

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**ESCUELA DE POSGRADO**



**VIABILIDAD DEL USO DE DRONES EN LA DETECCIÓN DE  
FALLAS/DETERIOROS EN CAMINOS MINEROS DE ACARREO DE  
MINERAL/MATERIAL**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO  
DE MAGÍSTER EN REGULACIÓN, GESTIÓN Y ECONOMÍA MINERA**

**AUTOR**

**ARRASCUE FUENTES, CARLOS ALONSO**

**ASESOR**

**GALVÁN LANDAVERE, RAFAEL JESÚS**

**Mayo, 2021**

## RESUMEN EJECUTIVO

El siguiente trabajo de investigación tiene el objeto de explorar la viabilidad del uso de vehículos aéreos no tripulados para mejorar la gestión de los caminos. Estos caminos sufren deterioros debido al tránsito de vehículos de carga pesada y a fenómenos climatológicos. A mayor presencia de deterioros, la productividad se reduce y la rentabilidad disminuye. La detección oportuna de fallas posibilita una gestión eficiente. Según la literatura, se puede originar un ahorro de hasta el 10% de los costos de transporte.

En el desarrollo de esta investigación se recopilan los resultados de tres tesis que tratan sobre la gestión de vías de acarreo y el impacto sobre cuatro parámetros: ciclo de producción, velocidad de acarreo, consumo de combustible y disponibilidad mecánica. Respecto del proceso de identificación de daños en caminos pavimentados, se toma la idea del uso de cámaras en combinación con vehículos aéreos para la detección de fallas en las vías de acarreo. Así mismo, se estima el tiempo y costo del servicio para una evaluación de 10 km. de vía. Para esta longitud, el precio podría aproximarse a USD 10,582 con un plazo de 6 días.

Finalmente, el trabajo de investigación cumple con el objetivo de explorar el uso de esta tecnología, compara su aplicación con otras soluciones existentes y encuentra argumentos suficientes para confirmar la viabilidad. Así mismo, se ha diseñado una metodología básica que puede servir de guía para trabajos de investigación futura. Por último, en el estado del arte, un subcapítulo da cuenta de la inteligencia artificial que, añadida a esta tecnología, puede lograr el reconocimiento automatizado y en tiempo real (video).

## ABSTRACT

This research explores the feasibility of using unmanned aerial vehicles to improve the management of roads. Haulage roads suffer deterioration due to the traffic of heavy-duty vehicles and weather. Haulage roads deterioration reduce productivity and profitability. Early detection of failures allows efficient management. Savings up to 10% in transport costs can be generated according to the literature.

This work shows the results of three studies about haulage roads management and its positive impact on four parameters: the production cycle, haulage speed, fuel consumption and mechanical availability. Using cameras along with aerial vehicles for this research was taken due its application on paved roads. Likewise, service time and cost were estimated for an evaluation of 10 km. The price could reach USD 10,582 with 6 days of processing for this length.

Finally, the research work fulfills the objective of exploring the use of this technology, compares its application with other existing solutions and finds strong arguments to confirm the feasibility. Likewise, a methodology has been designed and could serve as a guide for future research. Finally, state of the art gives an approach of artificial intelligence which along with this technology could achieve automated recognition such as real-time recognition by video for example.

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios, que por su divina misericordia y providencia tuve esta valiosa oportunidad.*

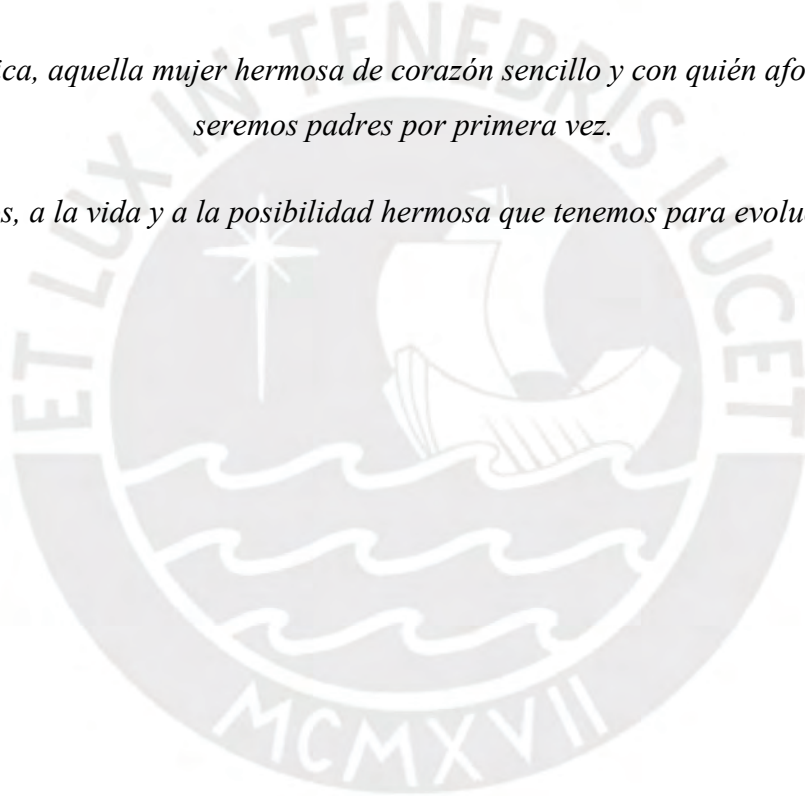
*A mi padre, a quién Dios llamó a su lado hace poco, pero cuyo ejemplo de pasión, perseverancia y paciencia ha quedado en mí.*

*A mi madre, una compañera incansable que siempre está dispuesta a servir.*

*A mis hermanos, por caminar conmigo y ser mis cómplices de vida.*

*Y para Angélica, aquella mujer hermosa de corazón sencillo y con quién afortunadamente seremos padres por primera vez.*

*Gracias a Dios, a la vida y a la posibilidad hermosa que tenemos para evolucionar en ella.*



# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>IX</b>
<b>1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE</b>	<b>5</b>
<b>2.1 INDUSTRIA MINERA: RENTABILIDAD Y COSTOS DE TRANSPORTE</b>	<b>5</b>
2.1.1 RENTABILIDAD EN LA INDUSTRIA MINERA	5
2.1.2 COSTOS DE LA INDUSTRIA MINERA	6
2.1.2.1 COSTOS TOTALES DE PRODUCCIÓN	7
2.1.2.2 COSTOS DE TRANSPORTE	8
<b>2.2 TRANSPORTE MINERO: SISTEMA CONTINUO Y DISCONTINUO</b>	<b>9</b>
2.2.1 SISTEMA CONTINUO: FAJAS TRANSPORTADORAS	9
2.2.2 SISTEMA DISCONTINUO: VEHÍCULOS DE CARGA	10
<b>2.3 CAMINOS MINEROS: GESTIÓN Y EVALUACIÓN</b>	<b>11</b>
2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE CAMINOS MINEROS	11
2.3.2 FALLAS EN CAMINOS MINEROS: TIPOS Y CAUSAS	13
2.3.3 GESTIÓN DE CAMINOS MINEROS	14
2.3.4 METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN EN CAMINOS DE ACARREO	15
2.3.4.1 TECNOLOGÍA A BORDO DE VEHÍCULOS DE CARGA	16
2.3.4.2 EVALUACIÓN DE CAMINOS A TRAVÉS DE LA RUGOSIDAD	16
<b>2.4 EVALUACIÓN DE FALLAS: CAMINOS PAVIMENTADOS Y NO PAVIMENTADOS</b>	<b>17</b>
2.4.1 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE FALLAS EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS:	17
2.4.1.1 TIPOS DE FALLAS EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS	17
2.4.1.2 METODOLOGÍA DE CALIFICACIÓN DE CAMINOS NO PAVIMENTADOS	19
2.4.1.3 TIPOS DE INTERVENCIONES EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS:	23
2.4.1.4 MÉTODO URCI (UNPAVED ROAD CONDITION INDEX)	23
2.4.2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE FALLAS EN CAMINOS PAVIMENTADOS:	26
2.4.2.1 MÉTODO MANUAL Y VISUAL:	26
2.4.2.2 MÉTODO SEMIAUTOMÁTICO O AUTOMÁTICO:	27
<b>2.5 USO DE DRONES EN LA MINERÍA</b>	<b>30</b>
2.5.1 TIPOS DE DRON UTILIZADOS EN MINERÍA A CIELO ABIERTO	34
2.5.2 TIPOS DE SENSORES:	36
<b>2.6 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES: TÉCNICAS PARA CAMINOS</b>	<b>37</b>
2.6.1 SISTEMAS DIFUSOS:	38
2.6.2 REDES NEURONALES:	39
2.6.2.1 REDES MULTICAPA:	39
2.6.2.2 REDES CONVOLUCIONALES:	39
2.6.3 INTELIGENCIA DE ENJAMBRE:	40

2.6.4	SISTEMA INMUNE ARTIFICIAL:	40
2.6.5	LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN:	41
2.6.5.1	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN C:	43
2.6.5.2	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN C++:	43
2.6.5.3	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN JAVA:	43
2.6.5.4	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON:	44
2.6.6	APLICACIÓN EN CAMINOS:	47
<b>2.7</b>	<b>MARCO TEÓRICO:</b>	<b>49</b>
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO III: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>54</b>
<b>3.1</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA:</b>	<b>54</b>
<b>3.2</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO:</b>	<b>55</b>
3.2.1	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN:	55
3.2.2	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN:	56
3.2.3	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN:	57
<b>3.3</b>	<b>ANÁLISIS DEL PROBLEMA:</b>	<b>60</b>
3.3.1	ESTUDIO DE CASO:	60
3.3.2	OBJETO DE ESTUDIO: IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FALLAS	64
3.3.3	DETECCIÓN DE FALLAS: ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO	66
3.3.4	METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE ORTOFOTOS	67
3.3.4.1	TIPO DE DRONES:	67
3.3.4.2	TIPO DE CÁMARA:	68
3.3.4.3	PROCESO:	72
3.3.4.4	CONDICIONES DE OPERACIÓN	73
3.3.4.5	TIEMPO:	74
3.3.4.6	COSTO	75
3.3.4.7	ENSAYO DE CAMPO	75
3.3.5	METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN VISUAL	75
3.3.5.1	TIPO DE CÁMARA:	75
3.3.5.2	TIPO DE DRONES:	76
3.3.5.3	PROCESO:	76
3.3.5.4	TIEMPO:	77
3.3.5.5	COSTO:	78
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN</b>	<b>79</b>
4.1	HALLAZGOS DE LA INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA	79
4.2	RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DEL CASO	81
4.3	RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS CUALITATIVO	82
4.4	RESULTADOS OBTENIDO ANÁLISIS CUANTITATIVO	84
4.5	ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS	86
4.6	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	89
4.7	APORTE DEL TRABAJO Y FUTURAS INVESTIGACIONES	90
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>92</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 DETERIOROS O FALLAS EN CARRETERAS NO PAVIMENTADAS .....	18
TABLA 2 CLASE DE EXTENSIÓN DE LOS DETERIOROS/FALLAS EN CARRETERAS NO PAVIMENTADAS .....	19
TABLA 3 CLASIFICACIÓN DE DENSIDAD EN CARRETERAS NO PAVIMENTADAS .....	20
TABLA 4 MATRIZ DE PUNTUACIÓN (PARTE I) .....	21
TABLA 5 MATRIZ DE PUNTUACIÓN (PARTE II) .....	22
TABLA 6 CLASIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN (PARTE I).....	23
TABLA 7 CLASIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN (PARTE II) .....	23
TABLA 8 TIPOS DE CONSERVACIÓN SEGÚN CONDICIÓN .....	23
TABLA 9 HOJA DE EVALUACIÓN MÉTODO URCI .....	25
TABLA 10 DETERIOROS EN FALLAS O PAVIMENTOS ASFALTADOS .....	27
TABLA 11 APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL DRON EN LA INDUSTRIA MINERA	33
TABLA 12 APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL DRON EN LA INDUSTRIA MINERA	34
TABLA 13 DRONES UTILIZADOS PARA VOLADURA, TOPOGRAFÍA O GEOLOGÍA EN MINERÍA A CIELO ABIERTO.....	35
TABLA 14 ESPECIFICACIONES COMERCIALES DE DRONES USADOS EN MINERÍA ...	36
TABLA 15 USO DE SENSORES EN MINERÍA.....	37
TABLA 16 ÍNDICE TIOBE: LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN MÁS USADOS A JULIO 2020 .....	42
TABLA 17 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN: CUADRO COMPARATIVO SEGÚN CARACTERÍSTICAS .....	46
TABLA 18 RED NEURONAL DE PROPAGACIÓN HACIA ATRÁS: RESULTADOS OBTENIDOS .....	48
TABLA 19 REDES NEURONALES: RESULTADOS OBTENIDOS EN OTROS ESTUDIOS ...	49
TABLA 20 DETERIOROS O FALLAS EN CARRETERAS NO PAVIMENTADAS .....	66
TABLA 21 ATRIBUTOS SEGÚN LA METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO .....	66
TABLA 22 COMPARATIVO DE TECNOLOGÍA DRON PHANTOM Y DJI SERIE M200 .....	68
TABLA 23 GSD POR CÁMARA PARA DRON MATRICE 210 RTK .....	71
TABLA 24 DISTANCIA HORIZONTAL TOMADA SEGÚN CÁMARA DE DRON MATRICE 210 V2 RTK.....	72

TABLA 25 PROCESO DE OBTENCIÓN DE ORTOFOTOS .....	73
TABLA 26 PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS RPA .....	73
TABLA 27 TIEMPO DE PROCESAMIENTO PARA 10 KM DE VÍA NO PAVIMENTADA ....	74
TABLA 28 RECURSOS NECESARIOS PARA EVALUACIÓN DE VÍAS DE ACARREO CON DRON .....	74
TABLA 29 ETAPAS Y ACTIVIDADES DE CAMPO PARA INSPECCIÓN VISUAL EN TIEMPO REAL CON DRON.....	77
TABLA 30 TIEMPO EN CAMPO PARA INSPECCIÓN VISUAL EN TIEMPO REAL CON DRON .....	77
TABLA 31 COSTO ESTIMADO DE INSPECCIÓN VISUAL EN TIEMPO REAL CON DRON	78
TABLA 32 COSTOS DE OPERACIÓN ESTIMADO POR CADA TECNOLOGÍA.....	78
TABLA 33 LÍMITES DE SEVERIDAD PARA BACHES SEGÚN METODOLOGÍA URCI .....	80
TABLA 34 MEJORAS OBTENIDAS MEDIANTE LA GESTIÓN DE VÍAS .....	81
TABLA 35 DRONES UTILIZADOS PARA VOLADURA, TOPOGRAFÍA O GEOLOGÍA EN MINERÍA A CIELO ABIERTO.....	82
TABLA 36 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MATRICE 210 V2 RTK.....	83
TABLA 37 EQUIPAMIENTO DEL MATRICE 210 V2 RTK.....	83
TABLA 38 GSD POR CÁMARA PARA DRON MATRICE 210 RTK .....	84
TABLA 39 DISTANCIA HORIZONTAL TOMADA SEGÚN CÁMARA DE DRON MATRICE 210 V2 RTK.....	84
TABLA 40 PRECIO SERVICIO DE DRON MATRICE 210 V2 RTK PARA 10 KM. ....	85
TABLA 41 TIEMPO SERVICIO DE DRON MATRICE 210 V2 RTK PARA 10 KM.....	85
TABLA 42 CUADRO COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS PARA LA DETECCIÓN DE DETERIOROS.....	86
TABLA 43 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE CADA TECNOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS.....	89
TABLA 44 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL USO DE TECNOLOGÍA RPA EN LA DETECCIÓN DE FALLAS.....	90



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CADENA DE VALOR DE UNA OPERACIÓN MINERA.....	5
FIGURA 2. FAJAS TRANSPORTADORAS.....	10
FIGURA 3. VEHÍCULOS DE CARGA PARA ACARREO .....	11
FIGURA 4. TIPO DE FALLAS EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS.....	19
FIGURA 5. INSPECCIÓN VISUAL EN CAMPO: ANALISTA CON ODÓMETRO .....	26
FIGURA 6. DETECCIÓN DE FALLAS: TECNOLOGÍA LIDAR.....	28
FIGURA 7. EJEMPLO DE IMÁGENES TOMADAS POR TECNOLOGÍA LIDAR .....	28
FIGURA 8. DETECCIÓN DE FALLAS: TECNOLOGÍA LÁSER 3D.....	29
FIGURA 9. COMPARATIVO DE IMÁGENES TOMADA EM 2D Y 3D COM TECNOLOGIA LÁSER.....	29
FIGURA 10. LÍNEA DE TIEMPO EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL DRON .....	31
FIGURA 11. TIPOS DE SENSORES USADOS EN DRONES .....	37
FIGURA 12. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN: LÍNEAS DE TIEMPO .....	43
FIGURA 13. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN: EJEMPLO DE SINTAXIS 1.....	44
FIGURA 14. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN: EJEMPLO DE SINTAXIS 2.....	45
FIGURA 15. FASES PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES .....	47
FIGURA 16. SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES: FISURAS Y PIEL DE COCODRILO .....	48
FIGURA 17. COSTOS DE EXTRACCIÓN V.S. PRECIO DEL COBRE .....	50
FIGURA 18. CONDICIÓN DE LA VÍA CON Y SIN MANTENIMIENTO .....	52
FIGURA 19. RESULTADOS TESIS DEL AUTOR FRANO MARINOVICH .....	61
FIGURA 20. RESULTADOS TESIS DEL AUTOR PERCY MARAVÍ.....	62
FIGURA 21. RESULTADOS TESIS DEL AUTOR BLADIMIR .....	64
FIGURA 22. PHANTOM 4 PRO V.S. MATRICE 210 RTK V2.....	68
FIGURA 23. EJEMPLO DE EXACTITUD DETERMINADO POR EL GROUND SAMPLING DISTANCE .....	69
FIGURA 24. PARÁMETROS PARA EL CÁLULOS DEL GROUND SAMPLING DISTANCE	70
FIGURA 25. ENSAYO DE CAMPO CON DRON DJI M210 V2 RTK .....	75
FIGURA 26. CÁMARA DE DRON ZENMUSSE Z30 .....	76

# 1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En el marco de la presente Maestría de Gestión, Regulación y Economía Minera; el tema de investigación aquí desarrollado está contenido en el ámbito de la gestión y; particularmente, en el campo de las actividades de explotación de las compañías mineras a tajo abierto. Específicamente, se circunscribirá a la gestión del mantenimiento de los caminos de transporte de mineral y/o material a través de la recolección de datos sobre el estado de los mismos y el procesamiento de esta información para realizar gestión sobre estos caminos, también llamados vías de acarreo.

El tema que se desarrollará será la ***“Viabilidad del uso del uso de drones en la detección de fallas o deterioros en caminos mineros de acarreo de mineral /material”***. Esta propuesta de innovación - que se desarrollará en torno a las vías utilizadas para el proceso de transporte de mineral – busca detectar las fallas o daños presentes en estos caminos; los cuáles, además de elevar los costos de operación, reducen la productividad de la operación. Se abordarán temas relacionados a la rentabilidad minera, la gestión y costos del transporte, los avances en los métodos de evaluación de fallas así como el uso de tecnología dron en el ámbito minero.

Los cuatro pilares sobre los que recae la rentabilidad de la industria minera son: el precio de los metales, la cantidad del mineral producido, el capital invertido y los costos de producción (De Giorgis, 2016). Así mismo, factores como la variación constante del precio de los metales y; el incremento de las responsabilidades sociales y ambientales son los que motivan a las organizaciones a buscar cada vez mayor eficiencia y mejoras en sus procesos (Almeida et al., 2019).

Por tanto, la rentabilidad de una operación minera está directamente relacionada a la estrategia y el control de costos que se realice sobre la misma. Así, dado que la naturaleza de estas operaciones involucra largos periodos, se debe buscar constantemente soluciones que ayuden al propósito de optimizar los costos, elevar la productividad y; en consecuencia, la rentabilidad. En este escenario, las organizaciones realizan un mapeo de los procesos operacionales para determinar aquellos costos de mayor impacto (Almeida et al., 2019).

Los costos de transporte pueden significar entre el 40% y el 60% de los costos operacionales totales (Tannant & Regensburg, 2001). En la misma línea, Thompson afirma que aproximadamente el 50% de los costos dependen de este proceso (Thompson, 2010). Por tanto, la estrategia de gestión sobre estos costos resulta ser una parte importante para la obtención de procesos más económicos y eficientes. Dados los principales sistemas de transporte utilizados en minería - el continuo de fajas transportadoras y el discontinuo con vehículos de carga - este desafío se concentrará en mejorar la productividad del segundo a través de la gestión de las vías de acarreo.

Estos caminos destinados para el transporte de material se construyen en rampas con cierto ángulo de inclinación y son no pavimentados dado el tiempo y la naturaleza de la carga que deben soportar. Como escriben los autores Pradena, Mery y Novoa en su artículo “Estabilización y mantenimiento de caminos no pavimentados sometidos a condiciones de hielo-nieve en zona de montaña”:

*“Por otro lado, el tránsito de maquinaria pesada y los horizontes del proyecto habitualmente hacen inviable el uso de caminos no pavimentados , debiendo recurrirse a soluciones granulares de alto desempeño” (Pradena et al., 2010, pág.99).*

Estas vías permiten trasladar el material con carga mineral al proceso de beneficio y el material excedente o residual al botadero destinado. Y, como se menciona anteriormente, estas se ven afectadas, principalmente, por fenómenos climatológicos como la lluvia y la nieve además del tránsito necesario de maquinaria pesada. Los daños ocasionados se denominan fallas – los cuáles pueden ser funcionales o estructurales – y reducen la velocidad de las operaciones a la vez que involucran mayor consumo de recursos como: combustible, neumáticos, entre otros.

Actualmente, en la industria de la evaluación de caminos pavimentados se han desarrollado diversas metodologías que podrían aplicarse a la detección de fallas en los caminos de acarreo. Para la recolección de la información de campo se ha desarrollado tecnología láser o se hace uso de cámaras de alta resolución instaladas en vehículos terrestres o aéreos como drones, por ejemplo. Posteriormente, esta información debe ser analizada por expertos. Si se requiere un proceso totalmente automatizado, se debe avanzar aún más en los sistemas de reconocimiento de imágenes que usan inteligencia artificial.

En consecuencia, nos enfrentamos a un problema de gestión de caminos para poder conseguir una operación eficiente y más productiva. A través de la detección oportuna de fallas funcionales se puede optimizar la estrategia de mantenimiento y reducir los costos implicados. Ya sea que se cuente con un presupuesto limitado, que se desee realizar actividades de mantenimiento focalizadas en el menor tiempo posible o un plan de mantenimiento a mediano y largo plazo, contar con data fidedigna nos encausará a las mejores soluciones. Una oportunidad de solución puede ser tomada de las tecnologías utilizadas actualmente en las vías pavimentadas: vehículos aéreos no tripulados para la inspección o reconocimiento.

La gestión de los caminos de transporte significa llevar a cabo actividades que permitan evaluarlos de manera objetiva con data cuantitativa (Saavedra, 2015). Los planes de mantenimiento son construidos en base a la información del estado actual de los caminos. Así mismo, a mayor anticipación de las intervenciones de mantenimiento mayor reducción de costos, mayor productividad y; en consecuencia, mayor rentabilidad. Así, en este trabajo de investigación se parte de la premisa lógica que la detección oportuna de fallas o deterioros impacta positivamente en la productividad y rentabilidad minera.

El factor tiempo resulta además una variable importante porque mientras más pronto se procese la información y se tengan los resultados, soluciones menos costosas podrán anticiparse. Ante esto, actualmente las soluciones existentes se clasifican en dos categorías: sensores en la maquinaria de transporte y tecnología externa de detección de fallas aplicada a este propósito.

Frente a estos desarrollos, el siguiente trabajo de investigación plantea una alternativa adicional que es el uso de tecnología no invasiva. Así, la hipótesis que se plantea ***es la viabilidad en tiempo y costo del uso de un dron o RPA (remoted pilot aircraft) para la detección de fallas o deterioros en vías de acarreo.***

Expuesto entonces el problema de la influencia de las fallas existentes en los caminos de acarreo sobre la rentabilidad de la operación, los objetivos a alcanzar estarán centrados en explorar el efecto de la solución sobre el problema, y la posibilidad de su aplicación futura a través de la sistematización y repetibilidad. Así, el objetivo principal será ***explorar la viabilidad técnica y***

*económica del uso de un RPA (remotely pilot aircraft) para la detección de fallas o deterioros en caminos mineros de acarreo de mineral/material.*

El segundo objetivo será *evaluar el estado del arte y comparar las ventajas y desventajas de las soluciones existentes* junto con la solución planteada. Por último, el tercer objetivo será *plantear de manera básica una metodología a seguir para la aplicación de esta nueva alternativa que utilice un vehículo pilotado a distancia* (RPA, por sus siglas en inglés) *en la detección oportuna de fallas o deterioros en estas vías de acarreo.*

Alcanzar estos objetivos significará no solamente un avance en la construcción de nuevo conocimiento para la solución del problema expuesto; sino que, además, podría ser utilizado en otros campos como la conservación de los caminos rurales en Sudamérica. Toda vez que las fallas a detectar en los caminos mineros comparten una estrecha similitud con los caminos rurales. Así mismo, en futuros desarrollos podría existir la posibilidad de llevar la solución de reconocimiento de imágenes a reconocimiento en tiempo real (video). No es muy difícil imaginar que esto será posible dado que otros avances como el reconocimiento facial ya ocurre en tiempo real.



## 2. CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

### 2.1 INDUSTRIA MINERA: RENTABILIDAD Y COSTOS DE TRANSPORTE

#### 2.1.1 Rentabilidad en la industria minera

La industria minera está caracterizada por la aleatoriedad del éxito y lo intensivo del capital. En la etapa de exploración, se debe reducir la incertidumbre sobre el tipo, cantidad y existencia de la reserva mineral. Por esto, mientras más capital sea invertido de manera eficiente en esta etapa, mayor será la mitigación de este riesgo y mayor el éxito futuro de la operación. Sumado a esto, se encuentran otras particularidades de la industria que influyen en el resultado del proyecto. Entre los principales se tiene: los costos elevados, los largos procesos de puesta en marcha, las fluctuaciones del precio de los metales, los costos de suministro al alza y una ley de mineral cada vez en disminución. (De Giorgis, 2016)

Así, los cuatro pilares sobre los que recae la rentabilidad de la industria minera son: el precio de los metales, la cantidad del mineral producido, el capital invertido y los costos de producción. Actualmente, se puede afirmar que la rentabilidad se ve amenazada por el decremento de la ley en las reservas minerales, el incremento sostenido de los costos en la cadena de suministros y de producción, además de la escasez de insumos claves en algunos países como el agua y la energía. (De Giorgis, 2016)



Figura 1. Cadena de Valor de una operación minera

Fuente: Merino Peña et al. (2017)

A nivel mundial, los metales son considerados “commodities” y el precio es fijado internacionalmente por el mercado. Así, las compañías mineras solo tienen control sobre las actividades que realizan desde la exploración hasta la obtención del producto para su comercialización. En consecuencia, durante la vida útil de un proyecto minero, la rentabilidad se consigue enfocándose en la gestión y el control de costos. En tal sentido, las compañías mineras no resultan ser competidoras entre sí; sino que por el contrario, están en constante relación y búsqueda de soluciones que les permitan reducir costos y elevar la productividad (Rumbo Minero, 2018).

Según Couceiro P., Florencio E. y Navarro J. en su artículo “*Adaptive Cost Optimization Model for Open Pit Mining Operations*”, la operación minera es un complejo sistema compuesto por procesos que van desde la explotación hasta la concentración para la obtención del mineral como producto final con interfaces entre ellos (procesos). Por tanto, el enfoque debe estar en las estrategias de optimización de costos que eleven la productividad y la rentabilidad a la vez que minimicen el impacto ambiental. De hecho, afirman que las estrategias de optimización de costos de largo plazo deben involucrar la habilidad de modelar, medir y calibrar los desempeños técnicos y operacionales lo largo de la vida útil de la mina (Couceiro et al., 2020).

Como se expresa líneas arriba, la rentabilidad de una operación minera está directamente relacionada a la estrategia y control de costos que se realice sobre la misma. Así mismo, dado que la naturaleza de estas operaciones involucra largos periodos, se debe buscar constantemente soluciones que ayuden en el propósito de optimizar costos, elevar la productividad y, en consecuencia, la rentabilidad. Entre estos, los costos de transporte resultan ser significativos y pueden ser optimizados a través de la gestión y mantenimiento de los caminos de acarreo.

### **2.1.2 Costos de la industria minera**

A continuación, se analizará la incidencia de los costos de transporte dentro de los costos totales de producción. Finalmente, se inferirá el peso del mantenimiento o la gestión de los caminos de acarreo sobre estos. El objetivo es poder cuantificar la oportunidad de solución al desarrollar el

siguiente trabajo de investigación. Primero, se hará una aproximación porcentual según la literatura disponible y segundo, se realizará el cálculo según los ingresos obtenidos de las compañías mineras peruanas que listan en bolsa.

### **2.1.2.1 Costos totales de producción**

El *Costo Total* de la empresa minera resulta de adicionar a los costos de producción, los gastos de administración y ventas además de los financieros. (Vargas et al., 2016). A su vez, el *Costo Total de Producción* por unidad minera resulta de la suma de los costos de extracción del mineral más los costos de la planta concentradora adicional al costo total de energía y, por último, de las unidades de servicio. Otros autores como Rojas Seguel, D., Castillo, E., & Cantallopts, J. consideran el costo de las remuneraciones y la depreciación incluidos dentro de estos costos (Rojas Seguel et al., 2015).

En el Perú, las empresas mineras según su tamaño se clasifican en: Gran y Mediana Minería, Pequeña Minería y Minería artesanal. Las empresas calificadas como gran y mediana minería cumplen dos condiciones: la producción mínima diaria es de 350 TMD y el tamaño del terreno concesionado sobre el cuál desarrollan sus actividades es de más de 2,000 hás. (Ministerio de Energía y Minas, 1992) Así, entre las principales compañías que pertenecen a esta categoría se encuentran: Sociedad Minera Cerro Verde, Compañía Minera Antamina S.A., Southern Perú Cooper Corporation, Minera Las Bambas S.A. y Minera Yanacocha S.R.L. (Ministerio de Energía y Minas, 2020).

Del análisis de los estados financieros de algunas de ellas, se obtuvo que el costo de obtención del mineral (costo de producción) puede significar entre el 33% y el 88% del total de las ventas o



ingresos<sup>1</sup> según datos de compañías mineras que listan en la Bolsa de Valores de Lima. Así mismo, según data recogida por la autora Saud K., en su tesis *“Relación del Precio del Cobre y Costos de Extracción”*, los costos de extracción entre los años 2010 hasta 2015 (inclusive) fluctúan entre 51,80% y 81,45% (Saud, 2017). A su vez, López M. afirma en su tesis *“Análisis y Gestión de Costos en explotación Minera a Cielo Abierto”*, que los costos de proceso dependientes de la operación minera “Los Bronces” de Anglo American en Chile, resultan del orden del 55,8% del total (López, 2008).

### **2.1.2.2 Costos de transporte**

Los costos de transporte pueden significar entre el 40% y el 60% de los costos operacionales totales (Almeida et al., 2019). Otra aproximación la tenemos gracias a Thompson con la siguiente afirmación:

*“Aproximadamente el 50% de los costos operacionales de mina dependen del proceso de transporte de material desde la zona de extracción hasta botadero o planta para su posterior proceso”*(Thompson, 2010, pág. 303).

La autora Saud Cherezade desagrupa los costos de mina de la siguiente manera: remuneraciones (26%), insumos (25%), servicio (22%), energía (14%), diésel (7%), contratistas (5%) y ácido (1%). Si consideramos el costo del transporte en minería (incluyendo el mantenimiento de las vías) comprendido dentro del componente “servicio”, se puede inferir que este costo se encontraría comprendido en rangos del 22% al 50% del costo total de producción.

---

<sup>1</sup> Estimación realizada a partir del análisis de los Estados Financieros de las compañías minera Cerro Verde, Buena Ventura y Volcán del 2015-2018.

Si se considera un ingreso promedio anual de USD 1'268,421,750 millones de dólares en la última década para las compañías de mina Buenaventura, Cerro Verde y Volcán, estaríamos frente a una oportunidad de optimizar un componente de un rango de USD 279 a 630 millones de dólares. Y, si se toma en consideración la afirmación de la compañía Altavía que afirma que:

*“[...] operar adecuadamente y por buenos caminos los vehículos de extracción (CaEx) [...] se traduce en disminuciones de hasta en un 10% de los costos de transporte asociado a continuidad operacional, ahorro en combustible, neumáticos y componentes de los CaEX”*(Altavía, 2019a).

Se tiene, finalmente, una idea más exacta de que la oportunidad de mejora en la gestión del transporte rondaría entre los USD 20 a 60 millones de dólares.

En consecuencia, resulta importante toda gestión, estrategia o solución que resulte en una optimización de los recursos disponibles para esta operación (transporte de mineral). El enfoque debe estar en elevar la productividad ya sea por mayor capacidad de transporte o mayor velocidad en la operación.

## **2.2 TRANSPORTE MINERO: SISTEMA CONTINUO Y DISCONTINUO**

En la minería a tajo abierto, el transporte de mineral y material estéril se produce desde la zona de explotación hasta la planta de beneficio o los “botaderos”, respectivamente. Entre las principales soluciones de transporte encontramos: las fajas transportadoras y los vehículos de carga. Estas soluciones dependen de plan de mina a ejecutar a lo largo del tiempo que involucra la cantidad, distancia y ubicación necesaria para el transporte (Xavier & Saldanha, 2009). A continuación, revisaremos brevemente en qué consiste cada uno de estos tipos de transporte.

### **2.2.1 Sistema continuo: fajas transportadoras**

Una faja transportadora es un sistema de transporte continuo conformado por una estructura metálica, la faja propiamente - compuesta de algún tipo de polímero- y; el sistema de movimiento compuesto por motores, reductores de velocidad, acoplamientos, entre otros que son activados por energía eléctrica (Almeida et al., 2019). Entre las ventajas principales de este sistema de transporte se tiene: bajo costo de operación y mantenimiento en relación con el uso de vehículos de carga o

trenes, demanda casi uniforme de energía, baja demanda de combustible y la capacidad de carga no depende de las distancias de traslado (Almeida et al., 2019). Entre las desventajas principales, el diámetro de material está limitado a 12”, el uso de recursos como el agua (León & Quispe, 2018) y la flexibilidad ante cualquier cambio de posición en la mina (Almeida et al., 2019).



Figura 2. Fajas transportadoras

Fuente: [www.haug.com.pe](http://www.haug.com.pe) (Haug, n.d.)

### 2.2.2 Sistema discontinuo: vehículos de carga

El uso de vehículos de carga en operaciones minera a cielo abierto (tajo) está bastante extendido. Se considera un sistema de transporte discontinuo (León & Quispe, 2018) y con pesos que oscilan entre 200 a 300 toneladas, actualmente, posee una capacidad de carga de hasta 363 toneladas aproximadamente (Revista Minería Chilena, 2014). Entre las principales ventajas se tiene: alta flexibilidad operacional, capacidad de transportar cualquier tipo de material, baja probabilidad de interrupción si es que alguno de los vehículos necesita reparación (Almeida et al., 2019). Entre las desventajas, alto costo de operación en relación a las fajas transportadoras, uso intensivo de mano de obra para operación y mantenimiento, reducción de productividad por los retornos vacíos luego de la descarga (50%)(Almeida et al., 2019) y tiempo de abastecimiento de 2 años en promedio (Revista Minería Chilena, 2014) desde puesta la orden de compra.



Fuente: (Catterpillar, n.d.)



Fuente: (BELAZ-7530 – Belaz, n.d.)



Fuente: (Komatsu, n.d.)

Figura 3. Vehículos de carga para acarreo

## 2.3 CAMINOS MINEROS: GESTIÓN Y EVALUACIÓN

### 2.3.1 Características de caminos mineros

Los caminos mineros que se encuentran destinados para el transporte de material se construyen en rampas con cierto ángulo de inclinación y no son pavimentados. Estas vías permiten trasladar el material con carga mineral al proceso de beneficio y el material excedente o residual al botadero destinado. El tránsito de maquinaria pesada sumado al periodo de tiempo en el cuál se desarrolla la operación de la mina hace que la solución pavimentada sea no viable (Pradena et al., 2010).

El diseño y construcción de caminos en minería debe darse de una manera integrada. Se deben considerar el aspecto geométrico, estructural, funcional, de conservación o mantenimiento. No atender estos aspectos puede atentar contra la seguridad o reducir la productividad de la compañía (Saavedra, 2015). Si bien es cierto existe una relación estrecha entre la estructura de la vía y el

desempeño funcional (ambos considerados en el diseño) el aspecto del mantenimiento no debe dejarse de lado. El costo de diseño y operación solo representan una porción del costo de operación y mantenimiento de estas vías (Thompson, 2010).

Las consideraciones que se deben tener en el diseño abarcan mucha información sobre el tipo de tránsito que hará uso de la vía. En detalle, se debe considerar el tipo de vehículos que hacen uso actualmente de la vía y se debe hacer una proyección de los que lo harán en el horizonte de vida útil de la vía. Esta información involucra el peso del vehículo, radios de giro, dimensiones del vehículo, entre otro que afecte la vía tanto superficial como estructuralmente. Otro factor importante vincula las llantas que usarán estos vehículos. Se debe considerar características cómo el tamaño, presión de las llantas, superficie de contacto (Tannant & Regensburg, 2001).

Las fases de diseño de un camino minero empiezan por recoger la información necesaria y básica incluyendo la contemplada en el párrafo anterior. Posteriormente, se realiza el diseño contemplando la geometría, en una fase siguiente el componente estructura seguido del componente funcional (Thompson, 2010). Por último, se toma en cuenta las consideraciones de mantenimiento. Al término, una pregunta deberá ser respondida: “¿es un óptimo diseño y entrega un mínimo costo total al usuario de la vía?”(Thompson, 2010) Si la respuesta es no, se debe regresar a la fase de diseño funcional o de gestión del mantenimiento (Thompson, 2010).

En la parte geométrica se debe diseñar el trazado de la vía además de su alineamiento en el plano tanto horizontal como vertical, así como también distancias de parada, de punto ciegos, ancho de vía, bermas. El objetivo es un diseño geométrico seguro, óptimo y eficiente (Thompson, 2010). Así mismo, deberá considerarse la canalización del agua para que no deteriore la estructura del camino.(Saavedra, 2015)

El diseño estructural será el soporte de la vía que podrá contener las cargas que le serán impuestas. En esta parte del diseño, debe pensarse en evitar el mantenimiento excesivo por daños en la estructura de una o más capas que por lo general ocurren gracias a materiales débiles, húmedos o suaves (Thompson, 2010). Aquí se define la cantidad de capas y materiales que se usarán. Una diseño eficiente repercutirá en menores actividades de mantenimiento periódico futuro (Saavedra,

2015). Entre los materiales que principalmente son utilizados se tiene: arenisca, arena, grava, material estéril de la mina, lutita, limolita (Tannant & Regensburg, 2001).

En la etapa de diseño funcional se decide sobre los materiales que irán a conformar la capa superior de tránsito que sufrirá el desgaste natural y los efectos medioambientales (Saavedra, 2015). El diseño de esta capa debe estar orientado a evitar la tasa de formación de defectos. Es importante anotar que esta capa es la que va a otorgar la calidad de tránsito confortable y seguro (Thompson, 2010). Los materiales que son usados comúnmente involucran arenisca triturada, grava, esquistos, material grueso residual, material residual (Tannant & Regensburg, 2001).

Por último, en la etapa del diseño de mantenimiento se debe considerar la óptima frecuencia de mantenimiento para un óptimo desempeño de la vía y la minimización de costos durante la vida útil de la vía (Thompson, 2010). En la mayor parte de minas se practica la nivelación de la capa de tránsito, la escarificación además de la excavación hasta el nivel de subgrado para rellenar y mejorar el tránsito (Tannant & Regensburg, 2001).

### **2.3.2 Fallas en caminos mineros: tipos y causas**

Estos caminos se ven afectados principalmente por fenómenos climatológicos como la lluvia y la nieve además del tránsito necesario de maquinaria pesada. Los daños ocasionados se denominan fallas - pueden ser funcionales o estructurales – y reducen la velocidad de las operaciones a la vez que involucran mayor consumo de recursos como: combustible, neumáticos, entre otros.

Los tipos de fallas en los caminos no pavimentados son: pérdida de fracción gruesa, erosiones, baches, hundimientos, entre otros deterioros (Pradena et al., 2010). La pérdida de la fracción gruesa significa la pérdida parcial del agregado dejando expuestas áreas aisladas de la capa de apoyo; mientras que, las erosiones son surcos que se forman debido a la acción del agua. Por último, los hundimientos se deben a la huella del tráfico que vence la capacidad de soporte de la capa subrasante.

Los caminos de transporte de material y mineral en minería debido al tráfico de maquinaria pesada y los periodos largos de los proyectos mineros no permiten el uso de pavimentación. Es así, que las soluciones pasan por el uso de estructuras granulares con alto desempeño. En el caso de la

realidad chilena, se puede encontrar características comunes como calzadas entre 7 y 8m de ancho y; hasta 21 en el área del tajo y explotación. Así mismo, carpetas de rodado entre 10 y 20 cm y; gradientes de casi 8% además de sistemas de cunetas a pie de talud que conforman el drenaje. (Pradena et al., 2010)

En consecuencia, nos enfrentamos a un problema de gestión de caminos a través de la detección temprana de deterioros o fallas funcionales y/o estructurales para una adecuada y oportuna intervención. Ya sea que se cuente con un presupuesto limitado, que se desee realizar actividades de mantenimiento focalizadas en el menor tiempo posible o un plan de mantenimiento a mediano y largo plazo, contar con data fidedigna nos encausará a las mejores soluciones.

### **2.3.3 Gestión de Caminos Mineros**

La gestión de caminos involucra actividades de conservación y mantenimiento. “Este proceso incluye al mantenimiento como actividad relevante debido a la necesidad de minimizar los deterioros que comúnmente se observan, tales como pérdida de fracción gruesa, erosiones, baches, calaminas, entre otras patologías.”(Saavedra, 2015). Según la Resolución Ministerial N° 17 – 2013 – MTC/14, los deterioros en caminos no pavimentados pueden ser deformación, erosión, baches (huecos), encalaminado y lodazal.

La estabilización de los caminos mineros ocurre mediante el uso de medios mecánicos o químicos. Los medios mecánicos significan el mejoramiento de la estructura granulométrica a través de procesos de compactación, por ejemplo. Los medios químicos, por su parte, significan la aplicación de aditivos como sales, enzimas, polímeros entre otros subproductos del petróleo. Entre estos, los cloruros ayudan a disminuir el punto de congelamiento del agua y se usa para caminos mineros sometidos a bajas temperaturas. También, se hace uso de polímeros que mejoran la resistencia mecánica del suelo. (Pradena et al., 2010)

En operaciones mineras como Andina de Codelco, Los Bronces de Anglo American y Minera Los Pelambres de Antofagasta Minerals, se observan similares estrategias de mantenimiento. Andina, utiliza medios mecánicos además de cloruro de sodio. En Los Bronces, se realizan intervenciones rutinarias y una intervención total que consisten en utilización de material granular con cloruro de

sodio y agua. Por último, en Minera Los Pelambres se utiliza los materiales propios del suelo además de cloruro de sodio y agua (Pradena et al., 2010).

En países de climas externos como Finlandia, Suecia Noruega y Escocia se agregan otras actividades de mantenimiento además de las mencionadas para el caso Chileno. Entre estas, el perfilado del camino, el mantenimiento del sistema de drenaje, además de la nivelación y recebo de la carpeta de rodado. A esto se suma, la aplicación de químicos como Cloruro de Sodio (NaCl) o Cloruro de Calcio (CaCl) para disminuir el punto de congelamiento y evitar la emisión de polvos. Por último, se aplican restricciones al tránsito según el peso durante temporadas (Pradena et al., 2010).

Los sistemas de gestión de mantenimiento que existen no pueden hacer frente totalmente al escenario complejo bajo el cuál se encuentran sometidos los caminos de acarreo. Debido a esto, es necesario aplicar además técnicas de conservación que se pueden clasificar en intervenciones rutinarias, periódicas y urgentes. Muchas veces, el resultado llega a ser el aumento de los costos de mantenimiento y la reducción del servicio del vehículo. En este contexto, se han propuesto sistemas de recogimiento de datos a bordo para ayudar a monitorear los caminos de acarreo en tiempo real (Heyns et al., 2012)

#### **2.3.4 Metodologías de evaluación en caminos de acarreo**

La gestión tiene que estar asociada a evaluaciones objetivas de la condición de los caminos, de la misma forma que ya hace mucho tiempo se monitorea el consumo de combustible, los tiempos de viaje, etcétera”(Saavedra, 2015). El factor tiempo resulta además una variable importante porque mientras más pronto se procese la información y se tengan los resultados, soluciones menos costosas podrán anticiparse. Ante esto, actualmente las soluciones existentes se clasifican en dos categorías: sensores en la maquinaria de transporte y tecnología externa de detección de fallas aplicada a este propósito.

Así mismo, se tiene en la literatura que,

*“Se han propuesto varias metodologías de evaluación de carreteras basadas en modelos en la literatura [1, 3, 4]. Thompson y Visser [1] proponen que se pueda usar una Red Neural (NN) para*



*clasificar los patrones de vibración que son representativos de las diferentes condiciones del camino. Hugo y col. [3] investigan el uso de un modelo de dinámica inversa del vehículo para estimar el perfil del camino a partir de una respuesta medida del vehículo, mientras que Ngwangwa et al. [4] proponen que el perfil del camino puede estimarse por medio de un NN, en lugar de un modelo analítico. Hugo y col. y Ngwangwa et al. posteriormente evaluar los perfiles de carretera estimados de acuerdo con las normas de clasificación de carreteras ISO 8608 [5]” (Heyns et al., 2012, pág. 1).*

#### **2.3.4.1      *Tecnología a bordo de vehículos de carga***

Respecto de tecnología implementada en la maquinaria de extracción o transporte, la empresa Caterpillar ha dotado a sus vehículos de la tecnología denominada RAC (Road Analysis Control, por sus siglas en inglés) o Control de Análisis de Caminos la cuál provee de información del estado de la vía según el impacto que esta tiene en los vehículos; específicamente en la operación y equipo de soporte. Esta tecnología sumada al Sistema de Administración de Información Vital (VIMS®) – también de la empresa Caterpillar - otorga información en línea sobre las condiciones del camino que se traduce en información útil para los ciclos y elementos del vehículo como el tren de fuerza, el bastidor la suspensión y los neumáticos (Caterpillar, n.d.).

#### **2.3.4.2      *Evaluación de caminos a través de la rugosidad***

La rugosidad es un parámetro de carretera que mide la regularidad de la vía y la comodidad en la conducción de los usuarios. Dado que este parámetro es utilizado para tomar decisiones objetivas sobre el diseño e implementación de estrategias de mantenimiento, desde el año 1986 se logró obtener una escala estándar internacional para el cálculo de este parámetro que pudo relacionar los distintos resultados de los diferentes equipos de rugosidad (Sayers et al., 1986). Así, estos sistemas de medición de rugosidad son sensibles tanto al perfil de carretera cómo a la velocidad de operación del equipo (Heyns et al., 2012).

Por otro lado, respecto de la tecnología externa utilizada para este fin, se encuentra el desarrollo de la compañía chilena Altavía. Esta empresa - cuya especialidad abarca la ingeniería de caminos - ha desarrollado un sistema integrado de tecnologías y software que permite evaluar las vías de

transporte minero. Los elementos que componen esta tecnología externa se instalan en los vehículos para poder llevar a cabo las evaluaciones. En este desarrollo se ha sumado a la detección y análisis del perfil longitudinal de las huellas, algoritmos matemáticos y un módulo de costos que permiten determinar la condición del camino minero además de, los costos de operación relacionados a los camiones de extracción. Como resultado y según su experiencia, la empresa asegura que pueden reducir hasta un 10% de los costos de transporte (Altavia, 2019a).

## **2.4 Evaluación de fallas: caminos pavimentados y no pavimentados**

### **2.4.1 Métodos de Evaluación de fallas en caminos no pavimentados:**

En Perú, la red vial tiene aproximadamente 96000 km de los cuáles casi el 84% está conformado por caminos no pavimentados (Revista Perú Construye, 2018). A través de contratos de conservación y/o mantenimiento, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones se encarga de la gestión sobre estos caminos. Adicionalmente, este ministerio cuenta con un Manual de Carreteras (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013), que detalla la tipología de fallas, las causas, la metodología de calificación y sugiere los tipos de intervenciones.

#### **2.4.1.1 *Tipos de fallas en caminos no pavimentados***

En la presente tabla a continuación, se detallan los tipos de fallas clasificadas según el Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones según su tipo y gravedad. Como se aprecia, son similares a las detalladas en el capítulo anterior que se encuentran presentes en los caminos mineros no pavimentados de acarreo.

**Tabla 1** Deterioros o fallas en carreteras no pavimentadas

Código de daño	Deterioros / Fallas	Gravedad
1	Deformación	1: Huellas/hundimientos sensibles al usuario pero < 5cm 2: Huellas/hundimientos entre 5 cm y 10 cm 3: Huellas/hundimientos >= 10 cm
2	Erosión	1: Sensible al usuario pero profundidad < 5 cm 2: Profundidad entre 5 cm y 10 cm 3: Profundidad >= 10 cm
3	Baches (Huecos)	1: Pueden repararse por conservación rutinaria 2: Se necesita una capa de material adicional 3: Se necesita una reconstrucción
4	Encalaminado	1: Sensible al usuario pero profundidad < 5 cm 2: Profundidad entre 5 cm y 10 cm 3: Profundidad >= 10 cm
5 y 6	Lodazal y cruce de agua	1: Transitabilidad baja o intransitabilidad en épocas de lluvia No se definen niveles de gravedad

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

A continuación, se muestra gráficamente los tipos de fallas:



Hundimiento



Erosión



Baches



Pérdida de fracción gruesa



Encalaminado



Lodazal

Figura 4. Tipo de fallas en caminos no pavimentados

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

#### 2.4.1.2 Metodología de calificación de caminos no pavimentados

Los tipos de fallas se califican de acuerdo con 3 variables: tipo de fallas, severidad de las fallas y área de deterioro o número de incidentes para el caso de baches (huecos). Así, para calificar la condición total de la vía se evalúa las fallas existentes por secciones de 500 m. como se muestra en las tablas a continuación (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013).

**Tabla 2** Clase de extensión de los deterioros/fallas en carreteras no pavimentadas

Clase	Descripción	Criterio (porcentaje del área de la sección evaluada)
1	Leve	menor a 10 %
2	Moderado	entre 10 y 30 %
3	Severo	Mayor a 30 %

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

Para los baches (huecos) es necesario una clasificación adicional como se detalla a continuación:

**Tabla 3** Clasificación de densidad en carreteras no pavimentadas

Clase	Descripción	Criterio de densidad de baches (huecos) (número / 500 m)
1	Leve	menor a 10
2	Moderado	entre 10 y 20
3	Severo	mayor a 20

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

Una vez determinada la severidad o densidad de los daños existentes, se procede a cuantificar los mismos, según las tablas mostradas a continuación:



**Tabla 4** Matriz de Puntuación (Parte I)

Código de daño	Deterioros / Fallas	Gravedad (G)	Medidas Área de deterioro $A_{ij}$ (m <sup>2</sup> ) Número de deterioros (N <sub>ij</sub> ) Longitud del deterioro (L <sub>ij</sub> )	Ancho de la Sección Evaluada (m)	Longitud de la Sección Evaluada (m)	Área de la Sección Evaluada (m <sup>2</sup> ) A <sub>s</sub>	Porcentaje de Extensión del deterioro/falla EF <sub>ij</sub> = (A <sub>ij</sub> /A <sub>s</sub> )x100
1	Deformación	1: Huellas/hundimientos sensibles al usuario pero < 5cm	Área (A <sub>11</sub> ): Daño 1 Gravedad 1 A <sub>11</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>11</sub>
		2: Huellas/hundimientos entre 5 cm y 10 cm	Área (A <sub>12</sub> ): Daño 1 Gravedad 2 A <sub>12</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>12</sub>
		3: Huellas/hundimientos >= 10 cm	Área (A <sub>13</sub> ): Daño 1 Gravedad 3 A <sub>13</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>13</sub>
2	Erosión	1: Sensible al usuario pero profundidad < 5 cm	Área (A <sub>21</sub> ): Daño 2 Gravedad 1 A <sub>21</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>21</sub>
		2: Profundidad entre 5 cm y 10 cm	Área (A <sub>22</sub> ): Daño 2 Gravedad 2 A <sub>22</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>22</sub>
		3: Profundidad >= 10 cm	Área (A <sub>23</sub> ): Daño 2 Gravedad 3 A <sub>23</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>23</sub>
3	Baches (huecos)	1: Pueden repararse por conservación rutinaria	Número (N <sub>31</sub> ): Daño 3 Gravedad 1				
		2: Se necesita una capa de material adicional	Número (N <sub>32</sub> ): Daño 3 Gravedad 2				
		3: Se necesita una reconstrucción	Número (N <sub>33</sub> ): Daño 3 Gravedad 3				
4	Ensamblado	1: Sensible al usuario pero profundidad < 5 cm	Área (A <sub>41</sub> ): Daño 4 Gravedad 1 A <sub>41</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>41</sub>
		2: Profundidad entre 5 cm y 10 cm	Área (A <sub>42</sub> ): Daño 4 Gravedad 2 A <sub>42</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>42</sub>
		3: Profundidad >= 10 cm	Área (A <sub>43</sub> ): Daño 4 Gravedad 3 A <sub>43</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>43</sub>
5 y 6	(5) Lodazal	1: Transitabilidad baja o Intransitabilidad en épocas de lluvia	Área (A <sub>51</sub> ): Daño 5 Gravedad 1 A <sub>51</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>51</sub>
	(6) cruce de agua	1: Transitabilidad baja o Intransitabilidad en épocas de lluvia	Área (A <sub>61</sub> ): Daño 6 Gravedad 1 A <sub>61</sub> = Longitud x Ancho (del deterioro)	ancho	500	anchox500	EF <sub>61</sub>

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

**Tabla 5** Matriz de Puntuación (Parte II)

Extensión Promedio Ponderada	Puntaje de Condición Según Extensión de Cada Tipo de Deterioro o Falla				Puntaje de Condición Resultante Por Cada Tipo de Deterioro/Falla
	0: Sin Deterioros o sin fallas	1: Leve EFp = Menor a 10%	2: Moderado EFp = entre 10% y 30%	3: Severo EFp = mayor a 30%	
$EFp = [(EF_{11} \times A_{11} + EF_{12} \times A_{12} + EF_{13} \times A_{13}) / (A_{11} + A_{12} + A_{13})]$	0	> 0 y < 20	≥ 20 y < 100	100	
$EFp = [(EF_{21} \times A_{21} + EF_{22} \times A_{22} + EF_{23} \times A_{23}) / (A_{21} + A_{22} + A_{23})]$	0	≥ 0 y < 20	≥ 20 y < 100	100	
$EFp = N_{31} + N_{32} + N_{33}$	0	≥ 0 y < 20	≥ 20 y < 100	100	
$EFp = [(EF_{41} \times A_{41} + EF_{42} \times A_{42} + EF_{43} \times A_{43}) / (A_{41} + A_{42} + A_{43})]$	0	> 0 y < 20	≥ 20 y < 100	100	
$EFp = [(EF_{51} \times A_{51}) / (A_{51})]$	0	> 0 y < 10	≥ 10 y < 50	50	
$EFp = [(EF_{61} \times A_{61}) / (A_{61})]$	0	> 0 y < 10	≥ 10 y < 50	50	
<b>SUMA PUNTAJE DE CONDICIÓN</b>					

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

Por último, se calcula la calificación de la condición para tipificar la condición.

**Tabla 6** Clasificación de la condición (Parte I)

CALIFICACION DE CONDICIÓN=	500 - SUMA PUNTAJE DE CONDICIÓN
CALIFICACION DE CONDICIÓN=	

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

**Tabla 7** Clasificación de la Condición (Parte II)

CONDICIÓN BUENO	> 400
CONDICIÓN REGULAR	> 150 y ≤ 400
CONDICIÓN MALO	≤ 150

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

### 2.4.1.3 *Tipos de Intervenciones en caminos no pavimentados:*

Según la calificación obtenida, se determina el tipo de conservación a ejercer sobre la vía. Este puede ser: Reconstrucción de la vía o Rehabilitación, Conservación Periódica o Conservación Rutinaria.

**Tabla 8** Tipos de Conservación según condición



Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

### 2.4.1.4 *Método URCI (Unpaved Road Condition Index)*

El Unpaved Road Condition Index (URCI), es un método de clasificación para vías sin asfalto. Este método ha sido desarrollado y validado en Estados Unidos, Inglaterra y Alaska. Este método



puede ser calculado individualmente o incorporado a softwares de gestión de pavimentos como PAVER o DYNATEST PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM. La importancia del uso de estos métodos en conjunto con un software de gestión es que pueden brindarnos la asignación de recursos óptima en la sección óptima para conservar la vía en la mejor condición posible al mínimo costo (Eaton et al., 1981).

Para aplicar el siguiente método, la ruta deberá ser dividida en unidades de muestra. Cada unidad de muestra deberá ser evaluada anotando los deterioros encontrados según su clasificación, densidad y valor deducido. Finalmente, la suma de los valores deducidos nos dará el valor final del URCI (Eaton et al., 1981).



**Tabla 9** Hoja de evaluación Método URCI

UNSURFACED ROAD INSPECTION SHEET								
Branch <u>Potatoe Hill Central</u>				Date <u>07/15/86</u>				
Section <u>PH2</u>				Inspector <u>R.A. Eaton</u>				
Sample Unit <u>1</u>				Area of Sample <u>100' x 16'</u>				
<b>DISTRESS TYPES</b>				<b>SKETCH</b>				
1. Improper Cross Section (linear feet) 2. Inadequate Roadside Drainage (linear feet) 3. Corrugations (square feet) 4. Dust 5. Potholes (number) 6. Ruts (square feet) 7. Loose Aggregate (linear feet)								
DISTRESS QUANTITY AND SEVERITY								
Type		1	2	3	4	5	6	7
Quantity and Severity	L	100			X	1		100
	M		100			1		
	H		100					25
URCI CALCULATION								
Distress Type	Density	Severity	Deduct Value	<b>REMARKS:</b> Erosion around culvert $URCI = 100 - CDV =$ $100 - 36 = 64$  Rating = <u>GOOD</u>				
1	6.3	L	13					
2	6.3	M	15					
2	6.3	H	20					
4		L	2					
5	0.1	L	1					
5	0.1	M	4					
7	6.3	L	10					
7	1.6	H	8					
Total Deduct Value =			73					
q =			5					
<b>URCI =</b>			<b>64</b>					
<b>RATING =</b>			<b>Good</b>					

Fuente: (Eaton et al., 1981)

A pesar de que este método está soportado en la literatura para la evaluación de los caminos no pavimentados, los parámetros de aceptación deberán ser modificados para ser aplicados en caminos mineros. Sin embargo, la metodología está estructurada para la evaluación cualitativa. Este indicador se basa en la ponderación de fallas como geometría deficiente para el drenaje, sistema de drenaje, corrugaciones, baches, ahuellamientos y erosión (Eaton et al., 1981).

## 2.4.2 Métodos de evaluación de fallas en caminos pavimentados:

Es importante revisar los métodos y desarrollos existentes para la evaluación en caminos pavimentados (asfalto o concreto). Esto, con la finalidad de poder entender aquellos que fuesen viables para la detección de fallas en caminos mineros no pavimentados. En esta parte, se analizarán los métodos manuales, automáticos y semiautomáticos.

### 2.4.2.1 *Método Manual y visual:*

En el método manual y visual, el analista recorre la vía y visualiza y mide directamente los daños encontrados. Así mismo, registra en un documento el tipo de falla encontrado y la severidad de esta.

En el siguiente gráfico se aprecia la realización de una inspección visual en un pavimento aeroportuario.



Figura 5. Inspección Visual en Campo: Analista con odómetro

Fuente: (Peshkin et al., 2019)

**Tabla 10** Deterioros en fallas o pavimentos asfaltados

**Tabla 4-8**  
Deterioros o Fallas de los pavimentos asfaltados

Clasificación de los deterioros/fallas	Código de deterioro/falla	Deterioro / Falla	Gravedad
Deterioros o fallas Estructurales	1	Piel de cocodrilo	1: Malla grande (> 0.5 m) sin material suelto 2: Malla mediana (entre 0.3 y 0.5 m) sin o con material suelto 3: Malla pequeña (< 0.3 m) sin o con material suelto
	2	Fisuras longitudinales	1: Fisuras finas en las huellas del tránsito (ancho ≤ 1 mm) 2: Fisuras medias corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 1 mm y ≤ 3 mm) 3: Fisuras gruesas corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 3 mm). También se denominan grietas.
	3	Deformación por deficiencia estructural	1: Profundidad sensible al usuario < 2 cm 2: Profundidad entre 2 cm y 4 cm 3: Profundidad > 4 cm
	4	Ahuellamiento	1: Profundidad sensible al usuario pero ≤ 6 mm 2: Profundidad > 6 mm y ≤ 12 mm 3: Profundidad > 12 mm
	5	Reparaciones o parchados	1: Reparación o parchado para deterioros superficiales. 2: Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en buen estado. 3: Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en mal estado.
Deterioros o fallas superficiales	6	Peladura y Desprendimiento	1: Puntual sin aparición de la base granular (peladura superficial). 2: Continuo sin aparición de la base granular o puntual con aparición de la base granular. 3: Continuo con aparición de la base granular.
	7	Bachas (Huecos)	1: Diámetro < 0.2 m 2: Diámetro entre 0.2 y 0.5 m 3: Diámetro > 0.5 m
	8	Fisuras transversales	1: Fisuras Finas (ancho ≤ 1 mm) 2: Fisuras medias, corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 1 mm y ≤ 3 mm) 3: Fisuras gruesas, corresponden a fisuras abiertas y/o ramificadas (ancho > 3 mm). También se denominan grietas.
	9	Exudación	1: Puntual 2: Continua 3: Continua con superficie viscosa

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

#### 2.4.2.2 *Método Semiautomático o Automático:*

Entre estos métodos, tenemos el uso de la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging), Láser 3D y de cámaras instaladas en vehículos terrestres o aéreos.

##### a. *LIDAR: (Light Detection and Ranging)*

La tecnología LIDAR apoyada con tecnología de georreferenciación generan una imagen de nube de puntos. Posteriormente la información es procesada y analizada para detectar y clasificar los daños.

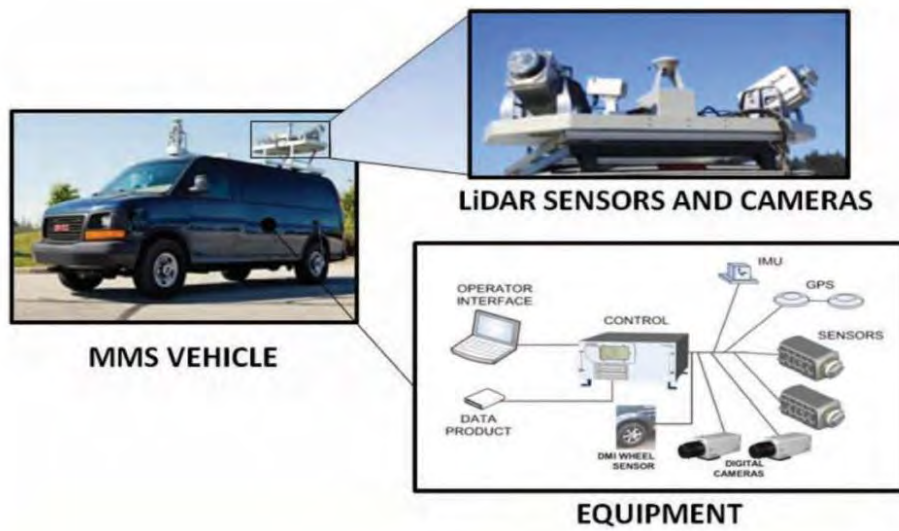


Figura 6. Detección de fallas: Tecnología LIDAR  
Fuente: Peshkin et al. (2019)

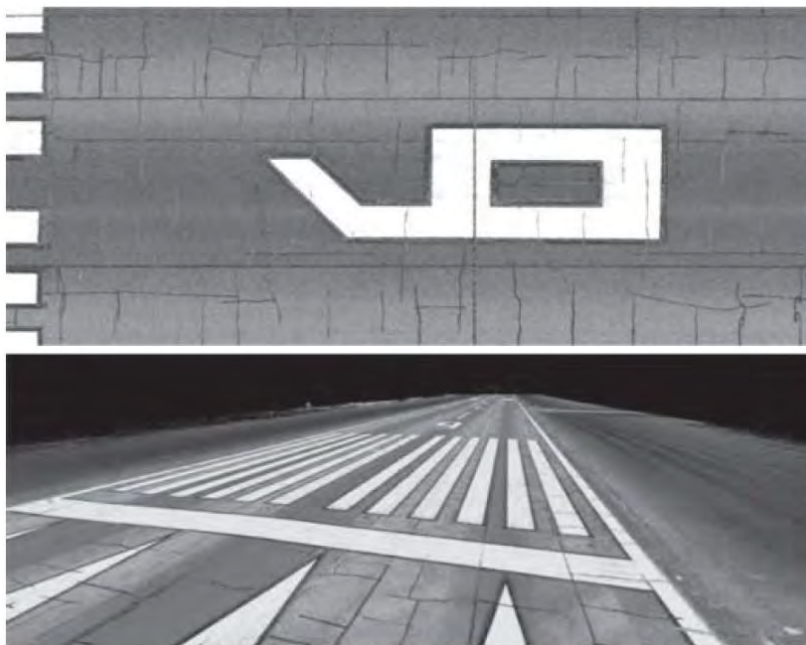


Figura 7. Ejemplo de imágenes tomadas por tecnología LIDAR  
Fuente: (Peshkin et al., 2019)

**b. Multifunctional Vehicle: (Imágenes Láser en 3D)**

Esta tecnología, como la utilizada por la compañía Dynatest (Dynatest Peru, 2020), además de detectar los daños puede distinguir entre los niveles de severidad (Peshkin et al., 2019). Una de las ventajas es que puede ser utilizada a cualquier hora del día (Dynatest Peru, 2020). Entre las desventajas tenemos que no es exacta cuando el pavimento se encuentra mojado (Peshkin et al., 2019).



Figura 8. Detección de fallas: Tecnología Láser 3D

Fuente: (Dynatest Peru, 2020)

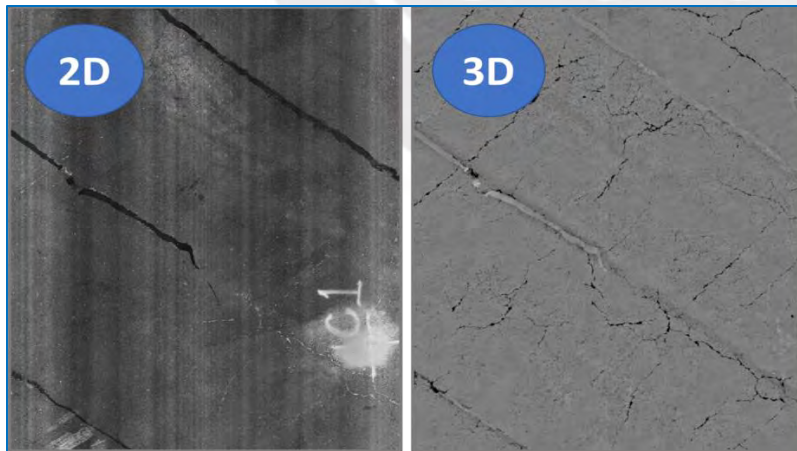


Figura 9. Comparativo de imágenes tomada en 2D y 3D con tecnología Láser

Fuente: (Dynatest Peru, 2020)

### *c. Cámaras instaladas en vehículos aéreos o terrestres:*

Desde hace varias décadas, el uso de cámaras montadas en vehículos se ha venido utilizando. Comparativamente a la inspección manual, este método ofrece mayor rapidez (Peshkin et al., 2019) y seguridad al no exponer a las personas directamente al tráfico. Una desventaja puede ser que la resultante es una imagen en 2D que no proporciona información de la profundidad (severidad) de las fallas (Peshkin et al., 2019). La inspección manual de una pista de aeropuerto de 2.5 km de largo podría tomar 16 horas mientras que con este método sólo 1h en campo (Peshkin et al., 2019).

Desarrollos actuales involucran vehículos aéreos no tripulados (UAS, unmanned aerial systems). Así mismo, las cámaras disponibles hoy en día proporcionan una imagen de muy alta resolución (1 pixel = 0,1 pulgadas), haciendo factible la identificación y cuantificación de deterioros postproceso (gabinete) (Peshkin et al., 2019). Sin embargo, como mencionan los autores David Peshkin y otros referente a las tecnologías Lidar, Láser 3D y cámaras de alta resolución, es necesario seguir desarrollando la tecnología de reconocimiento de imágenes en este campo:

*“[...] al igual que con las otras tecnologías de imágenes, los principales avances tecnológicos se encuentran en la capacidad de interpretar los tipos de deterioro y la severidad a través de algoritmos de software basadas en una interpretación de los píxeles (Peshkin et al., 2019).”*(Peshkin et al., 2019)

## **2.5 Uso de drones en la minería**

La idea del uso de vehículos aéreos no tripulados data desde hace un par de siglos. Se puede estimar que esta idea se origina en el siglo XIX. En 1849, se utilizaron bombas en globos aerostáticos para atacar la ciudad de Venecia (García, 2017). En 1860, se utilizaron estos mismos vehículos para la toma de imágenes aéreas (Shahmoradi et al., 2020). Años más adelante, en 1917, el ingeniero Archibald Low logró desarrollar un prototipo de biplano pequeño capaz de ser guiado a distancia por radio. Y no es sino hasta la década de 1960, en la guerra de Vietnam, donde los vehículos aéreos utilizados empiezan a llamarse dron y se populariza el término (García, 2017).

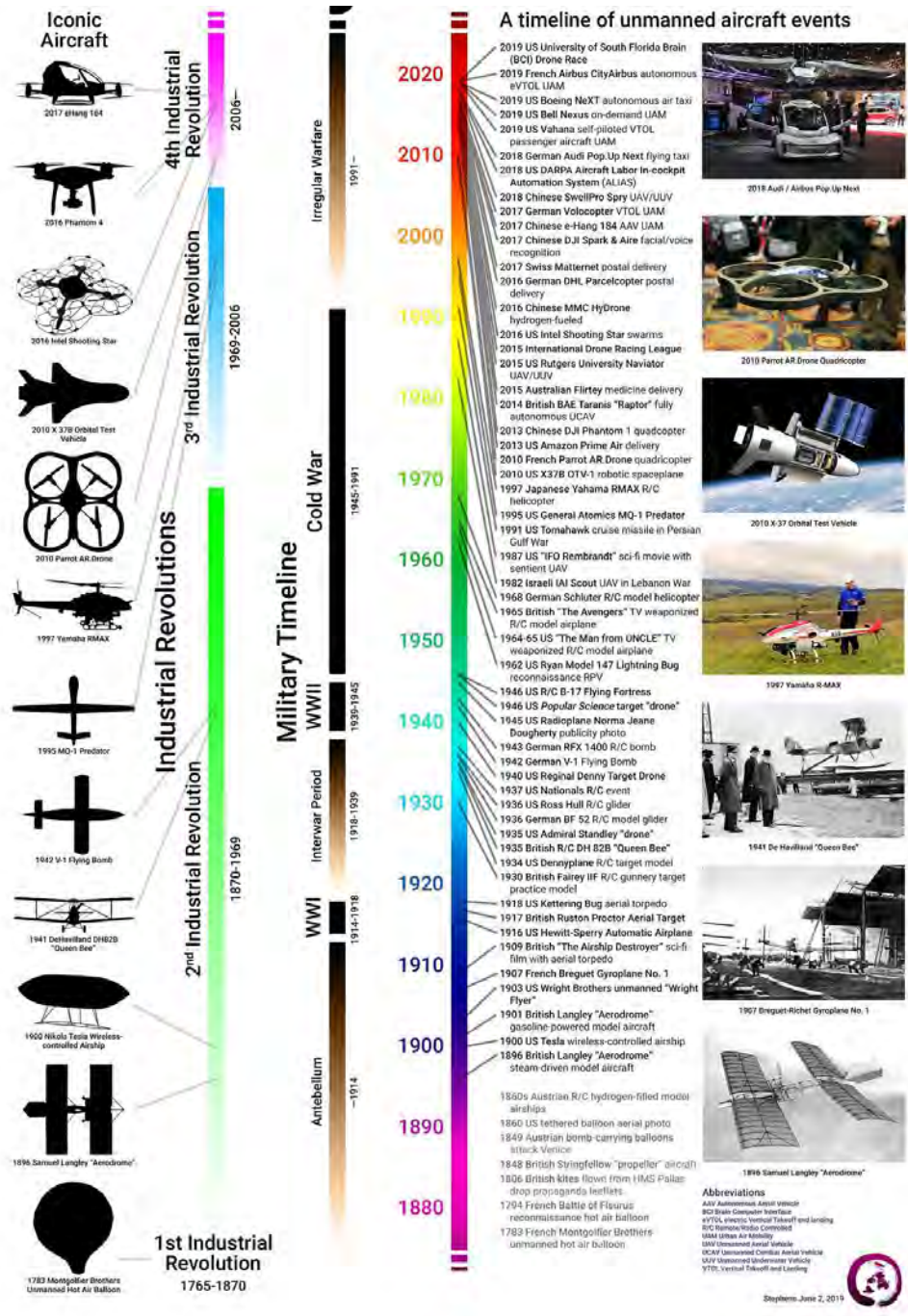


Figura 10. Línea de tiempo evolución de la tecnología del dron

Fuente: (Aviation Planning, n.d.)



En la última década, 2010, con los avances de la tecnología en microprocesadores, cámaras de alta definición, motores, baterías más ligeras y con mayor duración, entre otros desarrollos es que se ha popularizado para el público en general (García, 2017). Como menciona García:

*“El dron ha ido evolucionando y ha llegado al gran público que lo ha asimilado como un robot controlado con control remoto que dota de una gran autonomía y una gran gama de posibilidades de aplicación (García, 2017).”*

Actualmente, se puede definir un dron como un vehículo aéreo no tripulado y comandado a distancia. De hecho, recibe varios nombres como VANT (vehículo aéreo no tripulado, por sus siglas en español) o RPA (remotely piloted aircraft, por sus siglas en inglés) o UAV (unnamed aerial vehicle, por sus siglas en inglés). Según su uso, puede clasificarse en dos grupos: de uso civil o militar (García, 2017). Según su composición puede clasificarse en hasta 9 categorías: de ala fija, de ala batiente, de ala rotatoria, de rotor de inclinación, de ventilación canalizada, helicóptero, ornitóptero o de tipos no convencionales (Shahmoradi et al., 2020).

Según García, entre las aplicaciones generales de los drones se encuentran: los servicios de emergencia, de seguridad, de agricultura (detección de plagas o químicos), control ambiental, planeamiento urbano, en inspección de infraestructura y uso recreativo o deportivo (García, 2017). Se puede estimar además que recién en esta última década su aplicación en la industria minera ha tomado auge (García, 2017). Según Shamoradi y otros, hay dos ventajas para la utilización de esta tecnología en la industria. La primera es que los drones permiten una inspección muy rápida del área. Segundo, que permite la inspección y desbloqueo de aquellas zonas u objetos cuya accesibilidad se encuentra bloqueados (Shahmoradi et al., 2020).

Generalmente, los asentamientos mineros se encuentran ubicados en lugares remotos como las montañas, por ejemplo y el uso de mano de obra es intensivo. En consecuencia, los trabajos de control e inspección realizados por métodos tradicionales consumen tiempo y costo. Es así que los drones pueden ser usados para monitoreo y mapeo de las zonas de mina en menor tiempo, con mayor accesibilidad y con seguridad (Shahmoradi et al., 2020).

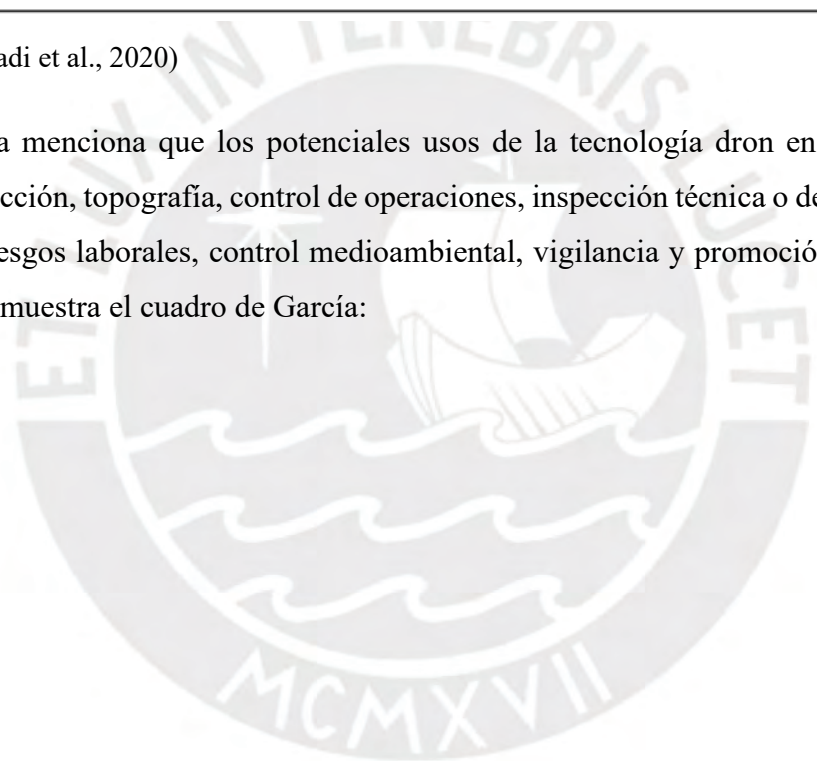
A continuación, se muestra el cuadro de Shahmoradi y otros, dónde se especifican las distintas aplicaciones de la tecnología dron tanto en minas superficiales, minas subterráneas o minas abandonadas.

**Tabla 11** Aplicación de la tecnología del dron en la industria minera

Surface Mine	Underground Mines	Abandoned Mines
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mine operation</li> <li>• 3D mapping</li> <li>• Slope stability</li> <li>• Mine safety</li> <li>• Construction monitoring</li> <li>• Facility management</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geotechnical characterization</li> <li>• Rock size distribution</li> <li>• Gas detection</li> <li>• Mine rescue mission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subsidence monitoring</li> <li>• Recultivation</li> <li>• Landscape mapping</li> <li>• Gas storage detection</li> <li>• Acid drainage monitoring</li> </ul>

Fuente: (Shahmoradi et al., 2020)

A su vez, García menciona que los potenciales usos de la tecnología dron en minería pueden abarcar la prospección, topografía, control de operaciones, inspección técnica o de mantenimiento, prevención de riesgos laborales, control medioambiental, vigilancia y promoción audiovisual. A continuación, se muestra el cuadro de García:



**Tabla 12** Aplicación de la tecnología del dron en la industria minera

<b>Campo</b>	<b>Actividades</b>
Prospección	Teledetección Magnetometría Aérea Gravimetría Aérea Radiometría aérea
Topografía	Topografía Cálculo de reservas Modelado 3D Cálculo de movimiento de tierras Cubicación de acopios y reservas en tiempo real Confeción de planes de labores Cálculo de pendientes Conocimiento hidrológico y zonas inundables
Control de operaciones	Control de stocks
Inspección técnica / mantenimiento	Control de infraestructura Inspección térmica
Prevención de riesgos laborales	Detección de zonas inseguras Detección de maniobras inseguras Detección de toxicidad del ambiente Trabajo en zonas de acceso riesgoso
Control medioambiental	Vector hidrológico Vector morfológico Vector vegetal paisajístico Vector edafológico Vector fauna
Vigilancia	Inspección visual en tiempo real

Adaptado de: (García, 2017)

### 2.5.1 Tipos de dron utilizados en minería a cielo abierto

Como se ha mencionado líneas arriba, el uso de esta tecnología en minería está orientado a la recolección de datos o inspección de la zona de operaciones. Entre los principales retos que se afrontan se tienen: la obtención de la información en lugares de difícil acceso o el mapeo de zonas para el reconocimiento de elementos (Shahmoradi et al., 2020). Actualmente, avances en el procesamiento de imágenes permiten cada vez mayor identificación de elementos (Shahmoradi et al., 2020). Así mismo, su uso se extiende a las actividades de voladura para la seguridad, reconocimiento de tipos de roca o incluso cartuchos (Shahmoradi et al., 2020).

A continuación, se presenta un cuadro sobre el uso de algunos drones para ciertas labores en minería.

**Tabla 13** Drones utilizados para voladura, topografía o geología en minería a cielo abierto

Type of Drone	Model	Goal	Wingspan (mm)	Length (mm)	Weight (g)	Endurance (min)	Payload (g)
Fixed-wing	Teklite	Characterization of blasting plumes	900	575	900-950	45	200
Fixed-wing	GoSurv	Characterization of blasting plumes	850	350	900-1200	50	>300
Fixed-wing	Swamp Fox	Characterization of blasting plumes	1800	1000	4500	40	1000
Multirotor	Quadcopter	Characterization of blasting plumes	-	-	2500	20	150
Multirotor	Phantom 2 Vision+	Topographic Survey	35 cm	-	1240	25	-
Multirotor	Aeryon Scout	Measuring fracture orientations	80×80×20	-	1300	25	400

Fuente: (Shahmoradi et al., 2020)

En el desarrollo de drones para labores en minería a cielo abierto se listan las siguientes empresas: Sensefly (Suiza), Drone Deploy (USA), Kespry (USA), Propeller Aero (Australia), QuestUAV (United Kingdom), Skycatch (USA), Prioria (USA), 3D Robotics (USA), Trimble (USA), Precision-hawk (USA), Pix4d (Suiza), Microdrones (Alemania) y Delair (Francia). A continuación, se muestra un cuadro con las principales características de los drones comerciales para minería a cielo abierto y las empresas que los producen.

**Tabla 14** Especificaciones comerciales de drones usados en minería

Type of Drone	Model	Company	Wingspan (mm)	Weight (g)	Endurance (min)	Payload (g)	Speed (m/s)
Fixed-wing	eBee X	Sensefly	1160	1400	90	-	11-30
Fixed-wing	eBee SQ	Sensefly	960	1100	55	-	11-30
Fixed-wing	eBee Classic	Sensefly	1100	690	50	-	11-25
Quadcopter	Kespry 2s	Kespry	-	2000	30	-	-
Quadcopter	DJI Mavic 2 Pro	Kespry, 3D Robotics	350	907	30	-	20
Quadcopter	DJI Phantom 4 Pro	Propeller Aero, 3D Robotics	350	1388	30	-	20
Fixed-wing	Q-200 Surveyor	QuestUAV	1950	4600	60	590	-
Fixed-wing	datahawk	QuestUAV	1164	2150	45	-	19
Quadcopter	Explore-1	Skycatch	650	3600	17	-	17
Fixed-wing	Leviathan	Prioria	2590	5897	90	907	-
Fixed-wing	Maveric	Prioria	749	1179	45-90	-	13.5
Hexacopter	Hex	Prioria	800	6350	15	-	6.2
Hexacopter	Yuneec 3DR	3D Robotics	-	1645	28	-	13.5
Quadcopter	DJI M200	Precision-hawk	643	6140	13-24	1610	23
Quadcopter	DJI Inspire 2	3D Robotics	427	4250	32-27	-	26
Hexacopter	Trimble ZX5	Trimble	850	5000	20	2300	9
Fixed-wing	Trimble UX5	Trimble	1000	2500	50	-	22
Fixed-wing	Trimble UX5	Trimble (HP)	1000	2900	35	-	24
Fixed-wing	FIREFLY6 PRO	Precision-hawk	1524	4500	50-59	700	15-18
Quadcopter	DJI M210	Precision-hawk	643	4570	13-24	1570	24
Hexacopter	MATRICE 600	Precision-hawk	1133	10000	18	5500	18
Quadcopter	md4-200	Microdrones	540	800	25	250	8
Quadcopter	md4-1000	Microdrones	1030	2650	45	1200	12
Quadcopter	md4-3000	Microdrones	2052	6000	45	5000	20
Fixed-wing	UX11	Delair	1100	1400	59	-	15
Fixed-wing	DT18 HD	Delair	1800	2000	120	-	17
Fixed-wing	DT26X LiDAR	Delair	3300	17000	110	-	17
Quadcopter	ELIOS	Flyability	400	700	10	-	6.5
Quadcopter	ELIOS2	Flyability	400	550	10	-	4.68

Fuente: (García, 2017)

### 2.5.2 Tipos de Sensores:

Entre los tipos de sensores que los drones pueden portar se tiene: (a) sensores infrarrojos, (b) los ultrasónicos, (c) cámara RGB, (d) cámaras stereo, (e) localizadores láser, (f) ultra radar de banda ancha (UWB, por sus siglas en inglés), (g) sensores hiperspectrales, (h) sensores magnéticos, (i) detectores de gas y (j) rango espectral infrarrojo cercano y visible.



Figura 11. Tipos de sensores usados en drones

Fuente: (García, 2017)

A continuación, se presenta una table con una breve explicación de cada uno de los tipos de sensores que son utilizados en minería.

**Tabla 15** Uso de sensores en minería

Sensores	Uso
Infrarrojos	Utiliza el espectro infrarrojo para la detección de obstáculos
Ultrasónicos	Emisión de sonido de alta frecuencia para la detección de obstáculos
Cámara RGB	Toma de imágenes RGB
Cámara Stereo	Creación de imágenes 3D
Localizadores láser	Detección de obstáculos
Ultra radar de banda ancha	Detección de obstáculos y creación de imágenes de alta resolución
Sensores hiperespectrales	En geología, mapeo de minerales y exploración
Sensores magnéticos	Detección del campo magnético
Rango espectral infrarrojo cercano y visible	Detección de humedad superficial en tajos abiertos, presas de relaves, paredes de espacios subterráneos y superficies
Calidad de Aire	Detección de calidad de aire, presencia de gas, monitoreo de polvo, entre otros

Adaptado de: (Shahmoradi et al., 2020).

## 2.6 Procesamiento de imágenes: técnicas para caminos

Los sistemas automáticos o semi automáticos de recolección de daños no podrían cumplir su objetivo sin las técnicas de procesamiento de imágenes. Estos sistemas articulados a estas técnicas

de procesamiento evitan el trabajo de campo prolongado, la exposición riesgosa del personal al tráfico y los resultados subjetivos (Morales Sánchez et al., 2019). A su vez, esta solución conjunta logra un estudio más eficiente y reduce el costo y tiempo del mismo (Reyes et al., 2019).

Las técnicas de procesamiento de imágenes han evolucionado junto con los avances en Inteligencia Artificial. En este campo, se tiene principalmente los sistemas difusos, las redes neuronales, la inteligencia de enjambre y el sistema inmune artificial. Cada una de estas técnicas compone un sistema inteligente que busca reconocer las imágenes para su aplicación en distintas ramas como la geología, arquitectura, medicina, zoología, seguridad, entre otras (Reyes et al., 2019).

### **2.6.1 Sistemas Difusos:**

En el mundo real, existen elementos cuya pertenencia a un conjunto o clase está definida. Por ejemplo: “la clase o conjunto de mamíferos”. No habrá duda en los elementos que componen este conjunto. Sin embargo, algunos otros elementos del mundo físico presentan una ambigüedad respecto del conjunto que se quiere formar. Por ejemplo: el conjunto o clase de “los hombre más altos” (Zadeh, 1965).

Un conjunto difuso es un conjunto caracterizado por una función de pertenencia. Esta función de pertenencia otorga a cada elemento un grado continuo de membresía que varía entre 0 y 1 (Zadeh, 1965). Si 0 es “completamente falso” y 1 “completamente verdadero”, para que un elemento sea parte de un conjunto, debe tener un valor cercano a 1. Este valor está dado por la función de pertenencia. Así, los conjuntos definidos de manera imprecisa – y que son parte “*importante del pensamiento humano, particularmente en el reconocimiento de patrones, comunicación de información y abstracción*”(Zadeh, 1965) - pueden representarse a través de esta lógica difusa.

Las características de una imagen no pueden ser delimitadas de una forma exacta. De igual manera, los elementos que componen la imagen. Debido a esto, es que la lógica difusa se ha utilizado ampliamente en el trabajo de procesamiento de imágenes. En los últimos años, el procesamiento digital de las mismas a través de la teoría de conjuntos difusos se ha incrementado. Por ejemplo, en la aplicación del campo de la geología o arquitectura (Reyes et al., 2019). En la identificación

de 5 tipos poros en rocas carbonatadas tuvo un éxito entre el 93.6% y el 100% comparado con el promedio de otros métodos.

## **2.6.2 Redes neuronales:**

Las redes neuronales artificiales simulan la manera en que está compuesto el cerebro para almacenar y procesar la información. Son redes interconectadas en paralelo jerarquizadas que responden a estímulos del mundo físico real del mismo modo que nuestro sistema nervioso (Aldabas-rubira et al., n.d.) Así, las redes neuronales artificiales vienen siendo usadas en muchos campos como el de la segmentación de objetos en imágenes (De Albuquerque et al., 2009). Principalmente, existen dos tipos de redes neuronales que vienen siendo utilizadas en el procesamiento de imágenes: multicapa y convolucionales (Reyes et al., 2019).

### **2.6.2.1 Redes Multicapa:**

La arquitectura de estas redes está compuesta por una red de neuronas de entrada, una de salida y un conjunto de varias redes ocultas entre estas (capas). Este tipo de redes presenta 3 características principalmente: se componen de funciones no lineales, las capas de neuronas ocultas capacitan a la red para aprender y almacenar información y; los pesos de las conexiones (jerarquización) dentro de la red pueden variar. Esto es lo que hace muy potente la capacidad de aprendizaje de este tipo de red neuronal (Aldabas-rubira et al., n.d.).

### **2.6.2.2 Redes convolucionales:**

Una convolución se puede definir como una tercera función que resulta de la operación de otras funciones. Este tipo de redes son una variación de la red neuronal multicapa basada en los mecanismos de función de la corteza visual de los animales. La relación entre cada capa está dada por operaciones de convolución (Lopez & Yu Liu, 2017).

*“En el procesamiento de imágenes, donde la convolución es comúnmente utilizada, se utiliza como filtro para cambiar características en las imágenes, remarcar contornos, difuminar o reducir el ruido de alta o baja frecuencia” (Lopez & Yu Liu, 2017)*



### **2.6.3 Inteligencia de enjambre:**

La inteligencia de enjambre está basada en los estudios del comportamiento en sociedad de los animales como las aves, las hormigas o las abejas. La interacción de los individuos en sociedad influye en el comportamiento individual y ayuda a estos a adaptarse al entorno local o global. Así, se puede decir que la inteligencia de enjambre trata de la adaptación colectiva (Eberhart & Kennedy, 2006).

El algoritmo que usa este sistema de inteligencia es tomar el mejor resultado de cada individuo respecto de la tarea que se quiere lograr además del mejor resultado de la población. Luego, se acelera a cada individuo “partícula” hacia los mejores resultados (Eberhart & Kennedy, 2006). En el procesamiento de imágenes, los autores Ankita Bose y Kalyani Mali usan un algoritmo basado en el concepto de optimización artificial de colonias de abejas y lógica difusa (Bose & Mali, 2016). Este método logra segmentar imágenes para detectar elementos en las mismas a través de la detección del cambio de intensidad en los píxeles (Reyes et al., 2019).

### **2.6.4 Sistema Inmune artificial:**

Este sistema inteligente está inspirado en el sistema inmunológico humano que reconoce las amenazas que ingresan a nuestro cuerpo, logra adaptarse para la eliminarlas y las recuerda para combatirlos en un futuro de manera más acelerada (Greensmith, 2014). Así, resulta muy útil para el reconocimiento de patrones (Reyes et al., 2019) y la optimización de procesos (Greensmith, 2014).

Un ejemplo de aplicación está en el diagnóstico a través de imágenes médicas. Estas dependen del instrumento que hace las tomas y el juicio del profesional que las evalúa (Reyes et al., 2019). Así, la aplicación en este campo se realiza con el objetivo de reducir la subjetividad que puede surgir por los diversos criterios de evaluación de los profesionales. Se busca conseguir “un reconocimiento más objetivo e independiente del profesional que hace el diagnóstico”(Reyes et al., 2019).

### 2.6.5 Lenguajes de programación:

El uso de algoritmos y lenguajes de programación conforman estos sistemas cuyo comportamiento son percibidos como inteligentes (Carratala, 2019). Los lenguajes de programación son el “idioma” bajo el cuál se dictan las instrucciones (algoritmo) que deberá seguir el sistema inteligente.

El Índice TIOBE - creado por la compañía que lleva el mismo nombre – lista los lenguajes de programación más usados en el mercado. **TIOBE** (*The Importance of Being Ernest*) es una compañía holandesa que ha desarrollado, desde el año 2001, un algoritmo que puede calcular la utilización de los distintos lenguajes de programación (Redondo, 2016).

Los lenguajes de programación se clasifican en: de bajo nivel, de alto nivel y de nivel intermedio. La diferencia entre estos niveles se debe al rendimiento, la sencillez del lenguaje (Carratala, 2019) e independencia del ordenador donde se ejecute (Gracia, 2003). Lenguajes como C y C++ son de bajo nivel porque tienen mayor rendimiento pero se deben cuidar muchos detalles (Carratala, 2019). Lenguajes como Python, son considerados de alto nivel por su independencia del ordenador en concreto (Gracia, 2003) aunque tienen menor rendimiento (Carratala, 2019). Y, lenguajes de nivel intermedio son un balance óptimo entre eficiencia y sencillez del lenguaje como JAVA (Carratala, 2019).

A continuación, se muestra la lista de los lenguajes de programación más usados según este índice a Julio de 2020.

**Tabla 16** Índice TIOBE: Lenguajes de Programación más usados a Julio 2020

Jul 2020	Jul 2019	Change	Programming Language	Ratings	Change
1	2	▲	C	16.45%	+2.24%
2	1	▼	Java	15.10%	+0.04%
3	3		Python	9.09%	-0.17%
4	4		C++	6.21%	-0.49%
5	5		C#	5.25%	+0.88%
6	6		Visual Basic	5.23%	+1.03%
7	7		JavaScript	2.48%	+0.18%
8	20	▲▲	R	2.41%	+1.57%
9	8	▼	PHP	1.90%	-0.27%
10	13	▲	Swift	1.43%	+0.31%
11	9	▼	SQL	1.40%	-0.58%
12	16	▲▲	Go	1.21%	+0.19%
13	12	▼	Assembly language	0.94%	-0.45%
14	19	▲▲	Perl	0.87%	-0.04%
15	14	▼	MATLAB	0.84%	-0.24%
16	11	▼▼	Ruby	0.81%	-0.83%
17	30	▲▲	Scratch	0.72%	+0.35%
18	33	▲▲	Rust	0.70%	+0.36%
19	23	▲▲	PL/SQL	0.68%	-0.01%
20	17	▼	Classic Visual Basic	0.66%	-0.35%

Fuente: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/>

Entre los cuatro lenguajes de programación más usados, se tiene: C, C++, JAVA y Python. A continuación, se describirá cada uno de estos lenguajes de programación a la vez, que se les comparará según las características de confiabilidad, facilidad de aprendizaje, portabilidad, legibilidad y reusabilidad (Junior et al., 2012).

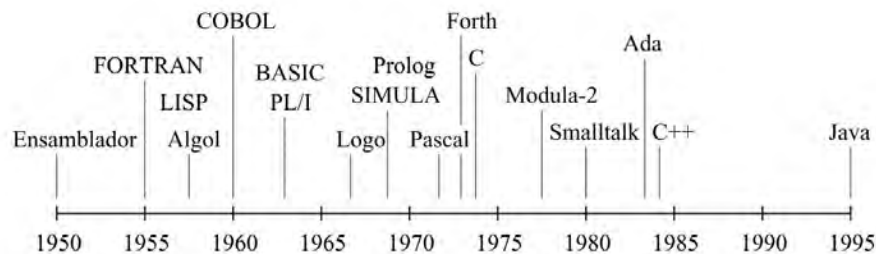


Figura 1.2: Cronología en el desarrollo de algunos lenguajes de programación

Figura 12. Lenguajes de Programación: Líneas de Tiempo

Fuente: (Peña & Cela, 2000)

### 2.6.5.1 *Lenguaje de Programación C:*

En 1972, fue creado por Dennis Ritchie en los Laboratorios de AT&T con el propósito definido de diseñar el sistema operativo UNIX (Peña Basurto & Cela Espín, 2000). Sin embargo, al ser muy flexible y potente (Peña Basurto & Cela Espín, 2000) además de tener muchas instrucciones de control y facilidad en su estructura de datos (Junior et al., 2012) ha sido utilizadas para diversos programas y aplicaciones.

### 2.6.5.2 *Lenguaje de Programación C++:*

Este lenguaje esta orientado a la programación con objetos (Peña & Cela, 2000). Es un lenguaje híbrido que toma como base el lenguaje de programación C (Peña & Cela, 2000). Fue creado a inicios de la década de 1980 por Bjarne Stroustrup con base en C y Simula y ha sido estandarizado por la American National Standard Institute (ANSI) y la International Standard Organization (ISO) (Junior et al., 2012).

### 2.6.5.3 *Lenguaje de Programación Java:*

Java es un lenguaje de programación orientado a objetos pero que puede cumplir propósitos más generales (Peña Basurto & Cela Espín, 2000). First Person, una filial de Sun Mrycosystem deseaba un lenguaje con menor costo de pruebas, orientado a objetos, la inclusión de bibliotecas gráficas y la independencia del sistema operativo (José Vélez Serrano et al., 2011). Fue creado por James Gosling y Bill Joy y descende de un lenguaje llamado Oak – cuyo propósito era desarrollar

un software para televisión interactiva. La sintaxis es parecida a C y C++ pero esto es toda la similitud (Peña Basurto & Cela Espín, 2000).

### 2.6.5.4 *Lenguaje de Programación Python:*

A finales de los años 80's e inicios de los 90's Guido Van Rossum, un programador holandés, comenzó el desarrollo de este lenguaje de programación como sucesor del lenguaje ABC y para funcionar con el sistema operativo Amoeba (Challenger-Pérez, Ivet. Díaz-Ricardo, Yanet. Becerra-García, 2014). Python es un lenguaje de programación multiparadigma<sup>2</sup> donde prima básicamente la legibilidad – sintaxis muy elegante – de entorno interactivo que detecta fácilmente errores y posee un rico juego de estructuras de datos (Gracia, 2003). Esta es la opción que suele elegirse para el desarrollo de sistemas de inteligencia artificial (Carratala, 2019).

A continuación, se presentan dos ejemplos de programación en los cuatro lenguajes de programación con la frase “Hola, Mundo” y “Hola de nuevo, mundo”.

<i>/* Exemplo em C */</i>	<i>/* Exemplo em C ++ */</i>	<i>/* Exemplo em Java */</i>
<pre>#include &lt;stdio.h&gt; main( ) {     printf("hello, world\n"); }</pre> <p>Fonte: BOOTLE, 1989</p>	<pre>#include &lt;iostream&gt; Using namespace std; int main( ) {     cout&lt;&lt; "olá, mundo!\n";     return 0; } Fonte: HUBBARD, 2003</pre>	<pre>import java.awt.*; public class applet extends java.applet.Applet {     public void paint(Graphics g)     {         g.drawString("hello world!", 25, 25); } }</pre> <p>Fonte: NEWMAN, 1997</p>

Figura 13. Lenguajes de Programación: Ejemplo de sintaxis 1

Fuente: (Junior et al., 2012)

<sup>2</sup> Paradigmas de la programación: Orientado al procedimiento, orientado a funciones, orientado a la lógica, orientado a objetos (José Vélez Serrano et al., 2011)

**¡Hola de nuevo, mundo!**

Te presentamos los programas «¡Hola, mundo!» en Python (izquierda) y C (derecha).

<pre>print 'Hello, world!'</pre>	<pre>#include &lt;stdio.h&gt;  int main(void) {     printf("Hello, world!\n");     return 0; }</pre>
----------------------------------	--

Como puedes comprobar, Python parece ir directamente al problema: una sola línea. Empezaremos aprendiendo Python.

Figura 14. Lenguajes de Programación: Ejemplo de sintaxis 2

Fuente: (Gracia, 2003)

### **Confiabilidad:**

Esta característica tiene que ver con la facilidad del lenguaje para detectar errores en la fase de programación (Junior et al., 2012).

### **Facilidad de Aprendizaje:**

Esta característica tiene que ver con la facilidad de entendimiento para el programador. Un lenguaje que ofrece varias formas para hacer los mismo puede terminar siendo confusa (Junior et al., 2012).

### **Portabilidad:**

Esta características tiene que ver con la posibilidad de que un proyecto bajo el lenguaje de programación sea desarrollado en cualquier plataforma (Junior et al., 2012). Es decir, la independencia del tipo de ordenador (Gracia, 2003).

### **Legibilidad:**

Esta característica tiene que ver con la lógica de los códigos que componen el lenguaje de programación. Es decir, el flujo de raciocinio que siguen en caso otro analista quiera revisar el código (Junior et al., 2012).

## Reusabilidad:

Esta propiedad tiene que ver con la facilidad de reaprovechamiento del código fuente. Es decir, cada vez que es necesario acceder a un banco (conjunto de instrucciones o tareas) es posible hacerlo solamente con una llamada a la clase responsable de esto (Junior et al., 2012).

A continuación, se muestra el cuadro elaborado por los autores Junior M., Azevedo C., Virtuoso G. y Martins P., respecto de los lenguajes de programación y las características antes mencionadas (Junior et al., 2012).

**Tabla 17** Lenguajes de Programación: Cuadro comparativo según características

Propiedad	C	C++	JAVA
<b>Confiabilidad</b>	Presentan incontables características que estimulan errores de programación (manipulación directa de direcciones de memoria por medio de punteros e comando de desvío incondicional irrestricto).		Atiende este requisito
<b>Facilidad de Aprendizaje</b>	Más fácil que el C++, con pocos conceptos y bastante ortogonal. La exigencia del uso de punteros aumenta la dificultad de aprenderlo.	Une las dificultades de aprendizaje de C y Java, además de tener un número excesivamente alto de conceptos diferentes.	Más fácil que C++. Existen muchos conceptos y muchas maneras de alcanzar una determinada funcionalidad; sin embargo, no es simple.
<b>Portabilidad</b>	Son lenguajes con versiones estandarizadas por las ANSI y por ISO; sin embargo, los compiladores ofrecen características adicionales. Dejan brechas para que ciertos conceptos sean definidos conforme la plataforma de ejecución (como intervalo de valores de tipo entero).		El portador de los derechos de propiedad establece un patrón. Fue diseñada a modo de evitar brechas que comprometiesen la portabilidad.
<b>Legibilidad</b>	Tiene características fácilmente usadas para crear un código ilegible y difícil de mantener.	Cuando se trata de programación orientada a objetos, esta característica es mejorada porque estimula el encapsulamiento y protección de datos.	Solo admite la orientación a objetos y además ofrece estímulos para la construcción de un código bien documentado.
<b>Reusabilidad</b>	Ofrece el mecanismo de bibliotecas compuestas por funciones, tipos, variables e constantes para facilitar el reuso del código	Ofrecen bibliotecas de clases, además de tener el mecanismo de paquetes. Así mismo, disponen de medios para promover el encapsulamiento y la producción de datos. Lo cuál estimula la construcción de componentes reusables y el poliformismo universal. Esto facilita la creación de un código reusable.	

Adaptado de: (Junior et al., 2012)

### 2.6.6 Aplicación en Caminos:

En el campo de pavimentos, la detección de daños es importante para la evaluación y conservación eficiente de la vía debido a que permite reducir el costo de mantenimiento y aumentar su vida útil (Li et al., 2014). Actualmente, la utilización de los sistemas de inteligencia artificial para la detección de daños ha avanzado principalmente en el reconocimiento de dos tipos de daños: grietas y fisuras (Reyes et al., 2019). En la siguiente figura, se muestra el marco general del procesamiento de imágenes para el reconocimiento de fallas usando inteligencia artificial (Li et al., 2014).

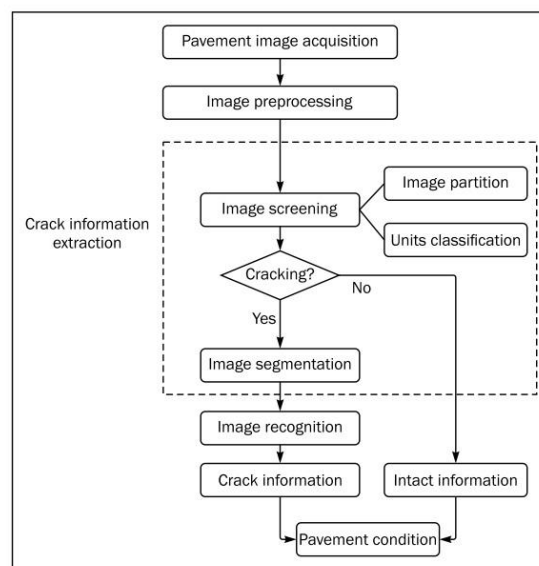


Figure 1 - Crack detection framework based on image processing

Figura 15. Fases para el procesamiento de imágenes

Fuente: (Li et al., 2014)

En primer lugar, una vez obtenida la imagen se busca hacer la segmentación de esta que busca identificar los elementos que la componen (entre ellos el fondo y los daños). Posteriormente, se realiza el reconocimiento y clasificación de estos elementos. Es decir; el cálculo por tipo de fallas.



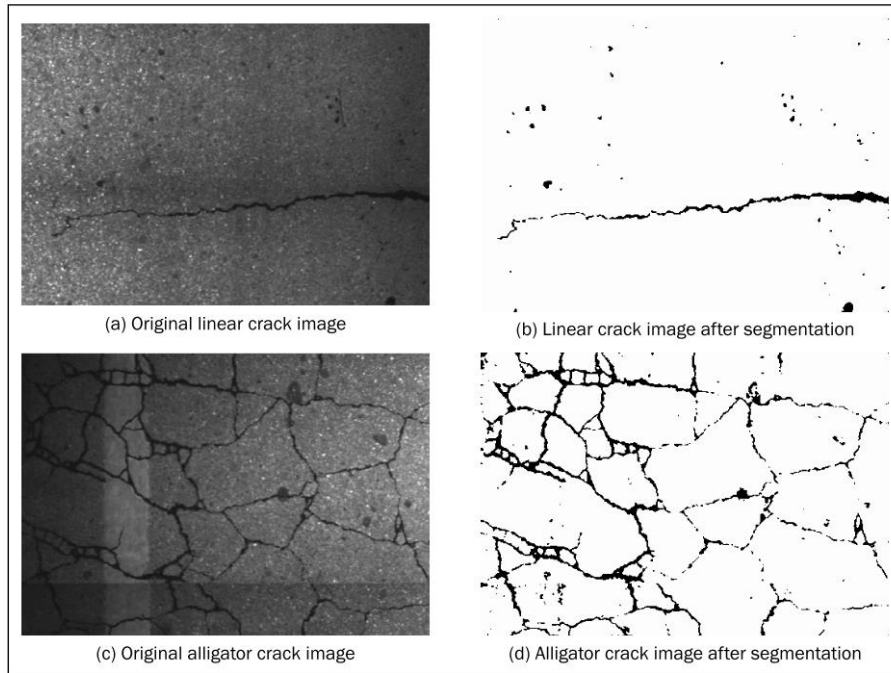


Figure 9 - Image segmentation results by Otsu method

Figura 16. Segmentación de imágenes: fisuras y piel de cocodrilo

Fuente: (Li et al., 2014)

Un ejemplo destacado por los autores Juan Castelblanco, Marcela Mejía y Oscar Reyes (Reyes et al., 2019), es el trabajo de los autores Li Li, Lijun Sun, Guobao Ning, Shengguang Tan (Li et al., 2014) que utilizan un sistema de Red Neuronal de Propagación hacia atrás (BPNN, Back Propagation Neural Network) cuyos resultados en la detección de grietas se muestra a continuación. Los ratios fueron “alligator” (97.5%), grieta transversal (100%), grieta longitudinal (88%) (Li et al., 2014).

**Tabla 18** Red Neuronal de Propagación hacia atrás: Resultados Obtenidos

Table 1 - Classification result by BPNN

Input \ Output	Alligator crack	Linear crack	Accuracy (%)
Alligator crack	39	1	97.5
Linear crack	5	35	87.5
Total	—	—	92.5

Table 2 - Classification result by direction angle

Input \ Output	Transversal crack	Longitudinal crack	Accuracy (%)
Transversal crack	25	0	100
Longitudinal crack	3	22	88.0
Total	—	—	94.0

Fuente: (Li et al., 2014)

Para una mejor referencia, los autores muestran otros estudios realizados redes neuronales principalmente y los resultados obtenidos (Li et al., 2014). Así, concluyen que el método utilizado de red neuronal es bastante aceptable y que tiene un balance entre los resultados de clasificación y el cálculo es suficiente para su aplicación práctica en la ingeniería.

**Tabla 19** Redes Neuronales: Resultados obtenidos en otros estudios

Researcher	Classification methods	Rate of correct classification				Others
		Alligator (NIS <sup>④</sup> )	Transversal (NIS)	Longitudinal (NIS)	Intact (NIS)	
Lee J	INN <sup>①</sup>	38% (16)	55% (22)	78% (49)	100% (29)	The hidden layer has 60 nodes
	HNN <sup>②</sup>	13% (16)	64% (22)	98% (49)	100% (29)	
	PNN <sup>③</sup>	88% (16)	90% (22)	98% (49)	100% (29)	
Koutsopoulos H N	Tree structure	73% (11)	100% (8)	100% (2)	—	—
	Logit model	91% (11)	87% (8)	100% (2)	—	—
Zhou J	Wavelet analysis	70% (10)	100% (20)	100% (20)	—	—
Lee H	Autocorrelation function	67% (3)	50% (2)	92% (13)	100% (6)	—
Fukuhara T	Eigenvalue classification	—	—	—	80% (not in detail)	—
Li	SVM <sup>⑤</sup>	—	—	—	78% (305)	—

① INN, image-based neural network; ② HNN, histogram based neural network; ③ PNN, Proximity based neural network;

④ NIS, number of image samples; ⑤ SVM, support vector machine

Fuente: (Li et al., 2014)

## 2.7 Marco teórico:

Según la autora **Valentina de Giorgis**, la industria minera sostiene en cuatro pilares el éxito (rentabilidad) de su operación. Cómo se ha mencionado, estos son: el precio del mineral, la cantidad del mineral producido, la inversión de realizada y los costos de producción (De Giorgis, 2016). Adicionalmente, los autores **Almeida, Castro Neves, Arroyo y Campos** comentan en su ensayo que la oscilación de los precios de los commodities sumado al incremento de los costos operativos impulsan al sector a una constante búsqueda de procesos más eficientes (Almeida et al., 2019).

La autora **Cherezade Saud** en su tesis nos muestra la lista de precios del cobre junto con los costos de extracción ocurrido entre 1995 y 2015 (obtenida de la Comisión Chilena del Cobre – Cochilco según la Bolsa de Metales de Londres). Con esta información, se ha calculado el porcentaje de los costos de extracción según el precio de los metales por cada año. En el gráfico que se muestra a continuación se aprecia que este indicador ha fluctuado entre 38% y 92%. Adicionalmente, a través

de un análisis de las principales compañías mineras de Perú que listan en la **Bolsa de Valores de Lima** se ha calculado que el costo de ventas promedio (costo de extracción) varía entre 51.8% y 81.45%.

Por lo expuesto líneas arriba y con base en los datos recogidos de los autores se evidencia la importancia e incidencia de los costos operativos o de extracción. Los mismos que no solo significan un pilar importante de la rentabilidad minera; sino que, además, presentan la mayor parte del porcentaje de venta. En consecuencia, se puede afirmar que el presente trabajo de investigación se halla circunscrito en los costos de producción y la búsqueda de mejores procesos que impacten de manera positiva la rentabilidad de la operación (éxito).

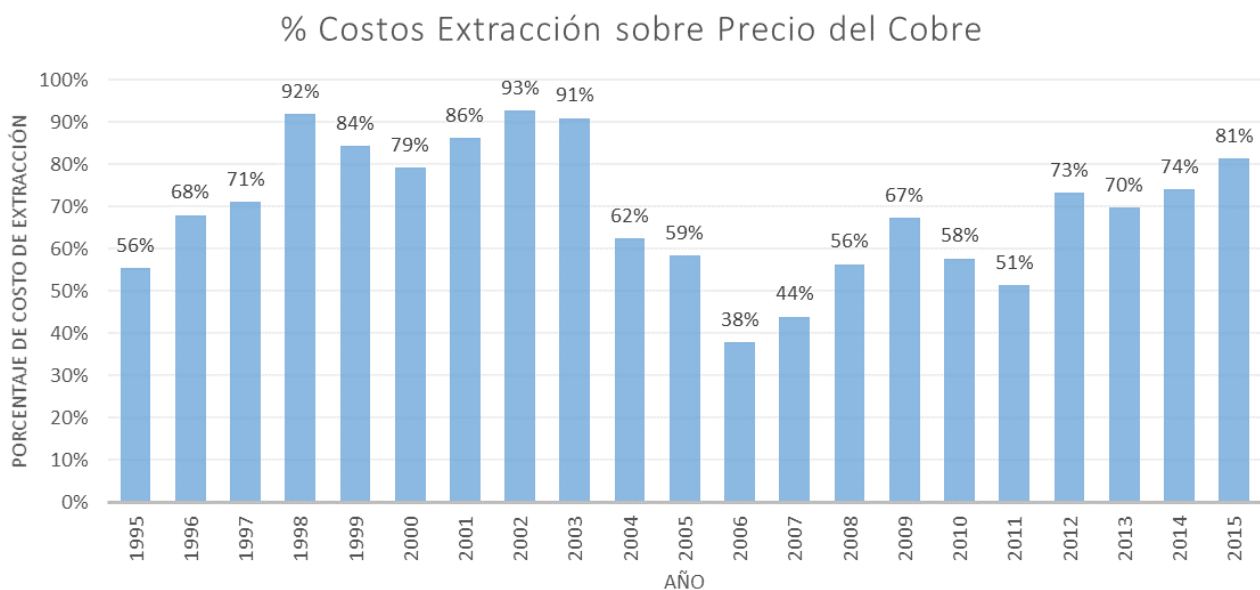


Figura 17. Costos de extracción v.s. Precio del cobre

Adoptado de: (Saud, 2017)

De acuerdo con el autor **Roger Thompson**, dentro de los costos operativos en las minas a tajo abierto, los costos de transporte significan hasta un 50% o más (Thompson, 2010) de los costos de operación. Según los autores **Dwayne Tannant y Bruce Regensburg**, estos se encuentran entre el 40% al 60%. Es decir, el transporte responde por la mitad o más de los costos más importantes en los que incurre una operación minera a tajo abierto. Por tanto, poner atención en los costos de

transporte resulta relevante si se quiere tener resultados significativos en la optimización y/o reducción de costos. La autora **Constanza Gómez** afirma:

“[...] es el proceso [transporte] con mayor cantidad de equipos involucrados y presenta un menor rendimiento productivo por equipo.”(Gómez, 2019)

Los elementos que conforman el sistema de transporte minero discontinuo son los vehículos de carga y las vías o caminos de acarreo, principalmente. Respecto de los vehículos de carga, se afirma que los avances en la tecnología han contribuido al desarrollo de vehículos o camiones mineros que cada vez son más grandes y pueden llevar cargas más pesadas en cada viaje. En este sentido, la autora **C. Gómez** afirma en su tesis que en las últimas tres décadas los vehículos de carga han pasado de una capacidad de 20 toneladas a una de 350 toneladas (Gómez, 2019).

Respecto de las vías o caminos de acarreo de mineral y material, los autores **Dwayne Tannant y Bruce Regensburg** afirman en su artículo que estos caminos deben ser considerados como un activo importante así como los vehículos de carga y demás equipamiento usado para el transporte (Tannant & Regensburg, 2001). En la misma línea de opinión, **Roger Thompson** afirma que el diseño de estas vías y la posterior gestión y mantenimiento son un componente principal de la operación de transporte en las minas de tajo abierto (Thompson, 2010). La correcta gestión logra un eficiente costo por tonelada acarreada (Thompson, 2010).

Los caminos o vías de acarreo sufren daños, deterioros, fallas o resistencia a la rodadura – en el lenguaje minero (Saavedra, 2015) - debido principalmente a dos componentes: el tráfico de vehículos de carga pesada y el clima (Pradena et al., 2010). Tal y como mencionan los autores **Pradena, Mery y Novoa**, en la gestión de caminos mineros son necesarias las actividades de mantenimiento que reduzcan la aparición de deterioros debido al impacto económico que significaría su inoperatividad o cierre (Pradena et al., 2010). Como expresa el autor **Wilfan Perafan** en el gráfico a continuación, el mantenimiento debe mantener a la vía en buen estado para no caer en mayores costos de reconstrucción o rehabilitación.

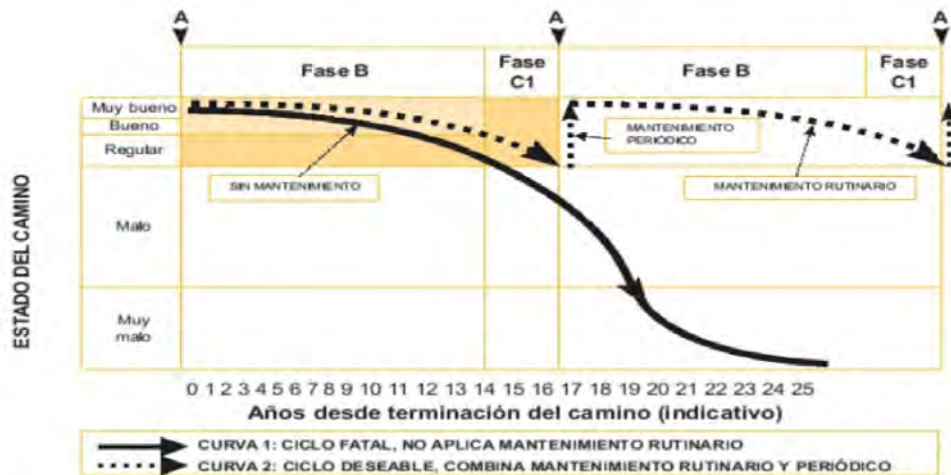


Figura 18. Condición de la vía con y sin mantenimiento

Fuente: (Perafan, 2013)

**Pradena, Mery y Novoa** mencionan, además, que estos deterioros pueden clasificarse en pérdida de fracción gruesa (de la capa de rodadura), erosiones, baches, calaminas (encalaminado), entre otros para los caminos expuestos a tránsito de carga pesada y clima de alta montaña (Pradena et al., 2010). Según la clasificación que hace el “Manual de Carreteras” del **Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones de Perú**, los deterioros se pueden clasificar en deformación, erosión, baches, encalaminado, lodazal y cruce de agua (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013).

Entonces, el mantenimiento oportuno y por consiguiente, la detección de fallas o deterioros a tiempo de los caminos o vías de acarreo resultan ser actividades relevantes para mantener la eficiencia operativa de los mismos. Respecto de la detección de fallas, los autores **T. Heyns, P.S. Heyns y J.P. de Villiers**, señalan en 2012 que los desarrollos para esta actividad utilizan los patrones de vibración en los vehículos sumados a inteligencia artificial o la estimación del perfil de los caminos. Es decir, las técnicas pueden clasificarse en dos tipos de modelos: modelos de estimación por vehículo o modelos por clasificación de carreteras a través de un criterio técnico como el perfil de la vía, por ejemplo. (Heyns et al., 2012).

Respecto de los modelos por estimación de vehículo, la empresa **Caterpillar** tiene un desarrollo que logra medir el perfil de la vía a través de la variación del bastidor del vehículo mientras transita

por la vía (Caterpillar, n.d.). Respecto de los modelos a través de la categorización de la vía según criterio técnico, la empresa **Altavia** mide el perfil de la vía con un perfilómetro instalado en los vehículos de acarreo (Altavia, 2019b). El presente trabajo, estará enmarcado en el modelo de clasificación de la carretera a través del criterio técnico. Se analizará la viabilidad del uso de un vehículo no tripulado comandado a distancia (RPA, remotely pilot aircraft) para la detección de estas fallas de manera oportuna.

El uso de dron en la minería se ha extendido a labores de prospección, topografía, control de operaciones, inspección técnica, prevención de riesgos laborales, control medioambiental, vigilancia y servicios de emergencia y rescate (García, 2017).

En suma y con la base teórica propuesta por los autores referidos en este Marco Teórico, el presente trabajo de investigación se encuentra enmarcado en las siguientes premisas. La gestión de cotos es significativa para lograr una mejor rentabilidad en la operación minera. Los costos de transporte tienen una incidencia importante en los costos totales de la operación minera. El mantenimiento oportuno de las vías las conserva en estado de operatividad y previene de mayores costos de rehabilitación y construcción. Los deterioros o fallas son el objeto de estudio para los planes de mantenimiento que logren evitar la reducción de productividad o por el contrario que aumenten la misma. Por último, el uso de dron en la minería se viene extendiendo en distintos ámbitos de la minería como la geotecnia y sería importante analizar la viabilidad de su utilización en la detección oportuna de fallas.

### 3. CAPÍTULO III: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Identificación del problema:

Por lo revisado en el capítulo anterior, queda demostrado el problema que los *deterioros o fallas resultantes en las vías de acarreo* causan en la operación minera. Estos deterioros – que son consecuencia de los embates del clima y el paso del tráfico - *producen un impacto negativo en la productividad y los costos*. Las vías de acarreo que, por su naturaleza y servicio, no pueden ser pavimentadas, son grandes vías que requieren una gestión adecuada y oportuna intervención para no encarecer los costos de mantenimiento o interrumpir más de lo necesario los ciclos de operación.

La gestión de caminos oportuna nos trae beneficios de productividad (servicio) y optimización de recursos (costos). Como se aprecia en el diagrama de “*Condición de la vía con y sin mantenimiento*” el mantenimiento oportuno conserva el camino en un estado óptimo por mucho más tiempo. Así mismo, esto debe producirse en el punto en el cual el costo del transporte es menor al igual que el de mantenimiento. Así, la *detección temprana de estas fallas se traduce en información a tiempo para una gestión oportuna* de estas vías de acarreo.

Sea por el método URCI (Unpaved Road Condition Index), por el método propuesto según el Manual de Carreteras del Perú para caminos no pavimentados, por el Índice de la Rugosidad Internacional (IRI) o cualquier otro método, la información obtenida ayudará a los ingenieros y analistas en la tarea de planificar eficientemente las intervenciones necesarias de conservación de la vía. Cabe resaltar que la importancia de incorporar métodos de clasificación radica en el detalle que la literatura actual sugiere o recomienda como intervenciones ideales según el resultado de dicha clasificación.

En suma, ha quedado soportada la idea de que las fallas o deterioros en los caminos tienen estrecha relación con la rentabilidad minera. Estas fallas o deterioros reducen el tiempo del ciclo de operación o lo detienen y así se inicia una cadena de consecuencias que afectan la productividad. Con la presencia de deterioros ocurre el aumento del consumo del combustible, la afectación

directa a los vehículos de carga que puede traducirse en mayores repuestos o fatiga de componentes acelerada, mayor cantidad de horas de parada o improductivas, entre otras.

### **3.2 Marco metodológico:**

En el marco metodológico se buscará enmarcar la investigación para poder concluir si las hipótesis se aprueban o rechazan y si los objetivos son cumplidos. Adicionalmente, se guiará y diseñará el análisis a realizar para la utilización de las herramientas metodológicas que sirvan para soportar las conclusiones de toda evaluación. En suma, se definirán los objetivos del trabajo de investigación, las hipótesis planteadas, las herramientas metodológicas y los indicadores de aceptación o rechazo.

#### **3.2.1 Alcance de la investigación:**

A través de lo encontrado en la literatura, se observa la importancia del mantenimiento de vías o caminos de acarreo dado su impacto en la rentabilidad minera. Estas vías o caminos significan uno de los activos importantes del sistema de transporte. Las fallas o deterioros que sufren pueden restar velocidad a las operaciones y en consecuencia productividad a la vez que pueden producir más consumo de combustible o necesidad de repuestos para los vehículos. Así, la detección de fallas en los caminos o vías de acarreo es un problema relevante para la productividad minera con impacto en la rentabilidad.

No obstante, el desarrollo de técnicas o herramientas para su solución aún no ha alcanzado el nivel que – en comparación - se encuentra actualmente para la evaluación de caminos pavimentados. En los cuáles, el uso de vehículos equipados con tecnología de evaluación además de software especializado e inteligencia artificial se combinan para realizar el análisis y proyecciones cada vez más exactas. No solo se evalúa el estado actual, sino que además, se realiza la proyección del comportamiento de las vías a 20 o 30 años y los distintos escenarios de mantenimiento posible según el presupuesto con el que se cuenta.

Ciertamente, ya existe un desarrollo con el cuál se ha equipado a los vehículos de carga, pero este se encuentra aún limitado. Los avances de este tipo de equipamiento no son tan especializados como el utilizado para la detección de fallas en vías asfaltadas. Un ejemplo de esto es el uso de



tecnología láser como la LIDAR (Light detection and ranging laser) o LCMS (laser crack measurement system) para la detección de deterioros y proyección de los mismos según distintos escenarios de planes de mantenimiento. Aún más, esta distinción se afirma si se considera que compañías consultoras se encuentran probando el uso drones (remoted pilot aircraft) para llevar a cabo las actividades de detección y recogimiento de datos.

El objetivo del presente trabajo de investigación es explorar la viabilidad técnica del uso de un RPA (remotely piloted aircraft) para detectar de manera oportuna los deterioros. Este se limitará al desarrollo de la metodología y consideraciones que sirvan de guía para poder determinar una viabilidad teórica o no de su aplicación, llevar a cabo futuros experimentos y por último, poder comparar la misma con las técnicas ya existentes. Es decir, el alcance de esta investigación será exploratorio.

La razón de este alcance es que actualmente el mundo atraviesa una etapa inusual de pandemia que ha limitado los desplazamientos y en consecuencia los trabajos de campo que podrían permitir mayor profundidad en este trabajo de investigación. Adicionalmente, el tiempo con el que se cuenta resulta escaso para el desarrollo de mayores herramientas como un software que permita hacer aproximaciones a una solución completa y corroborada.

### **3.2.2 Enfoque de la Investigación:**

Esta investigación pretende entender la naturaleza del objeto de investigación y en función a eso explorar la viabilidad de una alternativa para su posterior solución. Así, el enfoque será del tipo cualitativo en el cual se deberán discutir los puntos descritos a continuación en el diseño de investigación para poder lograr los objetivos de la investigación y confirmar si se comprueban o no las hipótesis. Por último, es importante mencionar que no se intervendrá en las variables de causa – efecto y que como herramientas de análisis se hará uso del método comparativo y el método del caso.

Como se ha expresado líneas arriba en el alcance de la investigación, el objetivo principal de este trabajo es *explorar la viabilidad técnica del uso de un RPA para la detección de fallas o deterioros en caminos mineros de acarreo de mineral/material*. Como objetivo secundario, se

tiene que es el de *evaluar el estado del arte y comparar las ventajas y desventajas de las soluciones existentes*. Por último, se tiene el objetivo de *plantear de manera básica una metodología a seguir para la aplicación de esta nueva alternativa que utilice un vehículo pilotado a distancia* (RPA, por sus siglas en inglés) *en la detección oportuna de fallas o deterioros en estas vías de acarreo*.

De la experiencia profesional del autor de esta investigación y la indagación bibliográfica desplegada en el estado del arte se desprende la siguiente hipótesis: *“Es viable el uso de la tecnología RPA en tiempo y costo para la detección de oportuna de fallas e impacto positivo en la productividad”*. De confirmarse esta hipótesis, se debería avanzar en trabajos de investigación más profundos para poder desarrollar en su totalidad una alternativa de solución que resultaría segura en su aplicación en cualquier momento de la operación minera. Establecidos los objetivos e hipótesis, la necesidad de la exploración estará enmarcada por los parámetros de viabilidad que deberán analizarse para determinar si técnicamente es posible o no, confirmar las hipótesis y cumplir los objetivos de este trabajo.

### **3.2.3 Diseño de la Investigación:**

Actualmente, existen tecnologías y herramientas de software - incluyendo inteligencia artificial – que se han desarrollado y se siguen desarrollando para la detección de deterioros en caminos pavimentados. Esto hace pensar y cuestionarse sobre la posibilidad que dichas soluciones y/o desarrollos puedan ser aplicables al ámbito minero y específicamente a los caminos o vías de acarreo. Por tanto, la intención de este trabajo de investigación es explorar la viabilidad técnica de una potencial aplicación y servir así de punto de partida para una alternativa que podría ser más segura, rápida y económica para este objetivo.

Los deterioros o fallas en los caminos mineros o vías de acarreo son el objeto de estudio de este proyecto de investigación. Los vehículos de carga han evolucionado en los últimos 30 años pasando de cargar 20 toneladas a cargar 350 toneladas (Gómez, 2019). Así mismo, la mayoría de los desarrollos mineros se encuentra expuesto a fenómenos climatológicos como la lluvia, nieve o granizo. Por tanto, se determina que las causas que originan estos deterioros o fallas son el volumen del tráfico, la carga pesada y el clima al que se encuentran expuestos los desarrollos mineros.

Por lo expresado líneas arriba, se escoge un diseño no experimental del tipo transversal. Dado que no se intervendrá en las variables de causa – efecto del objeto de estudio, esta investigación responde a un diseño no experimental. El objeto de estudio será observado y analizado en su naturaleza – el método URCI es una guía sobre la clasificación y categorización - para así postular una solución alternativa que será evaluada bajo parámetros de viabilidad. Por otro lado, se dice que esta investigación es del tipo transversal porque no se evalúan los datos en un periodo de tiempo si no que se evalúa el tipo de deterioro en sí ocurrido en un momento puntual de tiempo.

A continuación, se detalla los parámetros que permiten validar la viabilidad y se establecerá las herramientas de evaluación.

**Hipótesis:** “Es viable el uso de la tecnología RPA en tiempo y costo para la detección oportuna de fallas e impacto positivo en la productividad.”

La parte de la detección oportuna trata sobre el impacto – positivo o no - que tendría el hecho de detectar las fallas o deterioros en los caminos mineros oportunamente. “Oportunamente” significa a tiempo de poder hacer una buena gestión en términos de un plan de mantenimiento que mantenga y conserve la vía según entre un estado regular bueno o muy bueno. Según el gráfico de deterioro mostrado en el capítulo anterior debajo de este límite existen mayores costos de rehabilitación y/o construcción.

**Herramienta de análisis:** Estudio del caso.

Para demostrar esta parte de la hipótesis se ha escogido el estudio del caso en relación con el alcance “exploratorio” de la misma. Es decir, a través de fuentes secundarias donde se documentan a detalle casos que permiten hacer conclusiones o inferencias para aprobar o rechazar esta hipótesis.

La viabilidad técnica y económica trata sobre concluir si el uso de un dron o vehículo piloteado a distancia dotado de un elemento de toma de datos (que podría ser una cámara) es posible. Sin embargo, la viabilidad se deberá demostrar bajo criterio técnicos que soporten la afirmación o por el contrario la rechacen. Para estructurar los criterios técnicos se tomarán las siguientes herramientas de análisis.

**Herramientas de análisis:** a) Análisis cualitativo sobre la posibilidad de detección. b) Análisis cualitativo sobre las condiciones de operación para la toma de datos. c) Análisis cuantitativo de los tiempos de proceso. d) Análisis cualitativo de los resultados. e) Método Comparativo.

A través del análisis cualitativo de la posibilidad de detección de los deterioros, se analizará las dimensiones del objeto de estudio que se desea encontrar en cada inspección. Así mismo, se analizará los distintos drones disponibles y los dispositivos portantes que puedan calzar idóneamente para esta función.

A través del análisis cualitativo sobre las condiciones de la operación, se contrastará las condiciones operativas bajo las cuáles deberá funcionar el dron o RPA y las condiciones existentes en un espacio minero a tajo abierto típico. Se deberá responder si la operación del dron o RPA es posible.

Luego, se bosquejará o planteará un diseño básico del proceso que se deberá seguir desde la toma de datos hasta el plan de mantenimiento. Una vez, obtenido esto es que se determinará el tiempo total del proceso. Esto para determinar si dicho tiempo resulta oportuno o no para el objetivo deseado. Se deberá aproximar el tiempo desde la toma de datos hasta la elaboración del plan de mantenimiento.

A través del análisis cualitativo de los resultados, es que se deberá determinar si es que la calidad de la información recogida de campo por algún dron más el dispositivo de toma de datos es lo mínima o suficientemente adecuado para poder hacer un correcto análisis y avanzar en la siguiente etapa del proceso. Esta etapa es, la elaboración o determinación de un plan o actividad de mantenimiento. Se deberá responder si los datos sirven para ser objeto de análisis.

Finalmente, el método comparativo servirá para contrastar los atributos de tiempo de proceso, seguridad de la inspección, calidad de la información y accesibilidad de la tecnología (comprensión y costo) para situar en un ranking las tecnologías existentes con este nuevo planteamiento.

### 3.3 Análisis del problema:

#### 3.3.1 Estudio de Caso:

Para analizar la parte de la hipótesis sobre el impacto positivo de la detección oportuna de fallas, se presentarán 3 casos desarrollados en tesis que muestran el cambio en los indicadores luego de aplicar gestión del mantenimiento a los caminos mineros y/o vías de acarreo. El primer caso aparece en la tesis: *“Influencia del mantenimiento de vías sobre la productividad del proceso de acarreo en el minado del tajo la Pampa Verde, Minera La Zanja – Cajamarca”* del autor **Frano Marinovich**. El segundo se desarrolla en la tesis *“Influencia del mantenimiento de vías de acarreo en la productividad del tajo Ferrobamba – Minera Las Bambas – Apurímac”* del autor **Bladimir Hurtado**. Por último, se exponen los resultados de la tesis: *“Mejoramiento Funcional de vías mineras de acarreo con la aplicación de Geomateriales - Caso Mina Rafael S.A.C.”* del autor **Percy Maraví**.

En la tesis del autor **Frano Marinovich**, se presenta el problema de la reducción de productividad y el incumplimiento de metas de producción en minera La Zanja producto de los deterioros (fallas) en las vías. Estos deterioros – que son causados por efectos climatológicos – impactan además en el aumento de costos operativos y la inseguridad. A través de una frecuencia de intervenciones de lastrado de vía<sup>3</sup> se logra mejorar las condiciones de la vía y se consiguen los resultados mostrados a continuación:

---

<sup>3</sup> Colocar una capa de material sobre la capa de rodamiento para corregir los desniveles existentes.

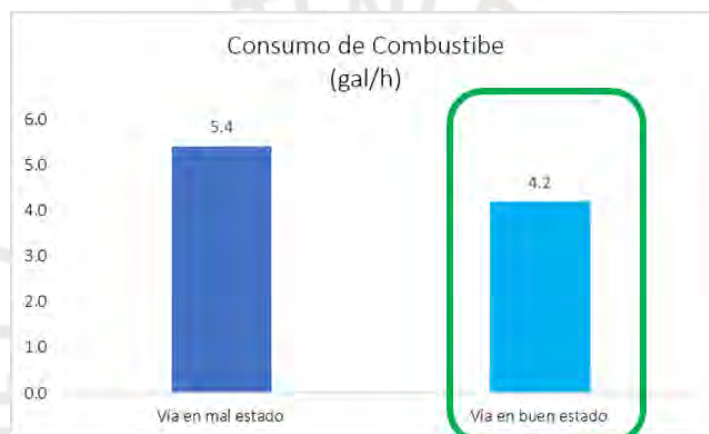


Figura 19. Resultados tesis del autor Frano Marinovich  
 Adoptado de: (Marinovich, 2017)

Como puede apreciarse en los cuadros mostrados, el *ciclo promedio de acarreo* de mineral mejoró en un **13.6%**. EL consumo de combustible se redujo en **22.23%** y la disponibilidad mecánica mejoró en un **5.97%**.

El autor **Percy Maraví** evalúa en su tesis el impacto de hacer mejoras funcionales (sobre la carpeta de rodadura) en las vías de acarreo con el uso de “**geomateriales**”. Se plantea realizar estas mejoras ante la problemática del paso de camiones con gran carga (500 ton) y el objetivo de reducir el ciclo de intervenciones de mantenimiento. Para esto, se realiza una dosificación adecuada de los materiales que se usarán en la intervención de lastrado además de un análisis estructural con deflectómetro y la optimización geométrica de la pendiente (5%). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

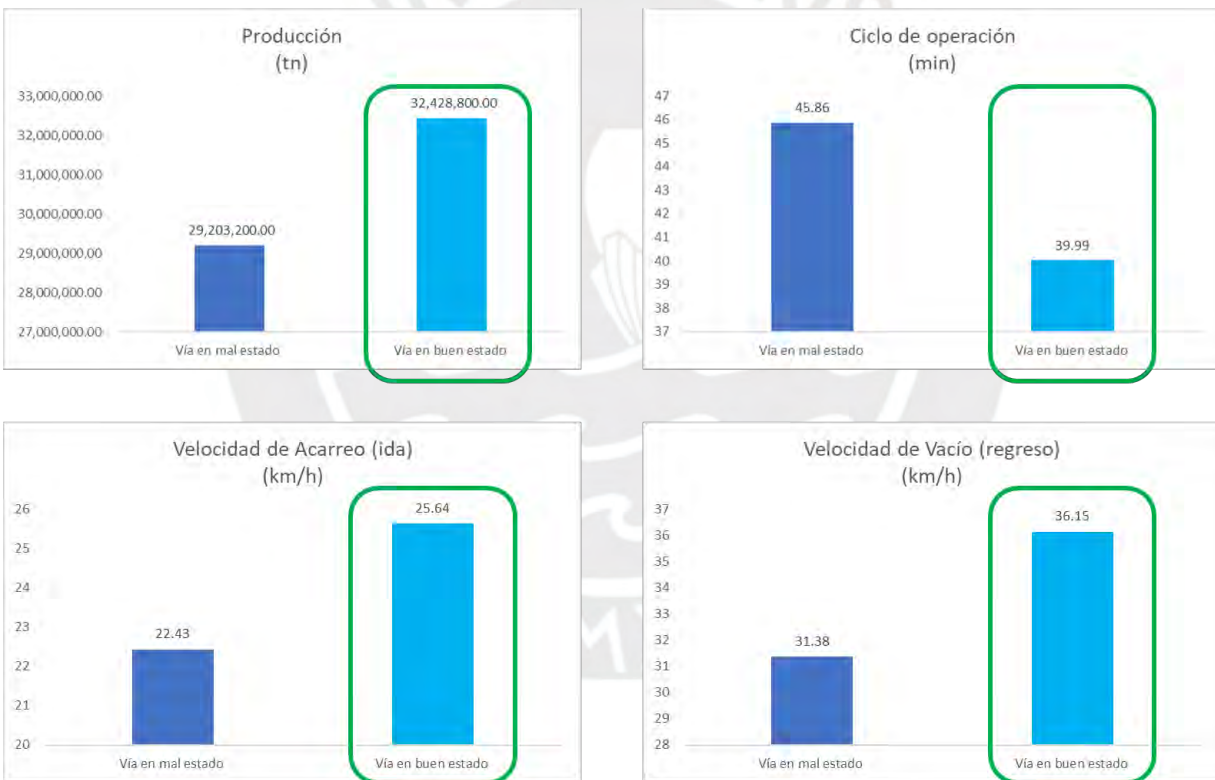


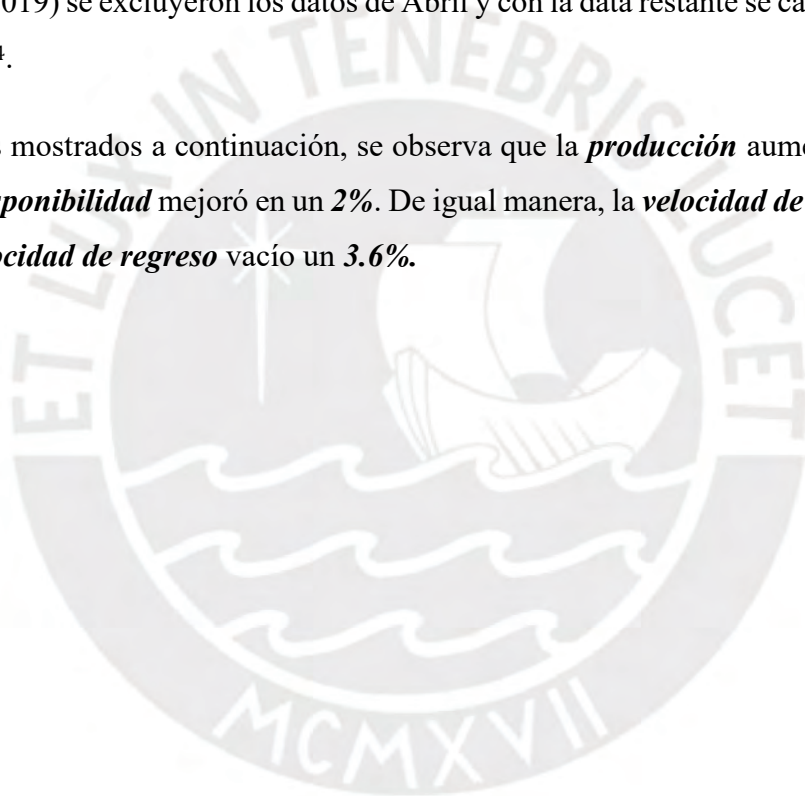
Figura 20. Resultados tesis del autor Percy Maraví

Adoptado de: (Maravi, 2019)

Como puede apreciarse en los gráficos mostrados líneas arriba, la **producción** mejoró en un **11.04%** mientras que el **ciclo de operación** se redujo en un **12.79%**. Por otro lado, la **velocidad de acarreo** (ida) y **vacío** (regreso) aumentaron en un **14.3%** y **15.20%**, respectivamente.

El autor **Bladimir Hurtado** desarrolla su tesis en la Compañía Minera Las Bambas en el tajo Ferrobamba. Ante la problemática del deterioro de las vías de acarreo por los fenómenos climáticos, desarrolla su trabajo de investigación sobre el impacto de las vías en buen estado. Se realizan trabajos de acondicionamiento tanto en la carpeta de rodadura (funcional) como en la estructura de la vía. Es importante comentar que en el periodo del estudio comprendido (Enero a Junio de 2018 y 2019) se excluyeron los datos de Abril y con la data restante se calculó el promedio de los resultados<sup>4</sup>.

De los resultados mostrados a continuación, se observa que la **producción** aumentó en un **6.02%** a la vez que la **disponibilidad** mejoró en un **2%**. De igual manera, la **velocidad de acarreo** aumentó un **2.7%** y la **velocidad de regreso** vacío un **3.6%**.



---

<sup>4</sup> En Abril de 2019 hubo una protesta social que paralizó parcialmente los trabajos lo que no permite una comparación exacta para ese mes.



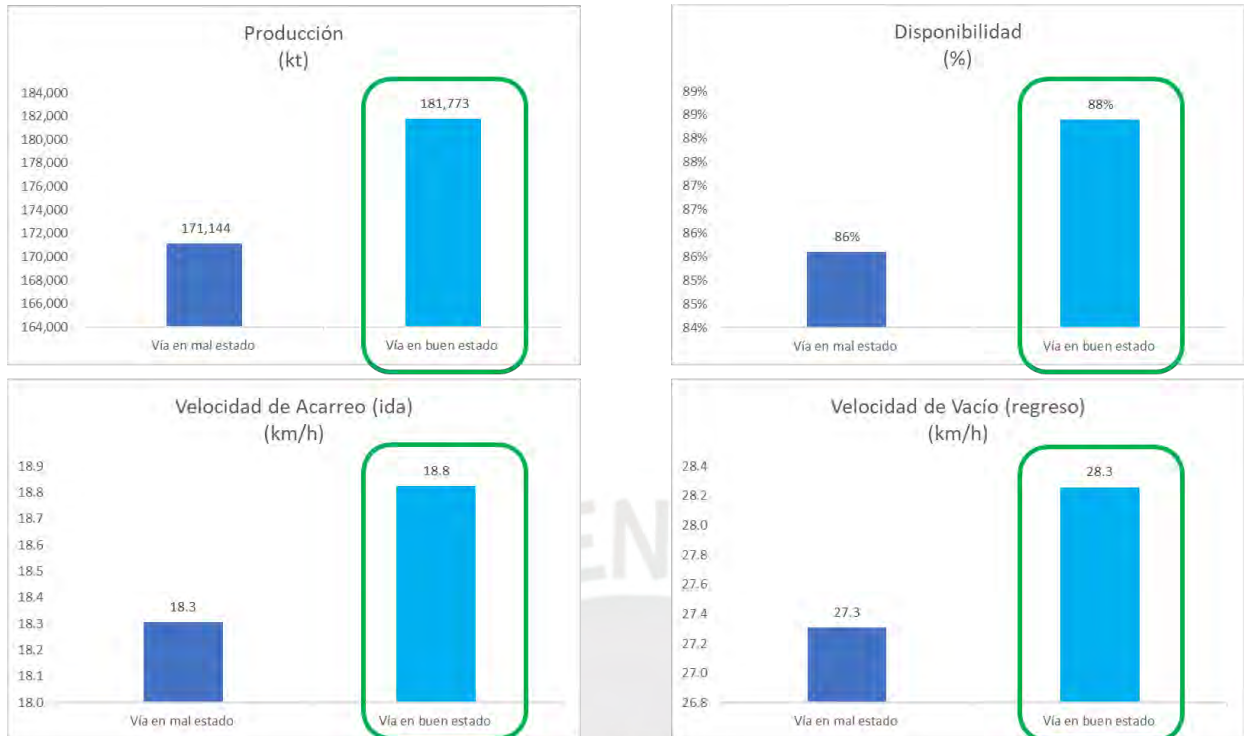


Figura 21. Resultados tesis del autor Bladimir  
Adoptado de: (Hurtado, 2019)

### 3.3.2 Objeto de Estudio: Identificación y clasificación de fallas

En segundo lugar, se deberá hacer el análisis a detalle del objeto de estudio: los deterioros o fallas y los tipos que pueden ocurrir en las vías de acarreo o caminos mineros. Deberán ser identificados en sus características y límites de permisibilidad. A continuación, se describirá cada tipo de deterioro.

#### Deformación:

Ocurre cuando aparece un ahuellamiento debido al desgaste por el tráfico al que es sometido la vía. Están considerados la deformación de la capa de grava o los hundimientos debido a la pérdida de capacidad estructural. Entre las principales causas se encuentran la insuficiencia estructural, la geometría de la carretera, los efectos del clima o un sistema de drenaje insuficiente (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013).

Entre las principales medidas correctivas se encuentran: el perfilado, el perfilado con compactación, el recapeo o reconstrucción de la vía nivel estructural (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013).

### **Erosión:**

Este tipo de falla resulta de la formación de surcos paralelos al eje de la vía. La principal causa se debe al escurrimiento del agua en el mismo sentido del eje de la vía. Las causas se deben a una topografía accidentada, el clima y/o el sistema de drenaje (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013).

### **Baches:**

Este tipo de deterioro ocurre cuando existen aguas estancadas en la superficie de la carretera y se forman hoyos en ella. Este tipo de deterioro estorba el paso de los vehículos y tiene como causa principal un mal sistema de drenaje. Entre las medidas correctivas se encuentran el perfilado, recapeo y/o reconstrucción (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2013).

### **Encalaminado:**

Este deterioro trata de ondulaciones transversales a la superficie. Esto, debido a la vibración producida por el paso de vehículos. Entre las principales medidas correctivas se tiene el perfilado, recapeo o reconstrucción.

### **Lodazal y cruce de agua:**

Este tipo de deterioro se debe a un deficiente sistema de drenaje. Entre las medidas correctivas se tiene el mejoramiento geométrico o del sistema de drenaje.

Las fallas se muestran gráficamente en la Figura 4. Tipo de fallas en caminos no pavimentados

Respecto de los límites de permisibilidad, se muestra la tabla promulgada en el Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones del Perú en la sección para

caminos no pavimentados. Sin embargo, este manual considera el tráfico de vehículos ligeros o de aquellos que normalmente se utilizan para el transporte de mercancías (cuyos pesos oscilan entre 0 a 10 toneladas generalmente). Este manual no considera los vehículos de carga pesada cuyos pesos pueden llegar a ser de hasta 650 toneladas. Por tanto, la gráfica que se muestra a continuación deberá ser modificada en sus límites de clasificación.

**Tabla 20** Deterioros o fallas en carreteras no pavimentadas

Código de daño	Deterioros / Fallas	Gravedad
1	Deformación	1: Huellas/hundimientos sensibles al usuario pero < 5cm 2: Huellas/hundimientos entre 5 cm y 10 cm 3: Huellas/hundimientos >= 10 cm
2	Erosión	1: Sensible al usuario pero profundidad < 5 cm 2: Profundidad entre 5 cm y 10 cm 3: Profundidad >= 10 cm
3	Baches (Huecos)	1: Pueden repararse por conservación rutinaria 2: Se necesita una capa de material adicional 3: Se necesita una reconstrucción
4	Encalaminado	1: Sensible al usuario pero profundidad < 5 cm 2: Profundidad entre 5 cm y 10 cm 3: Profundidad >= 10 cm
5 y 6	Lodazal y cruce de agua	1: Transitabilidad baja o intransitabilidad en épocas de lluvia No se definen niveles de gravedad

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013)

### 3.3.3 Detección de fallas: Análisis Cualitativo y Cuantitativo

Para la detección de las fallas en caminos mineros se pueden usar dos metodologías. La primera, mediante la inspección visual por video cámara en tiempo real. La segunda, mediante la creación de imágenes completas de la vía denominadas: ortofotos. Cada una de estas metodologías permiten identificar diversos atributos o determinarlos. A continuación, se muestra un cuadro sobre las características que pueden detectarse en cada caso.

**Tabla 21** Atributos según la metodología de procesamiento

Metodología	Características
Inspección Visual	Deterios o daños
Ortofotos	Daños o deterioros / Geometría / Topografía

### **3.3.4 Metodología de obtención de ortofotos**

Respecto de la inspección a través de Ortofotos, se explicará la metodología de consecución de imágenes iniciales, así como también el proceso de elaboración de estas (ortofotos). En primer lugar, se explicará las características del dron y tipo de cámara a utilizar. A continuación, se detallará la metodología y el proceso a seguir para finalmente, calcular el tiempo y costo que tomaría la aplicación de esta tecnología.

#### **3.3.4.1 Tipo de Drones:**

Según el autor Shahmoradi y otros, entre los drones utilizados en la minería a cielo abierto se tiene al Phantom 2 precisamente para labores de topografía y evaluaciones. Así mismo, el autor ha listado en la aplicación de esta tecnología para la minería al dron DJI M200. En esta investigación se cuenta con el dron industrial DJI M 200 V2, que resulta ser una tecnología más avanzada cómo se puede apreciar en el siguiente cuadro comparativo. Para esta investigación, el atributo importante radica en la autonomía de vuelo y capacidad de soporte de cámaras que son las que recogen la data de campo. Se añade la comparación con la versión actual existente del modelo Phantom: Phantom 4 Pro.

**Tabla 22** Comparativo de tecnología dron Phantom y DJI serie M200

Dron	Autonomía de Vuelo (min)	Resistencia al viento (m/s)	Carga Máxima (kg)	Equipamiento
Phantom 2	25	36	No disponible para nuevas cámaras	Cámara integrada de 14 MP
Phantom 4 Pro	30	36	No disponible para nuevas cámaras	Cámara Integrada de 20 MP
DJI M200	24	43.2	6.14	Zenmuse X4S Zenmuse X5S Zenmuse Z30 Zenmuse XT Zenmuse XT2 SLANTRANGE 3PX Sentra AGX710 No acepta doble cámara
DJI M200 RTK	24	43.2	6.14	Zenmuse X4S Zenmuse X5S Zenmuse X7 Zenmuse XT Zenmuse XT2 Zenmuse Z30 <i>Acepta el uso de doble cámara</i>

En este trabajo se ha escogido el DJI M210 RTK V2 que resulta ser un dron industrial superior al PHANTOM 4 PRO. El M200 es un dron más robusto y con capacidad para una variedad de cámaras – hasta dos al mismo tiempo – y por ende, mayor capacidad de carga.



Figura 22. Phantom 4 Pro v.s. Matrice 210 RTK V2

Fuente: (DJI, n.d.)

### 3.3.4.2 Tipo de Cámara:

Para el tipo de trabajo escogido, es importante definir el parámetro “accuracy” o “exactitud” por la traducción al español. Este parámetro refiere la exactitud con la que se necesita el detalle de la información. Para el caso de topografía, la exactitud queda determinada por la “calidad de

imagen”. En términos técnicos: GROUND SAMPLING DISTANCE (GSD) o “distancia de muestreo del suelo”, por la traducción al español.

Este parámetro de calidad e imagen mide cuantos centímetros del objeto están abarcados en un píxel de la imagen. A mayores centímetros abarcados en un píxel de la imagen, menor calidad del detalle. Es decir, mientras menor sea este parámetro, mayor calidad de imagen se tendrá. Un GSD de 5, significa 5 cm por lado abarcado de imagen. Así, un GSD de 5 significa 25 cm<sup>2</sup> por píxel.



Figura 23. Ejemplo de exactitud determinado por el Ground Sampling Distance

Fuente:(Pix4D, 2019)

El GSD se calcula considerando el ancho del sensor, el lente focal y el ancho de la muestra. Así, la fórmula está dada por la siguiente relación:

$$H = \frac{ImW * GSD * F}{SW * 100}$$

Dónde:

*H*: Altura de vuelo (m)

*ImW*: ancho de muestra captada (píxel)

*F*: lente focal (mm)

*GSD*: Distancia de muestreo del suelo (cm/píxel)

*SW*: ancho del sensor (mm)

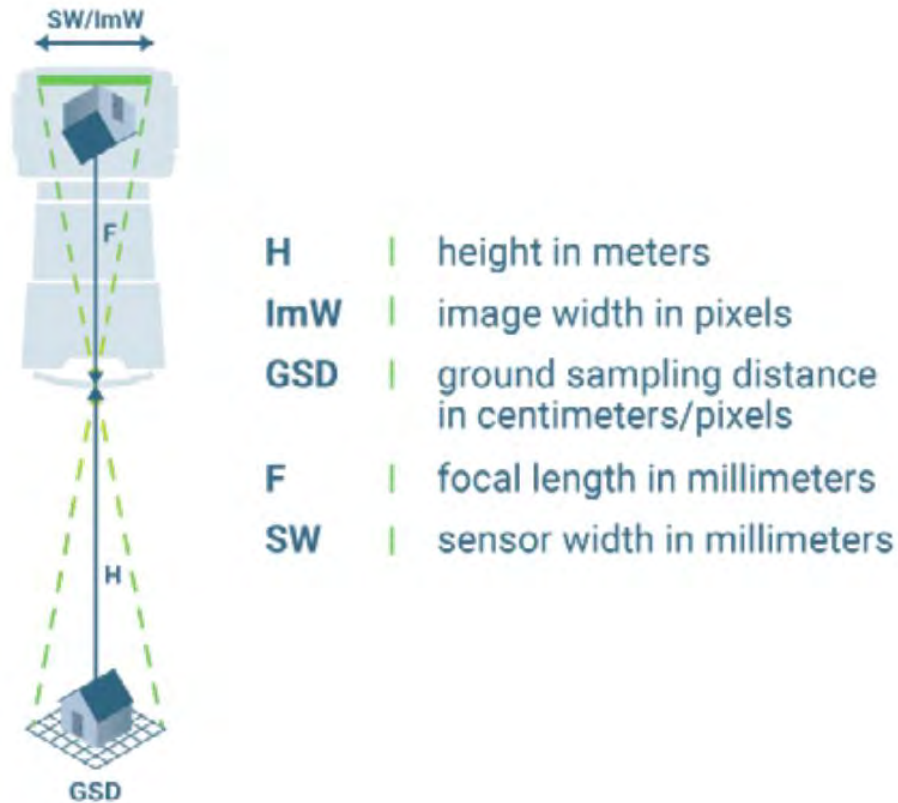


Figura 24. Parámetros para el cálculos del Ground Sampling Distance  
Fuente:(Pix4D, 2019)

Si despejamos GSD, se tiene que el parámetro de exactitud que nos interesa para esta investigación y que tiene que ver con la calidad de imagen, está dado por la siguiente relación.

$$GSD = \frac{H * SW * 100}{ImW * F}$$

Así, la manera de determinar la cámara que se utilizará estará determinado por este cálculo. Sin embargo, otra gran pregunta obvia sería: ¿qué exactitud es necesaria? Para responder a eso, se tomará los límites considerados en la metodología URCI (Unpaved Road Condition Index), en el cual se clasifica los deterioros de los caminos no pavimentados. En este índice, el tipo de falla denominado “surcos” se clasifican por debajo o por encima de 3 cm. Es decir, la mínima exactitud requerida sería de 3 cm/píxel.

Se hizo un cálculo de las cámaras disponibles según el dron escogido para esta función. Se excluyeron las cámaras XT y XT2 debido a que su función es ser cámaras térmicas. En el cuadro a continuación se muestra los GSD calculados por cada cámara. Para el caso de la cámara X7 Zenmuse se hicieron los cálculos con los distintos lentes focales. A continuación, los resultados:

**Tabla 23** GSD por cámara para dron Matrice 210 RTK

<b>Cámara</b>	<b>H(m)</b> <b>Altura de Vuelo</b>	<b>SW(mm)</b> <b>Tamaño de Sensor</b>	<b>F(mm)</b> <b>Lente focal</b>	<b>ImW(píxel)</b> <b>Ancho de imagen</b>	<b>GSD</b> <b>(cm/píxel)</b>
Zenmuse X7 ( 50 mm)	100	23.5	50	5656	<b>0.90</b>
Zenmuse X7 ( 35 mm)	100	23.5	35	5656	<b>1.29</b>
Zenmuse X7 ( 24 mm)	100	23.5	24	5656	<b>1.88</b>
Zenmuse X5S	100	17.3	15	5266	<b>2.19</b>
Zenmuse X7 (16mm)	100	23.5	16	5656	<b>2.82</b>
Zenmuse X4S	100	13.2	8.8	5164	<b>2.90</b>
Zenmuse Z30	100	5.28	10	1685	3.13

Se encuentra entonces que las cámaras X4s, X5s y X7 cumplen con el valor de parámetro establecido que es un  $GSD < 3$  cm por píxel. Dentro de estas cámaras la mejor resolución puede conseguirse con una cámara X7 Zenmuse y un lente focal de 50 mm. Sin embargo, debe considerarse otros parámetros de eficiencia de vuelo como el número ancho de imagen real tomada en cada foto.

A continuación, se muestra un cuadro con las distancias tomadas por cada foto. Se aprecia que, la Zenmuse X7 con lente focal de 16 mm o la Zenmuse X5s, son las mejores cámaras al momento de evaluar la eficiencia del vuelo. Por ejemplo, por cada toma de la Zenmuse X5s se abarcan 115 m. A esto, hay que agregar que para la creación de ortofotos se recomienda un traslape de 65% a más. Con este traslape, el barrido de un 1km de camino significaría 21 fotos.



**Tabla 24** Distancia horizontal tomada según cámara de dron Matrice 210 V2 RTK

Cámara	GSD (cm/píxel)	Distancia tomada por vuelo (m)
Zenmuse X7 ( 50 mm)	0.9	47
Zenmuse X7 ( 35 mm)	1.29	67
Zenmuse X7 ( 24 mm)	1.88	98
Zenmuse X5S	2.19	115
Zenmuse X7 (16mm)	2.82	147
Zenmuse X4S	2.9	150

### 3.3.4.3 *Proceso:*

Para iniciar el proceso de vuelo de dron se deberá tener unos pasos previos importantes. En primer lugar, planificar el vuelo y los parámetros requeridos para los trabajos de campo. En segundo lugar, el trabajo de gabinete para el procesamiento de la información, obtención de los resultados y; conclusiones y recomendaciones de estos.

A continuación, se ha elaborado un cuadro con las etapas, actividades y objetivos a lograr para conseguir las Ortofotos que permitan el análisis de las vías de acarreo.

**Tabla 25** Proceso de obtención de Ortofotos

Ubicación	Etapas	Actividades	Objetivos	Tiempo
CAMPO	Identificación de vía	Recolección de la información de la vía: Planos de Ingeniería Geometría de la vía Identificación de tramos Planes de mantenimiento	Recolección de información de la vía Identificación de los tramos	0.5
	Planificación del vuelo	Plan de adquisición de imagen Configuración de la cámara Definir la precisión de georreferenciación deseada Trazar la ruta de vuelo	Determinar el GSD objetivo Definir altura de vuelo Elegir el tipo de cámara a utilizar Definir el sistema de georreferenciación que será utilizado Obtener los archivos ".KML" para los vuelos programados	1
	Toma de datos	Realizar el check list previo de vuelo Realizar el vuelo de campo Verificar la data de campo tomada	Realizar el registro fotográfico de la vía para el análisis en campo.	1
GABINETE	Elaboración de Ortofotos	Agregar fotografías Orientar fotografías según sus coordenadas Generación de nube densa Creación de la malla a partir de la nube de puntos Ingreso de puntos de fotocontrol	Elaborar las ortofotos correspondientes a cada vuelo realizado.	3
	Generación de Ortomosaico	Generación de Ortofotos Cambio de formato de Ortofoto Unión de Ortofotos	Generar un solo modelo de la vía para ser analizado.	0.5

### 3.3.4.4 Condiciones de operación

A continuación, se describirá las condiciones bajo las cuáles debe operar un dron o RPA. Se ha seleccionado 3 drones (Matrice 300, Matrice 200 y Phantom 4) para poder evaluar las condiciones promedio de altura máxima, velocidad de viento, presión atmosférica y de actividad geomagnética principalmente. Entre estos encontramos:

- Altura máxima de vuelo: 152 m.
- Velocidad del viento: menor a 36 km/h – 54 km/h
- Presión Atmosférica: 1 atm
- Tormenta solar (electormagnetismo): menor a 3 kpa

A continuación, se muestra el detalle de cada uno de los drones seleccionados.

**Tabla 26** Parámetros de Operación de los RPA

Característica	Matrice 210 V2 RTK	Matrice 300	Phantom 4
Máxima resistencia de viento	43.2 km/h	54 km/h	36 km/h
GNSS	GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo	GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo	GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo
Operating Temperature	-20°C to 50°C (-4°F to 122° F)	-20°C to 50°C (-4°F to 122° F)	0°C to 40°C (32°F to 104° F)
Operating environment	< 15 lux	< 15 lux	< 15 lux
Actividad Geomagnética	< 3 kpa	< 3 kpa	< 3 kpa
	NCC/FCC: 8 km	NCC/FCC: 15 km	FCC: 7 km
Max Transmitting Distance	CE/MIC: 5 km SRRC: 5 km	CE/MIC: 8 km SRRC: 8 km	SRRC / CE / MIC / KCC: 5 km (Unobstructed, free of interference)

### 3.3.4.5 *Tiempo:*

Respecto de los tiempos, se ha calculado según una entrevista llevada a cabo una simulación para un total de 10 km. Se realizó una entrevista a ingenieros de la empresa Dynatest, dedicada a la evaluación de caminos pavimentados. Pese a que la evaluación se da sobre caminos pavimentados, la cantidad de información que se toma de campo y se procesa es la misma para una igual longitud. Bajo esta premisa, se ha elaborado el cuadro a continuación:

**Tabla 27** Tiempo de procesamiento para 10 km de vía no pavimentada

Ubicación	Etapas	Tiempo
CAMPO	Identificación de vía	0.5
	Planificación del vuelo	1
	Toma de datos	1
GABINETE	Elaboración de Ortofotos	3
	Generación de Ortomosaico	0.5
Total días para 10 km		6

Para poder cumplir con estos tiempos estimados es necesario los siguientes recursos:

**Tabla 28** Recursos necesarios para evaluación de vías de acarreo con dron

Ubicación	Recurso
Campo	Dron
	Cámara X5s Zenmuse
	4 pares de baterías
Gabinete	1 Ingeniero coordinador
	2 Ingenieros de Procesamiento
	4 Computadores de procesamiento

Es importante comentar que el cuello de botella resulta ser las computadoras de procesamiento. Para ello es importante la memoria RAM y tarjeta de video con las que estas se encuentren equipadas. Según la empresa Dyantest, los requerimientos mínimos son: Computador tipo Workstation, memoria RAM de 16 GB o más y tarjeta de video NVIDIA QUADRO K4000 3GB GDDR5 o superior.

### 3.3.4.6 Costo

Para calcular los costos se ha evaluado la cantidad de recurso humanos y los costos de movilización y seguridad que involucra la operación dentro de una actividad minera. Así mismo, se ha incluido el costo del equipo en base a la depreciación y los costos de mantenimiento que carrea. El cuadro presentado a continuación, muestra los costos diferenciados por campo y gabinete.

### 3.3.4.7 Ensayo de campo

Se realizó un ensayo en una vía no pavimentada al sur de Lima en el km. 71.5 de la Panamericana sur, acceso de Puerto Viejo. Se realizó este ensayo con la finalidad de obtener imágenes a 30 m. a 50 m. y a 100 m. para ver si el GSD era suficiente y si era posible la detección de fallas. Los resultados – que resultaron satisfactorios - se muestran a continuación en imágenes.



Figura 25. Ensayo de campo con dron DJI M210 V2 RTK

## 3.3.5 Metodología de inspección visual

### 3.3.5.1 Tipo de Cámara:

En esta sección, se empieza seleccionando el tipo de cámara porque la toma de datos en tiempo real es lo que va a determinar el éxito de la misión. Para la detección de las fallas el mayor acercamiento posible es importante para la identificación a distancia. A la fecha, la cámara con mayor zoom posible existente en el mercado es la *Zenmuse Z30*. Esta cámara posee un Zoom

Óptico de 30x (30 veces) y un adicional de Zoom digital de 6x (6 veces). Es decir, puede aumentar una imagen de hasta 180 veces su tamaño en tiempo real.



Figura 26. Cámara de dron Zenmuse Z30

Fuente: (DJI, n.d.)

### **3.3.5.2 Tipo de Drones:**

La cámara Zenmuse Z30 es compatible con la serie de drones “Matrice”. Entre estas se tiene: Matrice 100, Matrice M200, Matrice M200 V2, M600 Pro y Matrice 600 (DJI, n.d.). Entonces, cualquiera de los drones de esta serie puede ser utilizado para llevar a cabo las inspecciones visuales diaria y usar este tipo de cámara. En este trabajo se ha escogido el DJI M210 RTK V2 que resulta ser un dron industrial robusto y con capacidad de hasta dos cámaras al mismo tiempo.

### **3.3.5.3 Proceso:**

Para el proceso de la toma de datos en campo y cumplir con el objetivo de la supervisión diaria en tiempo real, se deben realizar los pasos previos al vuelo y luego ejecutar el mismo desde una zona segura. A continuación, se presenta el cuadro del proceso a seguir:

**Tabla 29** Etapas y actividades de campo para inspección visual en tiempo real con dron

Ubicación	Etapas	Actividades	Objetivos	Tiempo
CAMPO	Identificación de vía	Recolección de la información de la vía: Planos de Ingeniería Geometría de la vía Identificación de tramos Planes de mantenimiento	Recolección de información de la vía Identificación de los tramos	0.5
	Planificación del vuelo	Plan de adquisición de imagen Configuración de la cámara Definir la precisión de georreferenciación deseada Trazar la ruta de vuelo	Determinar el GSD objetivo Definir altura de vuelo Elegir el tipo de cámara a utilizar Definir el sistema de georreferenciación que será utilizado Obtener los archivos ".KML" para los vuelos programados	0.5
	Toma de datos	Realizar el check list previo de vuelo Realizar el vuelo de campo Verificar la data de campo tomada	Supervisión en tiempo real	1

#### 3.3.5.4 *Tiempo:*

Respecto del tiempo, se presenta a continuación el tiempo que tomaría el proceso de toma de datos para 10 km. Dado que es en tiempo real, se asume hacer la preparación previa del vuelo medio día antes del mismo y que la duración de la inspección tomaría 01 día con 01 dron por cada 10 km.

**Tabla 30** Tiempo en campo para inspección visual en tiempo real con dron

Ubicación	Etapas	Tiempo (días)
CAMPO	Identificación de vía	0.5
	Planificación del vuelo	0.5
	Toma de datos	1

### 3.3.5.5 Costo:

A continuación, se presenta el costo estimado de un vuelo en inspección visual con dron. El servicio de dron tiene que ver con el costo del equipo (costo de depreciación diaria, considerando la devaluación a 5 años.

**Tabla 31** Costo estimado de inspección visual en tiempo real con dron

Item	Descripción	Unidad	Cant.	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
1.1	Servicio Dron	día	1	451	451
1.2	Costos Indirecto	día	1	214	214
1.3	Gastos Generales	glb.	1	1,072	1,072
<b>TOTAL USD (sin IGV)</b>					<b>1,737</b>

Así mismo, se ha realizado una estimación de los costos de operación para las distintas tecnologías:

**Tabla 32** Costos de operación estimado por cada tecnología

Item	Descripción	Tecnología a Bordo (vehículos de carga)	Tecnología Externa (equipo de rugosidad)	Tecnología a remoto (RAP)
1.1	Servicio de Identificación	523	952	451
1.2	Costos Indirecto	71	214	214
1.3	Gastos Generales	343	1116	1072
<b>TOTAL USD (sin IGV)</b>		<b>937</b>	<b>2282</b>	<b>1737</b>

## 4. CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

La idea de esta investigación surge del conocimiento del autor sobre los avances y desarrollos existentes para la evaluación en vías pavimentadas. Estas vías al igual que las no pavimentadas deben cumplir con parámetros (indicadores) para conservar su estado y servir eficientemente a los usuarios y su propósito. La tecnología RPA está siendo aplicada y desarrollada para la detección de los daños o deterioros en vías pavimentadas. Así, la propuesta del autor fue investigar la aplicación de esta misma tecnología para las vías no pavimentadas y explorar la viabilidad tanto técnica como económica.

En el capítulo anterior se explicó que, debido a la coyuntura actual por la que atraviesa el país y el mundo, la presente investigación ha sido de alcance exploratorio. Así, la presente investigación ha utilizado como herramientas de análisis: el estudio del caso, el análisis cualitativo, el análisis cuantitativo además del comparativo para evaluar las tecnologías. El propósito general ha sido poder cumplir con los objetivos manifiestos de la investigación además de poder determinar la aprobación o rechazo de la hipótesis.

A continuación, el autor de esta tesis comentará sobre los logros alcanzados en esta investigación. En primer lugar, se disertará sobre los hallazgos más relevantes encontrados en la literatura y el estado del arte del uso de drones en la industria minera. En segundo lugar, se comentará sobre los resultados obtenidos luego del estudio de los casos mostrados y los análisis tanto cualitativos como cuantitativos. En tercer lugar, se hablará sobre la comparación de las tecnologías existentes para solucionar el problema objeto de estudio. Y por último, se analizará cuál ha sido el aporte y/o importancia de este trabajo además de cómo podría encaminar o servir para futuras investigaciones.

### 4.1 Hallazgos de la investigación bibliográfica

El primer hallazgo importante es la cuantificación que realizan los autores sobre el impacto de la gestión en las vías de acarreo. Los autores destacan que los ahorros de esta gestión pueden llegar hasta un 10% de los costos de transporte. Así mismo, calculan que los costos de transporte resultan estar entre el 40% y el 60% de los costos de extracción. Estos últimos, se han situado entre el 33%



y el 88% del total de ventas de acuerdo con los datos históricos de la minería peruana a cielo abierto. Entonces, a través de la literatura se puede soportar la idea que: “*la gestión de los caminos de acarreo podría significar un ahorro de entre el 1.32% y el 5.28% del total de ventas*”. En perspectiva, si una compañía minera tiene un ingreso de USD 1,000 millones de dólares anuales, podría ahorrar entre USD 13 millones y USD 52 millones de dólares solo por hacer una correcta gestión sobre las vías. Esto es, con información oportuna y adecuada.

El segundo hallazgo tiene que ver con el indicador desarrollado por el ejército estadounidense para el estudio de caminos no pavimentados. Este indicador denominado URCI (unpaved road condition index) clasifica los tipos de fallas y establece límites para asignarles un grado de severidad como se evidencia en la Tabla 33. Al respecto, el autor de esta tesis propone utilizar la misma metodología, pero con los límites de severidad cambiados. Este indicador está pensado para vías no pavimentadas que sirven de tránsito a vehículos livianos y pesados. Un vehículo liviano tiene un neumático de 15 cm. a 20 cm. de ancho; sin embargo, un vehículo minero de carga alcanza dimensiones de 100 cm. a 120 cm. Es decir, 10 veces mayor. Por ejemplo, según estos límites un bache con 10.16 cm. (4 in.) o más de profundidad y con un diámetro de 91.44 cm. (3 ft.) es una severidad alta. En la realidad, existe una gran diferencia entre el paso de un neumático de 15 cm. a uno de 120 cm.

**Tabla 33** Límites de severidad para baches según metodología URCI

<b>Máxima profundidad</b>	<b>Diámetro promedio</b>			
	<b>&lt; 1 pie</b>	<b>1-2 pie</b>	<b>2-3 pie</b>	<b>3 pie</b>
1/2" -2"	L	L	M	M
2" - 4"	L	M	H	H
4" a +	M	H	H	H

Fuente: (Eaton et al., 1981)

Respecto de las tecnologías existentes actualmente para la detección de los daños o deterioros en las vías de acarreo, estas intentan determinar los deterioros según el perfil de la vía. Ambas, requieren la implementación de dispositivos en el vehículo de carga el cuál deberá pasar por los deterioros para poder determinar el perfil. Actualmente, los desarrollos se encuentran enfocados

en la inteligencia artificial que pueda interpretar de mejor manera los datos recogidos para una toma de decisiones más exacta.

El uso de drones en la minería ha ido en aumento desde hace 10 años (2010). Los procesos que abarcan son: prospección, exploración, beneficio de mineral, control medioambiental, entre otros. Esta tecnología se está haciendo cada vez más común en los cielos mineros, y aunque ya se usa actualmente para labores de topografía o el control e inspección de procesos, no se ha encontrado evidencia del uso actual para la gestión de caminos de acarreo.

#### 4.2 Resultados obtenidos en el estudio del caso

Los resultados obtenidos mediante el análisis de los casos presentados resultan ser los esperados de acuerdo con la literatura. La gestión de los caminos mineros produce mejoras en el ciclo de acarreo y mejora la disponibilidad de los vehículos de carga. Todo esto impacta en la productividad como se evidencia en estudios realizados (Marinovich, 2017) (Hurtado, 2019) y (Maravi, 2019). En la Tabla 34 se presenta un comparativo de las mejoras obtenidas. El ciclo de operación que significa el tiempo en el cuál se realiza la tarea de acarreo disminuye lo cuál eleva la productividad. Así mismo, mejora la disponibilidad mecánica de los vehículos debido al menor deterioro de los caminos.

**Tabla 34** Mejoras obtenidas mediante la gestión de vías

Tesis	Ciclo de operación	Velocidad de Acarreo	Velocidad de Vacío	Disponibilidad Mecánica	Consumo de Combustible	Producción
<i>Influencia del mantenimiento de vías sobre la productividad del proceso de acarreo en el minado del tajo la Pampa Verde, Minera La Zanja – Cajamarca</i>	13.60%	ND	ND	5.97%	22.23%	ND
<i>Influencia del mantenimiento de vías de acarreo en la productividad del tajo Ferrobamba – Minera Las Bambas – Apurímac</i>	2.6%*	2.70%	3.60%	2%	ND	6.02%
<i>Mejoramiento Funcional de vías mineras de acarreo con la aplicación de Geomateriales - Caso Mina Rafael S.A.C</i>	12.79%	14.30%	15.20%	ND	ND	11.04%

\*Porcentaje de mejora calculado por el autor de esta tesis con datos de la tesis consultada.

### 4.3 Resultados obtenidos en el análisis cualitativo

A continuación, se resumirá el análisis cualitativo realizado de los drones para esta labor y la justificación de uso del *Matrice 210 V2 RTK*. Los parámetros de análisis son: parámetros de vuelo, y equipamiento. La Tabla 35 tomado de la literatura sobre el uso de drones en minería a cielo abierto, propone al vehículo aéreo *Phantom 2 Vision+* como el que se utiliza para labores de topografía. La detección de fallas o deterioros en las vías de acarreo tiene que ver con labores similares a la de topografía. Por tanto, este dron o uno superior puede ser utilizado para la labor deseada en este trabajo de investigación.

**Tabla 35** Drones utilizados para voladura, topografía o geología en minería a cielo abierto

Tipo de dron	Modelo	Objetivo	Ala (mm)	Largo (mm)	Peso (g)	Autonomía (min)	Carga (g)
Ala fija	Teklite	Caracterización de plumas de voladura	900	575	900-950	45	200
Ala fija	GoSurv	Caracterización de plumas de voladura	850	350	900-1200	50	>300
Ala fija	Swamp Fox	Caracterización de plumas de voladura	1800	1000	4500	40	1000
Multirotor	Quadcopter	Caracterización de plumas de voladura	-	-	2500	20	150
Multirotor	Phantom 2 vision+	Topografía	35cm	-	1240	25	-
Multirotor	Aeryon Scout	Medición de orientación de fracturas	80x80x20	-	1300	25	400

Fuente: (Shahmoradi et al., 2020)

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se contó con el dron *Matrice 210 V2 RTK* de la empresa DJI. Este dron es considerado un dron industrial superior al *Phantom 2 Vision+*. Así mismo, los parámetros de operación (Tabla 36) lo habilitan para que pueda realizar operaciones en ambiente minero donde los fenómenos climatológicos pueden resultar adversos.

**Tabla 36** Condiciones de operación del Matrice 210 V2 RTK

Característica	Matrice 210 V2 RTK
Máxima resistencia de viento	43.2 km/h
GNSS	GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo
Operating Temperature	-20°C to 50°C (-4°F to 122° F)
Operating environment	< 15 lux
Actividad Geomagnética	< 3 kpa
	NCC/FCC: 8 km
Max Transmitting Distance	CE/MIC: 5 km
	SRRC: 5 km

Adaptado de: (DJI, n.d.)

Así mismo, debemos considerar el equipamiento posible para este dron que es superior al Phantom 2 Vision + y al Phantom 4 que es la versión actualizada del Phantom al momento de redacción de esta tesis (diciembre 2020). Este equipamiento incluye cámaras de mayor resolución además de cámaras de inspección térmica para otros usos como se observa en la Tabla 37.

**Tabla 37** Equipamiento del Matrice 210 V2 RTK

Dron	Autonomía de Vuelo (min)	Resistencia al viento (m/s)	Carga Máxima (kg)	Equipamiento
DJI M210 RTK	24	43.2	6.14	Zenmuse X4S Zenmuse X5S Zenmuse X7 Zenmuse XT Zenmuse XT2 Zenmuse Z30 <i>Acepta el uso de doble cámara</i>
Phantom 2	25	36	No disponible para nuevas cámaras	Cámara integrada de 14 MP
Phantom 4 Pro	30	36	No disponible para nuevas cámaras	Cámara Integrada de 20 MP

En suma, el resultado del análisis cualitativo sobre los drones recomendados para la labor de detección e inspección topográfica, las condiciones de operación y el equipamiento posible, se tiene que el **DJI Matrice 210 RTK** es un dron superior que puede ser perfectamente usado para esta labor.

#### 4.4 Resultados obtenido análisis cuantitativo

El propósito del análisis cuantitativo ha sido determinar la calidad de imagen necesaria para la inspección de deterioros, además del tiempo y los costos que involucra la aplicación de la tecnología propuesta. El paso previo de todo este análisis fue determinar el GSD (ground sample distance) necesario. Para esto, se tomó el mínimo requerimiento de la metodología URCI que es el surco de 3 cm. de ancho. Por tanto, el GSD mínimo necesario fue de 3. En la Tabla 38 se presenta el GSD por cámara compatible para el dron.

**Tabla 38** GSD por cámara para dron Matrice 210 RTK

Cámara	H(m) Altura de Vuelo	SW(mm) Tamaño de Sensor	F(mm) Lente focal	ImW(píxel) Ancho de imagen	GSD (cm/píxel)
Zenmusse X7 ( 50 mm)	100	23.5	50	5656	<b>0.90</b>
Zenmusse X7 ( 35 mm)	100	23.5	35	5656	<b>1.29</b>
Zenmusse X7 ( 24 mm)	100	23.5	24	5656	<b>1.88</b>
Zenmusse X5S	100	17.3	15	5266	<b>2.19</b>
Zenmusse X7 (16mm)	100	23.5	16	5656	<b>2.82</b>
Zenmusse X4S	100	13.2	8.8	5164	<b>2.90</b>
Zenmusse Z30	100	5.28	10	1685	3.13

En primera instancia, los resultados arrojaron que las cámaras Zenmusse X5s y X7 resultan ser las mejores. Así mismo, se hizo la importante precisión que para la Zenmusse X7 los lentes que podían servir era los de 16mm, 24mm, 35mm y 50 mm. Otro parámetro que considerar es la distancia por vuelo según el tamaño del lente. Tabla 8

**Tabla 39** Distancia horizontal tomada según cámara de dron Matrice 210 V2 RTK

Cámara	GSD (cm/píxel)	Distancia tomada por vuelo (m)
Zenmusse X7 ( 50 mm)	0.9	47
Zenmusse X7 ( 35 mm)	1.29	67
Zenmusse X7 ( 24 mm)	1.88	98
Zenmusse X5S	2.19	115
Zenmusse X7 (16mm)	2.82	147
Zenmusse X4S	2.9	150

En suma, este análisis arrojó que dado el GSD necesario (3 cm/píxel) y la eficiencia de vuelo - a mayor lente, menor distancia tomada por foto – se escoge o la cámara Zenmuse X5s o la cámara Zenmuse X7. Con la primera, se realizaron pruebas de campo dónde se evidenció que efectivamente era posible la visualización de deterioros. El deterioro visualizado fue la pérdida de agregado.

Respecto del tiempo y los costos, se realizó una simulación para 10 km. de vía. Los recursos utilizados detallados en la metodología son: el equipo dron, la cámara seleccionada, cuatro pares de batería para lograr el rendimiento y; un equipo de gabinete formado por un ingeniero coordinador, 02 ingenieros de procesamiento y 4 computadores. Con estos recursos fue posible calcular aproximadamente el tiempo y el costo del servicio: 6 días y USD 10, 582. En la Tabla 40 y Tabla 41 se evidencia el análisis de precios y tiempo de manera detallada.

**Tabla 40** Precio servicio de dron Matrice 210 V2 RTK para 10 km.

Item	Descripción	Unidad	Cant.	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)	AOC (USD)	Utilidad (USD)	Precio Total (USD)
1.1	Servicio Dron	día	1	451	451	45	135	631
1.2	Costos Indirecto	día	1	214	214	21	64	300
1.3	Gastos Generales	glb.	1	1,072	1,072	107	322	1,500
1.4	Gabinete	glb.	1	5,822	5,822	582	1,747	8,151
<b>TOTAL USD (sin IGV)</b>					<b>7,559</b>	<b>756</b>	<b>2,268</b>	<b>10,582</b>

**Tabla 41** Tiempo servicio de dron Matrice 210 V2 RTK para 10 km.

Ubicación	Etapas	Tiempo
CAMPO	Identificación de vía	0.5
	Planificación del vuelo	1
	Toma de datos	1
GABINETE	Elaboración de Ortofotos	3
	Generación de Ortomosaico	0.5
Total días para 10 km		6

#### 4.5 Análisis comparativo de tecnologías

Las tecnologías existentes utilizan el dato del perfil de la vía. La tecnología RAC (Road análisis control, por sus siglas en inglés) de la empresa Caterpillar utiliza la variación en el bastidor para obtener este perfil. El perfilómetro láser instalado en vehículos utiliza los retornos de un láser para el mismo objetivo. Así, ambas tecnologías necesitan del vehículo de carga y transitar por el deterioro para lograr la obtención del parámetro. Otro atributo importante por considerar es la toma de datos. Al respecto, la tecnología RPA otorga un análisis directo para ser visualizado por el analista. Se puede considerar que esta información es suficiente para lograr el análisis.

Es importante analizar que el tiempo en el cuál se obtienen los datos – 06 días – puede ser útil para hacer correcciones en la geometría de la vía y para analizar la vía con la intención de un plan de mantenimiento a largo plazo. Para intervenciones diarias puede utilizarse la inspección en tiempo real que ofrece la cámara **Zenmuse Z30** cuyo zoom puede ser de hasta 30 veces. A través de esta cámara, el dron puede adelantarse al paso de los vehículos de carga e identificar una zona que necesite una intervención de emergencia. En la Tabla 42 se muestra un cuadro comparativo de atributos de las tecnologías utilizadas para la detección de deterioros.

**Tabla 42** Cuadro comparativo de tecnologías para la detección de deterioros

Atributos	Tecnología a bordo (vehículos de carga)	Tecnología externa (equipo de rugosidad)	Tecnología a remoto (RAP)
Toma de datos	Interpretación	Interpretación	Visual
Accesibilidad	Alta	Media	Baja
Tiempo de obtención de resultados	Tiempo real	Post - proceso	Tiempo real / post - proceso
Inversión	Incluida en la flota de vehículos	100,000 - 250,000	20,000 - 30,000*
Continuidad de las mediciones	continua	continua	discontinua
Repetitibilidad a gran escala	con limitaciones	sin limitaciones	con limitaciones

Se ha escogido los atributos anteriores en función de resaltar las características importantes de la obtención de datos para analizar el objeto de estudio y la implementación de una nueva tecnología. La toma de datos trata sobre cómo la información es adquirida una vez que se utiliza los instrumentos de campo. En el caso de la tecnología en el vehículo de carga y la tecnología externa, estos usan instrumentos que interpretan la realidad. Para el caso de la tecnología RPA, los datos son tomados de manera visual.

Respecto de la accesibilidad a la información, las barreras son altas para el caso de los vehículos de carga debido al costo y medio para ser adquirido: el costo aproximado de un vehículo de carga con esta tecnología es de USD 6 millones de dólares. Para el caso de la tecnología externa que usa un Perfilómetro Láser, el costo es bastante menor y puede estar en el rango de USD 100 mil a USD 250 mil dólares. Para ser adquirido es posible solicitar una unidad de este. Por último, para el caso de la tecnología RAP, el acceso es bajo en tanto el costo es menor – entre USD 20,000 y USD 30,000 – y es posible adquirirlo en cualquier tienda de distribución oficial de esta tecnología.

Las tecnologías existentes para este fin (la del vehículo de carga y la del perfilómetro láser) pueden hacer mediciones continuas a lo largo de la vía de acarreo. En el caso de la tecnología RPA, esta depende de las baterías con las que cuenta y debe aterrizar cada 20 o 30 minutos para un cambio de estas.

El atributo de repetibilidad a gran escala, es decir, al querer evaluar todos los caminos presenta limitaciones para la tecnología RPA como para la tecnología sobre los vehículos de carga. En el caso de los vehículos de carga, las vías a evaluar deben tener la geometría necesaria para el tránsito de estos vehículos pesados. Para el caso de la tecnología RPA, es necesario varias unidades y protocolos que aseguren el tránsito y seguridad de la operación. Para el caso del perfilómetro láser, los láseres son fácilmente montados a una estructura externa por lo que no presentaría limitaciones para poder implementarla.

Respecto de las limitaciones sobre el uso de la tecnología RPA, se debe considerar la cantidad de drones necesarios según los kilómetros que se requerirán medir y el personal necesario con nuevo conocimiento y habilidades para el manejo de los mismos. Además de esto, será necesario la implementación de protocolos de operación, control aéreo y seguridad dentro de mina. Por último, es necesario considerar los factores climatológicos que pueden limitar las operaciones y la interpretación de resultados.

De la metodología descrita líneas arriba, se ha descrito que los recursos necesarios para la evaluación de 10 km diarios son: un dron y cuatro pares de baterías. En otras palabras, por cada 10 km es necesario este conjunto de recursos si la inspección que se desea hacer es diaria. Esto



significa que se deberá pensar en una flota de drones para poder cubrir los kilómetros necesarios a evaluar.

Junto con la flota de drones, es necesario considerar la contratación de personal calificado que pueda volar cada equipo y tenga las habilidades y conocimientos necesarios para llevar a cabo las inspecciones. Este personal debe ser formado en una escuela de aviación y obtener una licencia emitida por parte del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Así mismo, deberá conocer las actividades que se llevan a cabo en la industria minera y ser concientizado sobre políticas de seguridad.

La operación de equipos transitando el espacio aéreo del desarrollo minero requiere de protocolos de tránsito, de control y de seguridad. Deberán existir puntos seguros o estaciones de manejo, despegue y aterrizaje tanto para los pilotos como para los drones. Esto a fin de preservar el bienestar de todos y preservar la seguridad. Respecto, del tránsito se deberá contar con un sistema que logre organizar el tránsito de varios drones a la vez en el espacio aéreo y que evite colisiones.

Una última limitación o consideración está relacionada a las “ventanas de operación” según los fenómenos climatológicos. Para esto se debe hacer una planificación de vuelo según los pronósticos del clima y apoyarse en los protocolos de operación para determinar cuando es seguro volar y cuando no lo es. La limitación se encuentra en que si en algún momento, es necesario realizar una inspección y el clima es adverso, esta misma quedará retrasada.

En la Tabla 43 se presenta un análisis sobre las ventajas y desventajas que cada tecnología puede presentar para el proceso de identificación de deterioros:

**Tabla 43** Ventajas y Desventajas del uso de cada tecnología para la identificación de daños

Atributo	Tecnología a bordo (vehículos de carga)	Tecnología externa (equipo de rugosidad)	Tecnología a remoto (RAP)
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incluida en la flota de vehículos</li> <li>- Mediciones diarias</li> <li>- Ahorro de operación</li> <li>- No detiene operación para medición</li> <li>- Precisión láser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mediciones en todo tipo de caminos dentro de la mina</li> <li>- Precisión láser</li> <li>- Medición continua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificación de varios tipos de daños</li> <li>- Accesibilidad a bajos costos</li> <li>- Mitigación de riesgos de operadores</li> <li>- No detiene operación para medición</li> <li>- Cobertura de todo el ancho</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No cubre caminos de vías secundarias</li> <li>- Limitado al parámetro de perfil</li> <li>- Limitado al ancho de la flota</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitado al parámetro de perfil</li> <li>- Costo de vehículo de medición</li> <li>- Detener operación de flota</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interpretación visual del analista</li> <li>- Limitado a condiciones climáticas</li> <li>- Medición discontinua por duración del vuelo</li> </ul>

#### 4.6 Objetivos e hipótesis

A través de los hallazgos y resultados de la investigación se puede concluir que los objetivos han sido cumplidos. El primer objetivo trata sobre determinar la viabilidad técnica y económica. Para ello, fue necesario establecer una metodología estructurada por herramientas que lograron encaminar el análisis. El segundo objetivo respecto de la evaluación del estado del arte respecto del objeto de estudio, este trabajo ha contado con bibliografía reciente respecto de los usos de drones en minería y el uso de tecnologías que han permitido y enriquecido esta evaluación. Esto, ha dado paso a cumplir el tercer objetivo, que es el planteamiento de una metodología para futuros trabajos o desarrollos.

Respecto de la hipótesis, la metodología estructurada por herramientas de análisis cuantitativo, cualitativo y comparativo ha logrado conducir el análisis hasta la conclusión ***que la esta queda aprobada***. La viabilidad técnica y económica a nivel exploratorio de la aplicación de la tecnología RPA para la detección de fallas o deterioros en vías de acarreo queda validada. A nivel exploratorio, se puede afirmar que esta tecnología resultaría totalmente viable para este objetivo.

En la Tabla 44 se muestra la metodología propuesta para el uso de tecnología RPA en la detección de fallas en caminos mineros.

**Tabla 44** Metodología propuesta para el uso de tecnología RPA en la detección de fallas

Ubicación	Etapa	Actividades	Objetivos
CAMPO	Identificación de vía	Recolección de la información de la vía: Planos de Ingeniería Geometría de la vía Identificación de tramos Planes de mantenimiento	Recolección de información de la vía Identificación de los tramos
	Planificación del vuelo	Plan de adquisición de imagen Configuración de la cámara Definir la precisión de georreferenciación deseada Trazar la ruta de vuelo	Determinar el GSD objetivo Definir altura de vuelo Elegir el tipo de cámara a utilizar Definir el sistema de georreferenciación que será utilizado
	Toma de datos	Realizar el check list previo de vuelo Realizar el vuelo de campo Verificar la data de campo tomada	Obtener los archivos ".KML" para los vuelos programados Realizar el registro fotográfico de la vía para el análisis en campo.
GABINETE	Elaboración de Ortofotos	Agregar fotografías Orientar fotografías según sus coordenadas Generación de nube densa Creación de la malla a partir de la nube de puntos Ingreso de puntos de fotocontrol	Elaborar las ortofotos correspondientes a cada vuelo realizado.
	Generación de Ortomosaico	Generación de Ortofotos Cambio de formato de Ortofoto Unión de Ortofotos	Generar un solo modelo de la vía para ser analizado.

En suma, los objetivos de la tesis quedan cumplidos y la hipótesis validada. Se hubiera deseado poder avanzar aún más el análisis integrando a los resultados de campo mostrados en el presente trabajo, mejores técnicas de procesamiento y análisis que incluyan inteligencia artificial, por ejemplo. Será oportuno que futuros trabajos con mayor profundidad y detalle, logren validar esta hipótesis a nivel explicativo mediante aplicación en escenarios reales.

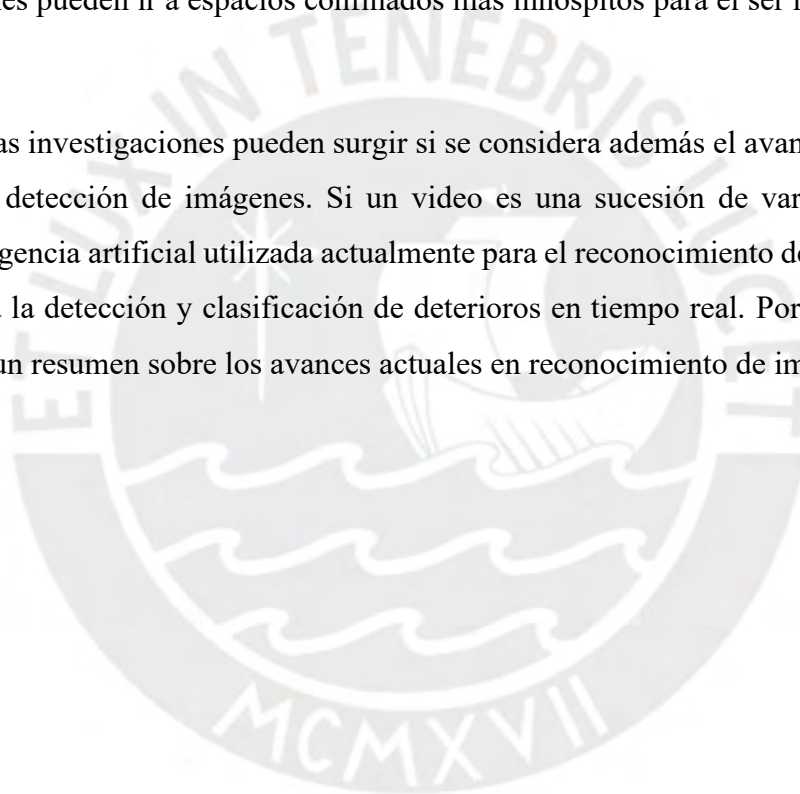
#### 4.7 Aporte del trabajo y futuras investigaciones

El presente trabajo de investigación es un aporte en tanto a la fecha ha logrado compendiar los avances y el desarrollo respecto del objeto de estudio. El estado del arte significa un resumen completo y especializado de las técnicas y metodologías utilizadas para poder realizar las intervenciones de mantenimiento que mitiguen los deterioros de la vía y aumenten la productividad de la operación. Así, se convierte en una fuente importante de consulta.

En segundo lugar, este trabajo logra ser un paso pequeño pero significativo para profundizar sobre la aplicación de esta tecnología para este propósito. Así mismo, debe considerarse entre los beneficios: la seguridad de la operación debido a que el vehículo puede ser operado a distancia desde una zona segura. Así mismo, se puede realizar la evaluación de cualquier vía, incluso pavimentadas o aquellas dónde no transitan los vehículos de carga.

En tercer lugar, este trabajo despierta otras ideas de aplicación como la posible en minería subterránea. A través de la tecnología LIDAR (laser imaging detection and ranging), se puede investigar la aplicación y los beneficios o desventajas de su aplicación en este tipo de desarrollo minero. Los drones pueden ir a espacios confinados más inhóspitos para el ser humano y de poca iluminación.

Por último, futuras investigaciones pueden surgir si se considera además el avance en inteligencia artificial para la detección de imágenes. Si un video es una sucesión de varias imágenes por segundo, la inteligencia artificial utilizada actualmente para el reconocimiento de imágenes podría ser utilizada para la detección y clasificación de deterioros en tiempo real. Por este motivo, este trabajo presenta un resumen sobre los avances actuales en reconocimiento de imágenes.



## 5. CONCLUSIONES

1.- A través del siguiente trabajo de investigación y el estudio de la literatura se afirma que la gestión sobre las vías de acarreo impacta en la productividad. Es lógico afirmar que una mejor gestión se deriva de información oportuna y de calidad. Por tanto, a través del siguiente trabajo de investigación puede confirmarse que la detección oportuna de fallas impacta positivamente en la productividad.

2.- Los análisis realizados sobre el posible tipo de dron para la tarea y las características de las cámaras a utilizar comprueban que la calidad de los datos obtenidos es suficiente para considerar viable la implementación de evaluaciones con drones como el Matrice 210 V2 RTK y las cámaras Zenmuse X5s y Zenmuse Z30. Así mismo, la viabilidad económica se sostiene en tanto los beneficios estimados entre el 1.31% y 5.28% (según datos de la literatura recogida en este trabajo y la realidad peruana) son superiores a la inversión en esta tecnología (entre USD 18.000 a USD 25.000 por equipo).

3.- En el presente trabajo se ha esquematizado un proceso para llevar a cabo la ejecución de la inspección vía dron. Este bosquejo servirá de guía a seguir para la aplicación de esta tecnología en futuros trabajos de investigación donde se desee analizar a detalle las limitaciones en la tecnología y los indicadores económicos de la inversión a través de más estudios de campo y en escenarios reales.

4.- Se consideran cumplidos los objetivos del presente trabajo. A través de los distintos análisis se pudo explorar y estimar la viabilidad del uso de drones para el trabajo de reconocimiento de fallas o deterioros en las vías de acarreo. Segundo, se logró comparar y evaluar los atributos de las tecnologías existentes actualmente para realizar este trabajo. Por último, el presente trabajo deja una secuencia de proceso y metodología para la ejecución de futuros trabajos y/o pruebas en campo que analicen la viabilidad con mayor profundidad.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldabas-rubira, E., Colom, U. T., & Barcelona, T. (n.d.). *Introducción al reconocimiento de patrones.pdf*. 1–3.
- Almeida, C. M. De, Neves, T. D. C., Arroyo, C., & Campos, P. (2019). Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2018. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2018*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4>
- Altavia. (2019a). *Sistema de gestión de caminos mineros disminuye en 10% costos de transporte – Altavia*. <https://www.altavia.cl/lorem-ipsam-dolor-amet/>
- Altavia. (2019b). *Solución automatizada para evaluar la condición de los caminos mineros – Altavia*. <https://www.altavia.cl/solucion-automatizada-para-evaluar-caminos-mineros/>
- Aviation Planning. (n.d.). *Unmanned Aircraft Systems & Advanced Air Mobility*. Retrieved November 29, 2020, from <https://aviationplanning.design.blog/unmanned-aircraft-systems/>
- BELAZ-7530 – Belaz. (n.d.). Retrieved July 22, 2020, from <http://belaz.com.au/products/belaz-7530/>
- Bose, A., & Mali, K. (2016). Fuzzy-based artificial bee colony optimization for gray image segmentation. *Signal, Image and Video Processing*, 10(6), 1089–1096. <https://doi.org/10.1007/s11760-016-0863-z>
- Carratala, J. V. (2019). *¿Cual es el mejor lenguaje de programación para inteligencia artificial? – JOCARSA*. <https://jocarsa.com/cual-es-el-mejor-lenguaje-de-programacion-para-inteligencia-artificial>
- Caterpillar. (n.d.). *Cat | Control del análisis de los caminos | Caterpillar*. Retrieved May 16, 2020, from [https://www.cat.com/es\\_US/support/operations/technology/fleet-management-solutions/road-analysis-control.html](https://www.cat.com/es_US/support/operations/technology/fleet-management-solutions/road-analysis-control.html)
- Catterpillar. (n.d.). *Dúmpster para Minería/Dúmpster de Transporte de 400 toneladas 797F | Cat | Caterpillar*. Retrieved July 22, 2020, from [https://www.cat.com/es\\_ES/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18093014.html](https://www.cat.com/es_ES/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18093014.html)
- Challenger-Pérez, Ivet. Díaz-Ricardo, Yanet. Becerra-García, R. A. (2014). El lenguaje de programación Python/The programming language Python. *Ciencias Holguín*, XX, 1–13. <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181531232001.pdf>

- Couceiro, P., Florêncio, E., & Navarro, J. (2020). Adaptive Cost Optimization Model for Open Pit Mining Operations. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJTR)*, 0869(2), 7–11.
- De Albuquerque, V. H. C., De Alexandria, A. R., Cortez, P. C., & Tavares, J. M. R. S. (2009). Evaluation of multilayer perceptron and self-organizing map neural network topologies applied on microstructure segmentation from metallographic images. *NDT and E International*, 42(7), 644–651. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.05.002>
- De Giorgis, V. (2016). *Competitividad de la industria minera Análisis de las problemáticas de la minería chilena*. 147.  
<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/139171/Competitividad-de-la-industria-minera.pdf?sequence=1>
- DJI. (n.d.). *DJI - Official Website*. Retrieved December 13, 2020, from <https://www.dji.com/>
- Dueñas, A. (2020). *Georreferenciación del eje y Anchos de Faja y Carril*.
- Dynatest Peru. (2020). *Presentación General Dynatest 2020*.
- Eaton, R. A., Gerad, S., & Datillo, R. S. (1981). A Method for Rating Unsurfaced Roads. *The Northern Engineer*, 21, 30–40.
- Eberhart, R. C., & Kennedy, J. (2006). *Swarm Intelligence Latané 's Dynamic Social Impact Dynamic Social Impact Theory : Summary Axelrod 's Culture Model*.
- García, M. S. (2017). Uso y aplicaciones de drones en minería. *Universidad Politécnica de Catalunya, 1*(Permite Planificar, monitorear, controlar y hacer seguimiento de los trabajos en mina además ayuda entre otros a la medición del impacto ambiental), 71. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/112714/PFC\\_Manuel\\_Sanchez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/112714/PFC_Manuel_Sanchez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gómez, C. (2019). Análisis del impacto del diseño geométrico de caminos mineros en la productividad de la flora de transporte. *Universidad Técnica Federico Santa María*. <https://repositorio-usm-cl.usm.idm.oclc.org/handle/11673/47180>
- Gracia, I. (2003). Introducción a la programación con Python. *Universitat Jaume I*, 1–399. <http://marmota.act.uji.es/II04/pdf/python.pdf>
- Greensmith, J. (2014). *Artificial Immune Systems - Computerphile*. <https://www.youtube.com/watch?v=u2qRUtg2k3Y&t=275s>
- Haug. (n.d.). *HAUG*. Retrieved July 22, 2020, from <http://www.haug.com.pe/proyecto/faja-overland-tintaya-antapaccay/>
- Heyns, T., Heyns, P. S., & De Villiers, J. P. (2012). A method for real-time condition monitoring of haul roads based on Bayesian parameter estimation. *Journal of Terramechanics*, 49(2), 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2011.12.001>

- Hurtado, B. (2019). *Influencias del mantenimiento de vías de acarreo en la productividad del tajo Ferrobamba-minera las Bambas- Apurímac*.  
<http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/UNSAAC/4658>
- José Vélez Serrano, Alberto Peña Abril, & and Patxi Gortazar Bellas. (2011). Diseñar y programar, todo es empezar. *2011*, 218.  
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliocauladechsp/detail.action?docID=3198514&query=clases+abstractas>
- Junior, M. A. C., Virtuoso, G. H. F., & Martins, P. J. (2012). Propriedades Desejáveis a uma Linguagem de Programação : Uma Análise Comparativa entre as Linguagens C , C ++ e Java. *Anais SULCOMP*, *1*(1), 0–3.  
<http://periodicos.unesc.net/sulcomp/article/view/796/747>
- Komatsu. (n.d.). *960E-2K - Electric Mining Trucks | Komatsu America Corp*. Retrieved July 22, 2020, from <https://www.komatsuamerica.com/equipment/trucks/electric/960e-2k>
- León, P. F., & Quispe, L. S. (2018). *Transporte de mineral por medio de fajas transportadoras en una mina de tajo abierto*. 8891.
- Li, L., Sun, L., Ning, G., & Tan, S. (2014). Automatic pavement crack recognition based on BP neural network. *Promet - Traffic - Traffico*, *26*(1), 11–22.  
<https://doi.org/10.7307/ptt.v26i1.1477>
- López, M. (2008). *Análisis y Gestión de Costos en explotación minera a cielo abierto*. Universidad de Chile; Universidad de Chile.  
<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103187>
- Lopez, M., & Yu Liu, W. (2017). *Identificación de sistemas no lineales mediante redes neuronales convolucionales*. 103.
- Maravi, P. (2019). *Mejoramiento Funcional de vías mineras de acarreo con la aplicación de Geomateriales - Caso Mina Rafael S.A.C*.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Marinovich, F. (2017). *Influencia Del Mantenimiento De Vias Sobre La Productividad Del Proceso De Acarreo En El Minado Del Tajo Pampa Verde, Minera La Zanja-Cajamarca*. 1–136.
- Merino Peña, E., Gómez Ramírez, J., & Salinas Bautista, L. (2017). Valorización de Volcan Compañía Minera S.A.A. *Repositorio de La Universidad Del Pacífico - UP*.
- Ministerio de Energía y Minas. (1992). Texto Único Ordenado de la Ley General de Minería. *Diario El Peruano*. <https://doi.org/10.1558/jsrnc.v4il.24>
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). Boletín Estadístico Minero - Edición N° 02-2020. *Boletín Estadístico Minero*.



- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2013). Resolución Directoral N°17-2013-MTC/14 Manual de Carreteras - Conservación vial. *Diario El Peruano*, 1243.
- Morales Sánchez, C. M., Lanz, Acosta, R. D., & Tomás, R. M. E. (2019). Detección de deterioros en pavimentos flexibles a partir del procesamiento de imágenes y modelos de su superficie. *Revista de Arquitectura e Ingeniería (Cuba)*, 13, 16.
- Peña Basurto, M. A., & Cela Espín, J. M. (2000). *Introducción a la programación en C*. <http://fisica.cab.cnea.gov.ar/gpgpu/images/introduccion-a-la-programacion-en-c.pdf>
- Peña, M., & Cela, J. (2000). *Introducción a la Programacion en C++*. 376. <http://fisica.cab.cnea.gov.ar/gpgpu/images/introduccion-a-la-programacion-en-c.pdf>
- Perafan, W. de J. (2013). *Guía para el Mantenimiento Rutinario de Vías no Pavimentadas*. 26(4), 1–37.
- Peshkin, D., Dzwilewski, P.-P. F., Potvin, K. M., Gauthier, K., Wade, M., Risner, E., Robinson, R., Snyder, C., Woolpert, M. C., & Feighan, K. (2019). *Guía para Recolectar, Aplicar y Mantener Datos de Condición de los Pavimentos en Aeropuertos*.
- Pix4D. (2019). *What is accuracy in an aerial mapping project*. April, 1–4. <https://www.pix4d.com/blog/accuracy-aerial-mapping%0Ahttps://www.pix4d.com/es/blog/mapeo-aereo-de-precision>
- Pradena, M., Mery, J. P., & Novoa, É. (2010). Estabilización y mantenimiento de caminos no pavimentados sometidos a condiciones de hielo-nieve en zona de montaña. *Revista de La Construcción*, 9(2), 97–107. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2010000200010>
- Redondo, F. (2016). *El Índice TIOBE: ¿cómo medir qué lenguajes de programación son los más... - Paradigma*. Paradigma. <https://www.paradigmadigital.com/dev/el-indice-tiobe-como-medir-que-lenguajes-de-programacion-son-los-mas-usados/>
- Revista Minería Chilena. (2014). Camiones mineros: Gigantes en tamaño y relevancia. *Minería Chilena*, 1–5. <http://www.mch.cl/informes-tecnicos/camiones-mineros-gigantes-en-tamano-y-relevancia/>
- Revista Perú Construye. (2018). *Perú: ¿qué porcentaje de la red vial no está pavimentada? - Perú Construye*. Revista Perú Construye. <https://peruconstruye.net/2018/11/16/peru-que-porcentaje-de-la-red-vial-no-esta-pavimentada/>
- Reyes, O., Mejía, M., & Castelblanco, J. (2019). Técnicas de inteligencia artificial utilizadas en el procesamiento de imágenes y su aplicación en el análisis de pavimentos. *Revista EIA*, 16(31), 189–207.
- Rojas Seguel, D., Castillo, E., & Cantallopts, J. (2015). Caracterización de los costos de la gran minería del cobre. *Cochilco*, 39. <https://www.cochilco.cl/Listado>

- Temtico/Informe\_caracterizacion\_de\_los\_costos.pdf%0Ahttps://www.cochilco.cl/Listado Temtico/062016 Seguimiento Costos.pdf
- Rumbo Minero. (2018). Expomina 2018 Gran Éxito de la Minería Peruana. *Rumbo Minero*, 114, 1–371.
- Saavedra, A. (2015). *Diseñando la Ruta*. Revista Construcción Minera.  
[https://issuu.com/construccionminera/docs/construccionminera\\_13](https://issuu.com/construccionminera/docs/construccionminera_13)
- Saud, C. (2017). *Relación precio del cobre y costos de extracción*. Universidad de Chile.  
<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144334>
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Queiroz, C. A. V. (1986). International Road Roughness Experiment: a Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements. *Transportation Research Record*, 76–85.
- Shahmoradi, J., Talebi, E., Roghanchi, P., & Hassanalain, M. (2020). A comprehensive review of applications of drone technology in the mining industry. *Drones*, 4(3), 1–25.  
<https://doi.org/10.3390/drones4030034>
- Tannant, D. D., & Regensburg, B. (2001). *Guidelines for mine haul roads design*.
- Thompson, R. (2010). Mine haul road design and management best practices for safe and cost-efficient truck haulage. *SME Annual Meeting and Exhibit 2010*, 140–146.
- Vargas, P. E., Olivera, F. de M., Luyo, D. R., & Sandoval, J. (2016). Elementos del costeo en compañías mineras. *Lidera*, 5.  
<http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/revistalidera/article/viewFile/14757/15338>
- Xavier, R. S., & Saldanha, R. R. (2009). PLANEJAMENTO DE OPERAÇÕES DE LAVRA EM MINAS A CÉU ABERTO COM ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CARGA E DE TRANSPORTE. *Xlliisbpo*, 2123–2134.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Department of Electrical Engineering and Electronics Research Laboratory, University of California, Berkeley, California A*, 338–353.