



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DEL **CARIBE**

**MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO
MINERO A CIELO ABIERTO ORIENTADO A
LA CONTINUIDAD OPERATIVA Y
CONFIABILIDAD DE ACTIVOS EN LA
COSTA CARIBE**

**LAURA ISABEL BARRAZA SIADO
LAIFRAN JOSÉ BERDUGO NAVARRO**

**ESPECIALIZACIÓN EN
FACULTAD DE INGENIERÍA
BARRANQUILLA
2026**

**Estructuración de un Modelo de Gestión de Mantenimiento Minería a cielo
abierto orientado a la Continuidad Operativa y Confiabilidad de Activos en la
Costa Caribe**

**Laura Isabel Barraza Siado
Laifran José Berdugo Navarro**

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar por el título de:
Especialista en gerencia de proyectos**

**Director
Gustavo Guzmán**

**Facultad de Ingeniería
Especialización
Barranquilla, Colombia
2026**



La operación de explotación de recursos en las canteras de la Costa Atlántica depende críticamente de la confiabilidad de su maquinaria de extracción mecánica a diferencia de procesos de minería gestionados por medio de voladuras; sin embargo, predomina un esquema de mantenimiento reactivo que genera fallas recurrentes, paradas no programadas y sobrecostos. Para abordar esta problemática, este trabajo plantea el diseño de un sistema integral de gestión de mantenimiento basado en el Mantenimiento Productivo Total (TPM), soportado en tecnologías (CMMS) y el análisis sistemático de fallas. El propósito es disminuir los procesos correctivos, aumentando los procesos preventivos y predictivos para maximizar la disponibilidad de los equipos. La metodología se estructuró en fases secuenciales establecidas por el PMI: un diagnóstico situacional, el diseño del plan de mantenimiento asistido por análisis FMEA (Modos y Efectos de Fallas) y principios RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad), y la proyección de la implementación del software de gestión junto con programas de capacitación operativa. Como resultado, se consolidó una estructura metodológica de gestión de activos adaptada al contexto minero regional y una matriz de criticidad de equipos. Este sistema permitirá incrementar la vida útil de la maquinaria, reducir costos operativos por paradas imprevistas y mejorar las condiciones de seguridad laboral. Asimismo, la integración de herramientas digitales y la capacitación del personal alinean al sector con las tendencias de transformación digital, entregando valor, sostenibilidad y fortaleciendo la competitividad de la industria extractiva regional.

CONTENIDO

Lista de símbolos	5
1 Lista de figuras.....	5
2 Lista de Tablas.....	6
3 Introducción	7
4 Marco teórico	9
4.1 Fundamentos de la Dirección de Proyectos (Estándar PMI)	9
4.1.1 El Ciclo de Vida y las Fases del Proyecto	9
4.1.2 Los 8 Dominios de Desempeño del Proyecto (PMBOK 7).....	9
4.1.3 Estructura de Desglose del Trabajo (EDT / WBS) y Gestión del Alcance	9
4.1.4 Cronograma, Presupuesto y Líneas Base	9
4.1.5 Gestión de Calidad, Riesgos y Requisitos.....	10
4.2 Ingeniería de Confiabilidad y Modelos de Gestión de Mantenimiento	10
4.2.1 Gestión de Mantenimiento en la Industria Extractiva.....	10
4.2.2 Mantenimiento Productivo Total (TPM)	10
4.2.3 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)	10
4.2.4 Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMEA)	11
4.2.5 Sistemas Computarizados de Gestión de Mantenimiento (CMMS)	11
5 Metodología	12

5.1	Acta de Constitución del Proyecto	12
5.1.1	Descripción y propósito General del Proyecto.....	12
5.1.2	Antecedentes del Proyecto.....	12
5.1.3	Necesidades del Negocio, Oportunidades y Riesgos.....	12
5.1.4	Justificación del Proyecto	12
5.1.5	Objetivos Generales, Estrategia y Beneficios del Proyecto.....	13
5.1.6	Alcance, Ámbito y Entorno	13
5.1.7	Condicionantes, Suposiciones y Restricciones	14
5.1.8	Project Owner, Clientes y Usuarios	15
5.2	Gestión del Proyecto	15
5.2.1	Gestión del cronograma	15
5.2.2	Gestión de Costos	16
5.2.3	Gestión de Calidad	17
5.2.4	Gestión de Recursos	18
5.2.5	Gestión de las Comunicaciones	18
5.2.6	Gestión de Riesgos	19
5.2.7	Gestión de Adquisiciones o Compras.....	19
5.2.8	Gestión de los Interesados (Stakeholders).....	20
5.2.9	Gestión de Configuración y Cambios	21
5.2.10	Gestión del Conocimiento del Proyecto.....	21
6	Resultados y análisis	22
7	Conclusiones y recomendaciones	23

7.1	Conclusiones	23
7.2	Recomendaciones	23
A.	Anexo:.....	25
	Referencias.....	26

LISTA DE SÍMBOLOS

Se incluyen símbolos generales (con letras latinas y griegas), subíndices, superíndices y abreviaturas.

Abreviaturas

Símbolo	Descripción
CMMS/SGMA	Sistema Computarizado de Gestión de Mantenimiento / Sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido
EDT/WBS	Estructura de Desglose del Trabajo
FMEA/AMEF	Análisis de Modos y Efectos de Fallas
HSE	Salud, Seguridad y Medio Ambiente
KPI	Indicador Clave de Rendimiento
MTR	Matriz de Trazabilidad de Requisitos
PMBOK	Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos
PMI	Instituto de Gestión de Proyectos
QA/QC	Aseguramiento de la Calidad / Control de Calidad
RCM	Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad
TPM	Mantenimiento Productivo Total

1 LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de Gantt.....	16
Figura 2 Matriz de interesados.....	20

2 LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de requerimientos y actividades.....	14
Tabla 2 Cronograma	15
Tabla 3 presupuesto preliminar del proyecto	17
Tabla 4 matriz de gestión de calidad	18
Tabla 5 matriz de gestión de recursos	18
Tabla 6 matriz de gestión de riesgos	19
Tabla 7 Matriz Integrada de Adquisiciones	20

3 INTRODUCCIÓN

El direccionamiento estratégico de la gestión del mantenimiento constituye un pilar fundamental para garantizar las buenas prácticas, la eficiencia operativa y la sostenibilidad del retorno económico dentro de la industria minera. En los procesos de extracción (excavadoras y buldóceres) transporte (volquetes y cargadores) y trituración de materiales (plantas de beneficio), la maquinaria pesada representa el activo más crítico para el cumplimiento de los objetivos de producción y la continuidad de la cadena de suministro de los agregados. A pesar de su relevancia, en el sector de la explotación de canteras predomina históricamente una gestión de carácter reactivo [1], caracterizada por la ausencia de planes estructurados, la falta de estandarización en los procedimientos operativos y una limitada adopción de herramientas tecnológicas.

Esta problemática adquiere una relevancia crítica al analizar el entorno socioeconómico de la Región Caribe Colombiana, la cual experimenta una alta demanda de materiales pétreos impulsada por el desarrollo de macroproyectos de infraestructura vial, obras civiles y edificación, un mercado que a nivel nacional demanda más de 40 millones de toneladas de materiales al año y que en la Costa Atlántica se concentra en la expansión de infraestructura vial y portuaria [2]. En este escenario de alta exigencia, la disponibilidad y la confiabilidad operacional de la maquinaria que operan en las canteras se transforman en ventajas competitivas determinantes. Sin embargo, la persistencia en la falta de gestión de mantenimiento limita la capacidad de respuesta a problemas técnicos, comprometiendo la estabilidad financiera de las empresas del sector. Ante este panorama, se hace evidente la necesidad de transformar los esquemas operativos tradicionales, lo que conduce a la formulación del siguiente interrogante de investigación: ¿De qué manera el diseño de un modelo de gestión de mantenimiento basado en los pilares del Mantenimiento Productivo Total (TPM) y soportado en tecnologías digitales, puede mitigar las fallas imprevistas y optimizar la confiabilidad operacional en las canteras de la Costa Atlántica?

Como respuesta a la problemática expuesta, el presente trabajo propone el diseño de un modelo integral de gestión de mantenimiento minero orientado a la continuidad y la confiabilidad operacional. Esta propuesta se fundamenta en la adopción de los pilares del Mantenimiento Productivo Total (TPM), promoviendo la transición desde un enfoque reactivo hacia una cultura de mejora continua y mantenimiento autónomo, donde se integra activamente al personal operativo en el cuidado de los activos [3]. Asimismo, el modelo

incorpora el uso de sistemas computarizados de gestión de mantenimiento (CMMS) como herramientas tecnológicas clave para la planeación, control y trazabilidad de las órdenes de trabajo [4]. Para garantizar la viabilidad y el rigor administrativo en la estructuración de esta solución, el desarrollo del proyecto se articula bajo las buenas prácticas y lineamientos del estándar PMBOK del Project Management Institute (PMI) [5], asegurando una gestión sistemática de las fases de inicio, planificación y diseño técnico mediante el control riguroso del alcance, el tiempo y los recursos asignados.

El alcance de este proyecto se delimita formalmente como un estudio de carácter descriptivo y propositivo, enfocado en evaluar de manera rigurosa el estado actual de la gestión de activos en las canteras seleccionadas y formular una propuesta estructural basada en procesos optimizados.

La relevancia de esta investigación radica en su potencial para transformar la gestión operativa de las canteras de la Costa Atlántica, ofreciendo un marco estructurado que alinee los procesos mineros con las tendencias internacionales de transformación digital, sostenibilidad y gestión moderna de activos. La viabilidad de la propuesta se fundamenta en su capacidad para proyectar mejoras sustanciales en los indicadores económicos (mediante la reducción de costos por paradas imprevistas), así como en los estándares de seguridad industrial y mitigación de impactos ambientales.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Fundamentos de la Dirección de Proyectos (Estándar PMI)

4.1.1 El Ciclo de Vida y las Fases del Proyecto

El ciclo de vida provee la estructura básica para dirigir un proyecto desde su inicio hasta su conclusión [5]. Para entornos donde alcance, tiempo y costos se definen de forma clara y temprana, se aplica un Ciclo de Vida Predictivo (Orientado al Plan), fundamentado en la planificación detallada previa a la ejecución masiva. Una fase es un conjunto de actividades lógicas que culmina en un entregable; su transición se rige por Puertas de Fase (*Phase Gates*) o puntos de control técnico que evalúan el rendimiento para autorizar o detener el avance [5].

4.1.2 Los 8 Dominios de Desempeño del Proyecto (PMBOK 7)

La Guía del PMBOK en su séptima edición introduce los Dominios de Desempeño como actividades críticas enfocadas en la entrega de valor. Para este proyecto se adopta un enfoque integrador donde dichos dominios se operan y materializan en la práctica a través de la estructura detallada de las 10 Áreas de Conocimiento de la sexta edición del PMBOK (cronograma, costos, calidad, riesgos, entre otras) [5], las cuales se desarrollan en el capítulo metodológico. De este modo, la estructura por procesos de la sexta edición proporciona las herramientas operativas para planificar el paso a paso, mientras que la séptima edición aporta el marco estratégico para asegurar que el modelo diseñado responda al contexto de las canteras

4.1.3 Estructura de Desglose del Trabajo (EDT / WBS) y Gestión del Alcance

La EDT es la descomposición jerárquica del alcance total que ejecutará el equipo; el trabajo no definido en ella queda excluido del proyecto. Su nivel más bajo es el Paquete de Trabajo, idóneo para estimar costos y cronogramas con fiabilidad [6]. Asimismo, el Plan de Gestión del Alcance norma la definición y control del proyecto, previniendo la corrupción del alcance (*Scope Creep*) al regular la transformación de requerimientos en entregables [7].

4.1.4 Cronograma, Presupuesto y Líneas Base

El cronograma es un modelo de programación que vincula actividades con duraciones y restricciones, empleando la Línea Base del Cronograma para

medir desviaciones temporales [7]. Paralelamente, el presupuesto se formaliza en la Línea Base de Costos, versión aprobada y desglosada en el tiempo que incluye reservas de contingencia (excluyendo las de gestión) para el control financiero del gasto [7].

4.1.5 Gestión de Calidad, Riesgos y Requisitos

El Plan de Gestión de Calidad operativiza las políticas institucionales mediante el Aseguramiento de la Calidad (QA), enfocado en optimizar procesos, y el Control de Calidad (QC), orientado a verificar técnicamente los entregables [7]. Para la incertidumbre, la Matriz de Riesgos prioriza eventos según su probabilidad e impacto para guiar las respuestas (evitar, mitigar, transferir, aceptar o explotar). Finalmente, la Matriz de Trazabilidad de Requisitos (MTR) vincula las necesidades de origen con los entregables de la EDT, asegurando el control de requisitos frente a solicitudes de cambio [7].

4.2 Ingeniería de Confiabilidad y Modelos de Gestión de Mantenimiento

Para responder a la criticidad operativa de las canteras de la Región Caribe, la gobernanza del PMI se acopla con los fundamentos de la confiabilidad de activos fijos.

4.2.1 Gestión de Mantenimiento en la Industria Extractiva

El mantenimiento a cielo abierto difiere de la manufactura por las severas condiciones ambientales y la dispersión de la flota pesada (excavadoras, buldóceres) [9]. La literatura estipula que migrar de esquemas reactivos a políticas proactivas es indispensable para evitar paradas imprevistas, mitigar el desgaste prematuro y proteger la rentabilidad del negocio.

4.2.2 Mantenimiento Productivo Total (TPM)

El TPM busca maximizar la eficiencia global de los equipos (OEE) eliminando averías, defectos y accidentes [10]. Su pilar clave aquí es el Mantenimiento Autónomo, que transfiere al operador tareas de inspección, limpieza y lubricación básica [3]. Esto genera cultura proactiva, mitiga fallas menores por omisión operativa y descongestiona de correctivos al taller central.

4.2.3 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

El RCM es un proceso sistemático para asegurar que un activo físico cumpla su contexto operacional presente [12]. Mediante siete preguntas clave sobre

funciones, fallas y efectos, permite sustituir los planes genéricos de fabricantes por tareas preventivas y predictivas justificadas analíticamente bajo criterios de criticidad real.

4.2.4 Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMEA)

El FMEA es una herramienta estructurada que identifica proactivamente cómo falla un componente (modos de falla), sus causas y efectos en la seguridad y producción [10]. Calculando el Número de Prioridad de Riesgo (NPR)—multiplicando severidad, ocurrencia y detectabilidad—clasifica las fallas para priorizar recursos hacia los activos más vulnerables [12].

4.2.5 Sistemas Computarizados de Gestión de Mantenimiento (CMMS)

Un software CMMS centraliza los datos de ingeniería para optimizar la administración de activos [4]. Actúa como núcleo operativo para planificar y programar Órdenes de Trabajo (OT), controlar inventarios de repuestos y calcular KPIs técnicos (MTBF y MTTR), sustituyendo bitácoras manuales por trazabilidad digital para la toma de decisiones gerenciales [10].

5 METODOLOGÍA

5.1 Acta de Constitución del Proyecto

5.1.1 Descripción y propósito General del Proyecto.

Con el objetivo de robustecer la competitividad y la sostenibilidad financiera de la industria minera en la Costa Caribe, este proyecto tiene como propósito diseñar un "Modelo de Gestión de Mantenimiento Minero a Cielo Abierto orientado a la Continuidad Operativa y Confiabilidad de Activos". Este modelo se estructurará a través del análisis riguroso de fallas y la estandarización de protocolos, permitiendo optimizar los procesos correctivos, preventivos y predictivos del sector.

5.1.2 Antecedentes del Proyecto

En el ámbito internacional, la adopción de filosofías como el TPM, herramientas como los softwares CMMS y metodologías de ingeniería de confiabilidad como RCM y FMEA, ha demostrado mitigar el desgaste prematuro de los activos, superando las limitaciones de los esquemas tradicionales basados exclusivamente en horómetros [10].

5.1.3 Necesidades del Negocio, Oportunidades y Riesgos.

El sector de minería y transporte de la Región Caribe busca optimizar la gestión de sus activos. A partir del levantamiento de información primaria y las entrevistas estructuradas realizadas en cuatro organizaciones del sector (Inverlog S.A.S., Transportes Garzón, Viatrans S.A.S. y Cantera Anónima), se identificó que el 100% de la muestra enfoca sus planes preventivos actuales en la gestión sistemática de fluidos y filtración, mientras que el 25% se encuentra en fase inicial de adopción de herramientas tecnológicas para la administración del mantenimiento. Para impulsar esta transición, este proyecto diseña un modelo estandarizado basado en Mantenimiento Productivo Total (TPM), análisis FMEA y requerimientos técnicos para un software CMMS adaptado a la operación regional.

5.1.4 Justificación del Proyecto

El diseño de este modelo integral se fundamenta en la necesidad de transformar los esquemas operativos tradicionales de las canteras del departamento del

Atlántico, un sector estratégico para el desarrollo de la infraestructura vial y civil de la Región Caribe. La viabilidad y conveniencia de la propuesta se sustentan bajo las siguientes tres dimensiones esenciales:

Socioeconómicamente, este modelo protege la rentabilidad de las canteras del Atlántico, clave para la infraestructura del Caribe. El sector aportó 8.63 billones de pesos al PIB en 2025 y generó más de 204,000 empleos directos [11]. Mitigar fallas imprevistas mediante planes preventivos estabiliza costos, aportando predictibilidad financiera y sostenibilidad regional.

5.1.5 Objetivos Generales, Estrategia y Beneficios del Proyecto.

La gestión predictiva e improrrogable de 9 meses optimiza la dirección de activos en canteras del Caribe mediante diagnóstico, diseño analítico y estandarización (CMMS). Mitigará correctivos y downtime, usando FMEA para priorizar criticidad y RCM para modelar matemáticamente el mantenimiento preventivo-predictivo.

Objetivo general: Diseñar un sistema integral de gestión de mantenimiento para canteras de la Costa Atlántica, basado en metodologías de confiabilidad y TPM, orientado a maximizar la disponibilidad de activos críticos, reducir paradas no programadas y mitigar sobre costos operativos.

Objetivos específicos:

- Diagnosticar la situación actual de mantenimiento, confiabilidad de flota y recursos técnicos, identificando causas raíz de paradas imprevistas.
- Diseñar el plan preventivo y predictivo mediante metodologías RCM y FMEA, determinando los requisitos de repuestos críticos.
- Estandarizar procesos operacionales mediante protocolos técnicos, la estructuración del CMMS y programas de capacitación bajo pilares TPM, asegurando trazabilidad y seguridad.

5.1.6 Alcance, Ámbito y Entorno

El proyecto estructurará un modelo documental (RCM, FMEA, TPM, PMBOK) para canteras del Atlántico, excluyendo compras y ejecución. Ante la baja madurez sectorial detectada en entrevistas, se prioriza la normalización de procesos y formatos como base previa al análisis. El proyecto abarca tres organizaciones seleccionadas. En Inverlog S.A.S., tras sesiones con la Gerencia de Operaciones y el equipo técnico, se diagnosticó una gestión

orientada al control operativo y de fluidos; se busca evolucionar hacia la centralización digital (CMMS) y la confiabilidad proactiva, delimitando el alcance a la normalización documental, matriz de criticidad, análisis FMEA y el diseño conceptual de activos. Por su parte, en Transportes Garzón se entrevistó al director de Logística, evidenciando un enfoque en la seguridad y salud en el trabajo; aprovechando sus controles por horómetros, se busca incorporar ingeniería de confiabilidad y mantenimiento autónomo (TPM), acotando el alcance a rutas de inspección visual, listas de chequeo para transporte minero y modos de falla bajo RCM, en viatrans Sas se evidencio un enfoque iniciativo hacia el desarrollo del sistema de gestión de mantenimiento y desarrollo en el abastecimiento de recursos. Finalmente, en la Empresa Anónima (bajo confidencialidad), la información del Administrador General reflejó un ritmo enfocado en la producción constante con registros flexibles; la oportunidad radica en estabilizar tiempos operativos y proteger los activos mediante planeación estructurada, orientando el alcance al diagnóstico situacional, análisis de fallas en equipos de extracción y protocolos técnicos basados en capacitación TPM.

Tabla de Alcance

Para mayor claridad y control sobre los límites de la propuesta, se presenta la clasificación sugerida de los requerimientos y actividades del proyecto, estos parámetros de control se establecen en la tabla I:

Tabla 1 Clasificación de requerimientos y actividades

CLASIFICACIÓN	ELEMENTOS Y ACTIVIDADES DEL PROYECTO
 IMPRESINDIBLE	Diagnóstico, modelos bajo ISO 55001 e ISO 14224, regulaciones CRA, estandarización, especificaciones CMMS y capacitación TPM.
 DESEABLE	Simulaciones financieras y diseño conceptual de KPIs.
 FUERA DE ALCANCE (OUT)	Compra de licencias/insumos y ejecución operativa de mantenimiento.

5.1.7 Condicionantes, Suposiciones y Restricciones

Para asegurar la viabilidad del proyecto, se definen los siguientes factores limitantes, premisas y restricciones obligatorias. Condicionantes; Acceso a campo, hardware disponible y participación del personal. Supuestos; Veracidad

de datos entregados, estabilidad del equipo consultor y aplicabilidad regional. Restricciones; Plazo fijo, alcance documental (sin compras ni ejecución); metodología PMBOK; datos anonimizados; visitas bajo horarios de cantera, EPP obligatorio y sin operar maquinaria.

5.1.8 Project Owner, Clientes y Usuarios

El Project Owner valida viabilidad técnica, asegura acceso a campo y recibe el modelo final. Clientes (Dirección de canteras): Reciben la propuesta documental para decisiones de inversión estratégica. Usuarios Administrativos (jefe/Planner): Gestionan órdenes de trabajo, inventarios y métricas CMMS. Usuarios Operativos (Mecánicos/Operadores): Ejecutan protocolos técnicos, listas de chequeo y mantenimiento autónomo TPM.

5.2 Gestión del Proyecto

5.2.1 Gestión del cronograma

La planificación (PMBOK) usará precedencias, línea base y Gantt para controlar la ruta crítica e hitos contra desviaciones. Fijación de hitos para detectar desviaciones de tiempo de forma temprana. Cómo se presenta en la tabla II.

Tabla 2: Cronograma

Nombre de la tarea	Estado	Asignada a	Fecha de inicio	Fecha de finalización	DURACIÓN (en días)	Estado
Concepción e inicio del proyecto	Sin iniciar	Coordinador de Proyecto	06/01	07/15	45	Sin iniciar
Inicio del proyecto	Completado	Coordinador de Proyecto	06/01	06/12	12	En curso
Elaboración del project charter	Completado	Coordinador de Proyecto	06/04	06/10	7	Completado
Identificación de interesados	En curso	Coordinador de Proyecto	06/12	06/16	5	En espera
Revisión bibliográfica y normativa	Sin iniciar	Equipo Consultor / Investigador	06/17	06/29	13	
Plan de gestión del proyecto	Sin iniciar	Coordinador de Proyecto	06/30	07/15	16	
Definición y planificación del proyecto	Sin iniciar	Jefe de Mantenimiento	07/04	08/25	53	
Política y estrategia RCM/FMEA	Sin iniciar	Jefe de Mantenimiento / Analista de Confiabilidad	07/05	07/22	18	
Instrucciones técnicas y rutas críticas	Sin iniciar	Ingeniero de Procesos / Ing. de Mantenimiento	07/20	08/10	22	
Checklists e instructivos visuales	Sin iniciar	Coordinador de Mantenimiento / Supervisor	07/28	08/10	14	
Evaluación financiera de activos	Sin iniciar	Área Financiera / Gerencia de Operaciones	08/05	08/25	21	
Lanzamiento y ejecución del proyecto	Sin iniciar	Planner de Mantenimiento	08/26	12/20	117	
Diseño y parametrización CMMS	Sin iniciar	Planner de Mantenimiento / Administrador CMMS	08/26	10/14	50	
Requisitos de seguridad y EPP	Sin iniciar	Especialista HSE	09/10	10/19	40	
Diseño de indicadores KPI	Sin iniciar	Analista de Indicadores / Jefe de Mantenimiento	10/11	12/12	63	
Capacitación TPM	Sin iniciar	Líder de Capacitación / Supervisor	11/02	12/10	39	
Formación técnica y seguridad	Sin iniciar	Especialista HSE / Líder de Capacitación	11/29	12/19	21	
Elaboración de manual de seguridad industrial	Sin iniciar	Especialista HSE	12/02	12/20	19	
Rendimiento/Monitoreo del proyecto	Sin iniciar	Auditor Interno	01/05	03/20	75	
Validación y aprobación de protocolos	Sin iniciar	Gerencia de Operaciones / HSE	01/05	01/25	21	
Auditoría documental	Sin iniciar	Auditor Interno	01/26	02/06	12	
Evaluación de cumplimiento de objetivos	Sin iniciar	Coordinador de Proyecto / Auditor	02/07	02/20	14	
Auditoría final y cierre	Sin iniciar	Auditor Interno / Jefe de Mantenimiento	03/03	03/20	18	

El manual de seguridad posee holgura, mientras los KPIs y la parametrización del CMMS integran la ruta crítica. EDT y cronograma reflejan la dependencia en cascada. Con esto tenemos en la siguiente fig.1 El diagrama de gantt.

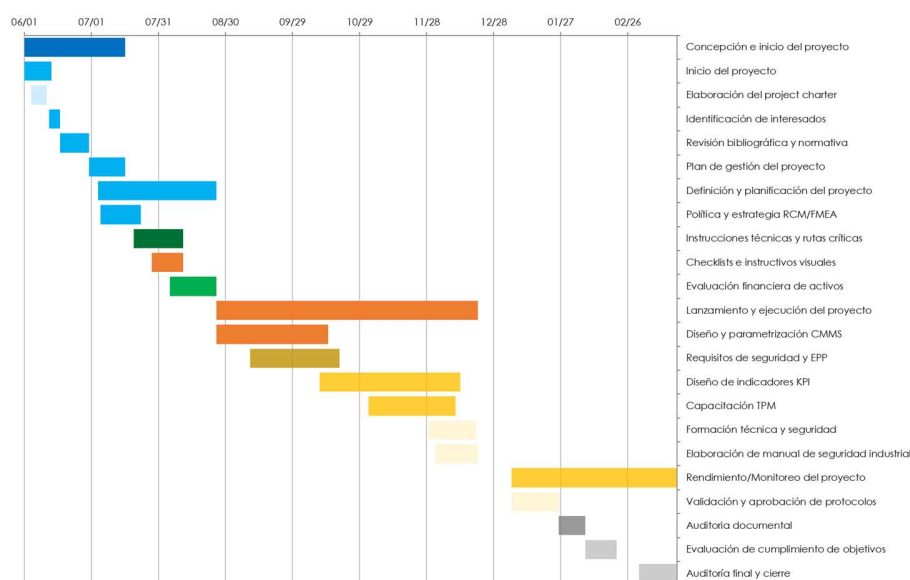


Figura 1: Diagrama de Gantt

El diagnóstico (interesados y ABC) condiciona el diseño de ingeniería (FMEA y RCM), cuyos modos de falla preceden obligatoriamente a los manuales y al CMMS; finalizando con la implementación de OTs/TPM y el cierre documental.

5.2.2 Gestión de Costos

La gestión de costos de este proyecto se estructura bajo el modelo de una propuesta técnico-económica de consultoría de ingeniería. Esta estimación financiera se presenta con un enfoque de costo-beneficio, donde la inversión requerida se justifica mediante el retorno económico proyectado por la reducción de paradas imprevistas, la optimización del inventario de repuestos

críticos y la mitigación del lucro cesante en la operación minera. Cómo se presenta en la tabla III.

Tabla 3 presupuesto preliminar del proyecto

ITEM	DESCRIPCIÓN	VALOR (COP)
1	Personal especializado (Director de Proyecto, Ingeniero de Confiabilidad, Analistas y Consultores Técnicos)	\$ 50.000.000
2	Levantamiento de información y trabajo de campo (visitas técnicas, inspecciones, entrevistas y viáticos)	\$ 8.000.000
3	Diseño del modelo de gestión de mantenimiento (RCM, FMEA, TPM, procedimientos y documentación técnica)	\$ 10.000.000
4	Infraestructura tecnológica y estructuración del CMMS (licencias referenciales, diseño de bases de datos y herramientas digitales)	\$ 6.000.000
5	Reserva de contingencia y gestión de riesgos (7,5%)	\$ 6.000.000
	TOTAL ESTIMADO DEL PROYECTO	\$ 80.000.000

5.2.3 Gestión de Calidad

Se estructurará un plan enfocado en asegurar que los entregables del diseño cumplan con los estándares técnicos de la ingeniería de confiabilidad y los requisitos del cliente. El control de calidad se realizará mediante revisiones periódicas de las matrices de criticidad y los planes preventivos propuestos, verificando su alineación con normativas internacionales de mantenimiento. El éxito del proceso se medirá mediante el porcentaje de aceptación de los diseños

técnicos y la ausencia de no conformidades en el modelo conceptual, Cómo se presenta en la tabla IV.

Tabla 4 matriz de gestión de calidad

ENTREGABLE	CRITERIO DE CALIDAD	MÉTODO DE VERIFICACIÓN	RESPONSABLE
DIAGNÓSTICO SITUACIONAL	Información completa, consistente y validada por las empresas participantes	Revisión documental y aprobación de stakeholders	Director del Proyecto
MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO	Cumplimiento de metodologías TPM, RCM y FMEA	Revisión técnica del equipo consultor	Ingeniero de Confiabilidad
DISEÑO CONCEPTUAL DEL CMMS	Requisitos, funcionales y trazabilidad documental definidos	Lista de verificación de requisitos	Líder de Tecnología
DOCUMENTACIÓN FINAL Y CAPACITACIÓN	Entregables aprobados y conocimiento transferido a los usuarios	Acta de aceptación y encuesta de satisfacción	Director del Proyecto

5.2.4 Gestión de Recursos

Para la administración del personal especializado (ingenieros de diseño, líderes de proyecto) y los recursos físicos o herramientas digitales necesarias durante el modelado, se diseñará una Matriz de Asignación de Responsabilidades (RACI). Esta herramienta delimitará claramente quién es el encargado de ejecutar (R), el responsable último (A), el consultado (C) y el informado (I) en cada fase del desarrollo, optimizando el esfuerzo y garantizando el uso eficiente de las horas de ingeniería, Cómo se presenta en la tabla V.

Tabla 5 matriz de gestión de recursos

RECURSO	FUNCIÓN PRINCIPAL	DISPONIBILIDAD	RESPONSABLE
DIRECTOR DEL PROYECTO	Planificación, coordinación y control general del proyecto	Tiempo parcial durante todo el proyecto	Project Owner
EQUIPO CONSULTOR (INGENIEROS DE CONFIABILIDAD Y MANTENIMIENTO)	Diagnóstico, análisis FMEA/RCM y diseño del modelo de gestión	Según cronograma de actividades	Director del Proyecto
PERSONAL DE LAS CANTERAS	Suministro de información, participación en entrevistas y validación de resultados	Bajo programación previa	Gerencia de Operaciones
RECURSOS TECNOLÓGICOS (SOFTWARE, EQUIPOS DE CÓMPUTO Y HERRAMIENTAS DIGITALES)	Elaboración de documentos, análisis de información y diseño conceptual del CMMS	Disponibilidad permanente	Líder de Tecnología

5.2.5 Gestión de las Comunicaciones

Se definirá la periodicidad, formatos y canales oficiales (informes de desempeño, reuniones de avance y tableros de control) para el flujo de información entre el equipo de diseño y la alta gerencia o patrocinadores del proyecto. Esto garantizará que los reportes sobre el estado del diseño del modelo sean claros, oportunos y contengan los datos necesarios para la toma de decisiones estratégicas.

5.2.6 Gestión de Riesgos

El proceso para gestionar la incertidumbre constará de tres etapas: identificación, análisis y planificación de respuestas. Las amenazas potenciales que puedan afectar el desarrollo del diseño (como la inconsistencia en los datos históricos de la maquinaria o restricciones operativas para levantar información en campo) se evaluarán cualitativamente mediante una Matriz de Probabilidad e Impacto. A partir de esta priorización, se formulará un Plan de Respuesta a Riesgos con estrategias de mitigación para salvaguardar el alcance del proyecto. Cómo se presenta en la tabla VI.

Tabla 6 matriz de gestión de riesgos

CATEGORÍA	RIESGO PRINCIPAL	PLAN DE MITIGACIÓN
ALCANCE	Información incompleta para el diagnóstico	Validación continua con stakeholders y fuentes secundarias.
CRONOGRAMA	Retrasos en levantamiento de información	Reprogramación de actividades y seguimiento semanal.
CALIDAD	Datos inconsistentes para análisis FMEA y RCM	Revisiones técnicas y verificación de registros históricos.
INTERESADOS	Baja participación de usuarios clave	Estrategia de comunicación y acompañamiento permanente.

5.2.7 Gestión de Adquisiciones o Compras

Esta dimensión definirá los procesos de compra y contratación que la empresa minera debe ejecutar externamente para viabilizar el modelo de mantenimiento. para adquirir el CMMS, consultores de capacitación, herramientas predictivas y repuestos de línea amarillama. La selección de proveedores se basará

estrictamente en costo, calidad y soporte técnico, como se establece en la tabla VII.

Tabla 7 Matriz Integrada de Adquisiciones

ENTREGABLE / ESTRUCTURA	APLICACIÓN EN EL PROYECTO	MECANISMO DE CONTROL
PLAN DE COMPRAS: <i>CRONOGRAMA Y BASE</i>	Adquisición de software CMMS Cloud, herramientas de alineación láser y 40 horas de capacitación RCM/TPM.	Línea base aprobada.
SOLICITUD DE PROPUESTA: (RFP) <i>TÉRMINOS Y CRITERIOS</i>	RFP-2026-001: Pliego para CMMS con módulo de órdenes de trabajo e inventario de repuestos críticos.	Matriz de evaluación.
MINUTA DE CONTRATO: <i>TÉRMINOS Y CRITERIOS</i>	Contrato de consultoría externa para entrenamiento técnico en TPM/RCM a planeadores y mecánicos.	Póliza de cumplimiento.
ORDEN DE COMPRA: (OC) <i>ÍTEMES, COSTO Y ENTREGA</i>	OC-2026-045: Compra de hardware predictivo (1 colector de vibraciones y 1 cámara termográfica industrial).	Recibo a satisfacción.

5.2.8 Gestión de los Interesados (Stakeholders)

Identificar a los impactados mediante una Matriz de Interesados para clasificarlos por poder e interés. Esto estructurará estrategias de involucramiento orientadas a mitigar la resistencia al cambio operativo. Con base en esto en la fig. se estructurarán estrategias de involucramiento para gestionar las expectativas de la operación y mitigar la resistencia al cambio organizacional.

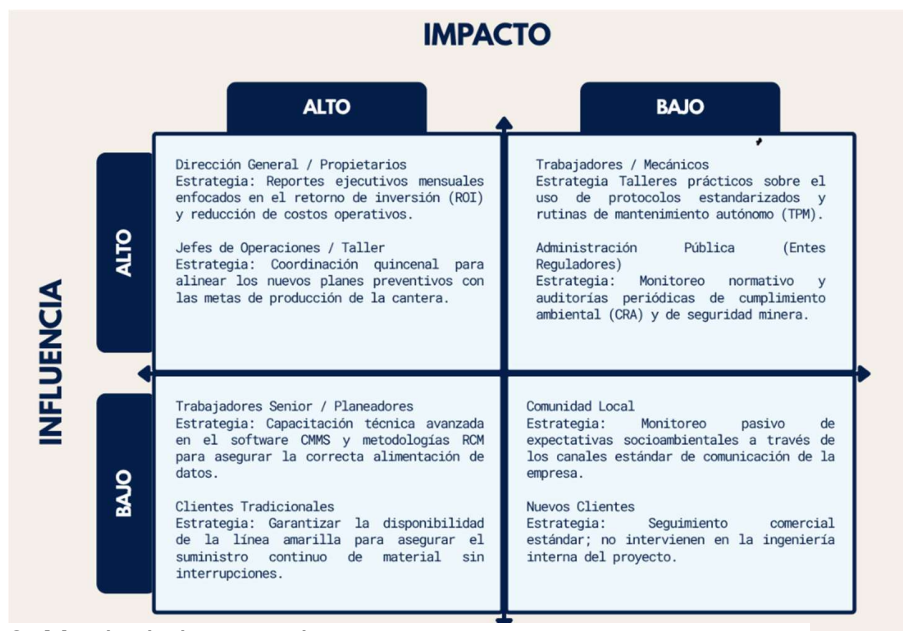


Figura 2: Matriz de interesados

5.2.9 Gestión de Configuración y Cambios

La integridad del alcance se blinda en tres fases operativas, que permiten la gestión del cambio. La Fase 1 (Configuración); madura el documento maestro desde el borrador metodológico (v0.1) y la taxonomía ISO 14224 (v0.2), hasta congelar la línea base aprobada (v1.0). La Fase 2 (Estructura de Captura); evalúa solicitudes mediante triple restricción; por ejemplo, la solicitud SC-2026-001 de la Coordinación añade dos días de capacitación en CMMS absorbiendo holgura y con costo cero (0 COP). La Fase 3 (Dictámenes); registra el estado histórico de las decisiones, decretando como aprobada la reprogramación de dicha capacitación (SC-2026-001) y rechazando tajantemente la compra de licencias definitivas (SC-2026-002) por estar fuera del alcance.

5.2.10 Gestión del Conocimiento del Proyecto

Esta dimensión se centran los saberes técnicos existentes y consolidar el nuevo conocimiento generado para asegurar la sostenibilidad del modelo en el tiempo. Se diseñará un repositorio estructurado para almacenar la documentación de los modos de falla, lecciones aprendidas de averías pasadas e información técnica de los fabricantes. Al cierre del diseño, se establecerá un informe de transferencia de conocimiento para garantizar que el personal operativo comprenda a fondo los fundamentos de confiabilidad aplicados en el nuevo modelo.

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

El desarrollo e implementación del modelo de gestión de mantenimiento minero a cielo abierto para el entorno de referencia no solo representa un esfuerzo de estandarización técnica e ingeniería de confiabilidad, sino que constituye en sí mismo un proyecto de cambio organizacional que debe ser analizado bajo el rigor metodológico del Project Management Institute (PMI). Al evaluar el ciclo de vida de esta iniciativa, se evidencia la alineación directa con los dominios de desempeño y los grupos de procesos establecidos en el estándar PMBOK, demostrando que la viabilidad operativa de las estrategias de mantenimiento depende críticamente de una gobernanza de proyectos sólida. Desde la fase de inicio, la formulación del Project Charter permitió delimitar con precisión el alcance conceptual y las fronteras operacionales para Inverlog S.A.S., Transportes Garzón y la cantera bajo condición de confidencialidad, previniendo la corrupción del alcance mediante una definición clara de los entregables documentales. Esta estructuración inicial facilitó la transición hacia los procesos de planificación, donde la creación de la Estructura de Desglose del Trabajo (EDT) y la secuenciación de actividades permitieron mitigar las restricciones de tiempo y recursos asociadas a la dispersión geográfica de los activos de línea amarilla en la Costa Caribe.

El manejo adecuado de estos canales de comunicación mitigó la resistencia al cambio, permitiendo capturar datos históricos clave a pesar de la flexibilidad u horizontalidad que caracterizaba el registro de intervenciones en la cantera anónima. Desde la óptica de la gestión de riesgos del PMI, el análisis sistemático de fallas (FMEA) y los pilares del Mantenimiento Productivo Total (TPM) actuaron como herramientas avanzadas de respuesta a los riesgos operativos del negocio; en lugar de adoptar una postura pasiva ante las averías imprevistas y los tiempos muertos, el proyecto diseñó una estrategia de respuesta proactiva que incrementa la certidumbre operativa y protege el valor de los activos tangibles.

Finalmente, la integración del diseño conceptual para un software de gestión asistida (CMMS) se fundamenta en los principios de gestión de la calidad del PMI, estableciendo métricas de control técnico para asegurar que la normalización documental se traduzca en una mejora continua y sostenible del uptime. La transición de estas empresas hacia esquemas de madurez organizacional demuestra que la ingeniería de mantenimiento y la gerencia de proyectos no operan de forma aislada, sino como un sistema integrado donde

los lineamientos del PMI proporcionan la estructura de control, el control de cambios y el aseguramiento del valor que hacen viable la continuidad operativa.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió estructurar un modelo integral de gestión de mantenimiento para operaciones de minería a cielo abierto en la Costa Caribe, fundamentado en metodologías de confiabilidad como TPM, RCM y FMEA, e integrado con herramientas digitales de gestión de mantenimiento (CMMS). La propuesta constituye una alternativa técnica para subsanar fallas en el sistema de mantenimiento y superar las falencias existentes en los distintos procesos técnicos asociados a las actividades del sector.

La aplicación de los lineamientos del PMI para la dirección del proyecto facilitó la planificación sistemática del alcance, el cronograma, los costos, los riesgos, la calidad y los recursos, garantizando que el modelo propuesto acate y responda de manera positiva las necesidades técnicas que demanda la operación y los principios que competen a la gestión de dichos procesos.

El modelo diseñado evidencia que la estandarización de los procesos de mantenimiento, el análisis de criticidad de los activos y la implementación de estrategias preventivas y predictivas contribuyen a incrementar la disponibilidad de la maquinaria, reducir las paradas no programadas, optimizar el uso de los recursos y disminuir los costos asociados a fallas inesperadas.

Finalmente, se concluye que el modelo propuesto constituye una herramienta técnicamente viable y adaptable a las condiciones operativas que existen en las canteras de la costa caribe. La implementación de este modelo de mantenimiento permitirá aumentar la confiabilidad de los activos, mejorar la continuidad de los procesos productivos, disminuir los tiempos muertos causados por paradas en los procesos y aumentar la eficacia y calidad de los mantenimientos efectuados a los equipos. Lo anterior contribuye en gran manera al desarrollo de una gestión de mantenimiento alineada con las tendencias de transformación digital y sostenibilidad de la industria minera.

7.2 Recomendaciones

Se recomienda que las empresas mineras de la Costa Caribe implementen de manera progresiva el modelo de gestión de mantenimiento propuesto, adaptándolo a las distintas necesidades que presente el sistema de operaciones que se maneje y de esta manera ajustándolo a las características de sus operaciones. La incorporación de un sistema computarizado de gestión de mantenimiento (CMMS), junto con la aplicación de metodologías como TPM, RCM y FMEA, permitirá optimizar la planificación de las actividades, mejorar la confiabilidad de los activos y fortalecer la toma de decisiones basada en información técnica. Es de vital importancia el promover la continua capacitación del personal con el fin de expandir la cultura organizacional entre todos los miembros de la organización y crear procesos que busquen alcanzar mejoras en el sistema de forma continua.

De igual manera, se recomienda establecer un seguimiento permanente mediante indicadores de desempeño como la disponibilidad de los equipos, el MTBF, el MTTR y el total cumplimiento de los programas de mantenimiento preventivo con la meta fijada de evaluar la efectividad y la eficacia del modelo de mantenimiento implementado. cumplimiento del mantenimiento preventivo, con el propósito de evaluar la efectividad del modelo e identificar oportunidades de mejora.

A. ANEXO:

REFERENCIAS

- [1] S. F. Sahiner, O. Golbasi, y H. S. Aksoy, "Mining equipment maintenance and reliability: a systematic review of modelling approaches, solution methods, and applications", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 40, no. 2, pp. 115-135, abr. 2026. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/17480930.2026.2662304>
- [2] Cámara Colombiana de la Infraestructura (CCI Norte), "Impacto socioeconómico y desarrollo de la infraestructura vial en la Región Caribe", *Revista CCI Norte*, vol. 18, no. 2, pp. 45-58, jul. 2024.
- [3] S. Nakajima, *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988.
- [4] A. Crespo Márquez, *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance*, 2da ed. Cham, Suiza: Springer, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90310-7>.
- [5] Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, 7th ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2021.
- [6] Project Management Institute, *Practice Standard for Work Breakdown Structures*, 3rd ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2019.
- [7] Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, 6th ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2017.
- [8] J. A. Restrepo y M. E. Carvajal, "Análisis de la siniestralidad laboral asociada a la ausencia de procedimientos de trabajo seguro en la operación de maquinaria amarilla en Colombia", *Revista Salud y Trabajo Industrial*, vol. 15, no. 3, pp. 142-156, sep. 2023.
- [9] J. L. Castrellón, "Estudio analítico de la degradación y ciclo de vida del parque de maquinaria pesada en la minería de tajo abierto", *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 26, no. 2, pp. 113-127, nov. 2023.
- [10] R. H. Gouz y S. T. Jenkins, "Integration of CMMS and TPM pillars in heavy duty fleet management: A metrics-based approach for extractive sectors",

International Journal of Asset Management & Reliability, vol. 31, no. 4, pp. 204-221, ene. 2024.

[11] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), "Información técnica: Producto Interno Bruto (PIB) - Tercer trimestre de 2025", DANE, Bogotá, D.C., Colombia, Rep. Estadístico, nov. 2025.

[12] J. Moubray, Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM II), 2da ed. Madrid, España: Aladon, 2004.

[13] L. A. Castro, "La gestión del conocimiento y las lecciones aprendidas como activos estratégicos en la ingeniería de proyectos", Revista Latinoamericana de Proyectos, vol. 19, no. 2, pp. 74-88, mayo 2025.

[14] Ministerio de Minas y Energía. (2021). Caracterización técnica y socioeconómica de la pequeña minería y minería subsistencia en Colombia. Bogotá D.C., Colombia: MinMinas. Recuperado de <https://www.minenergia.gov.co>