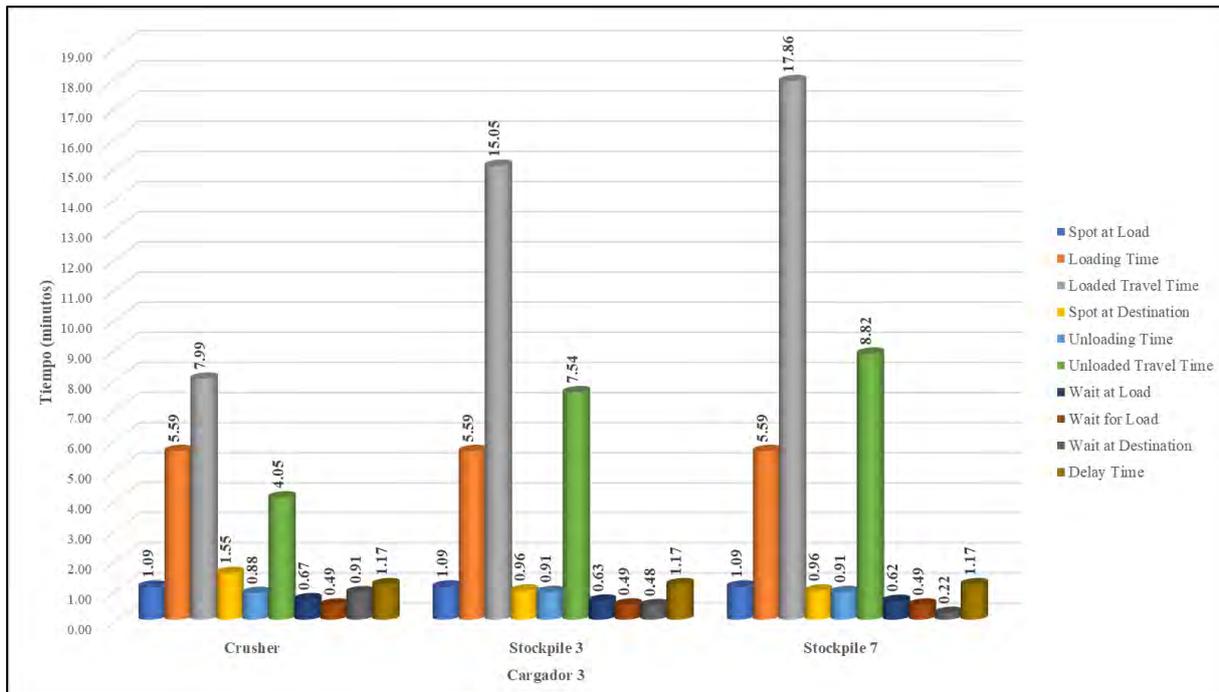


Figura 183. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada al cargador 3.

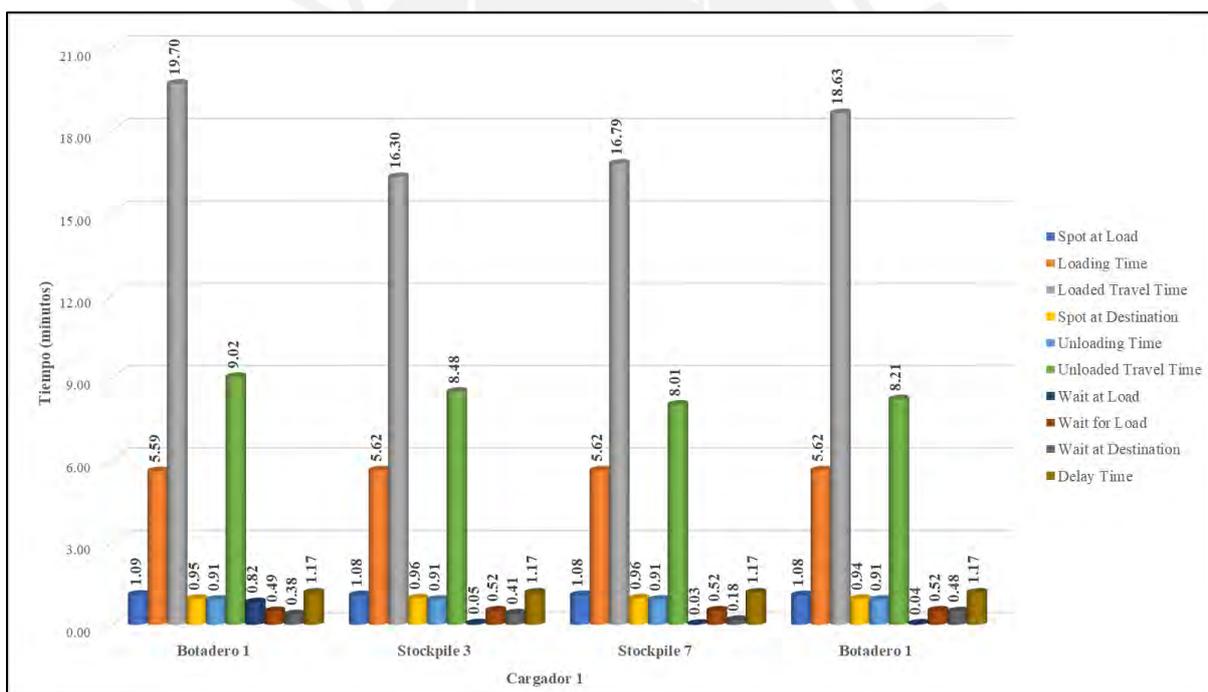


Figura 184. Ciclo total de acarreo en marzo para la flota asignada al cargador 1.

**Anexo 16: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante abril.**

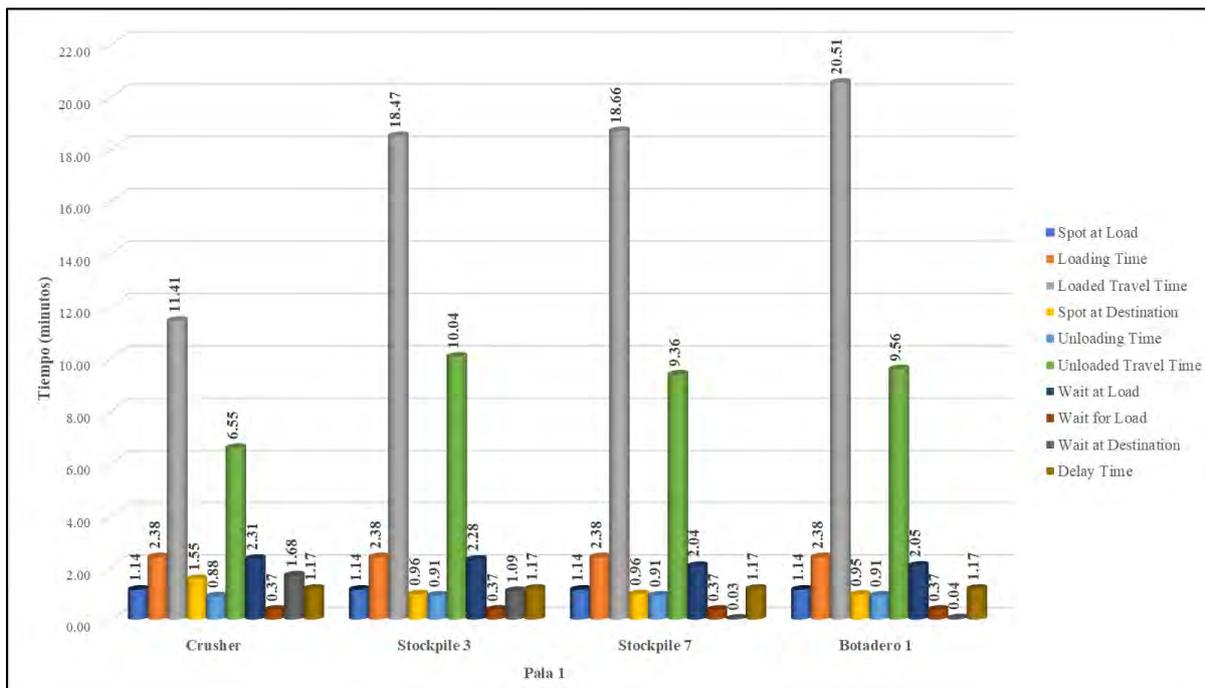


Figura 185. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 1.

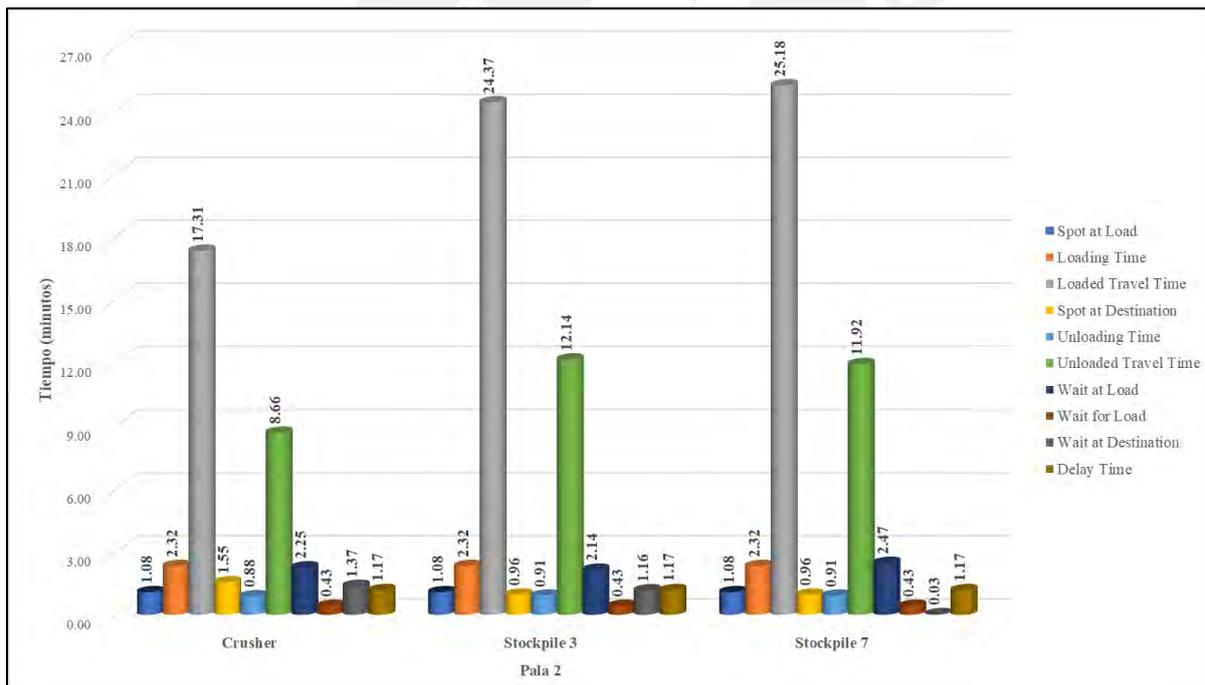


Figura 186. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 2.

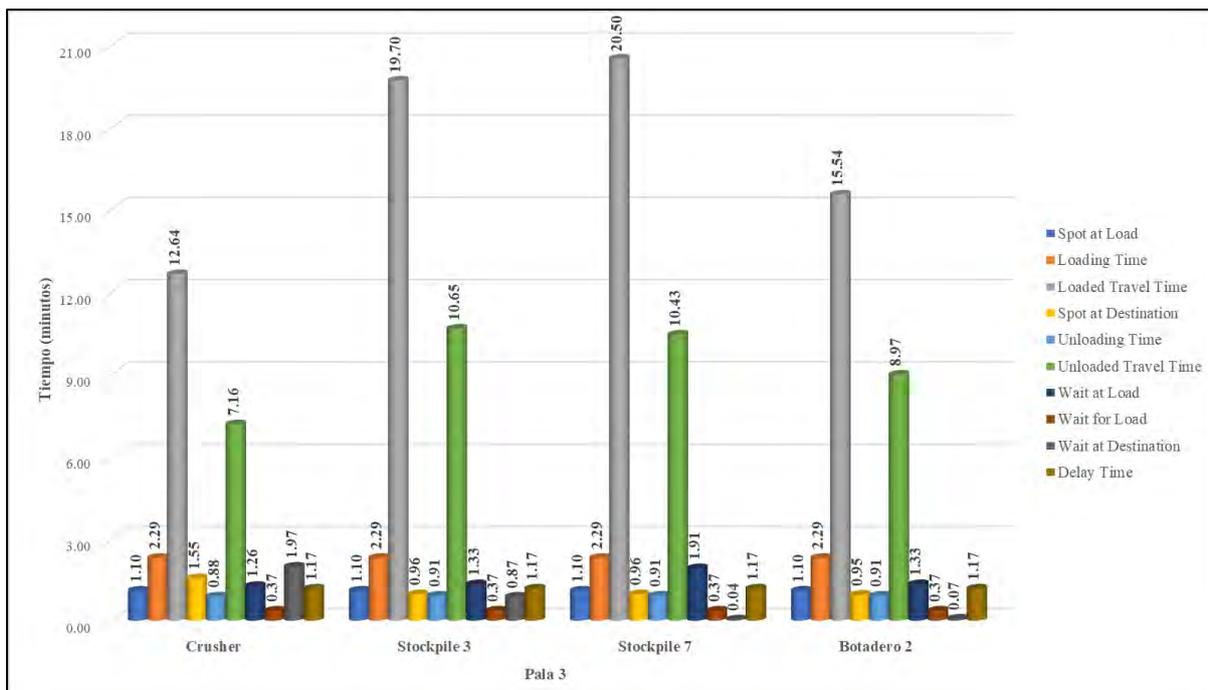


Figura 187. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada a pala 3.

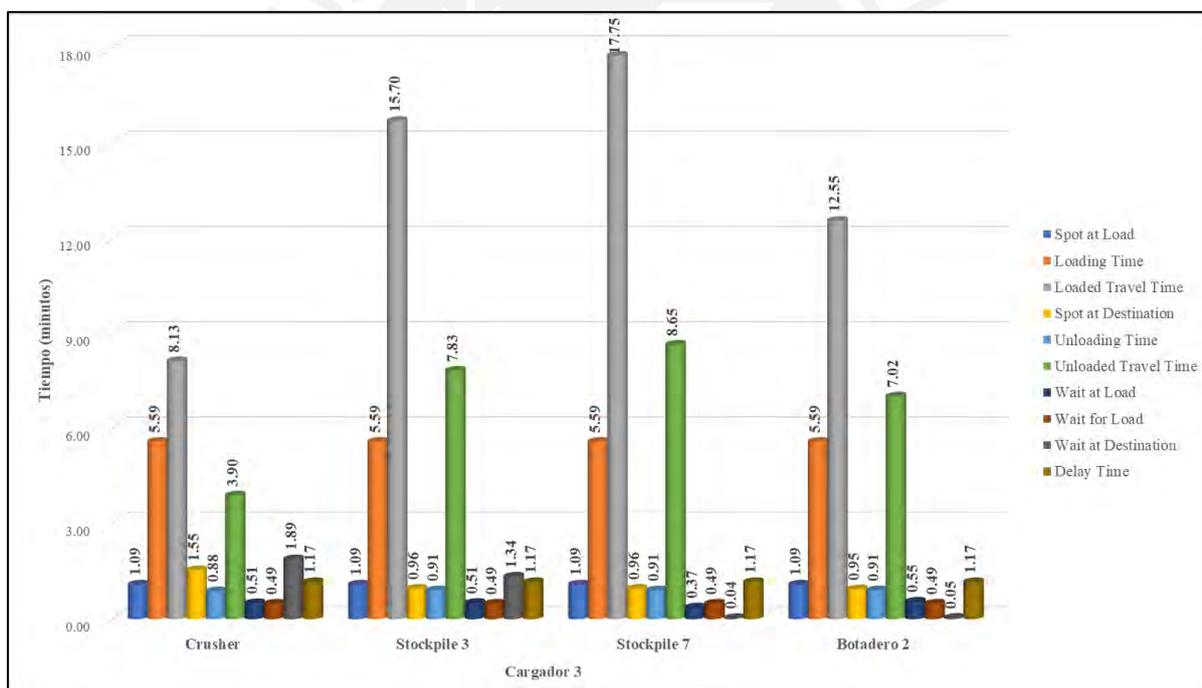


Figura 188. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 3.

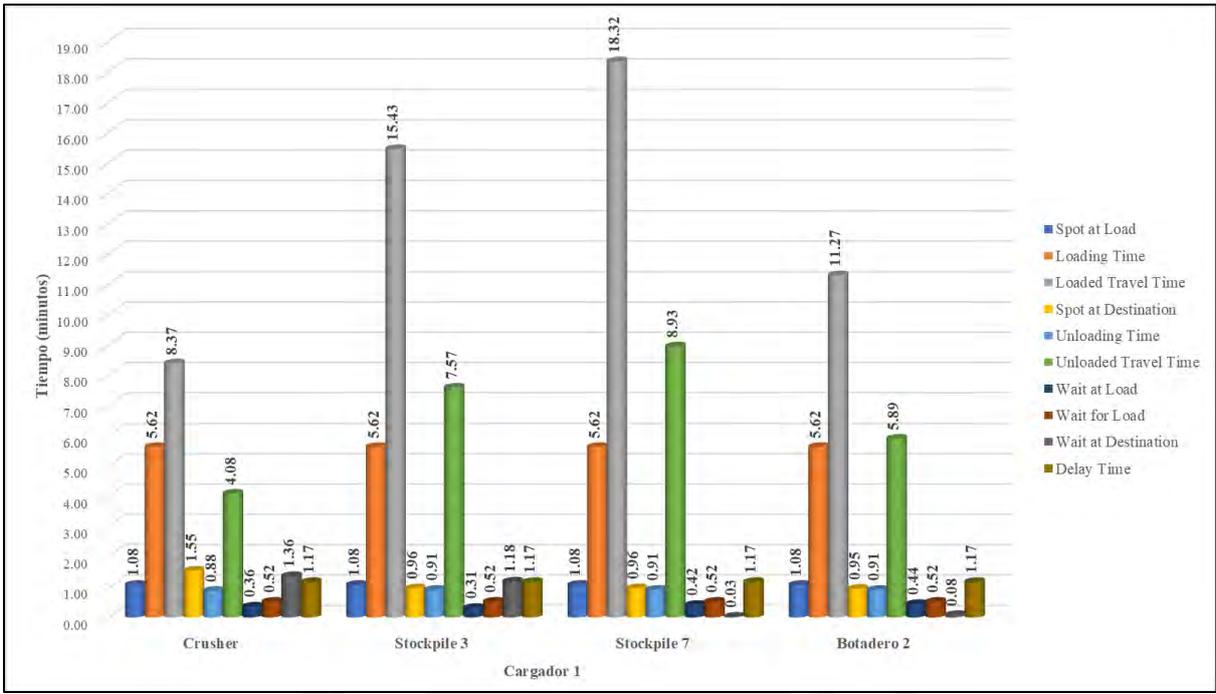


Figura 189. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 1.

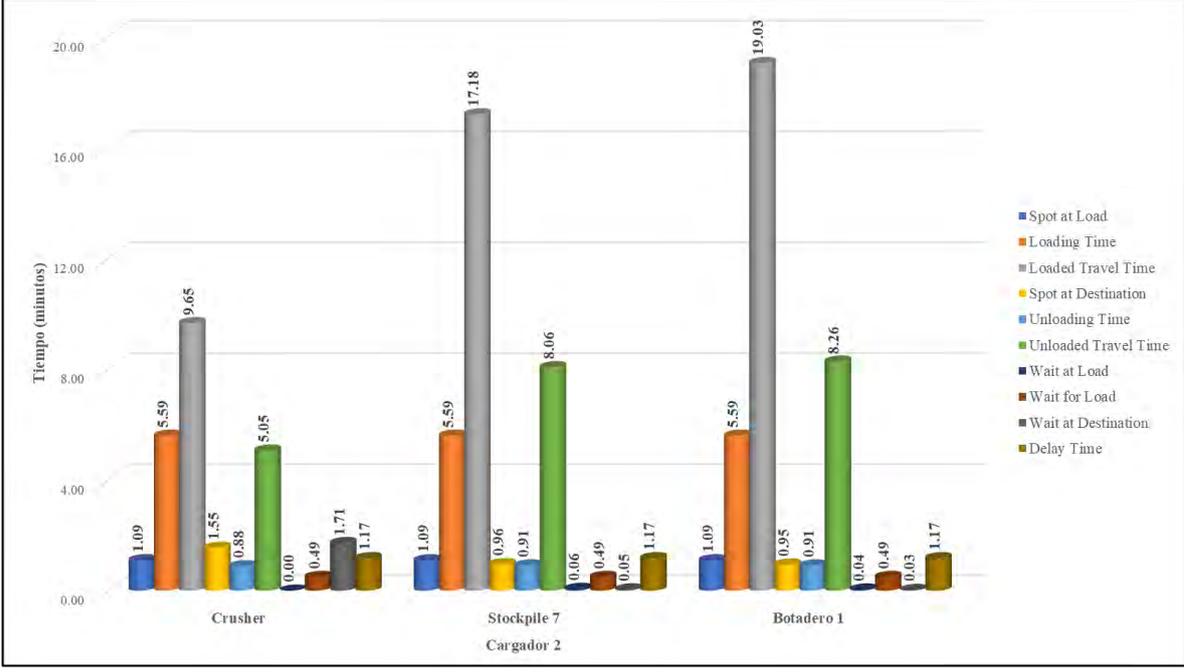


Figura 190. Ciclo total de acarreo en abril para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 17: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante mayo.**

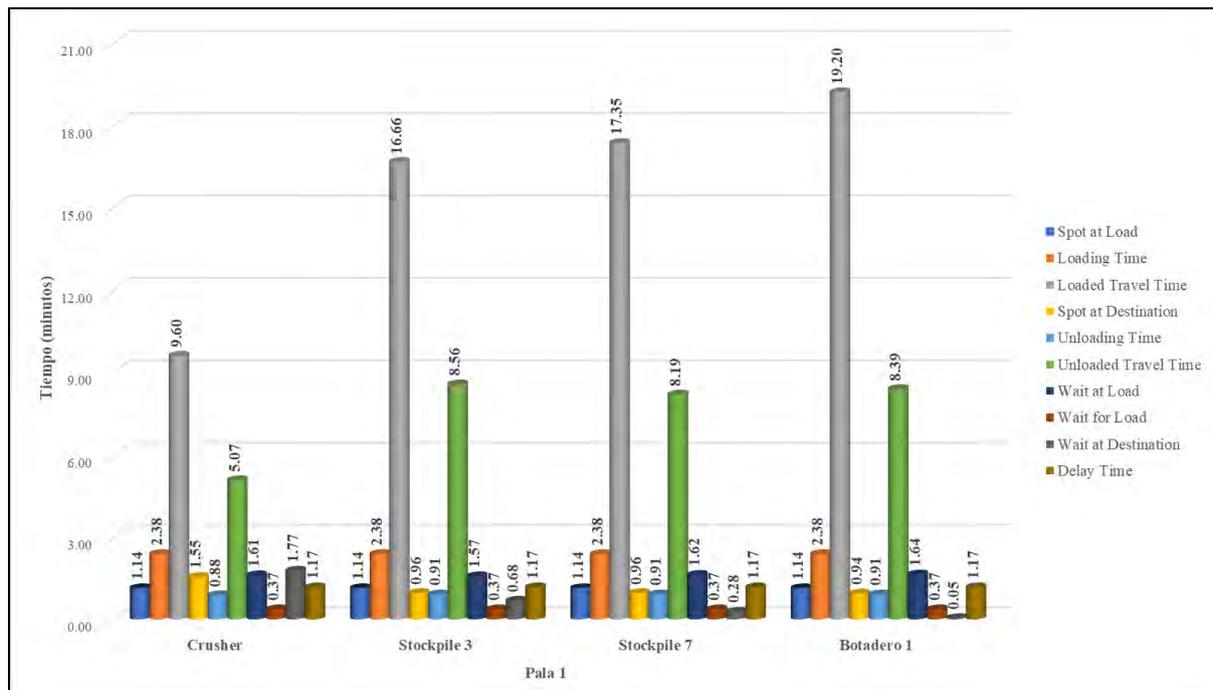


Figura 191. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 1.

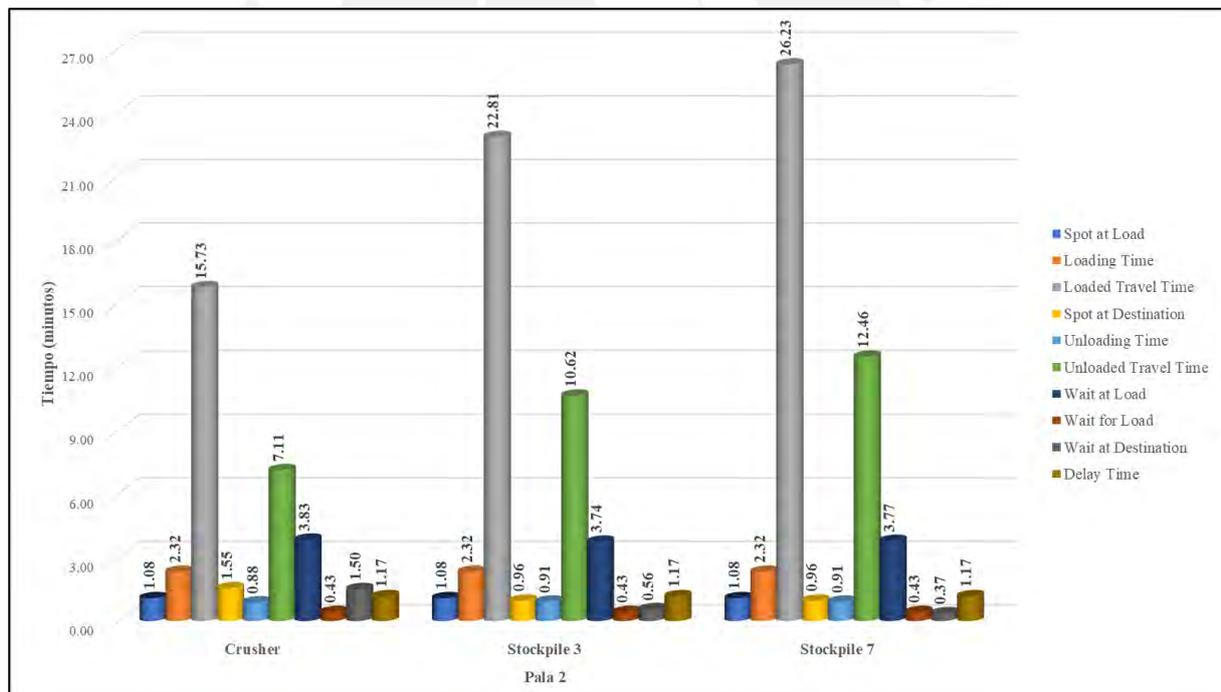


Figura 192. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 2.

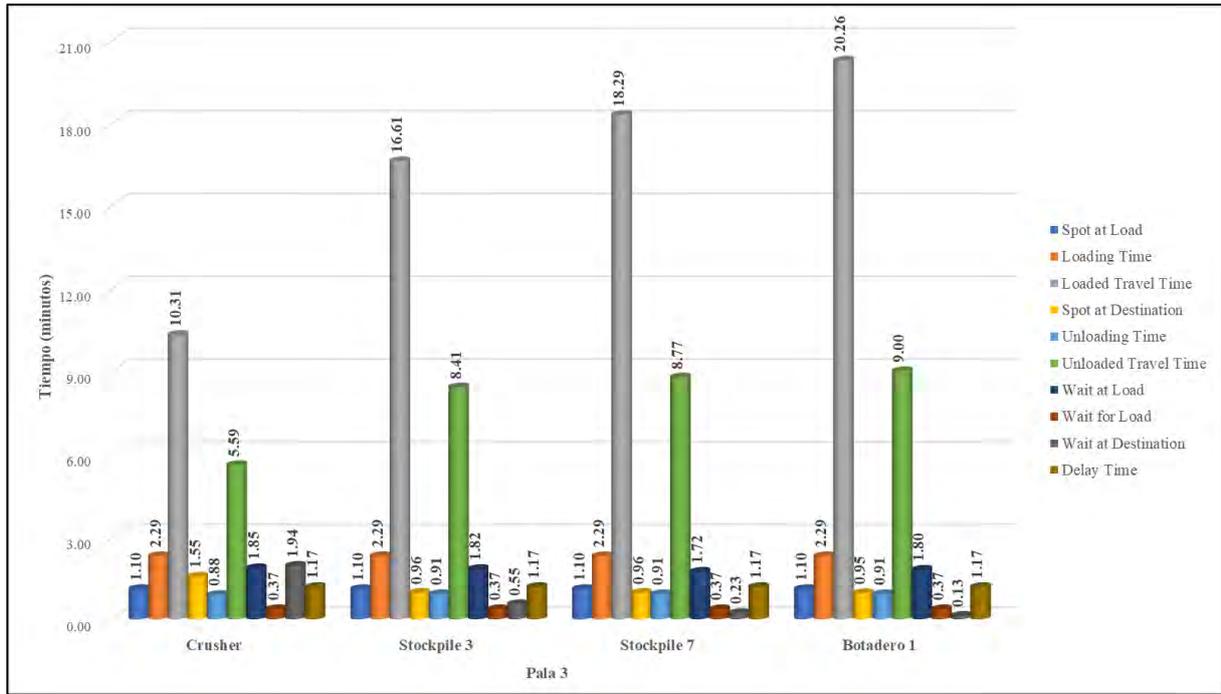


Figura 193. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada a pala 3.

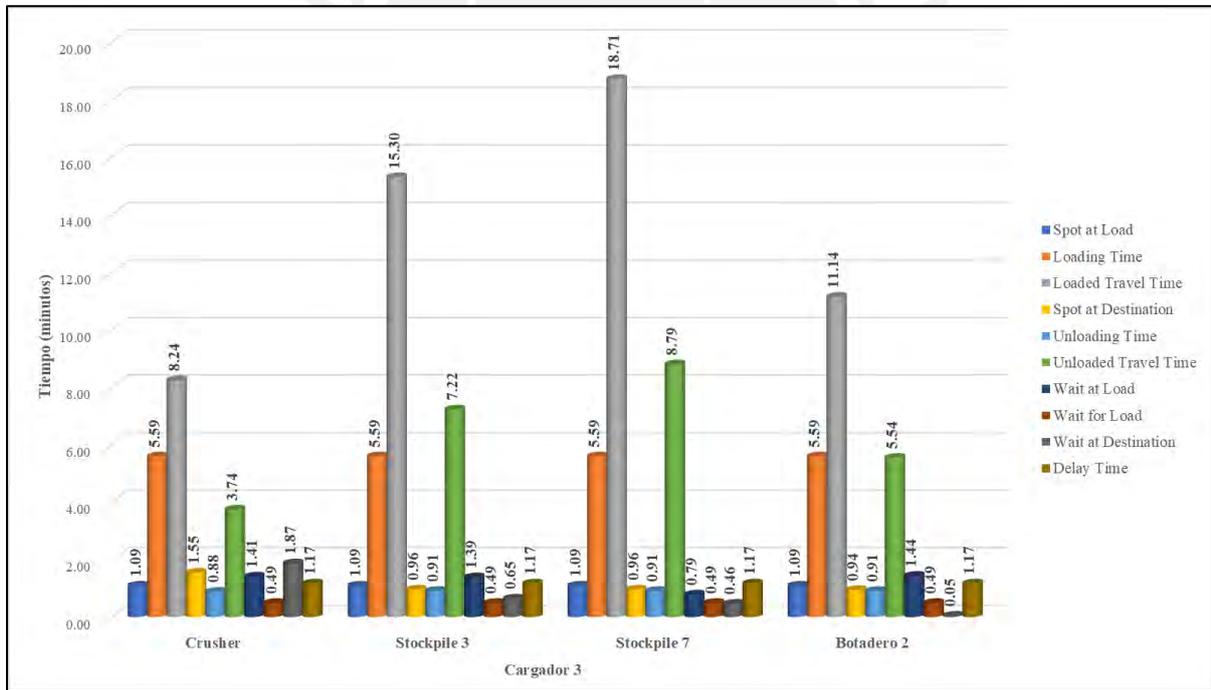


Figura 194. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 3.

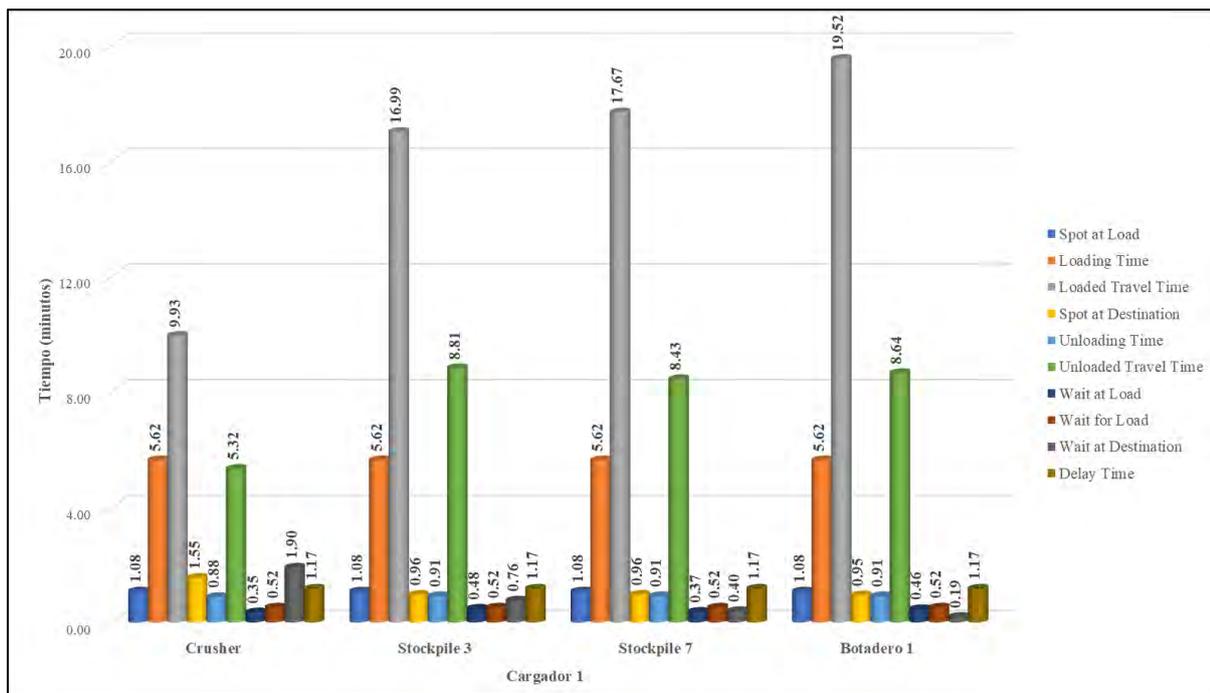


Figura 195. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 1.

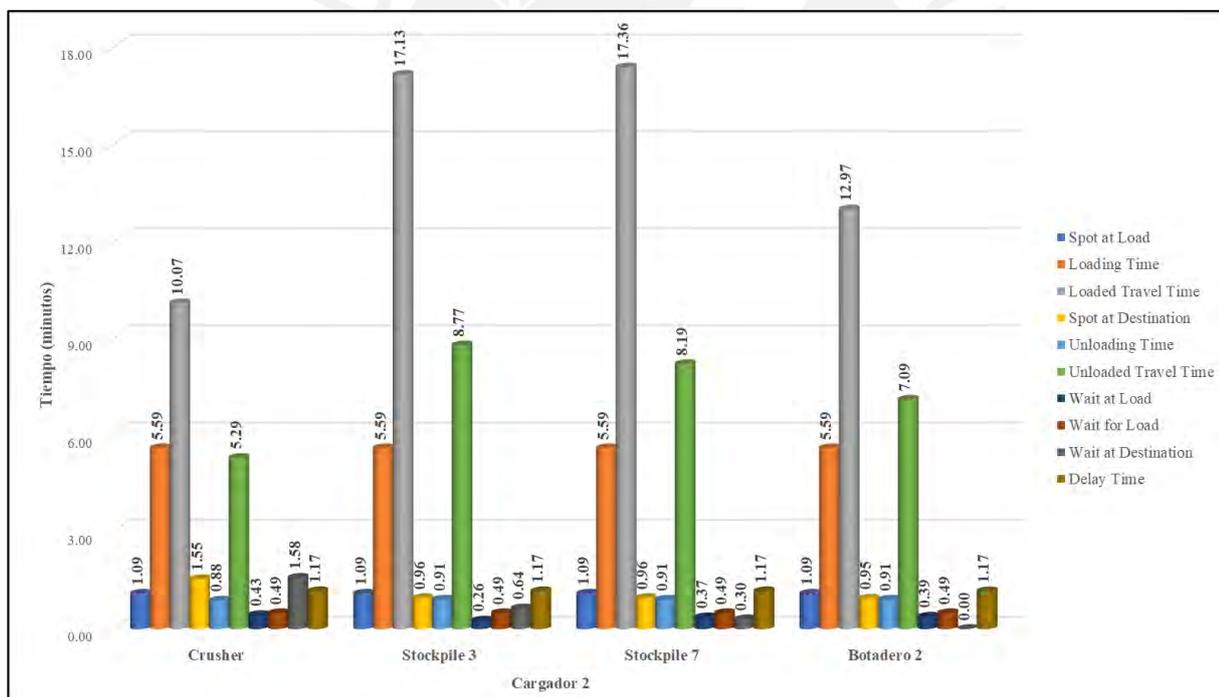


Figura 196. Ciclo total de acarreo en mayo para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 18: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante junio.**

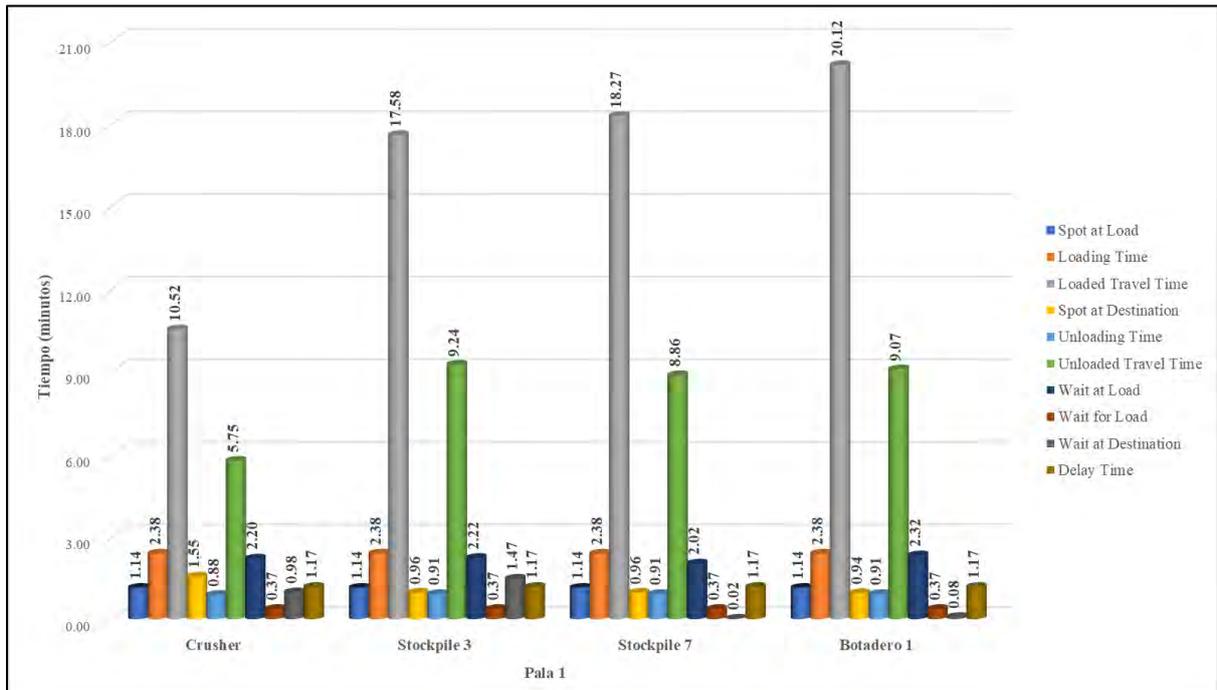


Figura 197. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 1.

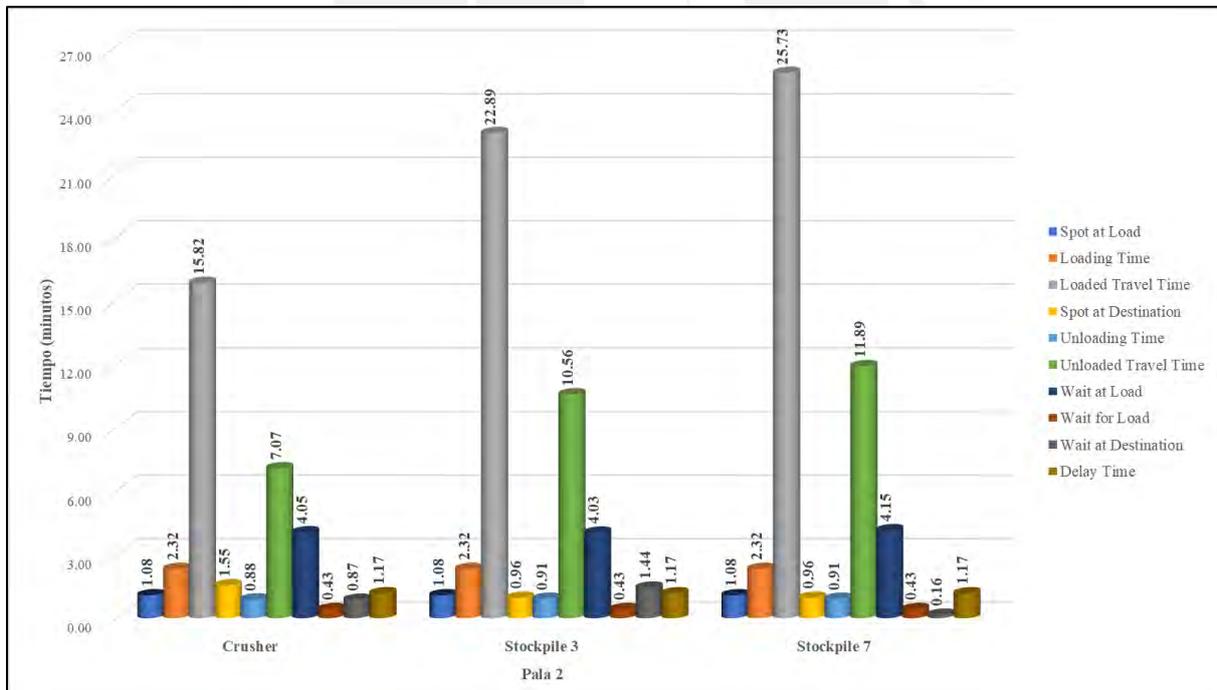


Figura 198. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 2.

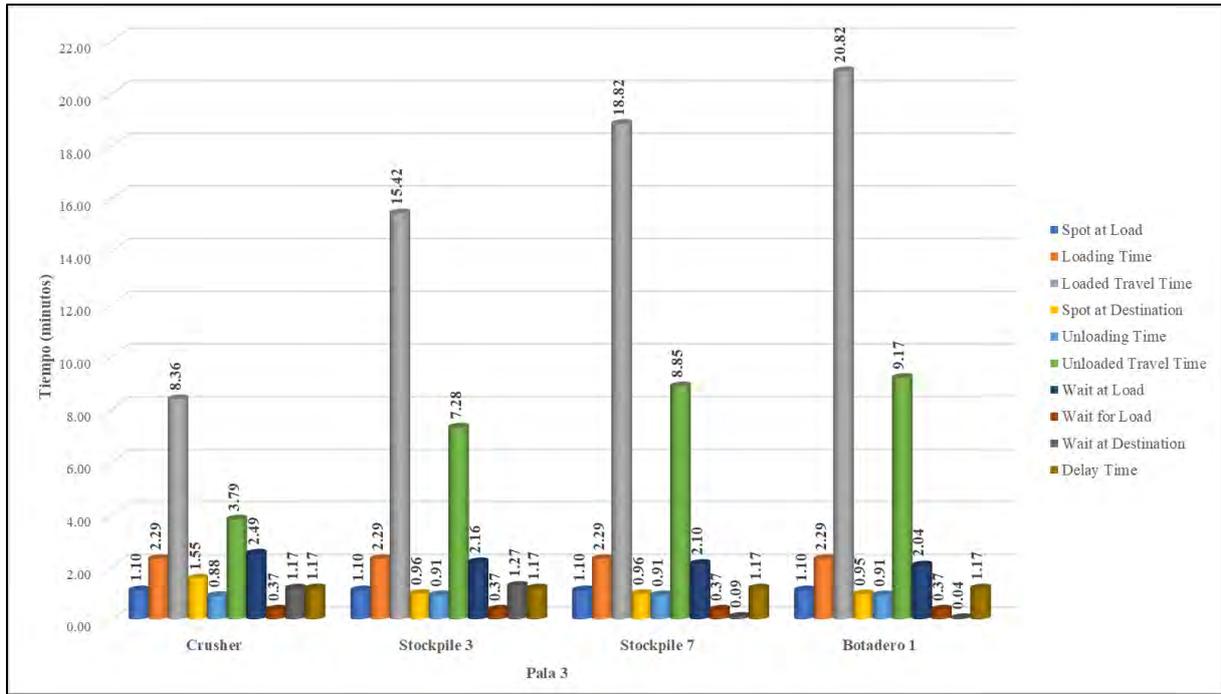


Figura 199. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada a pala 3.

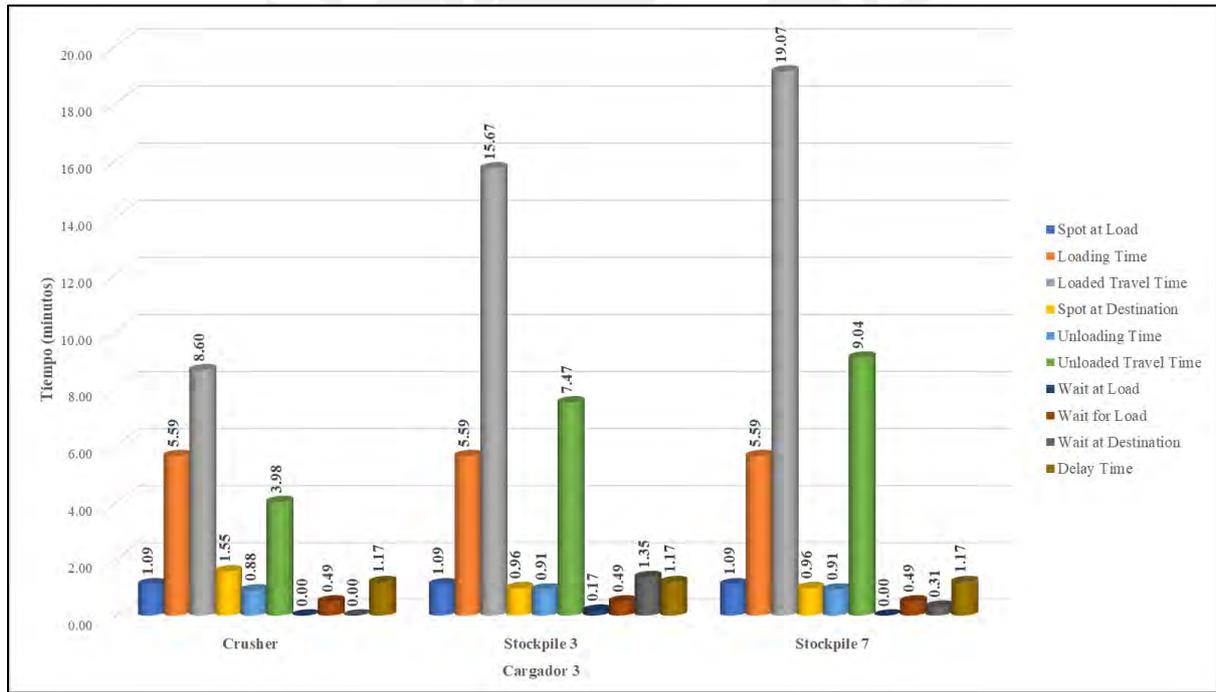


Figura 200. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 3.

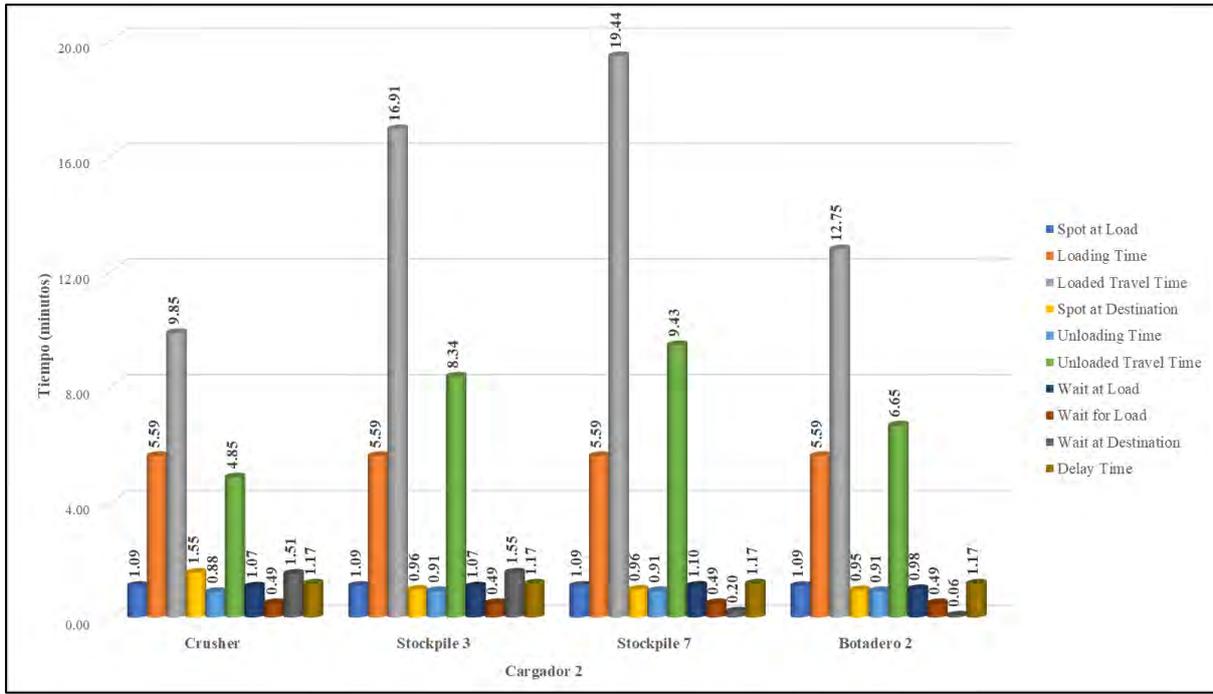


Figura 201. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 1.

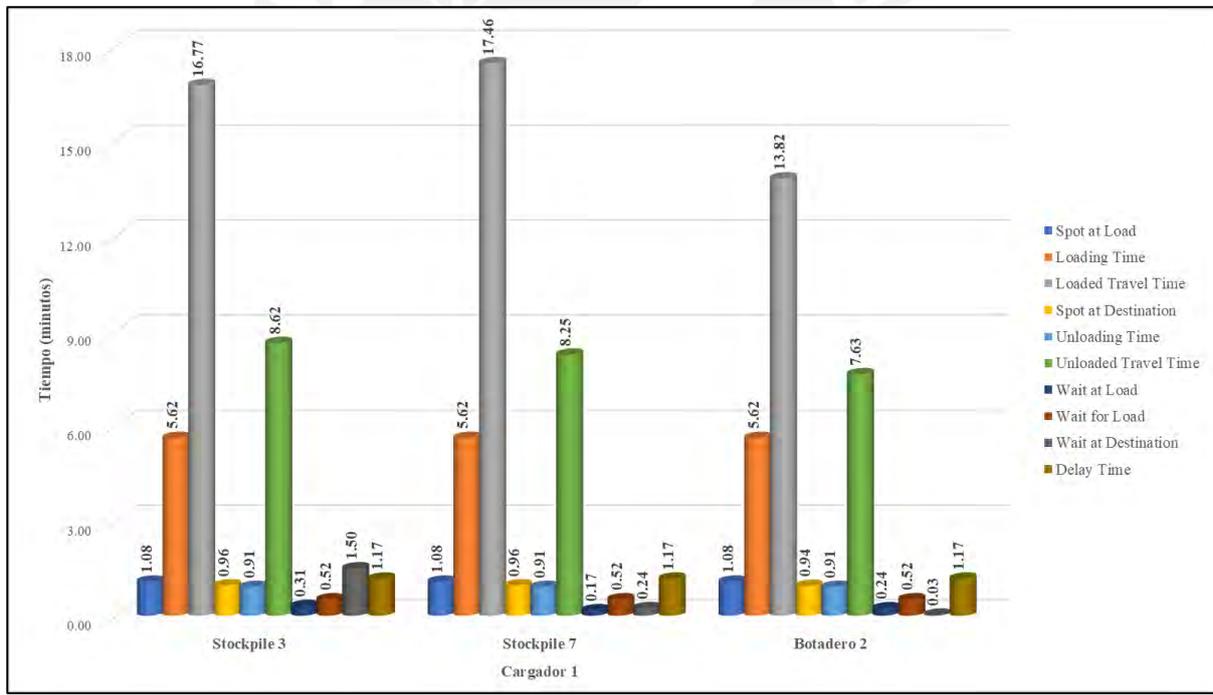


Figura 202. Ciclo total de acarreo en junio para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 19: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante julio.**

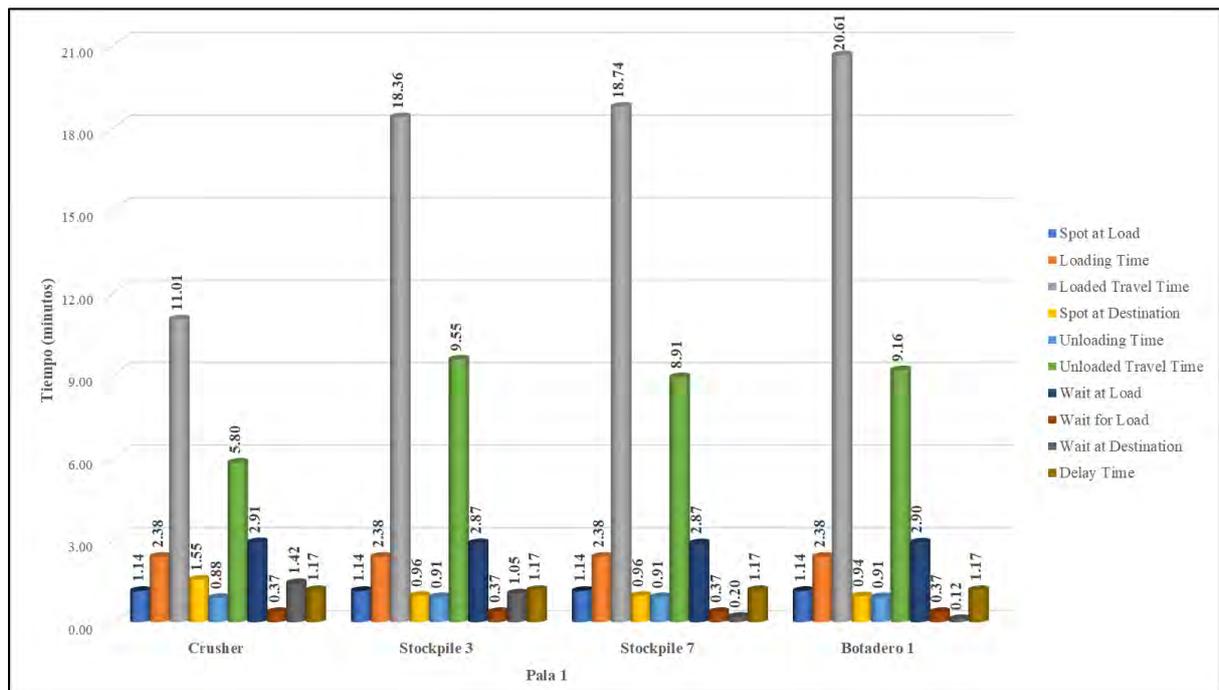


Figura 203. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 1.

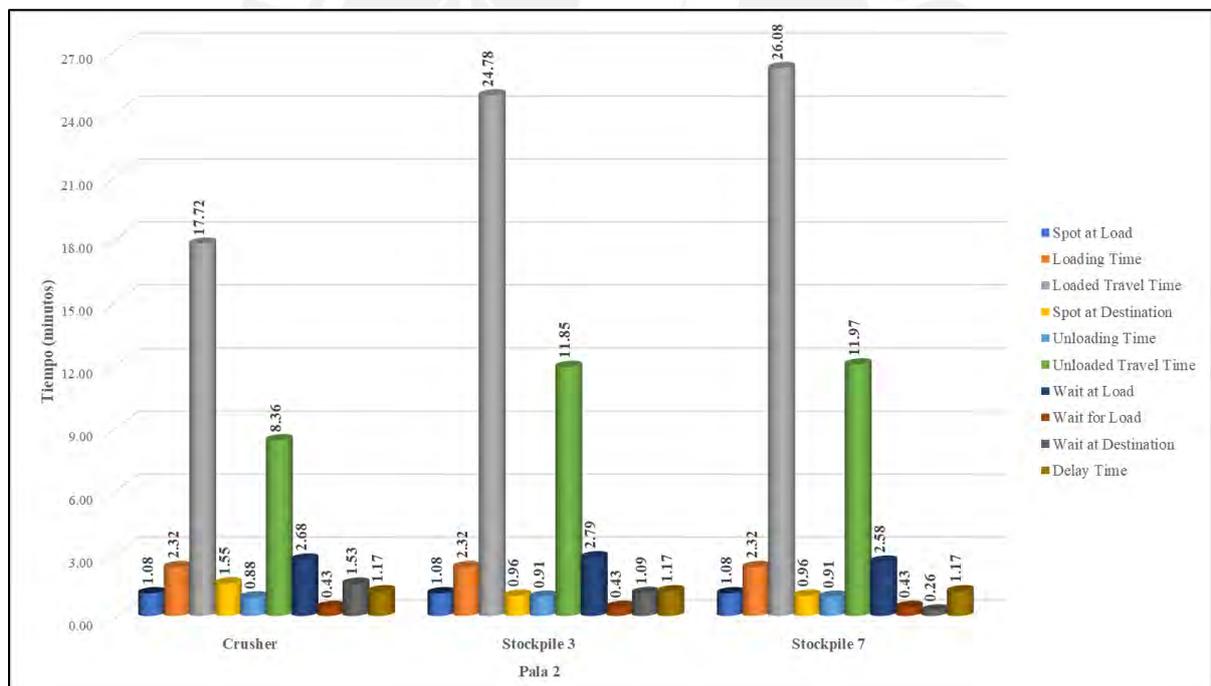


Figura 204. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 2.

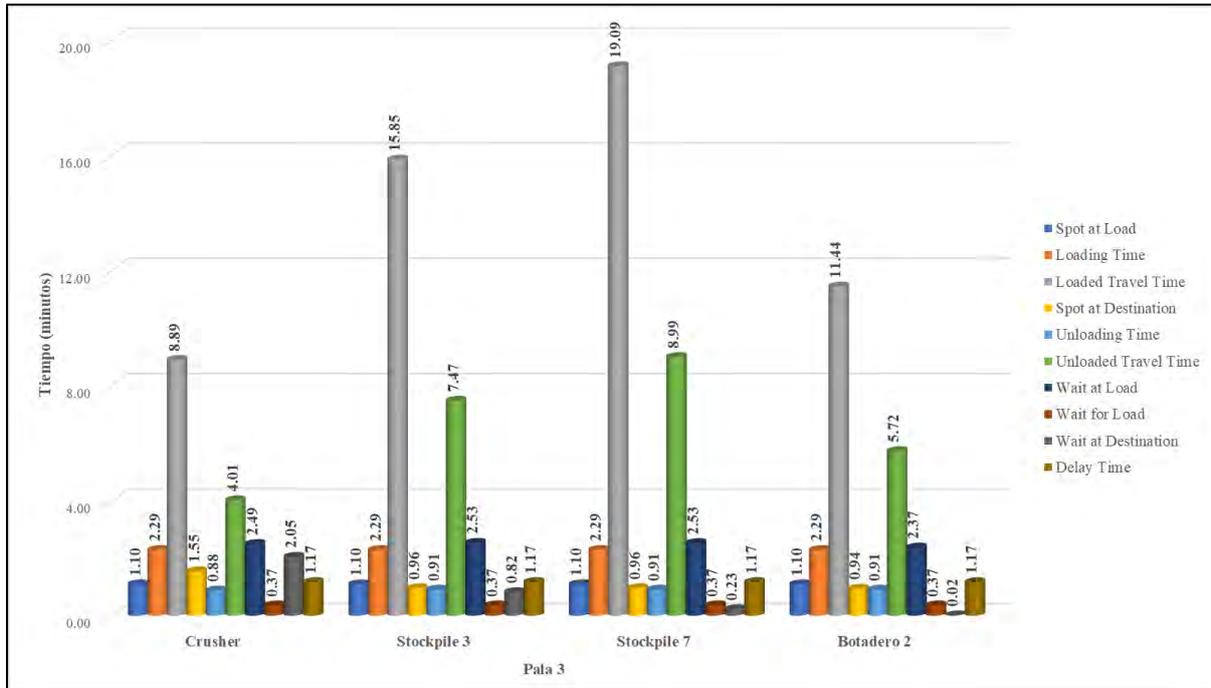


Figura 205. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada a pala 3.

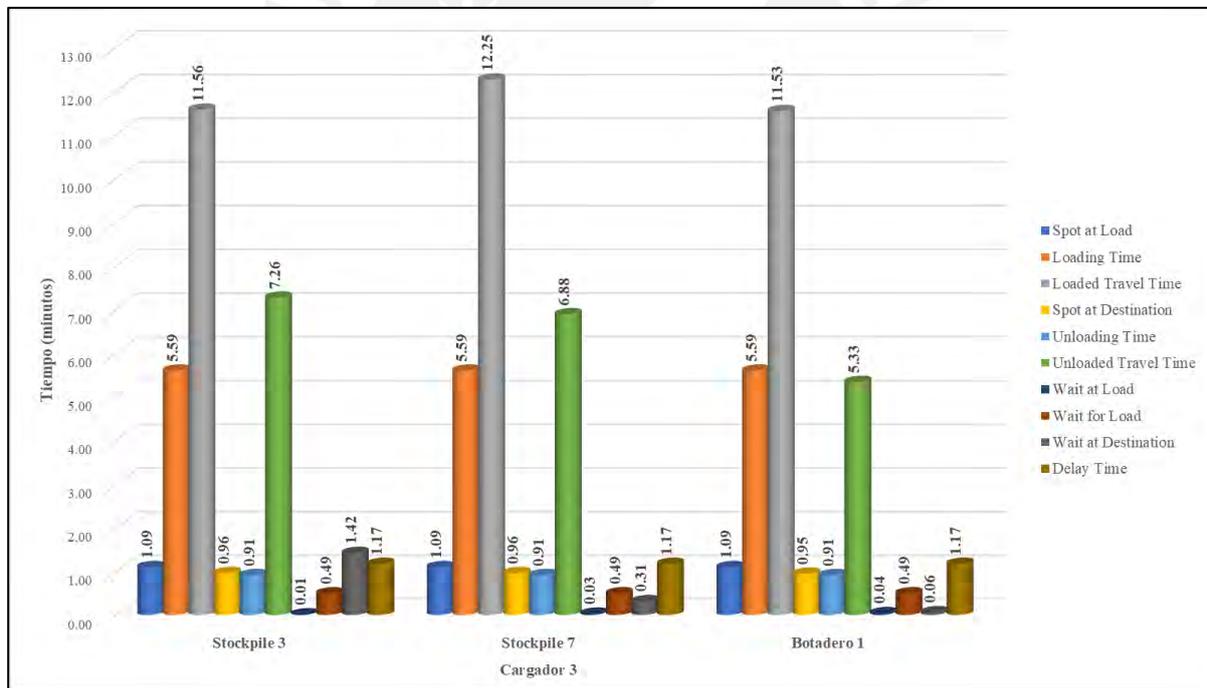


Figura 206. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 3.

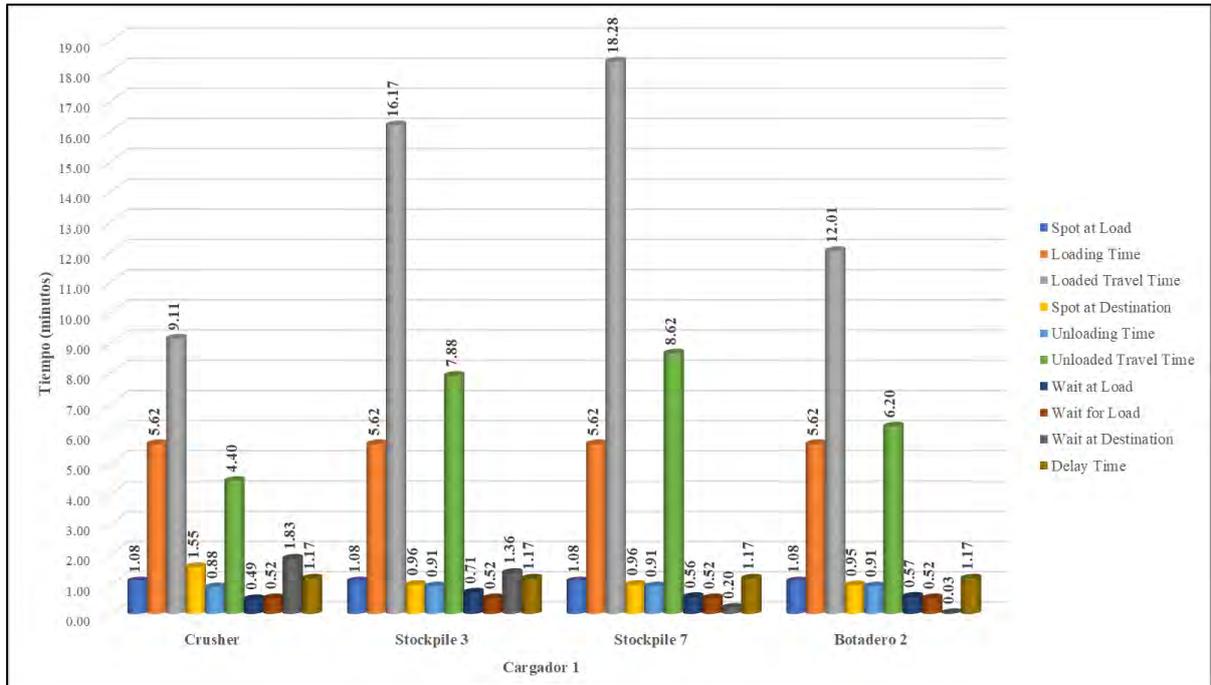


Figura 207. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 1.

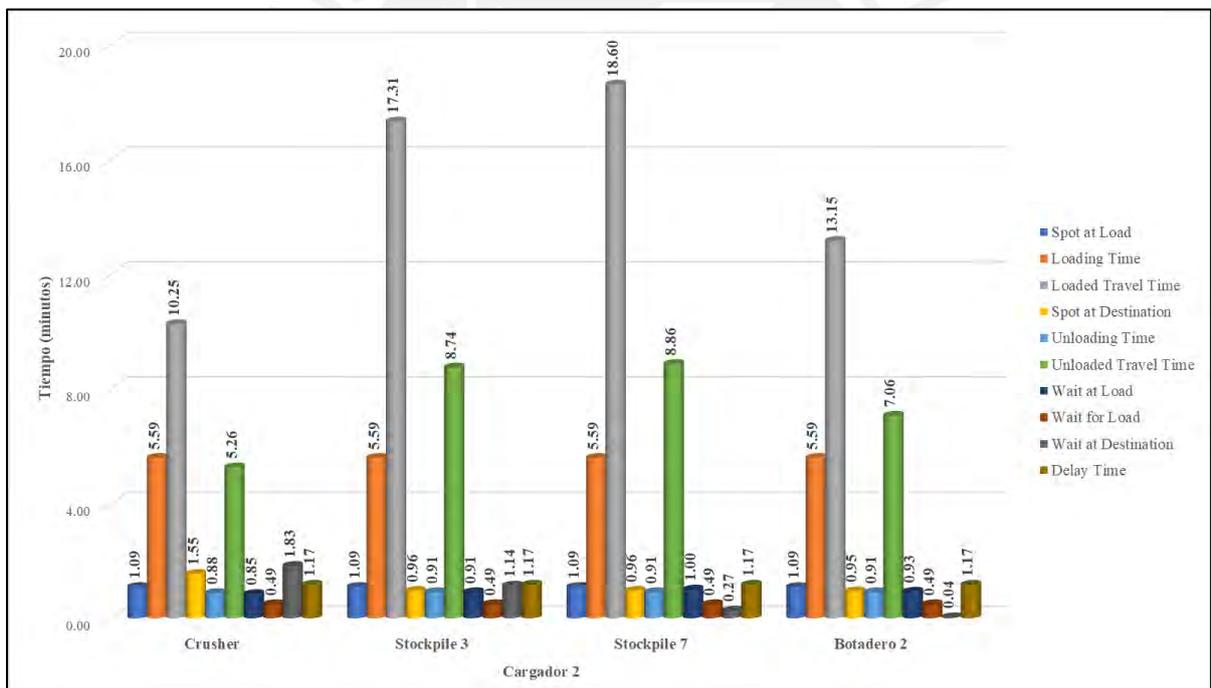


Figura 208. Ciclo total de acarreo en julio para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 20: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante agosto.**

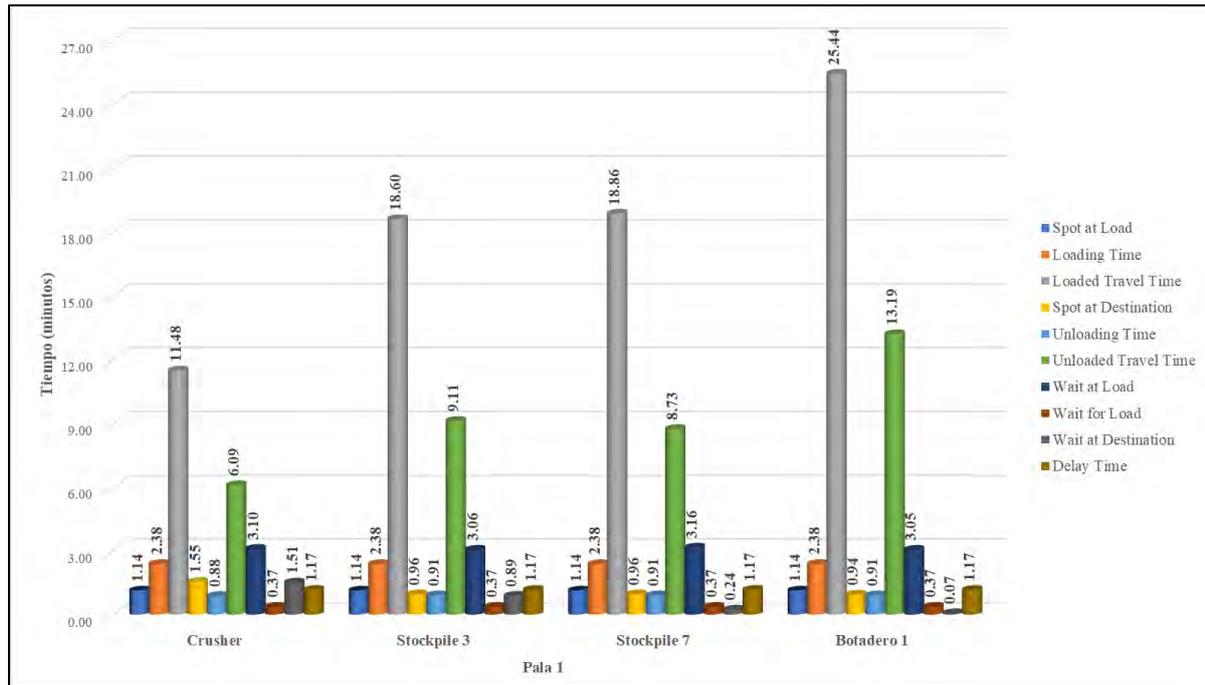


Figura 209. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 1.

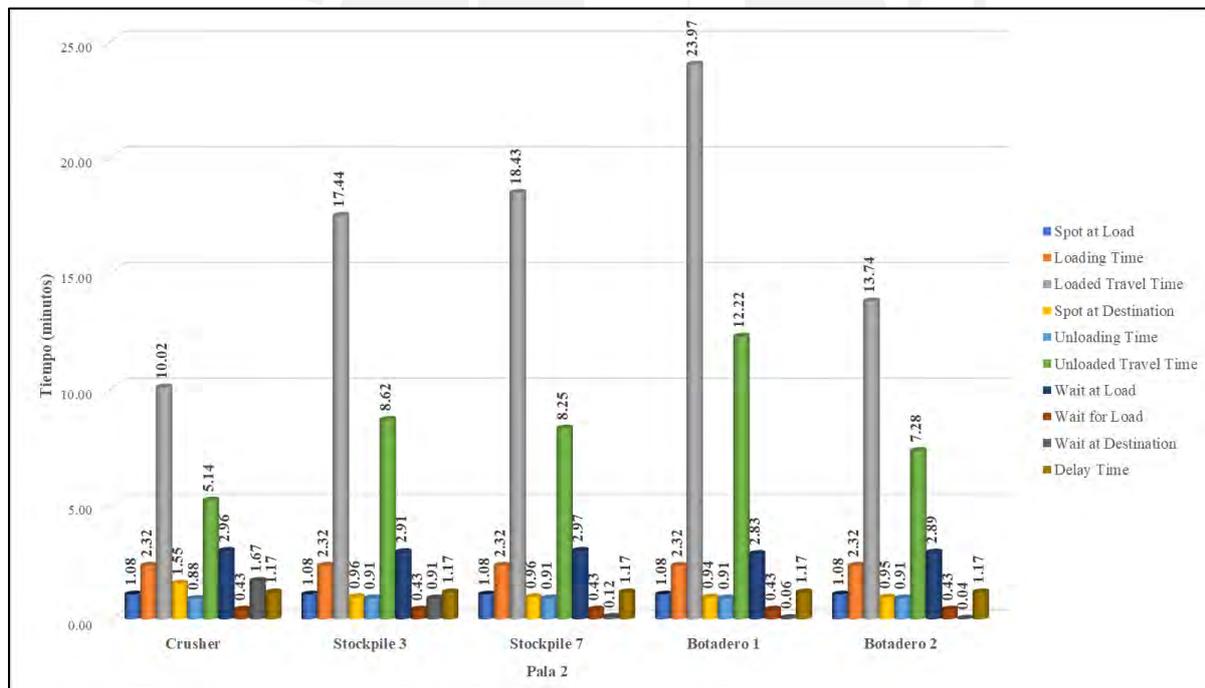


Figura 210. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 2.

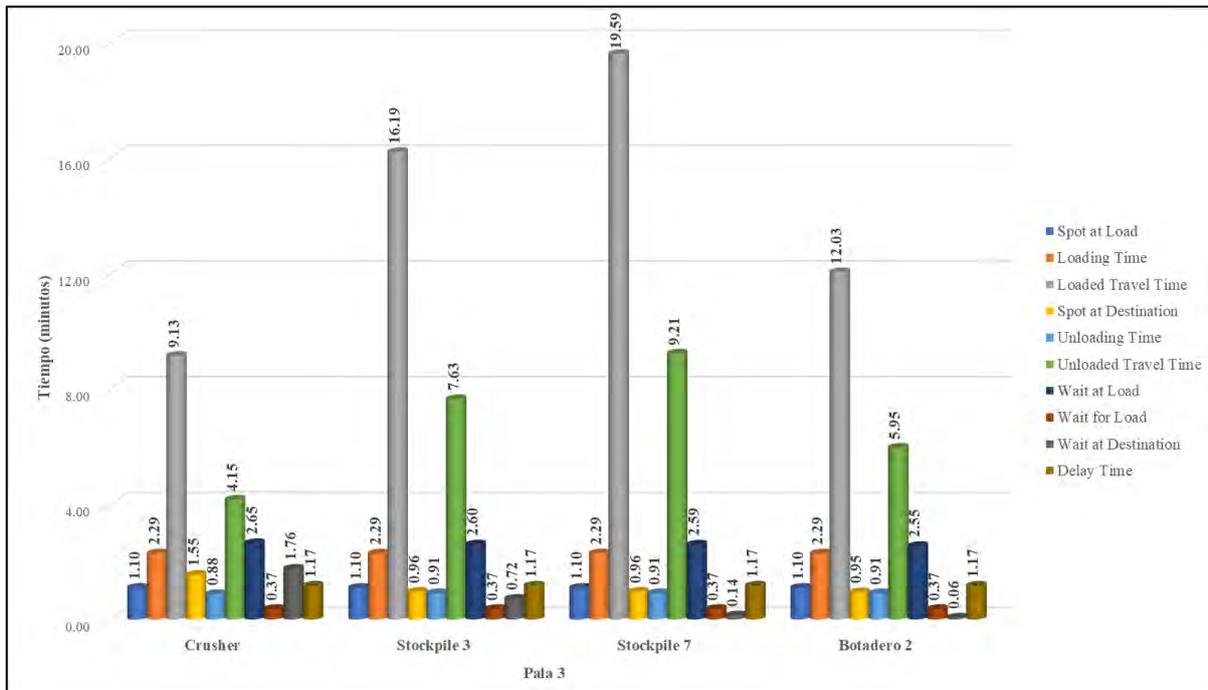


Figura 211. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada a pala 3.

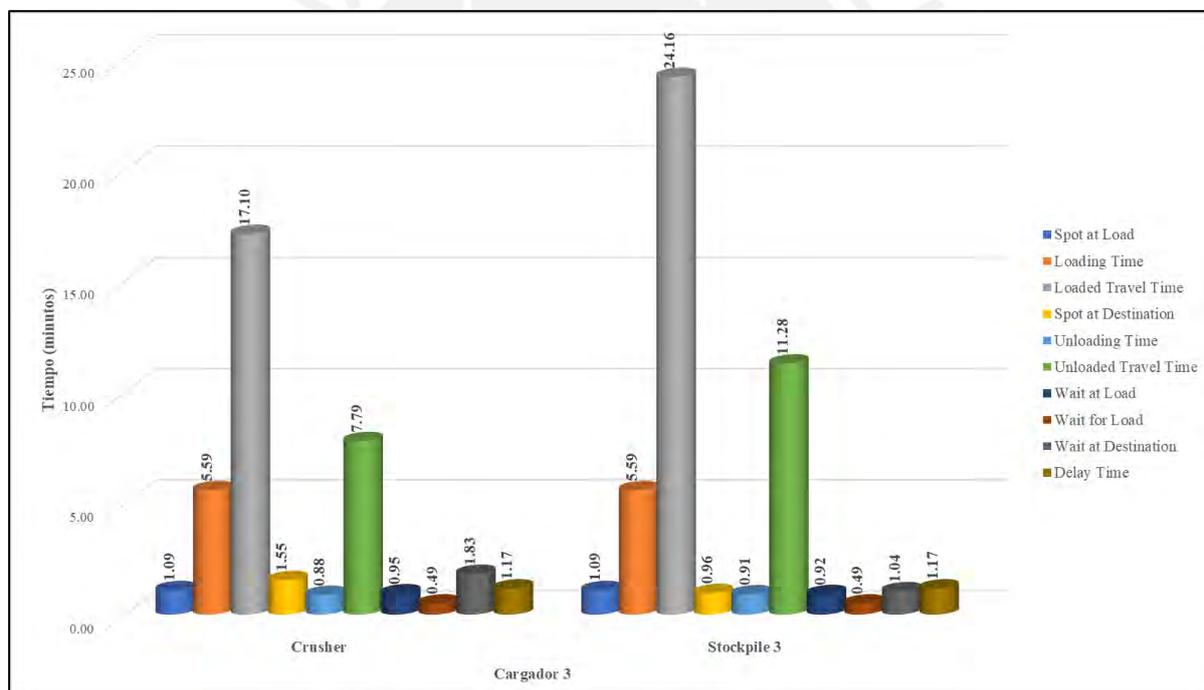


Figura 212. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 3.

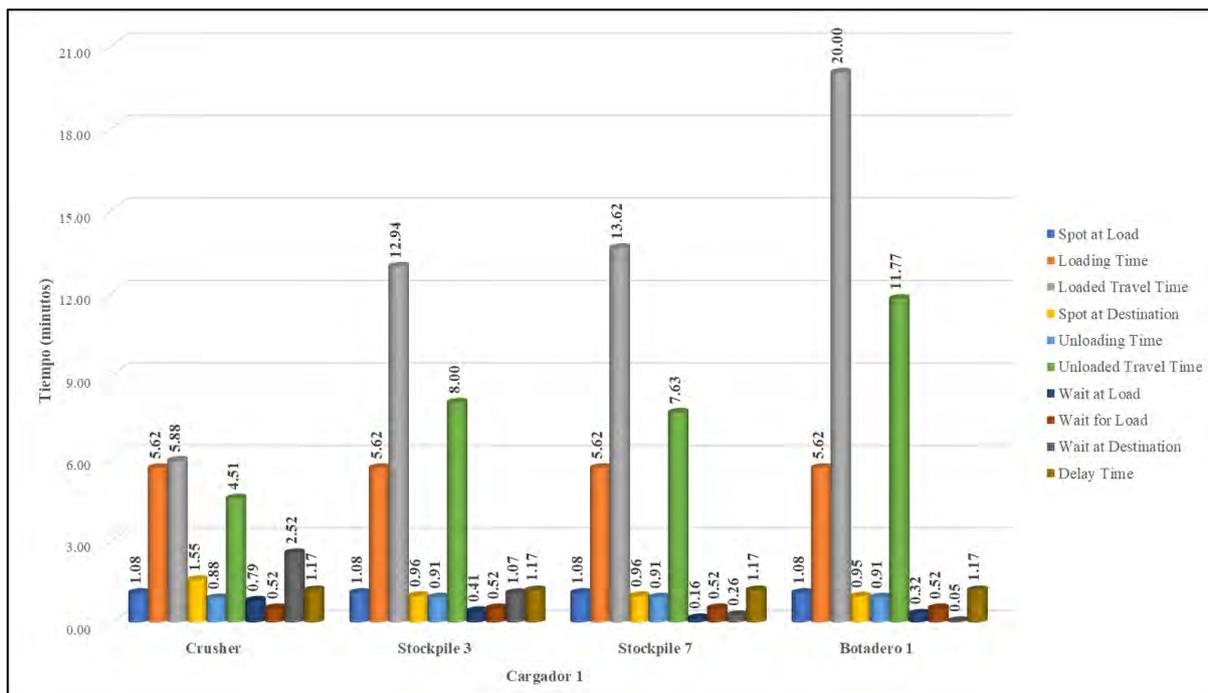


Figura 213. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 1.

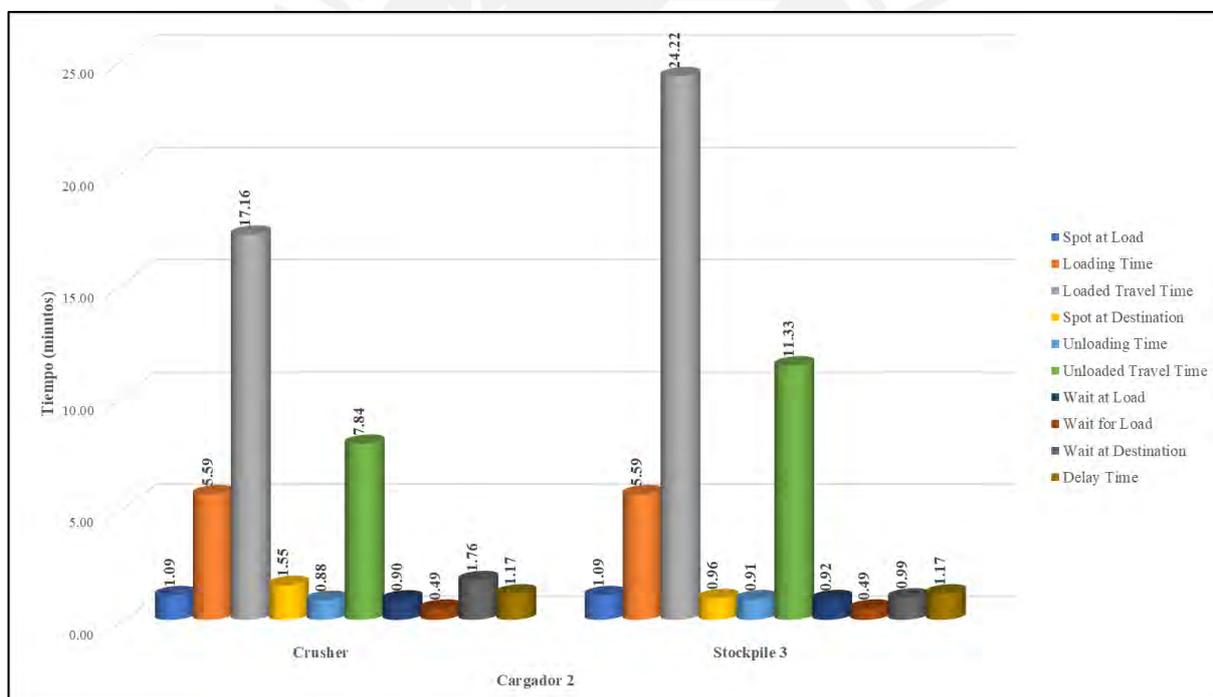


Figura 214. Ciclo total de acarreo en agosto para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 21: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante septiembre.**

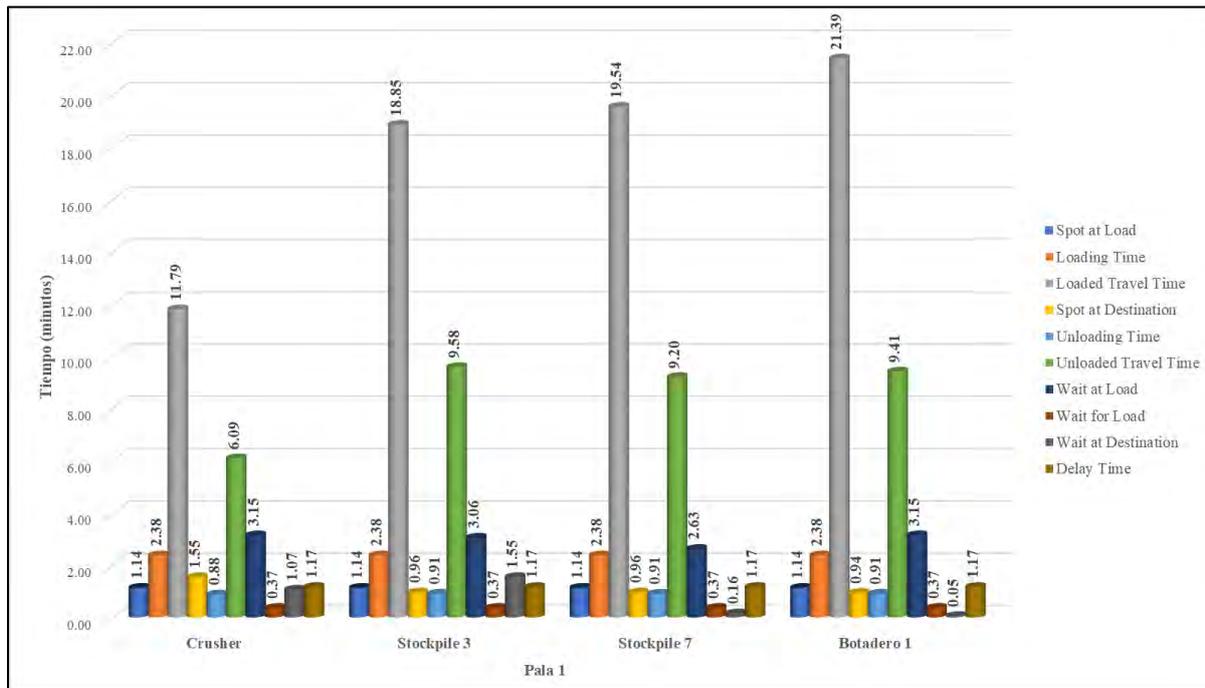


Figura 215. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 1.

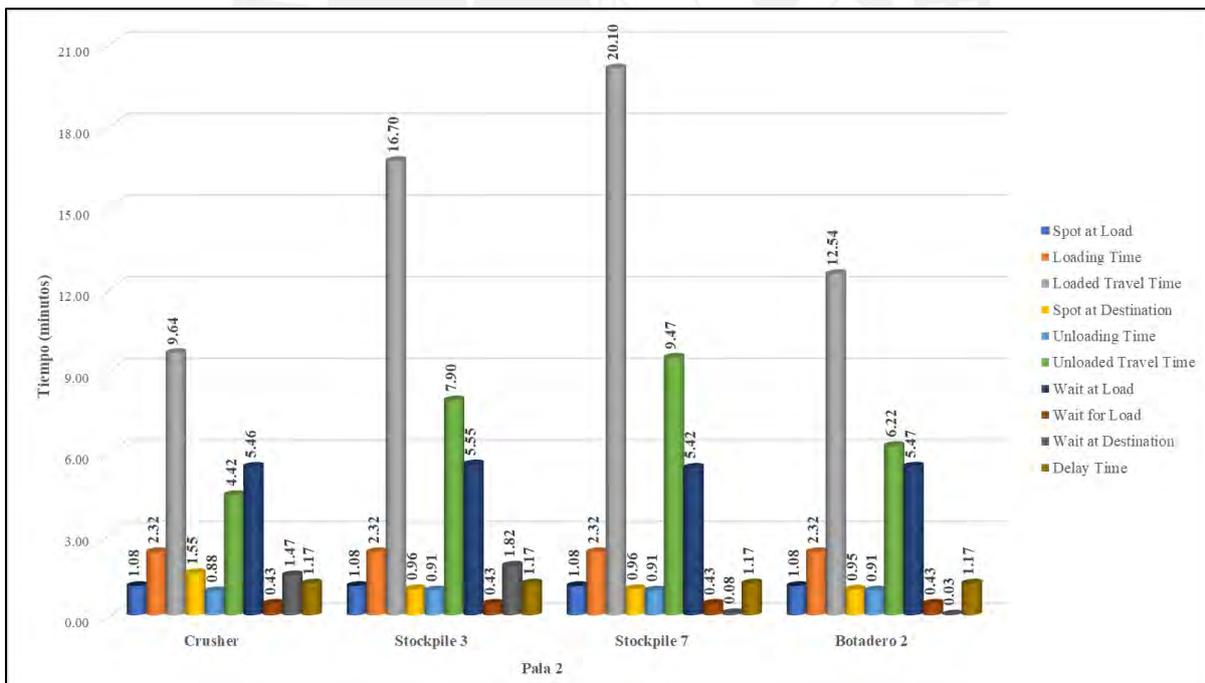


Figura 216. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 2.

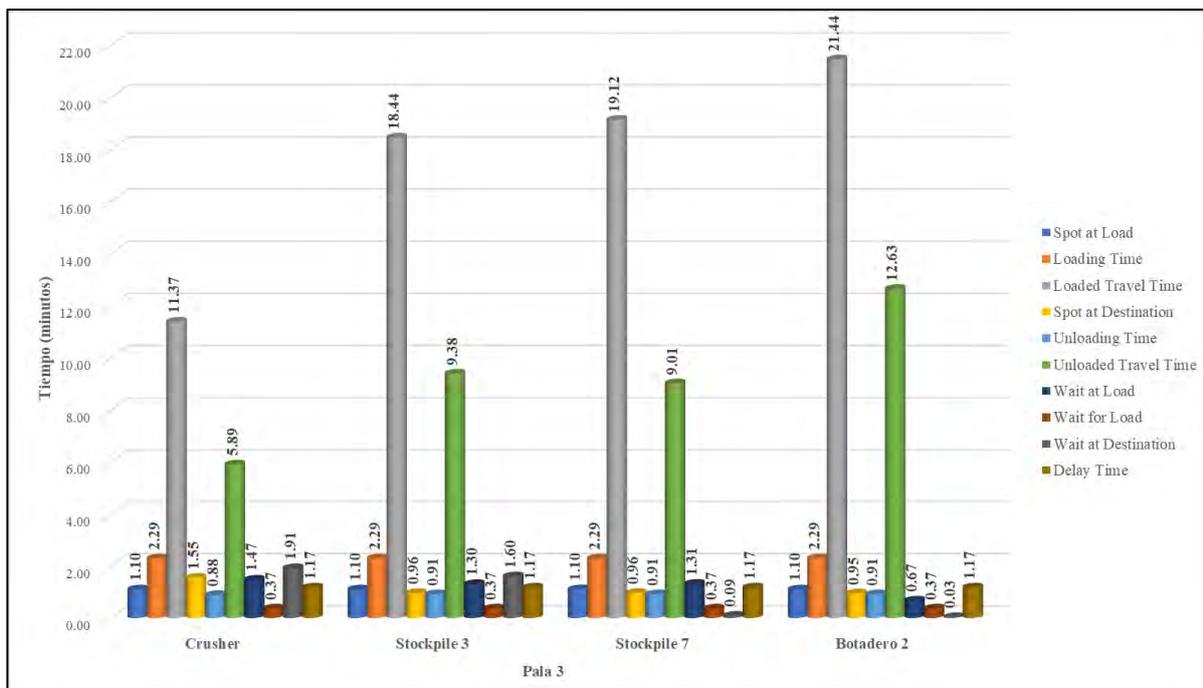


Figura 217. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada a pala 3.

El aumento en los tiempos de colas para la pala 2 se explica de igual manera que para el modelo estocástico en ese mes dado que el ciclo de transporte se reduce hasta los 29 minutos y que la distancia a recorrer alcanza los 3.91 km por viaje.

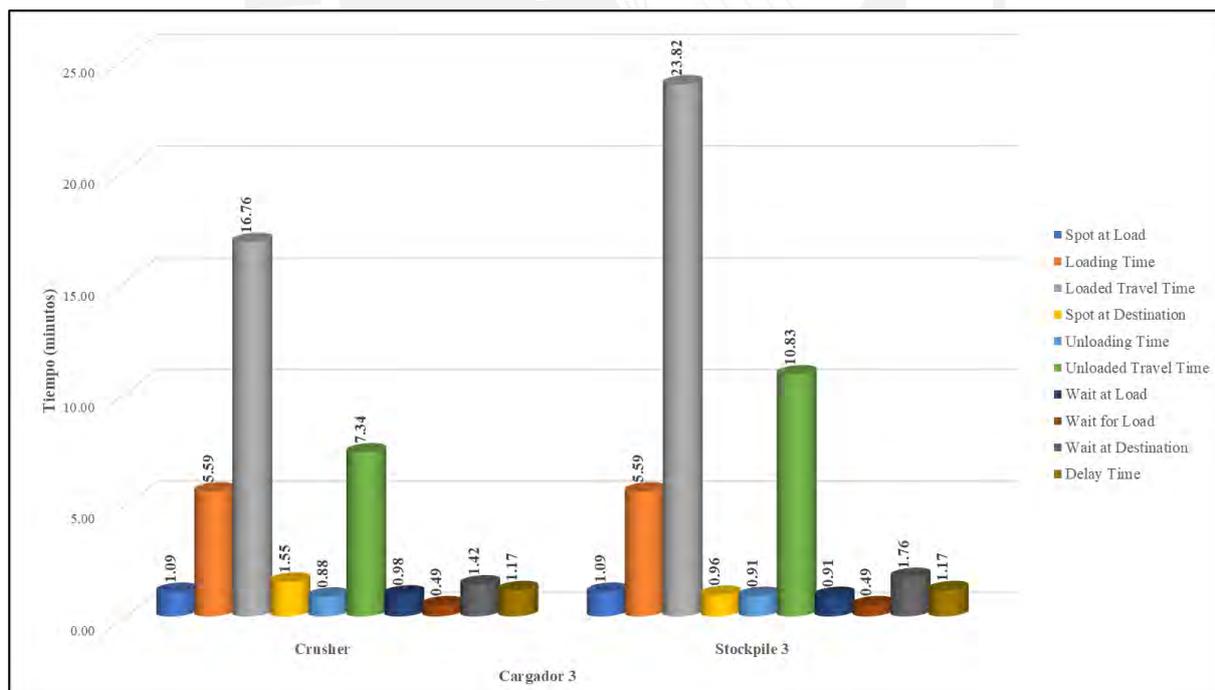


Figura 218. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 3.

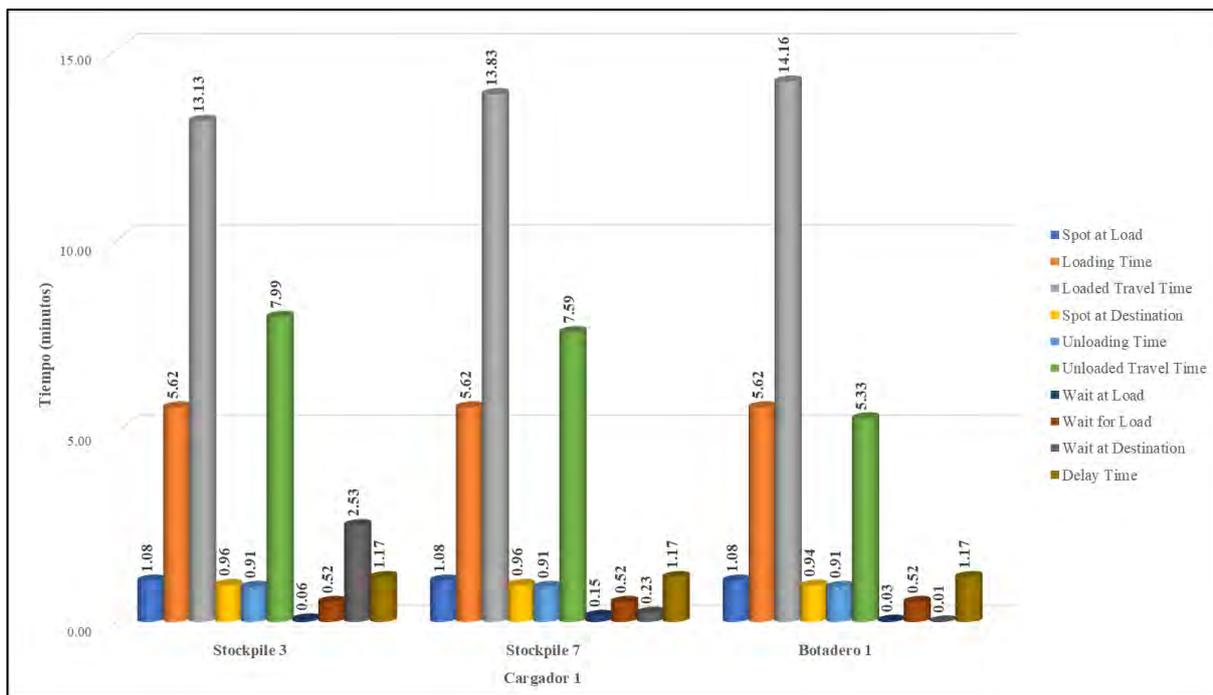


Figura 219. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 1.

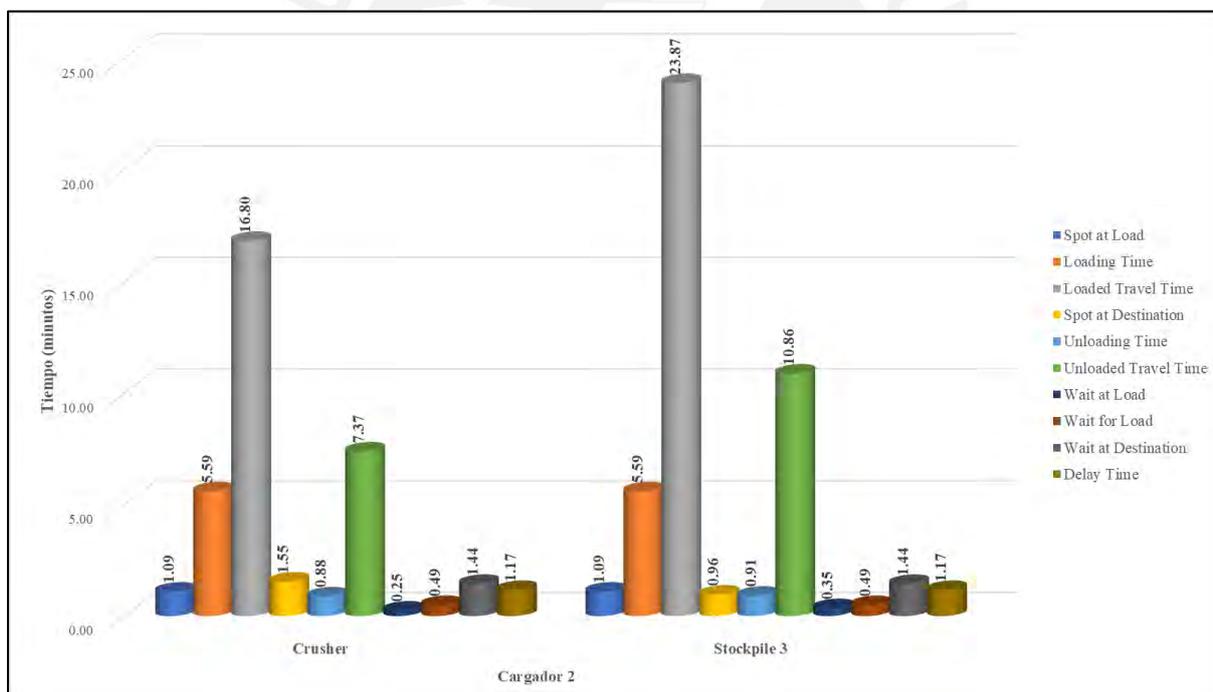


Figura 220. Ciclo total de acarreo en septiembre para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 22: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante octubre.**

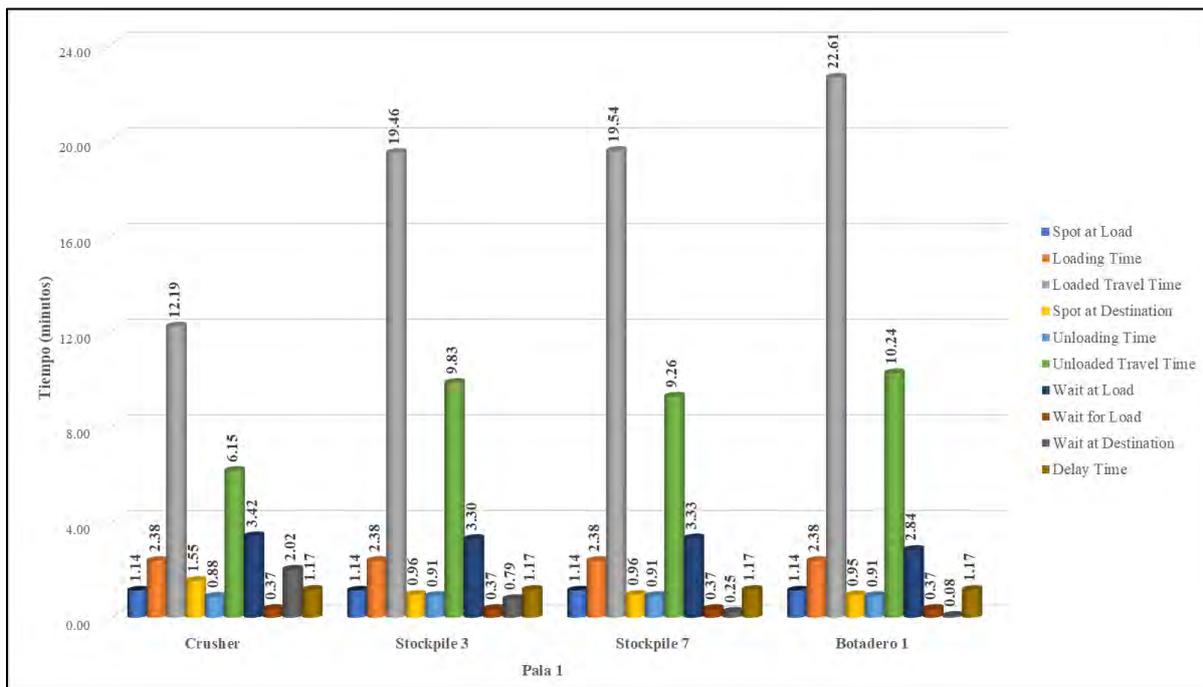


Figura 221. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 1.

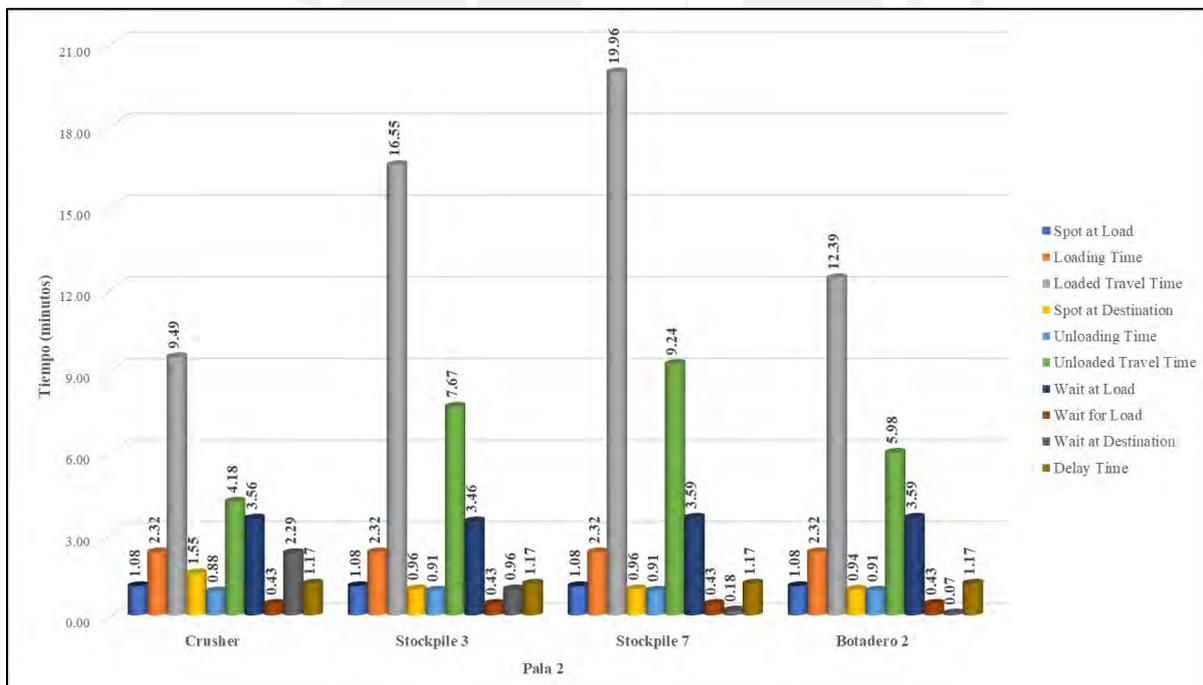


Figura 222. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 2.

Al igual que el mes anterior, en la pala 2 se observa que el tiempo de cola alcanza los 3.6 minutos. Ello es producto de que el tiempo del ciclo de los camiones asignados a esta pala se mantiene con respecto al mes anterior ya que los volquetes recorren una distancia aproximada

de 3.74 km por viaje. Estos menores tiempos de recorrido junto al incremento del número camiones asignados genera este resultado de tiempo de colas.

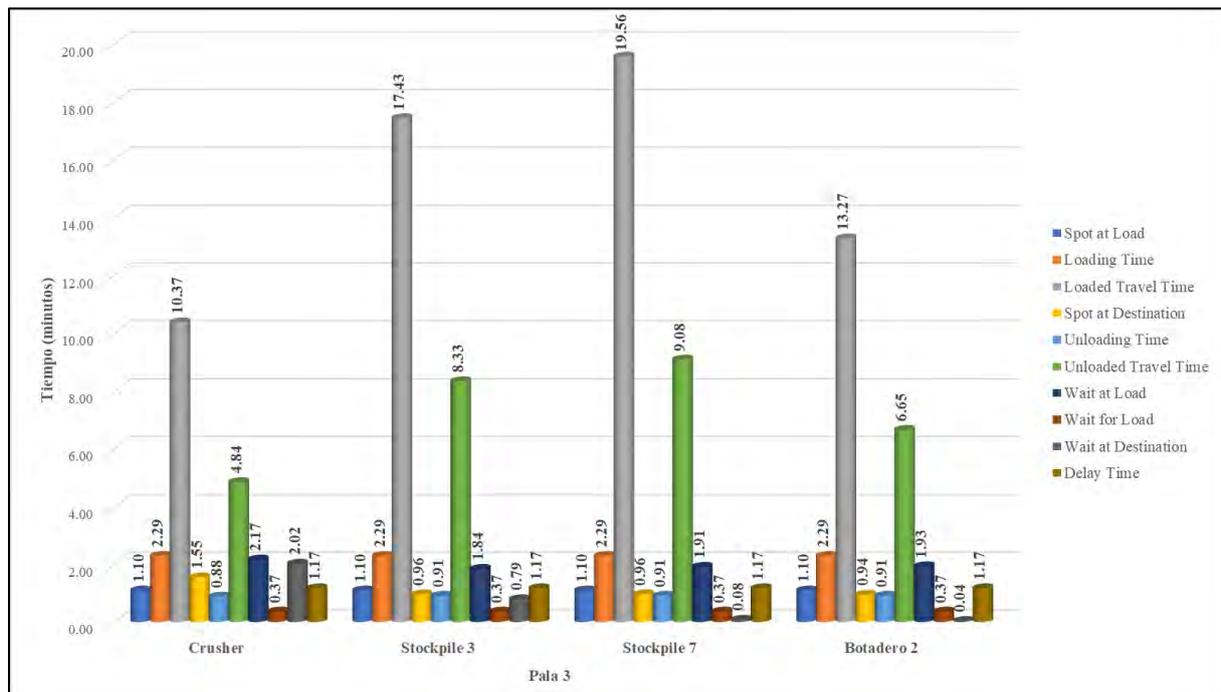


Figura 223. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada a pala 3.

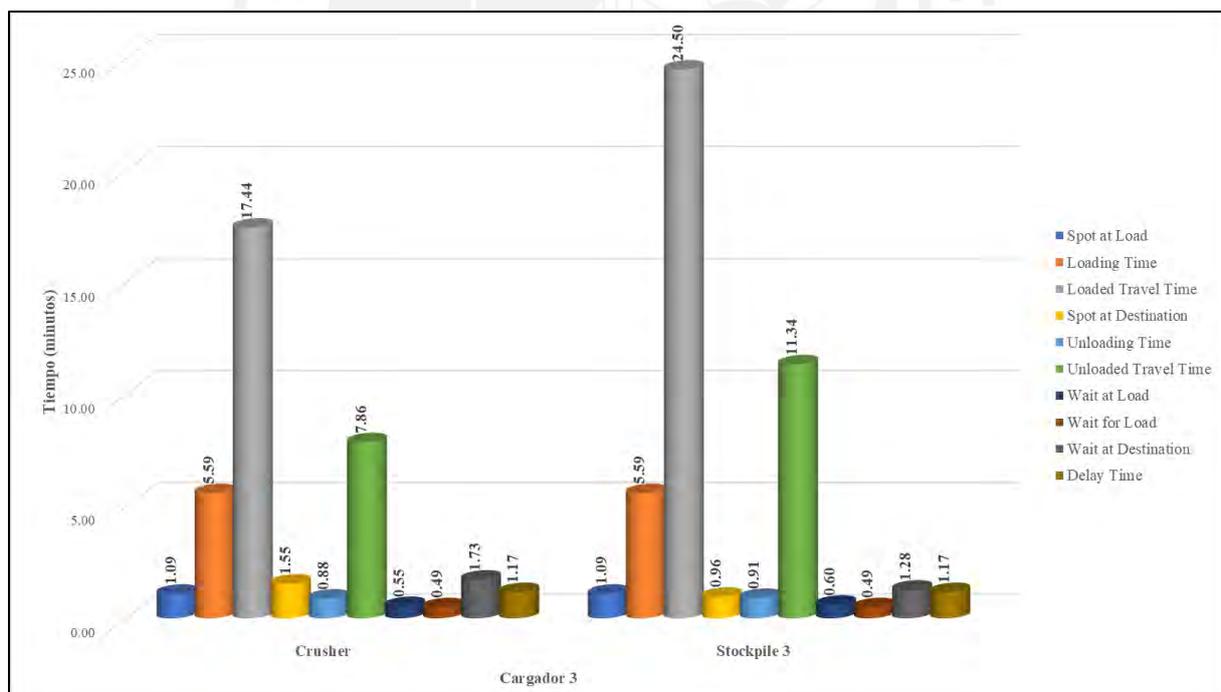


Figura 224. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 3.

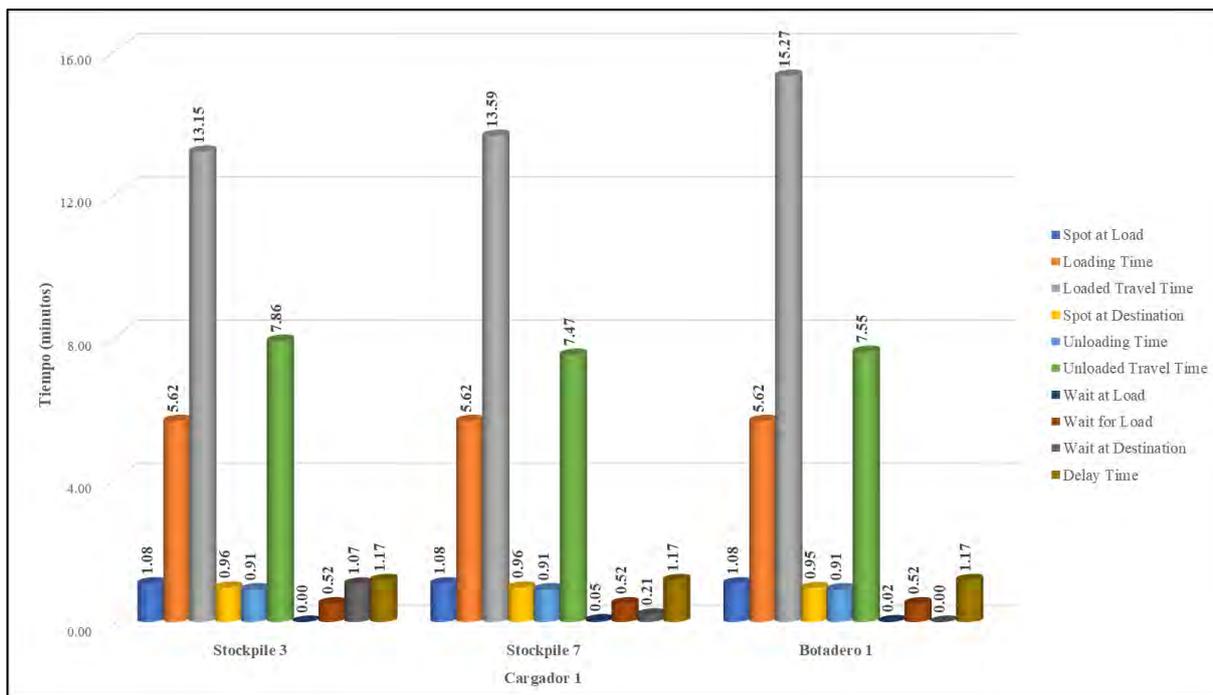


Figura 225. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 1.

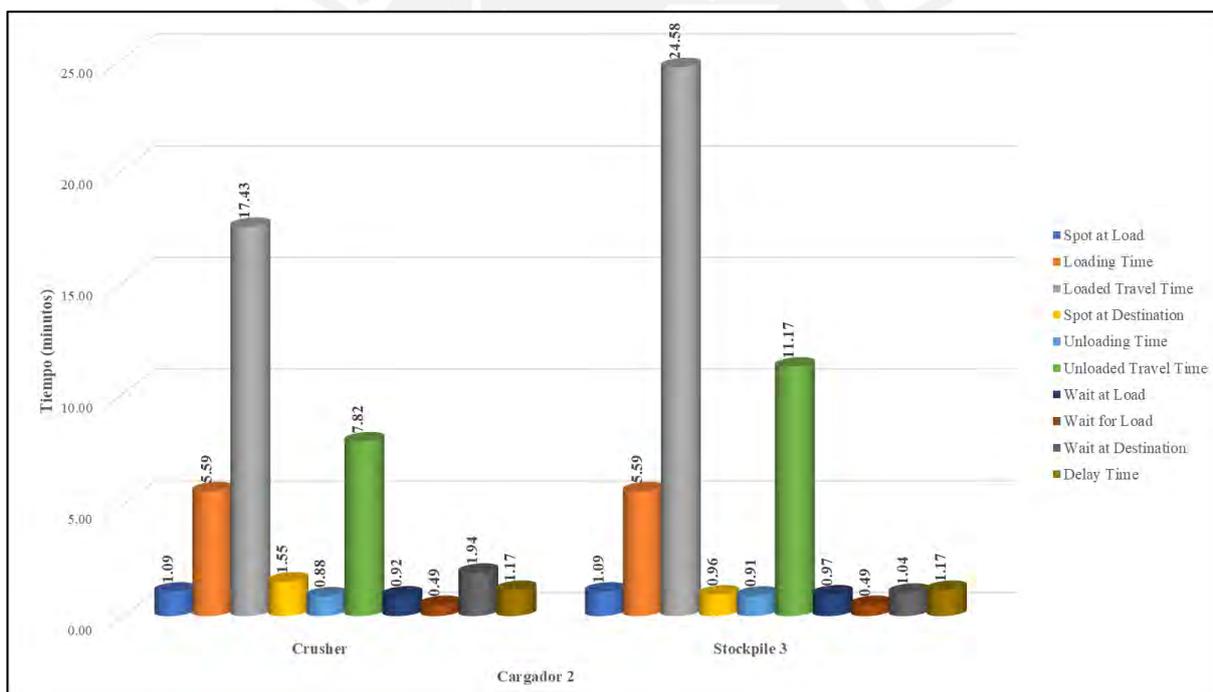


Figura 226. Ciclo total de acarreo en octubre para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 23: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante noviembre.**

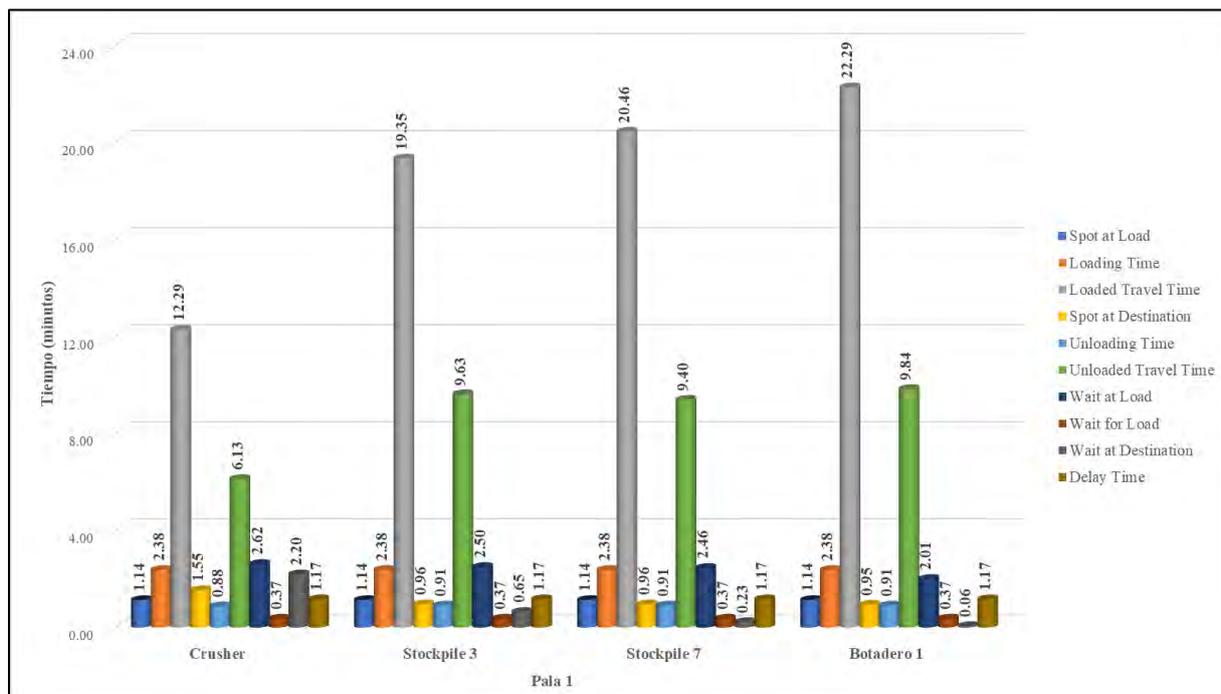


Figura 227. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 1.

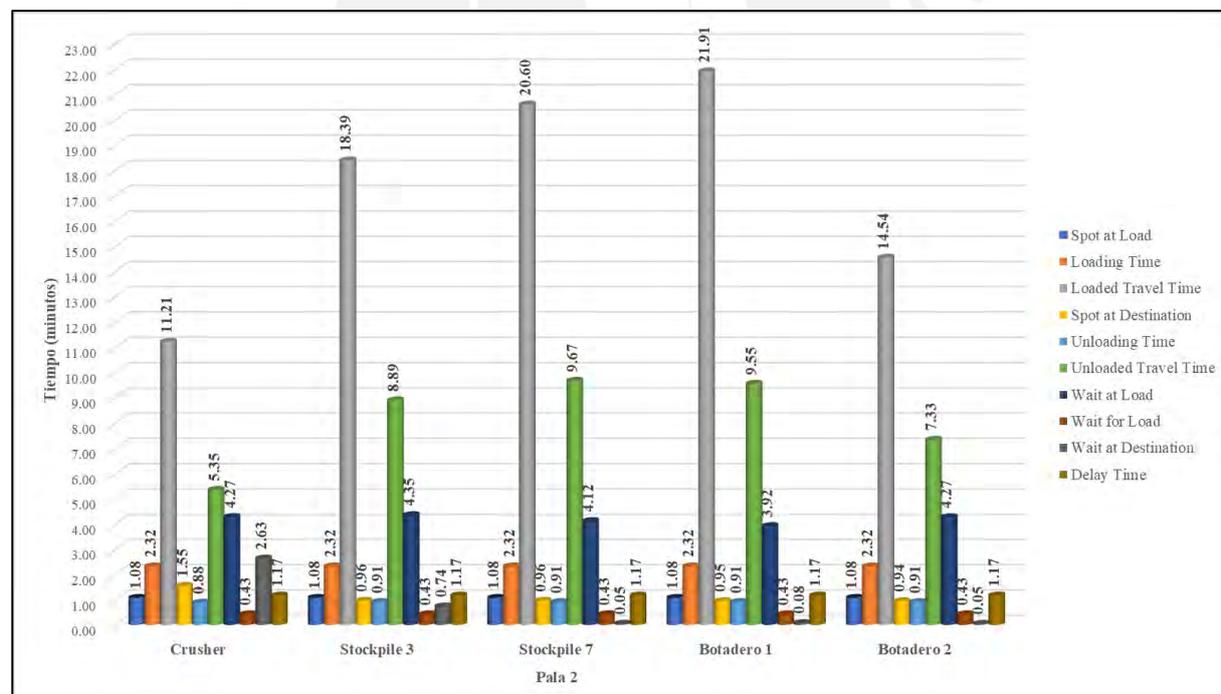


Figura 228. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 2.

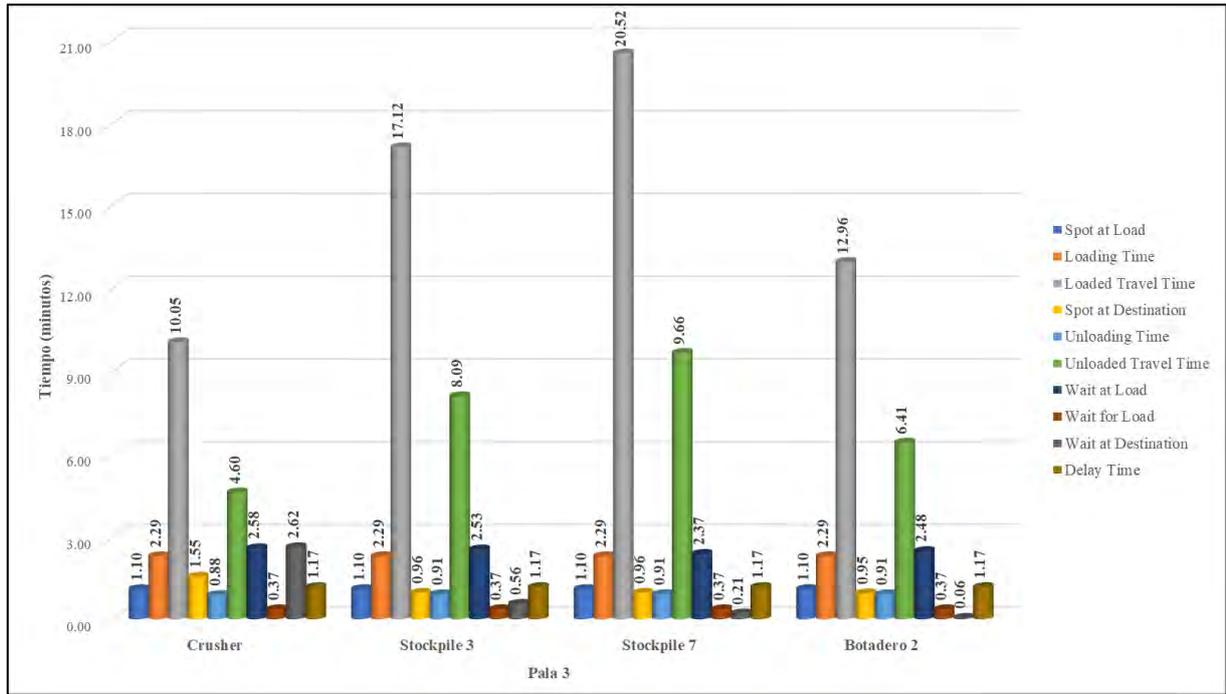


Figura 229. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada a pala 3.

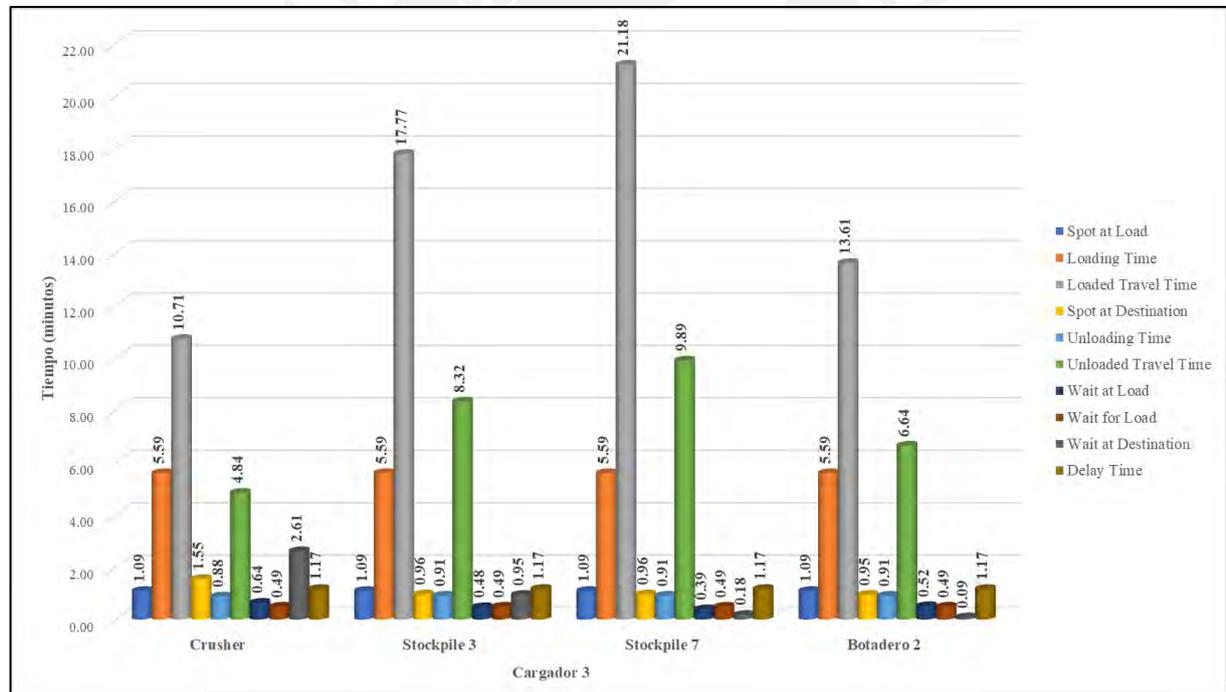


Figura 230. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 3.

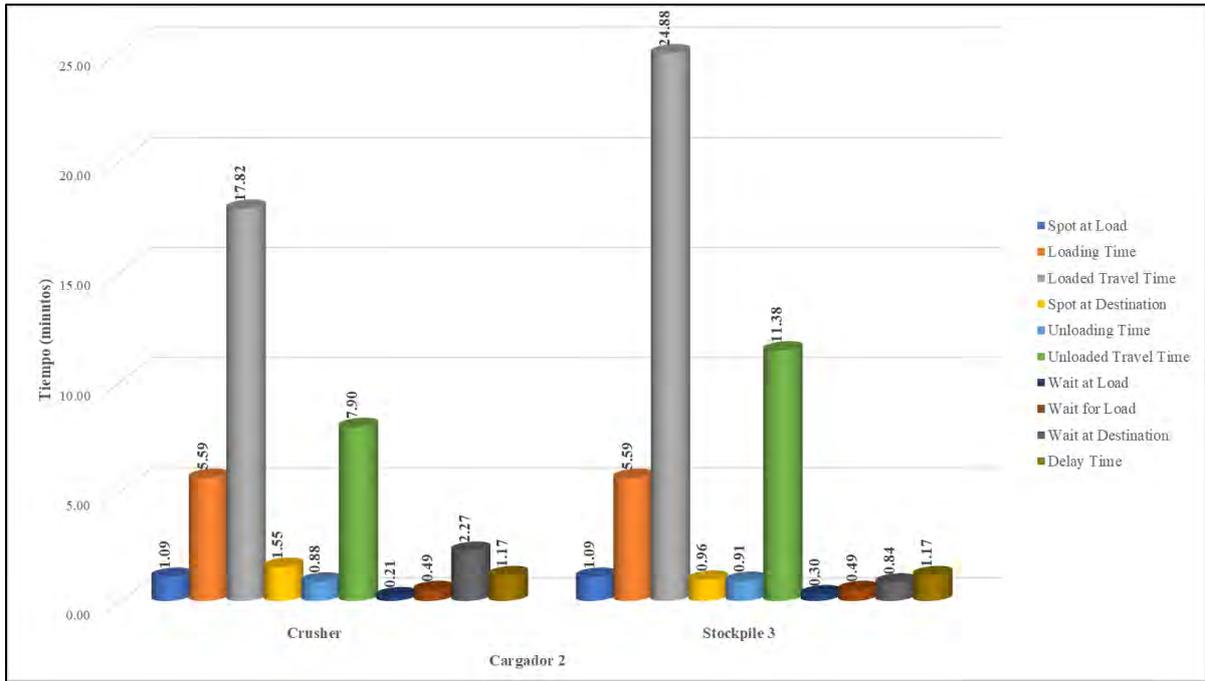


Figura 231. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 1.

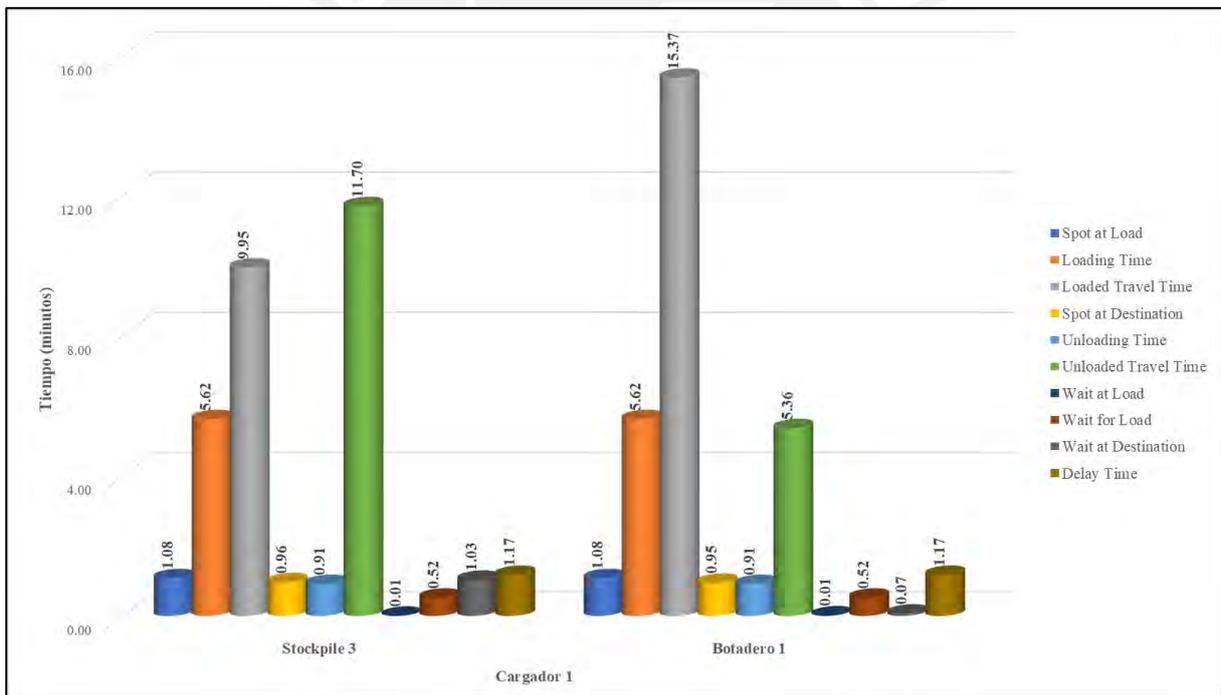


Figura 232. Ciclo total de acarreo en noviembre para la flota asignada al cargador 2.

**Anexo 24: Ciclo total de acarreo para camiones en el modelo determinístico durante diciembre.**

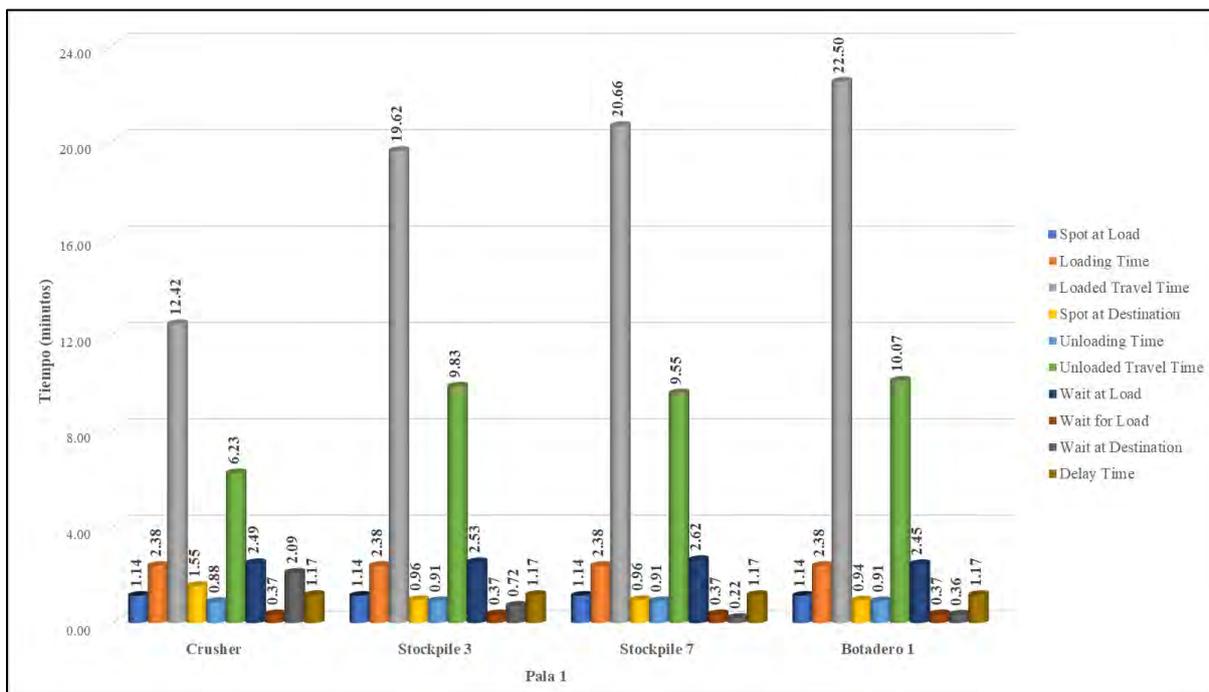


Figura 233. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 1.

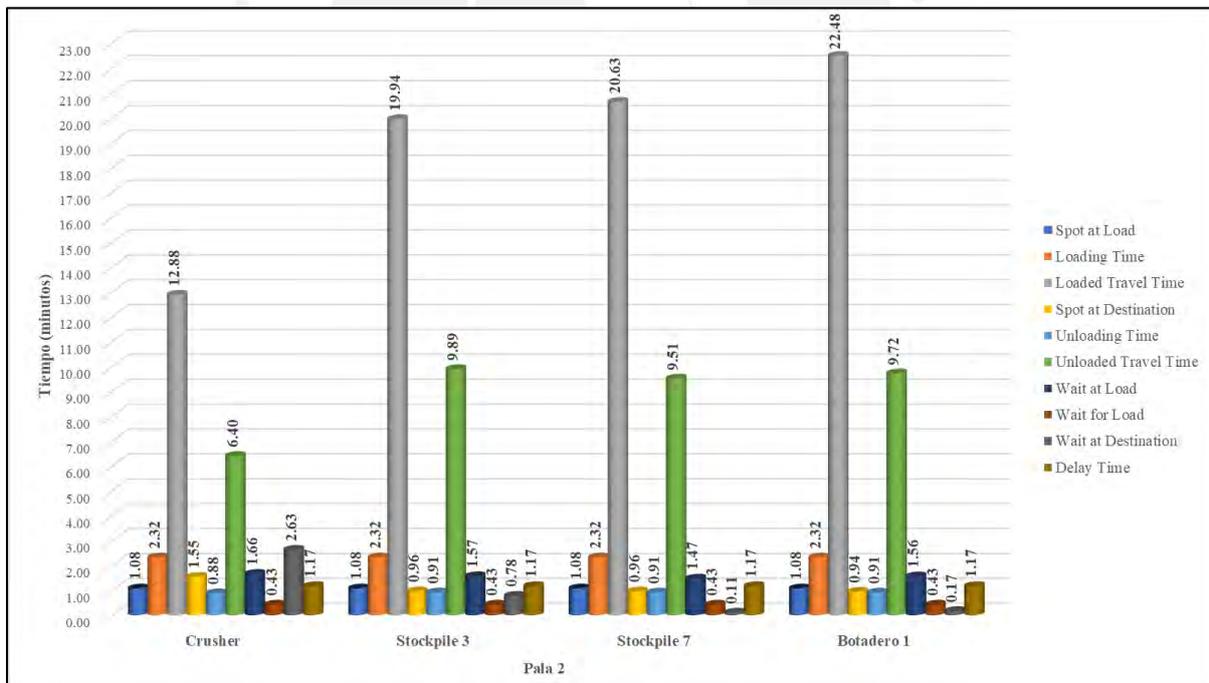


Figura 234. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 2.

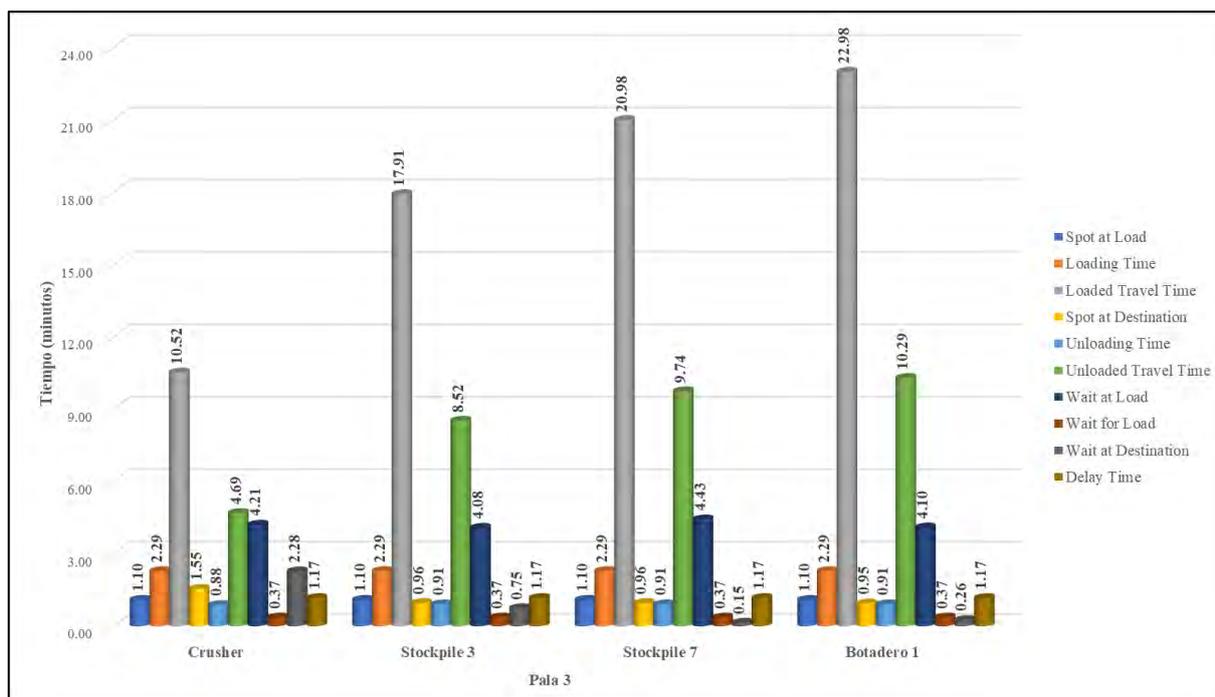


Figura 235. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada a pala 3.

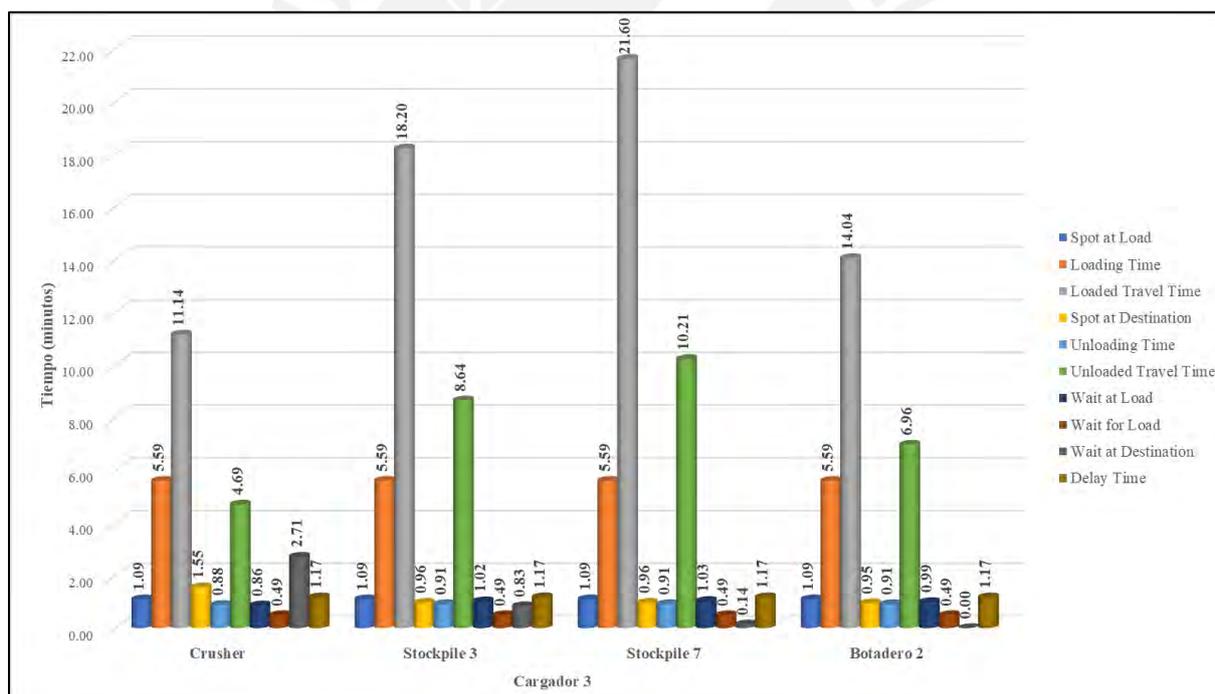


Figura 236. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 3.

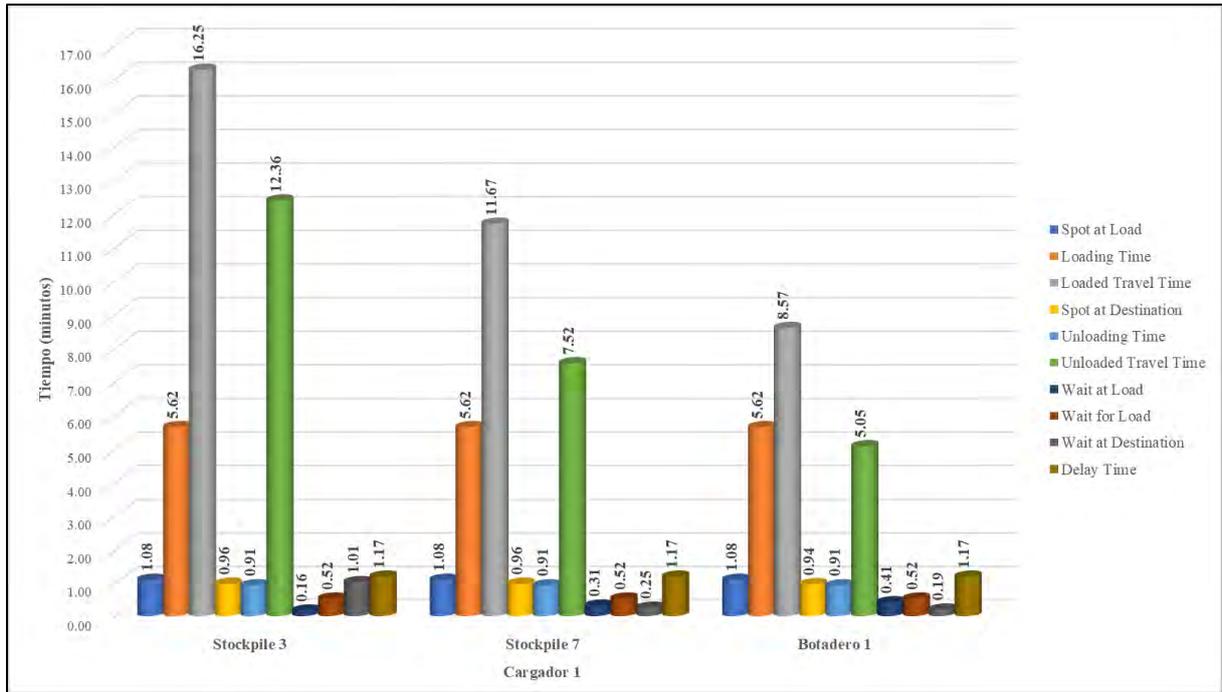


Figura 237. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 1.

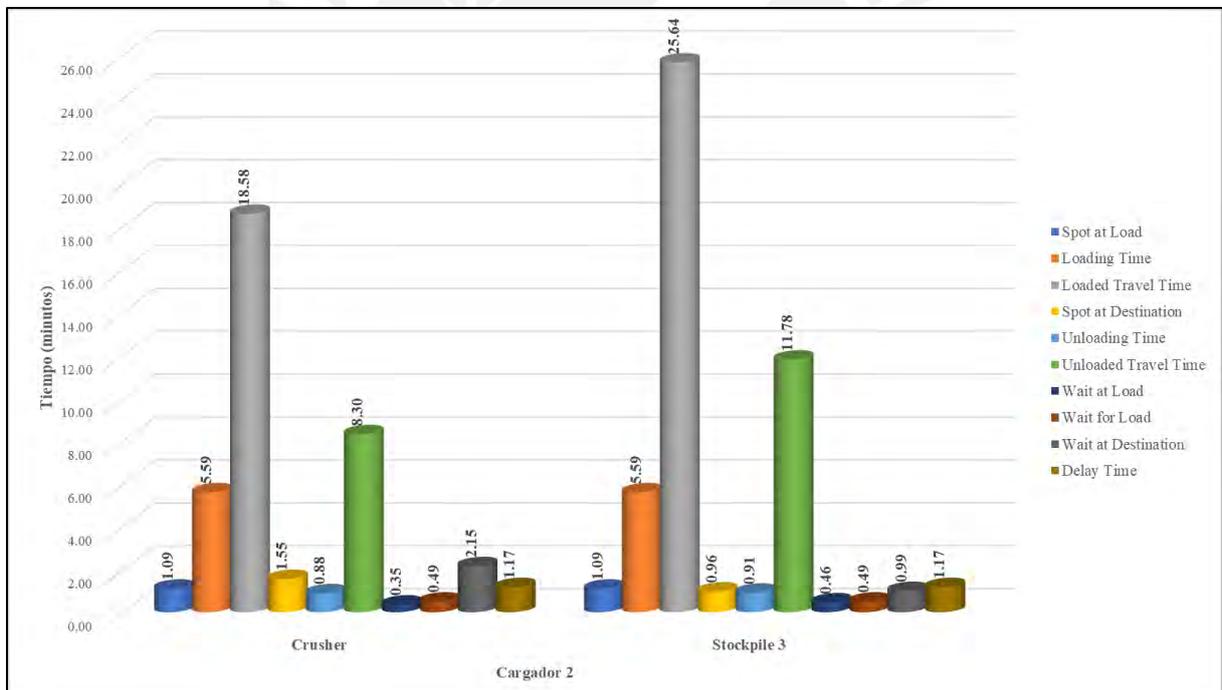


Figura 238. Ciclo total de acarreo en diciembre para la flota asignada al cargador 2.

## Anexo 25: Resultados producidos por el desarrollo del presente documento

Aceptación del artículo “**Application of Discrete-Event Simulation for Truck Fleet Estimation at an Open-Pit Copper Mine in Peru**” en la revista MDPI Applied Sciences.

**Abstract:** With production expansions, studies related to estimating the number of pieces of hauling equipment to be employed in open-pit mines have to be carried out. One of the main challenges comes from the methodology selected since numerous tools are available, including commercial solutions. However, given that some methodologies were complex or required an advanced understanding of programming languages and that, in the case study, the mining company was applying a deterministic approach, a stochastic methodology that involves a discrete-event simulation (DES) was proposed. Such an approach aimed to develop a calibration model whose inputs incorporated random variables, such as fixed times and tonnages loaded to hauling equipment. This model supported the replication of the yearly production plan for an open-pit copper mine in Peru located at 4500 masl that is expanding its operations in 2023 from 100,000 tons per day to 140,000. The results obtained from the stochastic methodology were compared with the deterministic approach, which showed that the stochastic model required additional trucks and that longer cycle times were generated from such an approach. Such outputs are now supporting engineers in anticipating future problems in the mine due to the generation of longer queues.

