

Desempeño operativo y resiliencia climática en terracerías del Frente 4 del tren AIFA-Pachuca

**Operational Performance and Climate Resilience in Earthworks of
Front 4, AIFA-Pachuca Railway**

Luis Fernando de la Cruz Castro

de337787@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0001-0172-9501>
Universidad Autónoma del Estado de
Hidalgo
Zempoala, Hidalgo – México

Humberto Iván Navarro Gómez

humberto_navarro@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-2338-4863>
Universidad Autónoma del Estado de
Hidalgo
Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Jesús Emmanuel Cerón Carballo

jesus_ceronc@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-2809-3387>
Universidad Autónoma del Estado de
Hidalgo
Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Mauricio Guerrero Rodríguez

mgr@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0002-7364-4686>
Universidad Autónoma del Estado de
Hidalgo
Pachuca de Soto, Hidalgo – México

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5815>

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5815>

Desempeño operativo y resiliencia climática en terracerías del Frente 4 del tren AIFA–Pachuca

Operational Performance and Climate Resilience in Earthworks of Front 4, AIFA–Pachuca Railway

Luis Fernando de la Cruz Castro

de337787@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0001-0172-9501>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Zempoala, Hidalgo – México

Humberto Iván Navarro Gómez¹

humberto_navarro@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2338-4863>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Jesús Emmanuel Cerón Carballo

jesus_ceronc@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2809-3387>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Mauricio Guerrero Rodríguez

mgr@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0002-7364-4686>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Artículo recibido: 02 de enero de 2026. Aceptado para publicación: 06 de mayo de 2026.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

Se analizó el desempeño operativo de las terracerías del Frente 4 del tren AIFA–Pachuca durante la temporada de lluvias de 2025. El objetivo fue identificar los factores que afectaron la continuidad productiva y proponer ajustes técnicos y logísticos para mejorar la ejecución de plataformas y terraplenes ferroviarios. Se empleó un enfoque aplicado, no experimental y descriptivo, sustentado en la observación directa, bitácoras de campo, registros operativos, el control de acarreo y la revisión de procedimientos de compactación y calidad. Se examinaron el suministro de material, la respuesta de la maquinaria pesada, la transitabilidad de los caminos de acarreo y la recuperación operativa tras eventos de lluvia. Los resultados mostraron que la saturación de caminos, la interrupción del acarreo y los tiempos muertos por reabastecimiento redujeron el rendimiento real respecto del programado; no obstante, el saneamiento oportuno de los accesos, la redistribución del equipo y la descentralización del suministro de diésel permitieron restablecer la producción diaria. Se concluyó que la eficiencia de las terracerías ferroviarias en entornos climáticamente adversos depende de la coordinación logística, del control de la compactación y de protocolos adaptativos basados en el monitoreo topográfico y meteorológico.

Palabras clave: terracerías ferroviarias, resiliencia climática, compactación, logística de


¹ Autor de correspondencia.

acarreo, control de calidad

Abstract

This study analyzed the operational performance of the earthworks executed in Front 4 of the AIFA–Pachuca railway during the 2025 rainy season. The objective was to identify factors affecting production continuity and propose technical and logistical adjustments to improve the construction of railway platforms and embankments. An applied, non-experimental, and descriptive approach was used, based on direct observation, field logs, operational records, haulage control, and review of compaction and quality-control procedures. Material supply, heavy equipment response, haul-road trafficability, and post-rain operational recovery were examined. The results showed that road saturation, haulage interruption, and refueling-related idle times reduced actual performance relative to the planned output; however, timely access to road rehabilitation, equipment redistribution, and decentralized diesel supply helped restore daily production. It was concluded that earthwork efficiency under adverse climatic conditions depended on logistical coordination, compaction control, and adaptive protocols supported by topographic and meteorological monitoring.

Keywords: railway earthworks, climate resilience, compaction, haulage logistics, quality control

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons. 

Cómo citar: de la Cruz Castro, L. F., Navarro Gómez, H. I., Cerón Carballo, J. E., & Guerrero Rodríguez, M. (2026). Desempeño operativo y resiliencia climática en terracerías del Frente 4 del tren AIFA–Pachuca. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 7 (2), 2406 – 2434. <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5815>

INTRODUCCIÓN

La infraestructura ferroviaria contemporánea opera bajo una presión creciente derivada de la intensificación de los eventos hidrometeorológicos, especialmente de las lluvias extremas, de la saturación del terreno y de las alteraciones en los periodos de retorno de la precipitación. A escala global, se ha estimado que una proporción importante de los activos carreteros y ferroviarios quedará expuesta a eventos de lluvia más frecuentes que los considerados en sus condiciones históricas de diseño, lo que compromete el desempeño funcional del drenaje, la estabilidad de los terraplenes y la continuidad operativa de los corredores de transporte (Liu et al., 2023).

En terraplenes ferroviarios, esta condición adquiere especial relevancia porque la infiltración y el ascenso del nivel freático pueden modificar rápidamente el comportamiento hidromecánico del relleno y de la subrasante, con efectos directos sobre la deformabilidad, la pérdida de rigidez y la estabilidad del cuerpo de terracería (Kumar & Hayano, 2024).

La literatura reciente ha mostrado que el riesgo en infraestructura ferroviaria no depende únicamente de la magnitud de la lluvia, sino también de la interacción entre la susceptibilidad geotécnica, el drenaje, la geometría del terraplén, el control constructivo y la capacidad de respuesta operativa.

En corredores ferroviarios con alta precipitación, el análisis conjunto de datos de campo, condiciones geotécnicas y registros pluviométricos ha permitido identificar zonas con mayor predisposición a movimientos de masa y afectaciones directas a la operación, lo que confirma la necesidad de integrar criterios de resiliencia climática desde la fase constructiva y no solo en la conservación posterior (Campos et al., 2024). De manera complementaria, estudios aplicados en subrasantes y bases han mostrado que el control continuo de la compactación y la retroalimentación operativa en tiempo real mejoran la calidad de la ejecución y reducen la variabilidad del desempeño estructural del terraplén (Baek et al., 2025).

En obras ferroviarias de alta exigencia, la calidad de las terracerías depende de la compactación efectiva por capas, del control de la humedad, de la estabilidad de los caminos de acarreo y de la coordinación entre el banco de préstamo, el transporte, el tendido, la conformación y la verificación geotécnica.

La experiencia internacional ha mostrado que, aun cuando se emplean materiales problemáticos o condiciones geotécnicas complejas, el monitoreo de campo y la gestión cuidadosa del proceso constructivo permiten contener las deformaciones y mejorar la respuesta del terraplén, siempre que exista un control técnico sostenido durante la ejecución (Watanabe et al., 2021).

En paralelo, el análisis reciente de fallas ferroviarias con apoyo de aprendizaje automático ha confirmado que las variables climáticas ya son determinantes observables del comportamiento de los activos ferroviarios, por lo que la operación y la construcción deben incorporar esquemas más robustos de anticipación, monitoreo y toma de decisiones (Soleimani-Chamkhorami et al., 2024).

En este contexto, el proyecto ferroviario AIFA–Pachuca constituye un caso de alto interés técnico por la magnitud de su intervención y las exigencias operativas que se imponen a las terracerías durante la temporada de lluvias. El presente estudio se centró en el Frente 4, que comprende 10 km totales, de los cuales 4.8 km estuvieron activos entre los puntos kilométricos PK 37+250.00 y PK 42+050.00 al momento del análisis.

En este frente, las plataformas alcanzaron un ancho aproximado de 32 m y requirieron hasta 15 capas compactadas de hasta 30 cm de espesor, empleando tepetate local y operando simultáneamente en tres núcleos de trabajo. Durante los episodios de lluvia intensa registrados en junio de 2025, la transitabilidad de los caminos de acarreo, la disponibilidad efectiva de maquinaria y la continuidad del

suministro se convirtieron en factores críticos que afectaron el ritmo de producción y obligaron a aplicar ajustes logísticos inmediatos.

A pesar de la relevancia técnica de estas condiciones, persiste un vacío en los estudios aplicados que documenten, con base en la obra real, cómo interactúan la compactación, la logística de acarreo, la respuesta del equipo y la variabilidad climática en frentes ferroviarios en construcción en el contexto mexicano.

Por ello, el objetivo de este artículo fue analizar el desempeño operativo de las terracerías del Frente 4 del tren AIFA–Pachuca en condiciones climáticas adversas, identificar los factores críticos que afectaron la continuidad productiva y plantear medidas técnicas y logísticas replicables para mejorar la ejecución, el control de calidad y la resiliencia operativa en proyectos ferroviarios de infraestructura lineal.

METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque aplicado, descriptivo y de estudio de caso, orientado a documentar y analizar el desempeño operativo de las terracerías ferroviarias ejecutadas en el Frente 4 del tren AIFA–Pachuca durante una etapa crítica de la construcción, bajo condiciones de lluvia. La elección de un estudio de caso se justificó porque el fenómeno de interés no podía separarse de su contexto real de ejecución, ya que el rendimiento de las terracerías dependió simultáneamente de variables geotécnicas, climáticas, logísticas, operativas y organizacionales.

En la investigación de la construcción, el estudio de caso es un diseño pertinente cuando se requiere examinar procesos complejos de obra con alto nivel de detalle, múltiples fuentes de evidencia y énfasis en la comprensión integral del desempeño en campo (Araújo & Lucko, 2022; Sanda et al., 2021).

Diseño metodológico

El diseño fue no experimental, observacional y transversal con orientación técnico-operativa, porque el investigador no manipula las variables del proceso constructivo, sino que documentó y analizó la operación tal como ocurrió en obra durante un periodo acotado. La temporalidad de observación correspondió principalmente a mayo y junio de 2025, con especial atención a los episodios de lluvia que alteraron la transitabilidad de los caminos de acarreo, la disponibilidad efectiva del equipo y el ritmo de avance.

La lógica analítica del diseño consistió en reconstruir el comportamiento del frente mediante la integración de observaciones de campo, bitácoras, registros de producción, controles de acarreo, resultados de laboratorio y entrevistas técnicas, siguiendo un principio de triangulación de evidencias, recomendado en estudios de caso aplicados a la gestión y operación de proyectos de construcción (Sanda et al., 2021; Manoharan et al., 2024).

Desde el punto de vista metodológico, el estudio combinó una descripción densa del proceso constructivo con un análisis comparativo de los rendimientos observados, las interrupciones operativas y las respuestas implementadas en campo. Esta aproximación es consistente con las mejores prácticas para estudios de caso en construcción, donde el valor analítico del trabajo depende de delimitar con precisión la unidad de análisis, estructurar el levantamiento empírico y asegurar la trazabilidad entre la evidencia, los hallazgos y la interpretación (Araújo & Lucko, 2022).

Unidad de análisis y delimitación del caso

La unidad de análisis estuvo constituida por el sistema operativo de terracerías del Frente 4, entendido como el conjunto articulado de actividades, recursos, controles y decisiones involucrados en la

extracción, el acarreo, la colocación, la conformación, la compactación y la verificación de capas de terraplén y de plataforma ferroviaria. Dentro de esta unidad se incluyeron: el banco de préstamo de tepetate, los caminos de servicio, los tres núcleos operativos de colocación y compactación, la flota de maquinaria y camiones, el personal técnico responsable del control del frente y la evidencia documental generada por la operación.

La delimitación espacial correspondió al tramo comprendido entre los PK 37+250.00 y 42+050.00, con una longitud activa aproximada de 4.8 km dentro del Frente 4. La delimitación funcional consideró únicamente las actividades vinculadas a las terracerías y sus operaciones auxiliares inmediatas, excluyendo los procesos ajenos al objetivo central del estudio. Esta delimitación permitió concentrar el análisis en una secuencia técnica concreta y sus variaciones de desempeño, en lugar de dispersarse entre otras fases del proyecto.

Población técnica observada y criterio de selección

No se aplicó un muestreo probabilístico, dado que el propósito no fue inferencial sino analítico y técnico. Se trabajó con una selección intencional de actores, registros y eventos, propia de los estudios de caso en construcción, priorizando aquellos componentes directamente vinculados con la ejecución y el control del frente. Se incluyeron como informantes y fuentes de verificación el personal de ingeniería del frente, responsables de núcleo, topografía, control de acarreo, operadores clave y registros de laboratorio asociados a la validación de capas.

La decisión metodológica fue captar el funcionamiento real del sistema operativo, en lugar de construir una muestra estadística de trabajadores o equipos. Este criterio es coherente con la lógica del estudio de caso en gestión de la construcción, donde el interés principal reside en reconstruir procesos reales, identificar relaciones causales plausibles y documentar mecanismos operativos verificables (Sanda et al., 2021; Manoharan et al., 2024).

Técnicas de recolección de información

Se emplearon cinco técnicas principales de recolección de información.

La primera fue la observación directa estructurada en campo, utilizada para registrar de manera sistemática la secuencia de actividades, el estado de los caminos de servicio, las maniobras de carga y descarga, la colocación por capas, la respuesta de la maquinaria, las interrupciones causadas por la lluvia y las decisiones de ajuste operativo.

La observación se organizó en formatos de campo con categorías previamente definidas: fecha, frente o núcleo, actividad predominante, maquinaria activa, condición climática, incidencias operativas, condición del material y comentarios técnicos.

En la investigación de la construcción, la observación directa sigue siendo una técnica central para captar procesos dinámicos y contrastarlos con registros operativos, aunque la literatura reciente subraya la conveniencia de estructurar y complementar con evidencia digital y documental para reducir sesgos y pérdidas de detalle (Kempcová & Kozlovská, 2023; Woźniak & Hoła, 2024).

La segunda técnica fue la revisión documental de obra, que incluyó bitácoras, reportes diarios, controles de acarreo, listados de maquinaria, registros de producción, croquis de avance, evidencias fotográficas y documentación de laboratorio relacionada con el control de materiales y compactación. Esta técnica permitió reconstruir la secuencia operativa y contrastar la observación de campo con registros escritos y cuantitativos. La literatura reciente sobre seguimiento en construcción señala que la trazabilidad de la información mejora significativamente cuando se combinan fuentes

documentales, operativas y de monitoreo, en lugar de depender de un solo canal de evidencia (Radman et al., 2025; Rogage et al., 2022).

La tercera técnica fue el análisis de registros operativos de productividad, centrado en los volúmenes acarreados, los ciclos de operación, los tiempos muertos, la disponibilidad de maquinaria y la continuidad del frente. Este componente fue indispensable porque el objetivo del estudio exigía evaluar el desempeño y no solo describir actividades.

Los trabajos recientes en productividad de movimientos de tierra muestran que la medición del rendimiento real requiere observar el equipo dentro de la cadena logística completa –carga, acarreo, descarga, retorno e inactividad–, ya que la pérdida de eficiencia suele originarse en la interacción entre equipos, rutas y condiciones del sitio más que en la capacidad nominal aislada de la maquinaria (Rogage et al., 2022; Deng et al., 2024; Hwang et al., 2025).

La cuarta técnica fue la entrevista técnica semiestructurada, aplicada al personal clave del frente para aclarar decisiones operativas, criterios de ajuste durante las lluvias, problemas recurrentes de suministro, la percepción del rendimiento de los equipos y los procedimientos de respuesta ante contingencias. No se planteó como técnica principal para la producción de resultados, sino como herramienta de contextualización y contraste. En estudios de construcción, la entrevista semiestructurada es especialmente útil cuando se requiere recuperar el razonamiento técnico detrás de las decisiones de obra y vincularlo con la evidencia observacional y documental (Manoharan et al., 2024).

La quinta técnica fue la integración de evidencias geotécnicas y de control de calidad, a partir de resultados de laboratorio y verificaciones asociadas al cumplimiento de la compactación y de las características del material. Esta información no se utilizó de manera aislada, sino como parte de la explicación del desempeño operativo del frente.

En el documento técnico del laboratorio SICAC se observan ensayos aplicables a materiales para terracerías, entre ellos, muestreo, preparación de muestras, contenido de agua, compactación dinámica y masa volumétrica seca del lugar, por lo que su incorporación metodológica resulta pertinente en el análisis del proceso constructivo.

Instrumentos de levantamiento y registro

Para la observación directa, se utilizó una bitácora de campo estructurada, diseñada para registrar de manera homogénea las condiciones operativas de cada jornada. Esta bitácora incluyó: ubicación del núcleo, condición meteorológica, tipo de actividad ejecutada, maquinaria en operación, incidencias en el camino de acarreo, interrupciones observadas, acciones correctivas y observaciones del investigador. La estandarización del registro respondió al criterio metodológico de minimizar las variaciones en la captura de datos entre jornadas y facilitar su posterior comparación.

Para la revisión documental se utilizó una matriz de extracción de información en la que se integraron los datos clave de los reportes diarios: volumen estimado y ejecutado, número de viajes, tiempos de espera, reasignación de equipo, afectaciones por lluvia y observaciones de supervisión. Para las entrevistas se empleó una guía semiestructurada temática, organizada en bloques: secuencia de operación, control del frente, incidencias críticas, criterios de ajuste operativo y propuestas de mejora. Para el análisis de productividad se utilizó una cédula de indicadores con variables como volumen diario, continuidad del acarreo, disponibilidad del equipo, incidencia de tiempos muertos y afectaciones por el clima.

Este tipo de integración de formatos de observación, entrevistas y trazabilidad documental es consistente con las recomendaciones metodológicas para estudios de caso en construcción y con los marcos recientes de monitoreo operativo en tiempo real (Araújo & Lucko, 2022; Radman et al., 2025).

Procedimiento técnico del estudio

El procedimiento metodológico se desarrolló en siete etapas.

Etapas 1: Delimitación del caso y reconocimiento del proceso

Se identificó el Frente 4 como unidad de estudio por su relevancia técnica, su longitud activa y la ocurrencia de eventos de lluvia que afectaron la operación. En esta fase se definieron los límites espaciales y funcionales del caso, así como las actividades que formarían parte del seguimiento: extracción de material, acarreo, tendido, compactación, control de calidad y respuesta operativa ante contingencias.

Etapas 2: Reconstrucción de la secuencia operativa base

Se documentó la secuencia normal del constructivo: extracción de tepetate en banco, carga en camiones, traslado por caminos de servicio, descarga en núcleo, extendido por capas, conformación geométrica, compactación con el equipo correspondiente y validación de la capa. Esta etapa permitió establecer un patrón de operación de referencia para distinguir posteriormente las desviaciones observadas durante las jornadas afectadas por la lluvia. La reconstrucción secuencial del proceso es fundamental en los estudios de productividad de los movimientos de tierra porque el rendimiento depende del acoplamiento entre actividades y no de eventos aislados (Rogage et al., 2022; Hwang et al., 2025).

Etapas 3: Levantamiento de campo y observación estructurada

Se realizaron recorridos y observaciones en los núcleos operativos y en los caminos de acarreo para registrar las condiciones reales de ejecución. En esta fase se documentaron el estado de humedad del material, la transitabilidad de los accesos, la continuidad de los ciclos de acarreo, la secuencia de las maniobras, las interrupciones y las acciones correctivas ejecutadas por el personal de obra.

Cuando ocurrieron eventos de lluvia, se registró, además, la afectación específica de los caminos, las capas en proceso y los tiempos de reinicio. Este procedimiento responde a la necesidad de capturar la variabilidad real del frente, aspecto que la literatura reciente considera indispensable para pasar de una evaluación estática a una lectura dinámica del desempeño constructivo (Kempecova & Kozlovská, 2023; Deng et al., 2024).

Etapas 4: Acopio y depuración de registros operativos

Se integraron bitácoras, reportes diarios, controles de viaje, registros de maquinaria y datos disponibles del laboratorio. Posteriormente, se revisó su consistencia temporal y temática, depurando duplicidades y armonizando las unidades de análisis por jornada, núcleo y actividad. El objetivo fue contar con una base de comparación entre el comportamiento previsto y el observado.

La literatura reciente sobre el monitoreo de la productividad en tierra y en construcción ha mostrado que la confiabilidad del análisis depende en gran medida de una depuración previa que permita distinguir el tiempo efectivo, el tiempo improductivo, los ciclos completos y los eventos de interferencia (Rogage et al., 2022; Deng et al., 2024; Radman et al., 2025).

Etapas 5: Entrevistas técnicas de contraste

Se realizaron entrevistas semiestructuradas con personal clave para aclarar decisiones operativas que no podían inferirse únicamente a partir de los registros. Se indaga sobre los criterios de redistribución de maquinaria, la reprogramación del suministro de diésel, el saneamiento de caminos, las restricciones del banco y la secuencia de reinicio tras la lluvia.

El propósito fue interpretar la lógica técnica de la respuesta operativa y no solo sus efectos visibles. En construcción, este uso de entrevistas de contraste resulta útil para complementar la observación y los documentos cuando se estudian procesos de supervisión, coordinación y productividad (Manoharan et al., 2024).

Etapas 6: Análisis integrado de desempeño

La información se organizó en ejes analíticos: rendimiento de la maquinaria, continuidad del acarreo, productividad por núcleo, afectaciones por la lluvia, respuesta operativa y control geotécnico de la capa. En lugar de aplicar un tratamiento estadístico complejo, el análisis se centró en la comparación técnica de patrones, desviaciones y relaciones operativas plausibles.

Este enfoque fue congruente con el diseño de estudio de caso y con la finalidad aplicada del trabajo, que buscó explicar cómo interactuaron el clima, la logística y el control de las terracerías en un frente específico. La literatura metodológica en construcción reconoce que la solidez del estudio de caso proviene de la coherencia entre la delimitación, la triangulación y la trazabilidad explicativa, más que de la complejidad formal del análisis cuantitativo (Araújo & Lucko, 2022; Sanda et al., 2021).

Etapas 7: Formulación de hallazgos y propuestas de mejora

A partir del análisis integrado se identificaron cuellos de botella, factores críticos de rendimiento y medidas de mejora técnica y logística. Las propuestas se formularon con base en la evidencia empírica del caso y se contrastaron con desarrollos recientes en monitoreo digital de la productividad, trazabilidad de la flota y control en tiempo real de las operaciones de movimiento de tierras. Esto permitió que la discusión no quedará limitada a una crónica de obra, sino que derivará en recomendaciones replicables para frentes ferroviarios con condiciones semejantes (Deng et al., 2024; Hwang et al., 2025; Radman et al., 2025).

Variables operativas e indicadores analizados

Dado que el estudio fue técnico-aplicado, se trabajó con variables operativas directamente observables. Entre las principales se consideraron: volumen de material acarreado por jornada, continuidad del frente, número de interrupciones por lluvia, condición de los caminos de servicio, disponibilidad efectiva de maquinaria, tiempo de respuesta ante contingencias, trazabilidad del suministro y condición de la capa respecto del control de compactación.

Estas variables se tradujeron en indicadores simples, comparables y útiles para interpretación de obra: producción diaria, desviación entre rendimiento esperado y observado, frecuencia de paro por lluvia, recuperación operativa y consistencia entre operación y validación geotécnica. El uso de indicadores operativos simples y trazables es consistente con la literatura reciente sobre el monitoreo de la productividad, que privilegia esquemas comprensibles y accionables para la toma de decisiones en campo (Kempecova & Kozlovská, 2023; Rogage et al., 2022; Hwang et al., 2025).

Normativa y criterios técnicos de referencia en la metodología

Para la interpretación del control geotécnico y de la calidad de las capas, se consideraron como referencias técnicas mexicanas las siguientes: la N-CTR-CAR-1-01-009/16, Terraplenes; la

M·MMP·1·09/22, Prueba de compactación dinámica; la M·MMP·1·10/19, Grado de compactación; y la M·MMP·1·16/20, Grado de compactación con deflectómetro de impacto ligero (LWD), todas emitidas por la SICT a través del Instituto Mexicano del Transporte.

Estas referencias no se utilizaron como un simple respaldo bibliográfico, sino como un marco técnico para interpretar la lógica de aceptación de materiales, la compactación y la validación de capas dentro del frente. Asimismo, el documento técnico del laboratorio SICAC respaldó la pertinencia de incluir los resultados de muestreo, el contenido de agua, la compactación dinámica y la densidad en sitio en el análisis metodológico.

Estrategia de análisis y validación

La estrategia de análisis se basó en la triangulación de fuentes, es decir, en la comparación sistemática entre la observación de campo, los documentos operativos, las entrevistas técnicas y la evidencia de control geotécnico. Esta triangulación permitió verificar los hallazgos, reducir la dependencia de una sola fuente y aumentar la credibilidad del análisis. En construcción, la triangulación es especialmente importante cuando se estudian procesos operativos complejos, porque la productividad aparente puede ocultar tiempos muertos, decisiones de ajuste o restricciones del sitio que solo se revelan al integrar observación, documentación y testimonios técnicos (Araújo & Lucko, 2022; Woźniak & Hoła, 2024; Manoharan et al., 2024).

La validez interna del estudio se fortaleció mediante cuatro mecanismos: delimitación precisa del caso, uso de instrumentos estructurados, contraste entre fuentes y consistencia entre los datos empíricos y la explicación técnica. La confiabilidad se atendió mediante formatos de registro homogéneos, criterios estables de extracción documental y una ruta analítica explícita entre el dato, el hallazgo y la interpretación. Estas prácticas coinciden con las recomendaciones metodológicas contemporáneas para estudios de caso en investigación de la construcción (Sanda et al., 2021; Araújo & Lucko, 2022).

Consideraciones éticas

El estudio no involucró población vulnerable ni el tratamiento de datos personales sensibles. Las entrevistas técnicas se realizaron con fines exclusivamente académicos y de mejora del conocimiento operativo, procurando no atribuir opiniones individuales de manera identificable en la redacción final. La información documental del proyecto se utilizó con fines analíticos dentro del alcance del estudio y únicamente en la medida necesaria para explicar el desempeño del frente.

En consecuencia, la metodología prioriza la anonimización de los comentarios individuales y la presentación agregada de decisiones y resultados operativos. Este tratamiento es congruente con los criterios habituales de estudios de caso aplicados a la gestión de proyectos y operaciones de construcción (Sanda et al., 2021; Manoharan et al., 2024).

Limitaciones metodológicas

Entre las limitaciones metodológicas del estudio se reconocieron: la dependencia parcial de registros manuales de obra; la ausencia de un sistema digital continuo de flota o trazabilidad automática de viajes; la falta de series instrumentales locales completas de lluvia integradas al análisis operativo; y la imposibilidad de comparar en igualdad de condiciones otros frentes del mismo proyecto. No obstante, estas limitaciones no invalidan el estudio, sino que definieron su alcance: documentar y explicar con rigor técnico el comportamiento real de un frente ferroviario específico a partir de evidencia disponible y triangulada. La literatura reciente sobre earthworks y monitoreo en construcción coincide en que, aun en ausencia de una digitalización plena, la combinación de observación estructurada, registros operativos y análisis documental sigue siendo una base válida para evaluar el desempeño y formular mejoras replicables (Rogage et al., 2022; Deng et al., 2024; Hwang et al., 2025).

DESARROLLO

Marco normativo y técnico aplicable a las terracerías ferroviarias

Las terracerías constituyen la base funcional de la infraestructura lineal, porque de su calidad dependen la estabilidad geométrica, la capacidad portante, la durabilidad de la subestructura y, en última instancia, la seguridad operacional del sistema férreo. Aunque buena parte de la normativa mexicana vigente fue desarrollada para la infraestructura carretera, sus criterios técnicos son plenamente aplicables al control de materiales, la compactación, la aceptación y la construcción de terraplenes ferroviarios cuando el proyecto adopta dichas especificaciones como referencia contractual o técnica.

En ese sentido, los materiales empleados en las capas asociadas al cuerpo del terraplén, la subyacente y la subrasante deben cumplir requisitos de calidad, granulometría, plasticidad, resistencia y comportamiento frente al agua, mientras que su colocación debe sujetarse a procedimientos de tendido, humectación o secado, compactación y verificación de campo (Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT], 2016, 2021a, 2021b).

Desde la perspectiva normativa mexicana, el control técnico de las terracerías se articula en dos grupos principales de documentos: las normas de materiales y las normas o manuales de muestreo y prueba. Para este estudio resultan especialmente relevantes la N-CMT-1-02/21, correspondiente a materiales para subyacente; la N-CMT-1-03/21, relativa a materiales para subrasante; y la N-CTR-CAR-1-01-009/16, que regula la construcción de terraplenes.

De manera complementaria, los procedimientos de laboratorio y de campo para la determinación de la humedad óptima, la masa volumétrica seca máxima, el grado de compactación y la evaluación rápida mediante deflectómetro de impacto ligero se apoyan en los manuales M-MMP-1-09/22, M-MMP-1-10/19 y M-MMP-1-16/20, respectivamente. En consecuencia, la calidad de un frente de terracerías no depende solo de "cumplir" con una capa compactada, sino de integrar de manera coherente la selección del material, su control geotécnico y su verificación operativa en obra (SICT, 2019, 2020, 2022).

En el caso específico del presente estudio, el control de laboratorio se apoyó en el documento técnico de SICAC, en el que se describen métodos aplicables a materiales para terracerías, entre ellos: muestreo, preparación de muestras, determinación del contenido de agua, compactación dinámica estándar y modificada, contenido de agua por secado rápido y masa volumétrica seca del lugar por método de trompa y arena.

Asimismo, el alcance técnico visible incluye la "inspección geométrica de rieles ferroviarios". Esto permite sostener que el proyecto contó con respaldo técnico de laboratorio en ensayos directamente vinculados con el control geotécnico y constructivo del frente, aun cuando en el archivo visible no se identifica un número de acreditación específico que deba declararse en el manuscrito.

Comportamiento geotécnico e hidromecánico de terraplenes ferroviarios bajo lluvia

La literatura reciente ha demostrado que la respuesta de los terraplenes ferroviarios ante eventos de lluvia intensa no depende exclusivamente de la precipitación, sino también de la interacción entre la infiltración, el nivel freático, la succión matricial, la gradación del material, la energía de compactación, el drenaje superficial y las condiciones de confinamiento. Kumar y Hayano (2024) mostraron que las variaciones en el nivel del agua subterránea dentro de terraplenes ferroviarios, bajo escenarios de cambio climático, pueden modificar significativamente la estabilidad y el comportamiento interno del sistema.

En términos prácticos, esto significa que la lluvia no solo dificulta la operación de la obra, sino que altera directamente el estado hidromecánico del terraplén y de la subrasante, afectando su respuesta estructural y su susceptibilidad a deformaciones o a la pérdida de capacidad de soporte (Kumar & Hayano, 2024).

La investigación reciente también ha insistido en que las fallas inducidas por la lluvia en los terraplenes ferroviarios son el resultado de procesos complejos y progresivos. Aqib et al. (2023) analizaron experimental y numéricamente la inestabilidad de un terraplén ferroviario sometido a lluvias intensas y mostraron que la infiltración modifica el esfuerzo efectivo y favorece mecanismos de falla tanto locales como globales.

En la misma línea, Fan et al. (2025) documentaron, en una zona loésica de China, los mecanismos de deslizamiento y colapso de terraplenes ferroviarios tras precipitaciones extremas, subrayando que la rápida degradación de la resistencia y la concentración de humedad pueden desencadenar procesos de pérdida de estabilidad con consecuencias operativas severas. Estos hallazgos son relevantes para el Frente 4 porque permiten interpretar que el deterioro de caminos de servicio y las afectaciones a las capas en construcción no son incidentes aislados, sino expresiones de la vulnerabilidad geotécnica de los materiales y de la logística bajo condiciones de saturación (Aqib et al., 2023; Fan et al., 2025).

De forma complementaria, Zhou et al. (2024) desarrollaron un enfoque de fragilidad para evaluar asentamientos excesivos inducidos por lluvia en terraplenes, mostrando que la intensidad de precipitación, la permeabilidad saturada y la geometría del talud modifican la probabilidad de respuesta desfavorable.

Desde la perspectiva de la gestión ferroviaria, Rojas-Vivanco et al. (2024) sostienen que el diagnóstico geotécnico debe ser multidisciplinario e incorporar geología, mecánica de suelos, drenaje, auscultación y comportamiento de la vía, precisamente porque muchos problemas funcionales del sistema tienen su origen en la subestructura. Para un estudio como el presente, esto justifica teóricamente la necesidad de analizar las terracerías no solo como una actividad de movimiento de tierras, sino también como el componente crítico que condiciona la estabilidad, el servicio y la conservación futura del corredor ferroviario (Vivanco et al., 2024; Zhou et al., 2024).

Compactación, variabilidad espacial y control de calidad

La compactación de materiales para terracerías es un proceso de control estructural orientado a reducir los vacíos, incrementar la masa volumétrica seca, mejorar la resistencia al corte y disminuir las deformaciones posteriores bajo carga. En infraestructura ferroviaria, esta operación es especialmente sensible porque la subestructura está sometida a sollicitaciones repetidas y a cambios de humedad que pueden amplificar los asentamientos diferenciales y deteriorar la geometría de la vía. Por ello, el control de compactación no debe reducirse a una verificación administrativa, sino entenderse como una condición para la estabilidad y el desempeño del sistema completo (Indraratna et al., 2024).

En el plano normativo, la SICT establece que la evaluación de la compactación se apoya en ensayos de laboratorio para obtener la relación humedad-densidad y en pruebas de campo para verificar el grado de compactación y, en su caso, la respuesta mediante LWD. Esta lógica técnica coincide con la literatura reciente sobre compactación inteligente, que ha cuestionado la suficiencia de los ensayos puntuales. Baek et al. (2025) mostraron en campo que los valores de compactación inteligente pueden utilizarse para mejorar el control de calidad de las subrasantes, mientras que Wang et al. (2024) propusieron una metodología de evaluación en tiempo real basada en el entrenamiento semi-supervisado para estimar la calidad de la compactación durante la construcción.

En conjunto, estos trabajos muestran que la tendencia técnica actual se orienta hacia esquemas de monitoreo continuo o semicontinuo que complementen los ensayos tradicionales y reduzcan la incertidumbre espacial dentro del frente de trabajo (Baek et al., 2025; Wang et al., 2024; SICT, 2020, 2022).

La variabilidad espacial del relleno compactado también depende de la naturaleza del material y de la energía aplicada. Zhang et al. (2024) documentaron que, en rellenos ferroviarios, la evolución dinámica de las partículas gruesas durante la vibración compactante modifica la estructura interna del material y condiciona la eficiencia del proceso. Ma et al. (2025), por su parte, propusieron un modelo de optimización multiobjetivo en tiempo real para la compactación inteligente de subrasantes ferroviarias, integrando la calidad, el tiempo y la asignación de recursos.

Estos enfoques son valiosos para el análisis del Frente 4 porque respaldan la idea de que la compactación eficaz no depende únicamente del número de pasadas del equipo, sino también de la humedad, la gradación, la respuesta del material, la energía efectiva y la capacidad de ajuste operativo en tiempo real (Ma et al., 2025; Zhang et al., 2024).

Rendimiento operativo de maquinaria y logística de acarreo

El rendimiento de la maquinaria pesada en terracerías es una variable compuesta, condicionada por el tipo de material, el estado del camino, la distancia de acarreo, la pendiente, la coordinación banco-frente, la pericia del operador y las interrupciones asociadas al clima o al suministro. Por ello, la productividad real rara vez coincide con los rendimientos nominales de catálogo.

Šopić et al. (2024) señalan que la medición de la productividad efectiva de la maquinaria puede utilizarse como sistema de alerta temprana para detectar desviaciones entre lo programado y lo ejecutado, particularmente en operaciones de movimiento de tierras, donde la logística introduce pérdidas que no se explican por la capacidad teórica del equipo. Este enfoque resulta directamente aplicable al estudio del Frente 4, en el que la operación se vio afectada por el deterioro de los caminos, la saturación del material y los tiempos muertos asociados al suministro y a la reorganización del frente (Šopić et al., 2024).

La logística de acarreo constituye, además, uno de los cuellos de botella más relevantes de la infraestructura lineal. Fernandes et al. (2023), mediante un mapeo sistemático de la planeación de earthworks, identificaron como temas dominantes la asignación de flota, la secuenciación de movimientos, la optimización espacio-temporal y el control del ciclo excavación-transporte-colocación. De forma complementaria, investigaciones recientes en control automatizado de la construcción han mostrado que los sistemas digitales de seguimiento de camiones, la visión computacional y los registros en tiempo real permiten estimar con mayor precisión los tiempos de ciclo y detectar pérdidas operativas ocultas.

Teóricamente, esto refuerza la pertinencia de analizar la operación del Frente 4 a partir del banco de material, los caminos de servicio, los puntos de control y la sincronización entre carga, acarreo, tendido y compactación, ya que la productividad del terraplén no depende de una sola máquina, sino del acoplamiento eficiente de toda la cadena logística (Fernandes et al., 2023).

Resiliencia climática y monitoreo en infraestructura ferroviaria

La resiliencia climática en la infraestructura ferroviaria se ha convertido en un campo prioritario de investigación debido al incremento de la exposición de los activos a lluvias extremas, inundaciones, erosión, inestabilidad de taludes y degradación acelerada de la subestructura. Liu et al. (2023) demostraron a escala global que la infraestructura de transporte enfrentará una exposición creciente a cambios en los patrones de precipitación bajo escenarios de calentamiento, mientras que Haghghi

et al. (2025), en una revisión sistemática centrada en ferrocarriles, identificaron la lluvia intensa, la inundación, la erosión y la inestabilidad de los terraplenes como interacciones críticas entre el clima y la infraestructura.

Estos resultados confirman que el análisis de un frente ferroviario en temporada de lluvias no es un asunto circunstancial, sino parte de una problemática estructural más amplia, vinculada a la adaptación y la continuidad operativa de los sistemas de transporte (Haghighi et al., 2025; Liu et al., 2023).

Los estudios de resiliencia geotécnica ferroviaria coinciden en que la respuesta efectiva ante lluvia intensa no debe limitarse a la reparación posterior, sino a incorporar la anticipación, el monitoreo y protocolos adaptativos. Avar et al. (2024), a partir de casos en el sureste de Inglaterra, mostraron que la mejora de la resiliencia de los terraplenes ferroviarios exige integrar información geotécnica, climática y operacional para identificar puntos críticos y priorizar acciones. Asimismo, las investigaciones recientes sobre el monitoreo y control de subrasantes mediante compactación inteligente, sensores y modelos predictivos muestran que la digitalización del frente puede reducir la dependencia de respuestas puramente reactivas.

En consecuencia, la teoría reciente respalda la idea de que un frente como el analizado debe evolucionar desde una resiliencia de reacción —saneamiento, redistribución de maquinaria, reprogramación de combustible— hacia una resiliencia operativa basada en alertas tempranas, verificación geotécnica rápida, control digital de acarreo y evaluación continua de las condiciones de transitabilidad y compactación (Avar et al., 2024; Baek et al., 2025; Ma et al., 2025).

En síntesis, el marco teórico permite sostener que la ejecución eficiente de terracerías ferroviarias bajo condiciones de lluvia depende de la convergencia de cinco dimensiones: cumplimiento normativo en materiales y construcción; comprensión del comportamiento hidromecánico del terraplén; control confiable de la humedad y la compactación; logística de acarreo basada en la productividad real; y capacidad de adaptación climática apoyada por el monitoreo y el diagnóstico geotécnico. Bajo esta lógica, el Frente 4 del tren AIFA–Pachuca puede analizarse como un caso técnicamente representativo de los retos contemporáneos de la infraestructura ferroviaria en contextos de creciente variabilidad hidroclimática.

RESULTADOS

La información recolectada durante el periodo de análisis permitió identificar patrones consistentes de desempeño operativo, afectaciones por lluvia y diferencias en la productividad entre los núcleos de trabajo del Frente 4.

El análisis integrado de observación de campo, registros operativos, controles de acarreo y evidencia técnica del proceso mostró que el comportamiento del frente no depende únicamente de la capacidad nominal de la maquinaria, sino de la interacción entre estado de los caminos de servicio, continuidad del suministro, coordinación entre banco y núcleo, condición de humedad del material y oportunidad de la respuesta correctiva aplicada en jornadas críticas.

En términos generales, los resultados evidenciaron tres hallazgos principales. Primero, se observó una reducción sistemática entre el rendimiento teórico y el observado en la maquinaria principal. Segundo, la productividad de los núcleos operativos presentó diferencias relevantes asociadas no solo a la longitud atendida, sino también a la continuidad logística y al grado de afectación por la lluvia. Tercero, la ocurrencia de precipitaciones intensas no sólo interrumpió temporalmente el frente, sino que también alteró la eficiencia global del sistema al afectar los caminos, los tiempos de ciclo y las

condiciones de compactación, lo que obligó a implementar medidas reactivas para recuperar el ritmo de producción.

Rendimiento de maquinaria y desviaciones operativas

El análisis de la maquinaria empleada en el Frente 4 mostró una diferencia constante entre el rendimiento teórico y el observado en campo. Como se presenta en la Tabla 1, las excavadoras Caterpillar 336F, Caterpillar 336L y Sany SY330H, así como el bulldozer CAT D6D, registraron desviaciones negativas que oscilaron entre 14.3% y 17.6%, con una pérdida promedio cercana al 16% respecto a los valores de referencia operativa. Esta diferencia indica que la productividad efectiva del frente estuvo limitada por condiciones reales de obra que no pueden captarse únicamente a partir de las especificaciones nominales del equipo.

Tabla 1

Rendimiento teórico y observado de maquinaria pesada empleada en Frente 4

Equipo	Tipo de operación	Rendimiento teórico (m ³ /día)	Rendimiento observado (m ³ /día)	Desviación (%)
Caterpillar 336F	Excavación y carga	1800	1500	-16.7
Caterpillar 336L	Excavación	1700	1400	-17.6
Sany SY330H	Excavación	1600	1350	-15.6
Bulldozer CAT D6D	Nivelación y empuje	1400	1200	-14.3

Fuente: elaboración propia con base en el Caterpillar Performance Handbook (Caterpillar, 2021) para los rendimientos teóricos y en los registros de producción en campo del Frente 4 (bitácoras del proyecto, 2025) para los rendimientos observados.

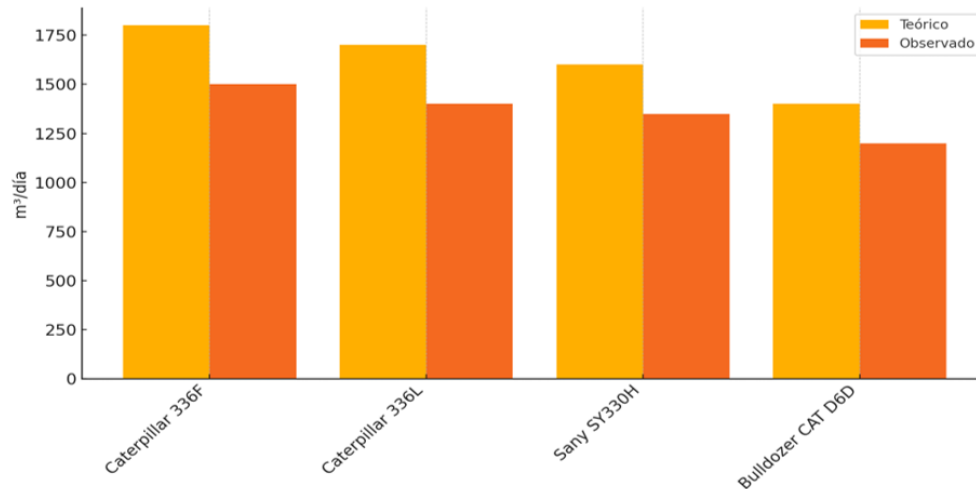
La disminución observada en el rendimiento se debió a varios factores concurrentes. Durante las jornadas con mayor estabilidad operativa, la producción depende de la disponibilidad continua de camiones, del acceso funcional a los núcleos y de la ausencia de interrupciones por reabastecimiento o por deterioro del camino.

En contraste, durante los días con precipitación o con secuelas directas de lluvia reciente, el ciclo operativo se volvió más ineficiente por reducción de velocidad de acarreo, esperas para carga o descarga, maniobras de recuperación de vehículos y necesidad de reasignar maquinaria a labores de saneamiento. En consecuencia, la desviación entre el rendimiento esperado y el observado debe interpretarse como un indicador de interferencias logísticas y ambientales, más que como un problema aislado de capacidad mecánica.

El gráfico 1 permite visualizar las diferencias entre los rendimientos teóricos y los observados. Su principal valor analítico radica en que muestra, de forma comparativa, que la pérdida de productividad no fue un evento excepcional en una sola máquina, sino una tendencia consistente en los equipos principales del frente. Esta consistencia refuerza la interpretación de que el problema no estuvo centrado en un operador ni en un equipo en particular, sino en el comportamiento sistémico de la operación bajo condiciones adversas.

Gráfico 1

Comparación del rendimiento de la maquinaria principal (teórico vs observado)



Nota: Estas pérdidas pueden explicarse por factores como tiempos muertos, saturación de humedad del material, esperas entre banco y núcleo, y restricciones operativas durante días lluviosos. De acuerdo con Gransberg et al. (2008) y con el Caterpillar Performance Handbook (Caterpillar, 2021), el rendimiento real en campo suele ser menor que el teórico cuando existen variaciones de material, limitaciones de acceso, incrementos de tiempo de ciclo y condiciones ambientales adversas; por ello, la estimación operativa debe incorporar factores de eficiencia y contingencia coherentes con la realidad del frente de obra.

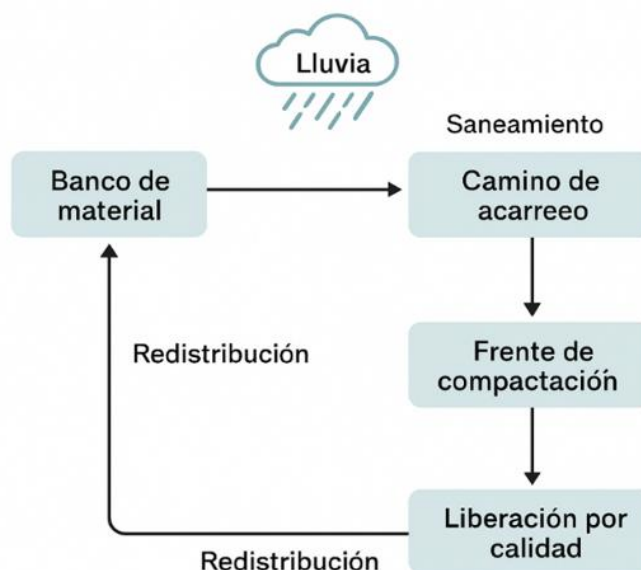
Fuente: elaboración propia con base en los registros técnicos del Frente 4 (2025).

Articulación operativa entre banco, acarreo y núcleo

El comportamiento del Frente 4 confirmó que la productividad de las terracerías no dependió de una sola fase de la operación, sino del acoplamiento entre extracción, carga, transporte, descarga, extendido, conformación y compactación. La Figura 1 sintetiza con precisión esta lógica operativa y ayuda a comprender por qué una afectación localizada, como el deterioro de un camino de servicio o el retraso en el suministro de combustible, puede propagarse al resto del sistema y comprometer la producción diaria del frente.

Figura 1

Esquema conceptual de interacción entre banco, acarreo y núcleo de compactación bajo condiciones adversas



Fuente: elaboración propia con base en la experiencia técnica del Frente 4 y en la sistematización de los procesos descritos por Faria y Paixão (2020).

Esta figura resume la secuencia operativa básica que estructura la ejecución de terracerías ferroviarias en un frente activo. Se ilustran los flujos de material, los puntos críticos donde la lluvia afecta directamente (caminos de acarreo y frentes sin drenaje) y las rutas de retroalimentación que se activan mediante saneamiento, redistribución de maquinaria o ajuste de suministros. Es útil para entender cómo pequeñas decisiones tácticas pueden alterar o sostener el ritmo general de producción diaria en condiciones adversas.

A partir de la observación de campo y de los registros operativos, se identificó que los puntos más sensibles de la secuencia fueron: a) la salida continua de material desde el banco, b) la transitabilidad del camino de acarreo, c) la capacidad del núcleo para recibir y distribuir material sin generar acumulaciones ni tiempos muertos, y d) la posibilidad de compactar en condiciones de humedad compatibles con la aceptación técnica.

Cuando alguno de estos componentes se interrumpió, la afectación se propagó al resto del sistema. En este sentido, el Frente 4 funcionó como una cadena operativa de alta dependencia interna, donde la eficiencia global fue equivalente al desempeño del eslabón más restrictivo en cada jornada.

Distribución espacial del caso y vulnerabilidad operativa del frente

La localización del tramo analizado contribuyó a explicar parte de la vulnerabilidad observada. La Figura 2 sitúa espacialmente el Frente 4 dentro del tramo Téllez de la línea AIFA–Pachuca, mientras que la Figura 3 precisa la simbología del mapa utilizado para interpretar los ejes, los caminos de servicio, el banco de material y las zonas con susceptibilidad a la afectación.

Estas figuras no son ornamentales: permiten relacionar la lectura operativa con la configuración espacial real del frente y con las áreas donde la lluvia tuvo efectos más notorios sobre la movilidad interna y la continuidad del acarreo.

Figura 2

Ubicación georreferenciada del Frente 4 en el tramo Téllez, línea AIFA–Pachuca



Nota: La figura muestra la localización espacial del Frente 4 dentro del tramo analizado, entre los PK 37+250.00 y 42+050.00, así como los elementos operativos relevantes para interpretar la vulnerabilidad del frente ante la lluvia y los problemas de transitabilidad.

Fuente: elaboración propia con base en datos de campo del proyecto (junio de 2025) y en una imagen satelital de Google Earth, consultada el 26 de enero de 2026.

Figura 3

Simbología de mapa

Simbología	
	PK 37+250
	PK 42+050
	4.8 km del eje de la vía del tren AIFA – Pachuca
	Camino de servicio
	Banco de material
	Zona inundable

Fuente: elaboración propia.

La evidencia espacial sugiere que la operación del Frente 4 estuvo condicionada por una relación estrecha entre la longitud activa, la localización del banco y la calidad funcional de las rutas internas de servicio. En condiciones secas, esta relación permitió una operación simultánea en tres núcleos; sin

embargo, cuando ocurrieron lluvias intensas, la misma configuración territorial amplifica la vulnerabilidad del frente, debido a la concentración del flujo de material en rutas cuya pérdida de transitabilidad afectó de manera inmediata el ciclo de acarreo.

Esto explica por qué el impacto de la lluvia fue desproporcionado respecto de la duración estricta del evento: el problema persiste mientras los accesos no recuperaron condiciones mínimas de operación.

Comparación entre núcleos operativos

El Frente 4 se organizó en tres núcleos que operaron simultáneamente, pero con comportamientos distintos. La Tabla 2 muestra que el Núcleo 3 alcanzó la mayor producción media diaria, con 1,264 m³/día, seguido por el Núcleo 1, con 1,100 m³/día, y el Núcleo 2, con 1,000 m³/día. No obstante, al analizar el rendimiento ajustado por kilómetro, se observa que el Núcleo 1 registró el valor más alto, con 916.7 m³/km, mientras que el Núcleo 3 presentó el más bajo, con 526.7 m³/km. Esto indica que una mayor producción absoluta no necesariamente equivale a una mayor eficiencia relativa cuando la longitud atendida también es mayor.

Tabla 2

Comparativo de productividad y afectaciones por lluvia en los núcleos operativos

Núcleo	Longitud trabajada (km)	Producción media (m ³ /día)	Interrupciones por lluvia (días)	Rendimiento ajustado (m ³ /km)
Núcleo 1	1.2	1100	2	916.7
Núcleo 2	1.2	1000	2	833.3
Núcleo 3	2.4	1264	1	526.7

Nota: El análisis comparativo de los tres núcleos operativos permite observar las variaciones en la productividad asociadas a las interrupciones por lluvia. Aunque el Núcleo 3 tuvo mayor volumen total, su rendimiento por kilómetro fue menor, lo que indica que la eficiencia logística debe ajustarse en función de la extensión de frente atendida y de la vulnerabilidad de sus rutas de acarreo.

Fuente: Elaboración propia con base en los registros diarios del proyecto (bitácoras del Frente 4, documento interno, 2025).

Este resultado permite una lectura más fina del desempeño. El Núcleo 3 fue el más productivo en términos absolutos, pero también el que trabajó sobre una mayor longitud, lo que dispersó recursos y redujo la productividad lineal. En cambio, el Núcleo 1 mostró una relación más favorable entre longitud atendida y producción, lo que sugiere una operación más concentrada o una mejor correspondencia entre recurso asignado, condición del acceso y ritmo de trabajo. El Núcleo 2, por su parte, presentó el comportamiento más limitado, lo que puede interpretarse como indicio de una menor eficiencia logística relativa o mayor sensibilidad a las interrupciones.

Las diferencias entre núcleos también muestran que el desempeño del frente no puede evaluarse únicamente con promedios globales. El análisis por núcleo resulta indispensable porque permite identificar dónde se concentraron las mejores prácticas operativas y dónde persistieron mayores restricciones. Desde esta perspectiva, la comparación no solo sirve para describir rendimientos, sino para localizar oportunidades de mejora en la distribución de maquinaria, la priorización de rutas y la programación de actividades de compactación y acarreo.

Efectos de la lluvia sobre la continuidad operativa

Uno de los hallazgos centrales del estudio fue la magnitud del efecto de la lluvia sobre la continuidad operativa del Frente 4. Las jornadas críticas documentadas, en especial la del 2 de junio de 2025, mostraron que la precipitación afectó simultáneamente los caminos de servicio, la movilidad de los camiones, la condición del material y la posibilidad de compactar dentro de rangos aceptables. Esta afectación no se limitó al momento del evento, sino que generó una inercia operativa negativa que se extendió a jornadas posteriores mientras no se restablecieron las condiciones mínimas de tránsito y de preparación del frente.

Las figuras 4 y 5 ilustran visualmente esas condiciones húmedas de operación. Ambas imágenes documentan la pérdida de tracción, el deterioro del acceso y el ambiente operativo restrictivo bajo la lluvia. Su valor en los resultados radica en evidenciar que las interrupciones descritas en el texto no fueron supuestos analíticos, sino condiciones efectivamente observadas en campo. Las imágenes refuerzan la interpretación de que la producción del frente estuvo fuertemente condicionada por el estado de los caminos de acarreo y por la capacidad de reacción del equipo técnico ante la degradación del entorno de trabajo inmediato.

Figura 4

Frente 4 operando en condiciones húmedas durante la lluvia del 2 de junio



Nota: La imagen ilustra el efecto inmediato de los escurrimientos superficiales sobre el camino de servicio, evidenciando la pérdida de tracción y la afectación de la compactación. Permite visualizar el entorno operativo real y subraya la importancia de los protocolos de respuesta rápida.

Fuente: Registro fotográfico propio, junio de 2025.

Figura 5

Afectación del acceso operativo y pérdida de transitabilidad en el Frente 4 durante la lluvia del 2 de junio



Fuente: Registro fotográfico propio, junio de 2025.

Explicación: La imagen ilustra el efecto inmediato de los escurrimientos superficiales sobre el acceso al frente activo, evidenciando la pérdida de tracción y la afectación de la compactación. Permite visualizar el entorno operativo real y subraya la importancia de los protocolos de respuesta rápida.

La evidencia reunida mostró que los efectos inmediatos de la lluvia fueron cuatro: saturación y reblandecimiento de los caminos, incremento de los tiempos de ciclo de los camiones, interrupción o ralentización del suministro de material y reducción de la viabilidad de la compactación.

A su vez, estos efectos activaron una segunda cadena de consecuencias: uso de maquinaria para el saneamiento en lugar de la producción directa, reprogramación del suministro de combustible, redistribución del equipo disponible y pérdida de continuidad en la secuencia banco-acarreo-núcleo. Por lo tanto, la lluvia debe entenderse, en este caso, no solo como un evento meteorológico, sino también como un factor desorganizador del sistema operativo completo.

Estrategias reactivas y recuperación del ritmo de producción

Ante las afectaciones observadas, el personal de obra implementó varias medidas reactivas para restablecer la continuidad del frente.

Entre las principales se identificaron: el saneamiento de caminos mediante el retiro o el reacomodo de material con exceso de humedad, la redistribución de excavadoras para atender accesos y zonas críticas, y la reprogramación del suministro de diésel para reducir los tiempos muertos. Estas acciones no eliminaron por completo la pérdida de productividad, pero sí contribuyeron a disminuir su duración y a reactivar el flujo operativo en jornadas posteriores.

La recuperación del frente tras los episodios de lluvia sugiere que el sistema operativo tenía cierta capacidad de adaptación, aunque todavía era predominantemente reactiva. Es decir, el frente logró responder y sostener la obra, pero lo hizo mediante medidas correctivas aplicadas después de que la afectación ya se había producido.

En términos analíticos, este resultado es importante porque distingue entre dos niveles de desempeño: uno vinculado a la capacidad de recuperación y otro a la capacidad de anticipación. El Frente 4 mostró

fortaleza en el primero, pero también evidenció la necesidad de avanzar hacia mecanismos más preventivos para la gestión del riesgo operativo.

Indicadores propuestos para monitoreo diario

La experiencia del caso permitió identificar la utilidad de establecer indicadores operativos simples, pero consistentes, para seguimiento diario. La Tabla 3 resume una propuesta de indicadores clave de rendimiento, entre ellos el rendimiento de carga, el tiempo de ciclo de acarreo, el porcentaje de calas aprobadas y el tiempo de respuesta ante la lluvia. Esta tabla aporta valor porque traduce la experiencia del Frente 4 en un esquema replicable para otros frentes de terracería ferroviaria con exigencias similares.

Tabla 3

Sugerencia de indicadores clave de rendimiento para monitoreo diario en obras de terracería

Indicador	Fórmula / Unidad	Valor esperado	Responsable del registro
Rendimiento de carga	m ³ /hora	≥ 120 m ³ /h	Operador del banco
Tiempo de ciclo de acarreo	minutos/viaje	≤ 20 min	Chegador de tramo
Porcentaje de calas aprobadas	(Calas aprobadas / total) × 100	≥ 90%	Laboratorio SICAC
Tiempo de respuesta ante lluvia	Horas desde incidente a saneamiento	≤ 6 h	Coordinador de núcleo

Fuente: elaboración propia con base en criterios operativos del caso de estudio y en procedimientos de control de compactación/aceptación asociados a NIT-SICT (IMT, 2019, 2020, 2022).

Efectos de la lluvia y estrategias reactivas

Uno de los hallazgos más relevantes del estudio fue la afectación operativa derivada de las lluvias atípicas del 2 de junio. Ese día se registraron severos daños en los caminos de servicio, la paralización temporal de la maquinaria y retrasos en las liberaciones del laboratorio. Esta situación se replicó parcialmente los días 4 y 6 de junio.

En términos interpretativos, la Tabla 3 muestra que el control del frente puede fortalecerse si la supervisión deja de centrarse únicamente en el volumen producido y empieza a integrar variables de continuidad, calidad y capacidad de reacción. Por ejemplo, el tiempo de respuesta ante la lluvia es un indicador especialmente valioso porque vincula directamente el evento adverso con la eficiencia de la recuperación operativa. Del mismo modo, el porcentaje de calas aprobadas conecta el rendimiento productivo con el control geotécnico, evitando que el avance físico se evalúe al margen de la calidad de las capas ejecutadas.

Síntesis interpretativa de los resultados

En conjunto, los resultados permitieron establecer que el desempeño del Frente 4 depende menos de la capacidad teórica aislada de sus equipos y más de la coordinación efectiva entre los recursos, las rutas, el suministro y el control del proceso. La operación fue funcional en términos generales, pero vulnerable a perturbaciones hidrometeorológicas y logísticas.

La desviación entre rendimientos teóricos y observados, las diferencias entre núcleos y la sensibilidad del frente a la lluvia mostraron que la productividad real estuvo fuertemente condicionada por factores

operativos que, aunque no siempre visibles en la programación inicial, resultaron decisivos en la ejecución.

De esta manera, el caso analizado demuestra que las terracerías ferroviarias requieren una lectura integrada de la producción, la calidad, la geotecnia y la logística. El Frente 4 no presentó simplemente un problema de bajo rendimiento, sino un comportamiento típico de una obra lineal expuesta a condiciones ambientales cambiantes, en el que la continuidad productiva depende de la rapidez con que se detectan y se corrigen las restricciones del sistema. Este hallazgo prepara el paso a la discusión, en la que corresponde contrastar estos resultados con la literatura especializada sobre compactación, logística de terracerías ferroviarias y resiliencia climática en infraestructura ferroviaria.

DISCUSIÓN

Los resultados del Frente 4 muestran que el desempeño de las terracerías ferroviarias no puede explicarse únicamente a partir de la capacidad nominal de la maquinaria ni de la programación lineal del frente. La evidencia del caso indica que la productividad real depende de una interacción compleja entre la condición del material, la transitabilidad de los caminos de acarreo, la continuidad del suministro, la oportunidad de compactación y la capacidad de respuesta ante la lluvia.

Esta lectura es consistente con la literatura reciente sobre infraestructura ferroviaria, que ha señalado que la vulnerabilidad de terraplenes y subrasantes se intensifica cuando procesos hidromecánicos desfavorables coinciden con limitaciones operativas y logísticas. Kumar y Hayano (2024) demostraron que las variaciones del nivel freático y la infiltración transitoria pueden modificar significativamente el comportamiento interno de terraplenes ferroviarios, mientras que Indraratna et al. (2024) destacan que la estabilidad y la deformabilidad de la subrasante dependen críticamente del control de la compactación, del drenaje y de la sensibilidad del material frente a cambios de humedad.

En este sentido, la reducción sistemática entre el rendimiento teórico y el observado de la maquinaria principal no debe interpretarse como una mera ineficiencia mecánica. Más bien, revela que la productividad efectiva del frente estuvo condicionada por las restricciones del sistema en su conjunto. Este hallazgo coincide con la literatura reciente sobre terracerías ferroviarias, que advierte que los rendimientos nominales de catálogo suelen sobreestimar la producción real cuando existen tiempos muertos, rutas inestables, variaciones del terreno y condiciones climáticas adversas.

Šopić et al. (2024) subrayan que la productividad real de excavadoras y camiones debe analizarse como un indicador de alerta temprana del estado del proceso, ya que las desviaciones respecto del rendimiento esperado suelen reflejar desajustes logísticos y condiciones del sitio, no solo el desempeño del equipo. De forma complementaria, Hwang et al. (2025) muestran que el monitoreo en tiempo real de las operaciones de movimiento de tierras permite detectar con mayor precisión los puntos de pérdida de eficiencia en el ciclo operativo.

La comparación entre núcleos operativos también aporta una lección importante. Aunque el Núcleo 3 presentó la mayor producción absoluta, su rendimiento ajustado por kilómetro fue inferior al del Núcleo 1. Esto sugiere que una mayor longitud atendida o un mayor volumen movilizado no garantizan automáticamente un mejor desempeño relativo.

Desde la perspectiva de la planeación de terracerías ferroviarias, Fernandes et al. (2023) señalan que la productividad depende de la adecuada articulación entre la secuenciación, la asignación de flota, las rutas de acarreo y la sincronización de frentes, más que de una expansión indiscriminada del área atendida. Por ello, el caso del Frente 4 refuerza la idea de que la eficiencia debe evaluarse mediante indicadores normalizados y comparables, y no únicamente por el volumen total ejecutado.

Otro aspecto central de la discusión es el efecto de la lluvia sobre la continuidad operativa. En el Frente 4, las precipitaciones no solo afectaron temporalmente el avance, sino que también alteraron la estabilidad de los caminos de servicio, incrementaron los tiempos de ciclo y limitaron la compactación de las capas en proceso. Esta evidencia empírica coincide con estudios recientes sobre terraplenes ferroviarios sometidos a lluvias intensas.

Aqib et al. (2023) documentaron que la infiltración puede reducir la resistencia efectiva y favorecer inestabilidades progresivas en terraplenes ferroviarios, mientras que Zhou et al. (2024) mostraron que la lluvia intensa incrementa la probabilidad de asentamientos excesivos en terraplenes, dependiendo de parámetros geométricos e hidromecánicos. A una escala más amplia, Haghghi et al. (2025) identifican la lluvia intensa, la erosión y la inestabilidad de los terraplenes como una de las relaciones de riesgo más críticas entre el cambio climático y la infraestructura ferroviaria. Así, lo observado en el Frente 4 no constituye una anomalía aislada, sino una manifestación local de un problema estructural reconocido internacionalmente.

La discusión también debe considerar el papel del control geotécnico y de la compactación. El caso muestra que la productividad del frente estuvo fuertemente condicionada por la posibilidad de ejecutar capas en condiciones de humedad compatibles con la aceptación técnica. Esto es congruente con la normativa mexicana aplicable, que vincula la construcción de terraplenes con procedimientos de control de humedad, densidad y grado de compactación, así como con la verificación complementaria mediante LWD cuando procede.

En paralelo, la investigación reciente sobre compactación inteligente ha mostrado que los métodos continuos o semicontinuos de evaluación pueden reducir la incertidumbre espacial y mejorar la toma de decisiones en obra. Baek et al. (2025) reportaron resultados favorables del uso de la compactación inteligente para el control de calidad de subrasantes, mientras que Ma et al. (2025) desarrollaron un esquema de optimización multiobjetivo en tiempo real para subrasantes ferroviarias, integrando la calidad, la eficiencia temporal y la asignación de recursos. Bajo esta perspectiva, el Frente 4 evidencia que el control de compactación no debe verse como una verificación final, sino como un componente activo de la gestión operativa diaria.

Desde el punto de vista de la gestión, uno de los aportes más relevantes del caso fue evidenciar que la respuesta del frente fue predominantemente reactiva, pero funcional. El saneamiento de caminos, la redistribución de maquinaria y la reprogramación del suministro de diésel permitieron recuperar parcialmente el ritmo de producción. Sin embargo, la literatura reciente sobre resiliencia ferroviaria sugiere que la verdadera mejora no radica solo en reaccionar rápido, sino en anticipar mejor. Avar et al. (2024) muestran, a partir de casos de Inglaterra, que la resiliencia de las terracerías ferroviarias mejora cuando se integran el diagnóstico geotécnico, la información climática y la priorización de riesgos.

Rojas-Vivanco et al. (2024) coinciden en que el diagnóstico geotécnico debe desempeñar un papel central en la gestión ferroviaria, ya que muchos problemas de operación y mantenimiento tienen su origen en la subestructura y no en la superestructura visible. Por tanto, el Frente 4 mostró capacidad de recuperación, pero también una clara oportunidad de evolucionar hacia una resiliencia operativa más preventiva y respaldada tecnológicamente.

En esa misma línea, la literatura reciente sobre el monitoreo digital de la productividad ofrece una ruta concreta de mejora. Deng et al. (2025) proponen métodos de estimación automática del volumen transportado por camiones para el seguimiento en tiempo real de la productividad de las terracerías, mientras que Hwang et al. (2025) muestran el potencial de las plataformas multivisión para monitorear las operaciones de movimiento de tierras y actualizar el estado del frente.

Estos desarrollos resultan especialmente pertinentes para el caso analizado, ya que el control del Frente 4 todavía dependía de registros manuales, checadores y bitácoras. Aunque ese esquema permitió sostener el análisis del caso, su capacidad predictiva fue limitada. En consecuencia, la experiencia del Frente 4 sugiere que la combinación de control geotécnico, monitoreo digital del acarreo y alertas meteorológicas locales podría mejorar sustancialmente la continuidad productiva y la calidad de la ejecución en futuros frentes ferroviarios.

En términos más amplios, este estudio confirma que las terracerías ferroviarias deben entenderse como un sistema técnico integrado en el que convergen geotecnia, logística, clima, maquinaria y control de calidad. El caso no demuestra únicamente que la lluvia reduce el rendimiento; demuestra, sobre todo, que la vulnerabilidad del frente depende de la forma en que el sistema está organizado para absorber perturbaciones.

Debido a lo anterior, la principal aportación del estudio no es solo descriptiva, sino también interpretativa: documenta cómo un frente ferroviario activo responde ante una perturbación hidrometeorológica y cuáles son los componentes más sensibles de esa respuesta. Esto refuerza la necesidad de que la gestión de terracerías en proyectos ferroviarios mexicanos incorpore un enfoque más integrado de productividad, diagnóstico geotécnico y adaptación al cambio climático.

CONCLUSIÓN

El análisis técnico-operativo del Frente 4 del tren AIFA–Pachuca permitió concluir que la eficiencia de las terracerías ferroviarias durante la temporada de lluvias no depende exclusivamente de la capacidad nominal de la maquinaria ni del volumen movilizado, sino de la interacción entre las condiciones geotécnicas, la transitabilidad de los caminos de servicio, la continuidad logística, el control de la compactación y la capacidad de respuesta ante contingencias. En otras palabras, el rendimiento del frente fue el resultado del comportamiento del sistema completo y no de un componente aislado.

La primera conclusión sustantiva es que hubo una desviación operativa consistente entre los rendimientos teóricos y los observados, lo que confirmó que la productividad real en obra estuvo fuertemente afectada por los tiempos muertos, las restricciones de acarreo y el deterioro de los accesos. Este hallazgo coincide con la literatura reciente sobre terracerías, que advierte que el rendimiento efectivo debe medirse en el contexto del ciclo completo de operación y no a partir de valores nominales de catálogo ni de programación idealizada.

La segunda conclusión es que las precipitaciones intensas actuaron como factor de perturbación sistémica. La lluvia no solo interrumpió temporalmente el trabajo, sino que también comprometió la calidad funcional de los caminos, alteró los ciclos de transporte, condiciona la compactación y prolonga la recuperación operativa más allá del evento meteorológico inmediato. Esto es consistente con la evidencia reciente que relaciona la lluvia intensa, la infiltración y una mayor vulnerabilidad de los terraplenes y las subrasantes ferroviarias.

La tercera conclusión es que el Frente 4 mostró una capacidad de recuperación operativa aceptable, basada en el saneamiento de caminos, la redistribución de maquinaria y ajustes logísticos de suministro. Sin embargo, esa recuperación fue esencialmente reactiva. Por ello, el estudio concluye que el siguiente nivel de mejora no debe orientarse únicamente a reaccionar con mayor rapidez, sino a fortalecer esquemas preventivos de gestión mediante el monitoreo de la productividad, una verificación geotécnica más dinámica y el uso de información meteorológica local para la toma anticipada de decisiones.

La cuarta conclusión es que el control de compactación y la validación geotécnica deben desempeñar un papel central en la gestión del frente, no solo en la aceptación final de las capas. La literatura

reciente sobre subrasantes ferroviarias e intelligent compaction confirma que la estabilidad futura del sistema depende de controlar oportunamente la humedad, la densidad y la respuesta del material durante la construcción. Por tanto, la calidad geotécnica y la continuidad productiva no deben tratarse como objetivos separados, sino como variables interdependientes del mismo proceso constructivo.

Finalmente, el estudio concluye que el Frente 4 constituye un caso representativo de los desafíos contemporáneos de las terracerías ferroviarias en contextos de creciente variabilidad hidrometeorológica. Su principal valor no radica solo en describir una experiencia de obra, sino en mostrar que la productividad, la geotecnia y la resiliencia climática deben integrarse en un mismo marco de gestión. A partir de ello, se recomienda que futuros frentes ferroviarios incorporen: a) monitoreo digital de los ciclos de acarreo y de productividad; b) protocolos de actuación diferenciados según umbrales de lluvia y de transitabilidad; c) control geotécnico más oportuno, apoyado en métodos rápidos y continuos; y d) esquemas de priorización de rutas y recursos basados en el riesgo operativo. Con estas medidas, la ejecución de terracerías podría transitar de una lógica correctiva hacia una gestión más robusta, anticipativa y técnicamente resiliente.

REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2022). AASHTO T 180-22: Standard method of test for moisture-density relations of soils using a 4.54-kg (10-lb) rammer and a 457-mm (18-in.) drop. AASHTO.

Aqib, M., Kumar, A., & Sharma, K. G. (2023). Experimental and numerical analysis of rainfall-induced slope failure of railway embankment of semi high-speed trains. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70, 25. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00188-7>

Araújo, L. G., & Lucko, G. (2022). Best practices for case studies in construction engineering and management research. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002312](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002312)

ASTM International. (2021). ASTM D1557-12(2021): Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. ASTM International.

Avar, B., Haliburton, M., Smith, S., & Indoe, J.-P. (2024). Improving the climate resilience of railway earthworks: Case studies from Southeast England. En *Geo-Resilience 2023 Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.53243/Geo-Resilience-2023-2-2>

Baek, S.-H., Cho, J.-W., & Kim, J.-Y. (2025). Field study on intelligent compaction for compaction quality control of subgrade bases. *Canadian Geotechnical Journal*, 62, 1–14. <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0300>.

Campos, P. C. de O., Rosa, D. L., Marques, M. E. S., & Paz, I. (2024). Predisposition to mass movements on railway slopes: Insights from field data on geotechnical and pluviometric influences. *Infrastructures*, 9(10), 168. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9100168>

Caterpillar Inc. (2021). *Caterpillar performance handbook* (50th ed.). Caterpillar Inc.

Deng, T., Sharafat, A., Lee, S., & Seo, J. (2024). Automatic vision-based dump truck productivity measurement based on deep-learning illumination enhancement for low-visibility harsh construction environment. *Journal of Construction Engineering and Management*, 150(11). <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-14194>

Fan, J., Zhang, Y., Peng, Y., Xing, Z., Yuan, K., Cui, J., Liu, B., & Zhou, W. (2025). Study on the disaster mechanism and prevention technology of embankment slip-collapse after extreme rainfall in the loess area. *Scientific Reports*, 15, 20613. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04920-6>

Fernandes, P. G. P. S., Rocha, C. G., Barros Neto, J. de P., Heineck, L. F. M., & Costa, D. B. (2023). Optimization of earthworks planning: A systematic mapping study. *Canadian Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1139/cjce-2022-0185>

Gransberg, D. D., Popescu, C. M., & Ryan, R. C. (2008). *Construction equipment management for engineers, estimators, and owners*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420013993>

Haghighi, E., Kasraei, A., Famurewa, S., Strandberg, G., Sas, G., & Garmabaki, A. H. S. (2025). Climate change risks on railway infrastructure: A systematic review and analysis. *Sustainable Cities and Society*, 129, 106504. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106504>

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Hwang, J., Jeong, I., Kim, J., & Chi, S. (2025). Web-based multi-vision platform for earthwork productivity on construction sites using real-time model updating. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 19, 1021–1040. <https://doi.org/10.1007/s11709-025-1197-0>

Indraratna, B., Nguyen, T. T., Atapattu, S., Ngo, T., & Rujikiatkamjorn, C. (2024). Subgrade soil response to rail loading: Instability mechanisms, causative factors, and preventive measures. *Transportation Geotechnics*, 46, 101267. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101267>

International Organization for Standardization. (2011). ISO 15686-1:2011, Buildings and constructed assets—Service life planning—Part 1: General principles and framework. ISO. <https://www.iso.org/standard/45798.html>

Kempecova, D., & Kozlovská, M. (2023). Sensing technologies for construction productivity monitoring. *MATEC Web of Conferences*, 385, 01032. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202338501032>

Kerlinger, F. N., & Lee, H. B. (2000). *Foundations of behavioral research* (4th ed.). Harcourt College Publishers.

Kumar, M., & Hayano, K. (2024). Variation of the groundwater table within Indian railway embankments in consideration of climate change. *Sustainability*, 16(14), 6143. <https://doi.org/10.3390/su16146143>

Li, D., Hyslip, J., Sussmann, T., & Chrismer, S. (2015). *Railway geotechnics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18982>

Liu, K., Wang, Q., Wang, M., & Koks, E. E. (2023). Global transportation infrastructure exposure to the change of precipitation in a warmer world. *Nature Communications*, 14, 2541. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38203-3>

Ma, Z., Xu, H., Zhao, Q., y colaboradores. (2025). Real-time multi-objective optimization and simulation of intelligent compaction for railway subgrade construction. *Transportation Geotechnics*, 57, 101848. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101848>

Manoharan, K., Dissanayake, P., Pathirana, C., Deegahawature, D., & Silva, R. (2024). A case study on the site supervisory attributes in construction labour management, performance assessment, and productivity measurement practices. *Journal of Responsible Production and Consumption*, 1(1), 37–61. <https://doi.org/10.1108/JRPC-01-2024-0001>

Patton, M. Q. (2002). *Qualitative research & evaluation methods* (3rd ed.). Sage Publications.

Proyectos México. (2025). *Tren México–Pachuca: Tramo AIFA–Pachuca*. (Ficha del proyecto; consultada para el contexto del caso).

Radman, K., Jelodar, M. B., Lovreglio, R., Ghazizadeh, E., & Wilkinson, S. (2025). Real-time tracking and analysis in construction projects: A RealCONs framework. *Advanced Engineering Informatics*, 67, 103511. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103511>

Rogage, K., Mahamedi, E., Brilakis, I., & Kassem, M. (2022). Beyond digital shadows: A digital twin for monitoring earthwork operation in large infrastructure projects. *AI in Civil Engineering*, 1(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s43503-022-00009-5>

Rojas Vivanco, J. A., Breul, P., Talon, A., Benz-Navarrete, M. A., Barbier, S., & Haddani, Y. (2024). Importance of geotechnical diagnosis in railway management: A review. *Transportation Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100293>

Sanda, Y. N., Anigbogu, N. A., Izam, Y. D., & Nuhu, L. Y. (2021). Designing case study research in construction management. *Journal of Surveying, Construction and Property*, 12(1), 27–35. <https://doi.org/10.22452/jscp.vol12no1.3>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2016). N-CTR-CAR-1-01-009/16, Terraplenes. Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/storage/normativa/N-CTR-CAR-1-01-009-16.pdf>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2019). M-MMP-1-10/19, Grado de compactación. Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-MMP-1-10-19.pdf>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2020). M-MMP-1-16/20, Grado de compactación con deflectómetro de impacto ligero (LWD). Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-MMP-1-16-20.pdf>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2021a). N-CMT-1-02/21, Materiales para subyacente. Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/storage/normativa/N-CMT-1-02-21.pdf>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2021b). N-CMT-1-03/21, Materiales para subrasante. Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/storage/normativa/N-CMT-1-03-21.pdf>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2022). M-MMP-1-09/22, Prueba de compactación dinámica. Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-MMP-1-09-22.pdf>

SICAC. (2025). Alcance técnico del laboratorio [Documento técnico interno, fecha de revisión 2025-08-01].

Soleimani-Chamkhorami, K., Karbalaie, A., Kasraei, A., Haghghi, E., Famurewa, S. M., & Garmabaki, A. H. S. (2024). Identifying climate-related failures in railway infrastructure using machine learning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 135, 104371. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104371>

Šopić, M., Vukomanović, M., & Car-Pušić, D. (2024). Machine cost-effectiveness in earthworks: Early warning system and status of the previous work period. *Sustainability*, 16(17), 7294. <https://doi.org/10.3390/su16177294>

Vivanco, J. R., Breul, P., Talon, A., Benz-Navarrete, M. A., Barbier, S., & Haddani, Y. (2024). Importance of geotechnical diagnosis in railway management: A review. *Transportation Engineering*, 18, 100293. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100293>

Wang, X., Ma, G., y colaboradores. (2024). Developing a real-time compaction quality assessment methodology for subgrade based on semi-supervised co-training. *Transportation Geotechnics*, 49, 101412. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101412>

Watanabe, K., Nakajima, S., Fujiwara, T., Yoshii, K., & Venkatappa Rao, G. (2021). Construction and field measurement of high-speed railway test embankment built on Indian expansive soil "Black Cotton Soil". *Soils and Foundations*, 61(1), 218–238. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.08.008>

Woźniak, Z., & Hoła, B. (2024). Analysing near-miss incidents in construction: A systematic literature review. *Applied Sciences*, 14(16), 7260. <https://doi.org/10.3390/app14167260>

Xie, K., Chen, X., Yao, J., Li, T., Wang, Y., Deng, Z., & Lü, X. (2024). Vibration compaction mechanism of high-speed railway fillers based on the dynamic evolution of coarse particles. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 46(4), 803–813. <https://doi.org/10.11779/CJGE20230030>

Zhou, H., Ma, F., Yu, X., & Zheng, G. (2024). Fragility assessment for the rainfall-induced embankments on silty soils. *Frontiers in Built Environment*, 10, 1389576. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1389576>

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](#) 