

EVALUACIÓN DE LOS DESAFÍOS Y SOLUCIONES DE INGENIERÍA EN EL PROYECTO DEL TREN PANAMÁ-DAVID

Evaluating the Challenges and Engineering Solutions in the Panama-David Train Project

Gabriel Montúfar Chiriboga

Universidad de Panamá

Facultad de Ingeniería Civil

Panamá

gabriel.montufar@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-3392-3728>

Recibido: 16 de agosto 2024

Aceptado: 19 de noviembre 2024

DOI <https://doi.org/10.48204/j.centros.v14n1.a6602>

Resumen

El proyecto del tren Panamá-David representa un desafío significativo en la ingeniería civil de Panamá, al tratarse de una infraestructura ferroviaria que busca conectar la capital con la ciudad de David a lo largo de 450 kilómetros. Este artículo evalúa los principales desafíos técnicos que enfrenta el proyecto, incluyendo aspectos geotécnicos, estructurales, hidráulicos y ambientales. Se analizan soluciones innovadoras implementadas en proyectos ferroviarios internacionales, como el uso de tecnologías avanzadas de radar de penetración terrestre, materiales de construcción de alta resistencia, sistemas de drenaje inteligentes y prácticas de sostenibilidad ambiental. La discusión se centra en la viabilidad de adaptar estas innovaciones al contexto local de Panamá, destacando la importancia de una integración tecnológica cuidadosa y una planificación sostenible. Las conclusiones subrayan la necesidad de adoptar un enfoque colaborativo y adaptativo que permita a Panamá no solo superar los desafíos técnicos, sino también posicionarse como un modelo de innovación en infraestructura ferroviaria en América Latina.

Palabras clave: Tren Panamá-David; geotecnia avanzada; ingeniería estructural; sostenibilidad; tecnologías innovadoras.

Abstract

The Panama-David train project represents a significant challenge in Panamanian civil engineering, as it is a railway infrastructure that seeks to connect the capital with the city of David along 450 kilometers. This article evaluates the main technical challenges facing the project, including geotechnical, structural, hydraulic, and environmental aspects. It analyzes innovative solutions implemented in international railway projects, such as the use of advanced ground-penetrating radar technologies, high-strength construction materials, intelligent drainage systems, and environmental sustainability practices. The discussion focuses on the feasibility of adapting these innovations to the local context of Panama, highlighting the importance of careful technological integration and sustainable planning. The conclusions underline the need to adopt a collaborative and adaptive approach that allows Panama not only to overcome technical challenges but also to position itself as a model of innovation in railway infrastructure in Latin America.

Keyword. Panama-David Train; advanced geotechnics; structural engineering; sustainability; innovative technologies.

Introducción

El proyecto del tren Panamá-David representa un hito en la historia del desarrollo de infraestructuras en Panamá, siendo una de las iniciativas más ambiciosas en el campo del transporte ferroviario del país. Este proyecto tiene como objetivo conectar la Ciudad de Panamá con la ciudad de David, en la provincia de



Chiriquí, a través de una red ferroviaria de aproximadamente 450 kilómetros. A lo largo de esta ruta, el tren cruzará diversas regiones geográficas y climáticas, lo que plantea un conjunto único de desafíos técnicos y de ingeniería civil.

La planificación y ejecución de un proyecto de esta magnitud requieren una evaluación meticulosa de múltiples factores, incluidos los aspectos geotécnicos, estructurales, hidráulicos y ambientales (Shah et al., 2014; Fialho, 2020).

Cada uno de estos aspectos presenta desafíos que deben ser abordados mediante soluciones de ingeniería innovadoras y sostenibles. Por ejemplo, la variabilidad del terreno y la presencia de suelos inestables a lo largo de la ruta exigen un análisis geotécnico exhaustivo y la implementación de técnicas avanzadas para la estabilización de taludes y la construcción de túneles (Raja, et al., 2023; Cao et al., 2023).

Además, la construcción de puentes y viaductos para salvar ríos y valles, así como la gestión eficiente del agua en zonas propensas a inundaciones, requiere un enfoque integral que combine ingeniería estructural y hidráulica. La integración de tecnologías avanzadas, como sistemas de control de trenes y electrificación, también es crucial para garantizar la seguridad y la eficiencia operativa del tren

Este artículo se centra en evaluar los principales desafíos de ingeniería que enfrenta el proyecto del tren Panamá-David y en analizar las soluciones técnicas implementadas para superarlos. A través de un enfoque multidisciplinario, se abordan aspectos clave como la adaptación geotécnica, el diseño estructural, la gestión hidráulica y la sostenibilidad ambiental, proporcionando una visión completa de los retos y avances en la ejecución de este importante proyecto de infraestructura (Li et al., 2024; Ruiz-Cantisani et al., 2021).





Materiales y Métodos

La evaluación técnica del proyecto del tren Panamá-David se enfoca en identificar desafíos clave de ingeniería y explorar soluciones innovadoras que han sido aplicadas con éxito en proyectos ferroviarios internacionales. La misma se ha realizado a través la investigación descriptiva documental, basadas en experiencias recientes en China, Europa, Estados Unidos y otras regiones líderes en infraestructura ferroviaria.

Desarrollo

En proyectos ferroviarios de gran envergadura, como el tren Panamá-David, el análisis geotécnico es fundamental para asegurar la estabilidad de las infraestructuras en terrenos complejos. En lugar de técnicas convencionales, se pueden considerar enfoques más innovadores utilizados en proyectos internacionales (Mihai et al., 2014; Dalai y Enebish, 2024).

Análisis Geotécnico Avanzado

La Tecnología Radar de Penetración Terrestre (GPR) ha sido ampliamente utilizada en China y Europa para mapear estructuras subterráneas y detectar inestabilidades del suelo sin necesidad de perforaciones invasivas. GPR puede proporcionar imágenes detalladas del subsuelo, identificando zonas de riesgo antes de la construcción. La Figura 1 muestra un dispositivo de radar de penetración terrestre (GPR, por sus siglas en inglés) montado sobre un sistema de ruedas para facilitar su desplazamiento sobre el terreno. Este tipo de equipo es utilizado comúnmente en la exploración geofísica para detectar objetos, estructuras y cambios en la composición del subsuelo sin necesidad de excavar.



También se emplean Técnicas de Microzonificación Sísmica en países como Japón y zonas sísmicamente activas de Italia, estas técnicas permiten una evaluación más precisa de las características sísmicas locales, ayudando a diseñar estructuras que puedan resistir movimientos telúricos específicos de microzonas.

Figura 1.
Sistema de Radar de Penetración Terrestre (GPR) LMX200 para Exploración Subterránea



Tomado de <https://optima-ingenieria.com/wp-content/uploads/2023/07/LMX200-back.png>

Diseño Estructural y Construcción de Puentes y Túneles

El diseño de puentes y túneles en el proyecto del tren Panamá-David debe considerar las últimas innovaciones en ingeniería estructural para optimizar la seguridad y eficiencia, especialmente en áreas geológicamente desafiantes (Nandi et al., 2022).

Se hace uso de materiales avanzados en proyectos como el Puesto de la Bahía de Hong Kong-Zhuhai-Macao, donde se ha empleado hormigón autocompactante de alta resistencia y acero de ultra alta resistencia, que ofrecen mayor durabilidad y resistencia a condiciones ambientales extremas. Estos materiales podrían ser aplicados en la construcción de puentes y túneles en Panamá, donde las condiciones climáticas son variables y exigentes.

El tipo de hormigón que se muestra en la Figura 2 es hormigón autocompactante, un tipo de hormigón que, debido a su alta fluidez, se extiende y rellena los encofrados sin necesidad de vibración mecánica, lo que facilita el trabajo en áreas con alta densidad de refuerzos o formas complejas.

Figura 2.

Autocompactante en la construcción de losas de concreto



Tomado de <https://dehormigon.com.ar/wp-content/uploads/2019/12/ventajas-del-hormigon-autocompactante.jpg>

Otra técnica son los túneles sumergidos. Inspirados por el túnel subacuático de Fehmarnbelt entre Dinamarca y Alemania, los túneles sumergidos podrían ser

una solución para atravesar cuerpos de agua o terrenos inestables, minimizando la intervención sobre la superficie y reduciendo el impacto ambiental.

Gestión Hidráulica y Control de Inundaciones

El manejo del agua es un aspecto crucial en el diseño y construcción de infraestructuras ferroviarias, especialmente en regiones con alta pluviosidad como Panamá. Las innovaciones en ingeniería hidráulica pueden ofrecer soluciones más eficientes y sostenibles (Wilms, et al., 2024; Noviarti et al., 2023).

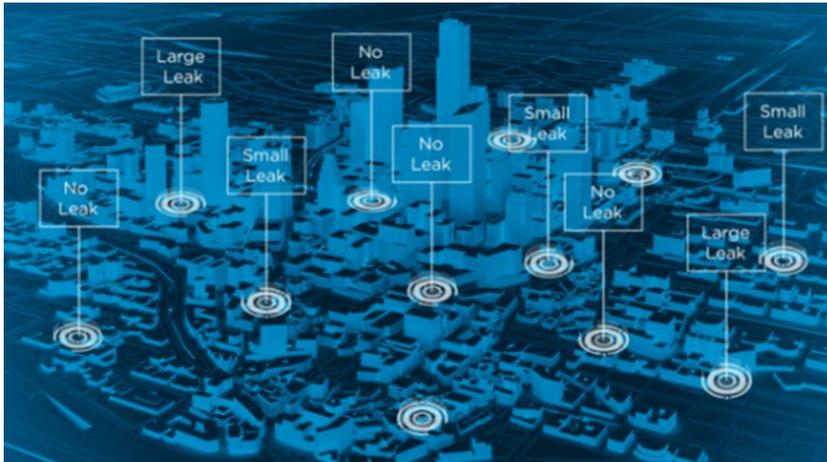
Dentro de las tecnologías innovadora se pueden mencionar los sistemas de drenaje inteligentes desarrollados en Europa y aplicados en el proyecto Crossrail de Londres, los sistemas de drenaje inteligentes utilizan sensores en tiempo real para monitorear el flujo de agua y ajustar automáticamente las válvulas y compuertas, previniendo inundaciones y optimizando el manejo de aguas pluviales.

La Figura 3 es una visualización típica en sistemas avanzados de gestión de infraestructuras, donde se utilizan tecnologías como la inteligencia artificial y la correlación de datos para monitorear y optimizar la red de distribución de agua en las ciudades.

Por otro lado, inspirado en proyectos como el Stadshaven Poort de Rotterdam, se podría integrar infraestructura verde, como techos verdes y jardines de lluvia, que ayudan a absorber el agua y reducir la escorrentía superficial, mejorando la resiliencia del entorno urbano frente a eventos climáticos extremos.

Figura 3.

Sistema de Detección Inteligente de Fugas de Agua en Redes Urbanas



Tomado de <https://www.adasasystems.com/es/caso-de-estudio/deteccion-de-fugas-de-agua-fido-ia.html>

Impacto Ambiental y Sostenibilidad

La sostenibilidad es un factor esencial en la construcción de grandes infraestructuras. En todo el mundo, los proyectos ferroviarios están adoptando tecnologías y prácticas sostenibles que no solo minimizan el impacto ambiental, sino que también promueven la resiliencia a largo plazo.

Se puede implementar el uso de tecnologías de reducción de carbono. En Francia y Alemania, se ha implementado el uso de betón modificado con caucho reciclado en la construcción de vías, lo que reduce las emisiones de carbono y aumenta la durabilidad de la infraestructura. Esta tecnología podría ser adaptada en el proyecto del tren Panamá-David para promover prácticas de construcción más sostenibles. La Figura 4 muestra una escena de una obra vial en la que se está aplicando asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR).

Figura 4.

Mezclas especiales con asfalto modificado de grano de caucho reciclado



Tomado de <https://twitter.com/AsfaltosMPI/status/1274387658157043713/photo/3>

También existen los sistemas de recuperación de energía en los trenes, como los implementados en los trenes de alta velocidad de Japón (Shinkansen), que permiten la reutilización de la energía de frenado, reduciendo el consumo total de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. La Figura 5 muestra una representación gráfica de un tren moderno, con un enfoque en la tecnología de frenado regenerativo.

Figura 5.

Uso de ultracondensadores de freno en trenes



Tomado de <https://www.mundodeportivo.com/urbantecno/motor/audi-e-tron-quattro-autonomia-frenada-regenerativa>

Integración Tecnológica y Automatización

La automatización y la integración de tecnología avanzada son esenciales para la operación eficiente y segura de las redes ferroviarias modernas. Los avances en control automático y sistemas de monitoreo ofrecen nuevas oportunidades para optimizar la infraestructura ferroviaria en Panamá.

Como tecnología innovadora existe el control de trenes basado en comunicaciones (CBTC). Aplicado en el Metro de Nueva York y en las líneas de alta velocidad de China, el CBTC permite un control preciso y automático de los trenes, optimizando el uso de la infraestructura ferroviaria y mejorando la seguridad y la eficiencia del sistema.

Este sistema utiliza la llamada digitalización y gemelos digitales, que han sido utilizados en proyectos como el HS2 del Reino Unido. Los gemelos digitales

permiten crear réplicas virtuales de la infraestructura ferroviaria, facilitando el monitoreo en tiempo real, la simulación de escenarios y la toma de decisiones basada en datos durante todas las fases del proyecto.

Discusión

La implementación del proyecto del tren Panamá-David enfrenta una serie de desafíos técnicos que requieren soluciones innovadoras y adaptadas al contexto local. A partir de la revisión de las tecnologías y métodos aplicados en proyectos ferroviarios internacionales, esta sección discute la viabilidad de estas soluciones en Panamá y su potencial impacto en la infraestructura, el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental del país (Samuelsson et al., 2023; Kawalec et al., 2017; Murashev, 2021).

El análisis geotécnico avanzado es crucial en cualquier proyecto ferroviario, especialmente en un país como Panamá, donde la geografía presenta condiciones desafiantes, como suelos blandos, áreas montañosas y alta sismicidad (Cao, et al., 2023; Raja et al., 2023).

Las tecnologías de radar de penetración terrestre (GPR) y microzonificación sísmica, que han demostrado ser efectivas en proyectos en China y Japón, podrían ofrecer ventajas significativas en Panamá (Raja et al., 2023). La capacidad del GPR para proporcionar una evaluación detallada y no invasiva del subsuelo permite anticipar y mitigar riesgos asociados a la inestabilidad del terreno, minimizando sorpresas durante la construcción (Raja et al., 2023; Cao et al., 2023).

Sin embargo, la efectividad de estas tecnologías depende de su adaptación a las características específicas del terreno panameño, lo que requeriría estudios



preliminares detallados y posiblemente la combinación de varios métodos geotécnicos (Indraratna et al., 2020).

El diseño estructural de puentes y túneles en Panamá debe responder tanto a las condiciones ambientales locales como a los estándares internacionales de seguridad y durabilidad. La experiencia de otros países sugiere la adopción de materiales y técnicas avanzadas (Larsson y Kråk, 2024; Kaewunruen, et al., 2024).

El manejo del agua es un aspecto crítico en el proyecto del tren Panamá-David, dada la alta pluviosidad y las condiciones hídricas variables del país. Las innovaciones en gestión hidráulica utilizadas en proyectos europeos ofrecen un modelo a seguir (Povoroznyuk et al., 2022; Noakes et al., 2019).

La implementación de sistemas de drenaje inteligentes, similares a los utilizados en el proyecto Crossrail de Londres, podría ser altamente beneficiosa en Panamá, donde las lluvias intensas y los sistemas de drenaje tradicionales pueden no ser suficientes para evitar inundaciones (Clarke et al., 2024).

Estos sistemas, que ajustan automáticamente su capacidad en función de los datos en tiempo real, ofrecen una solución eficiente y adaptativa. Sin embargo, su integración en el entorno panameño requeriría un análisis detallado de los patrones de precipitación y la capacidad del sistema de infraestructura hídrica existente (Clarke et al., 2024; Negut y Bitá, 2023).

El impacto ambiental es una preocupación importante en cualquier proyecto de infraestructura a gran escala. La adopción de prácticas sostenibles y tecnologías de reducción de carbono es esencial para minimizar este impacto y garantizar la viabilidad a largo plazo del proyecto.



Las tecnologías de reducción de carbono, como el uso de betún modificado con caucho reciclado, pueden ser aplicadas en Panamá para reducir la huella de carbono del proyecto ferroviario. Estas prácticas no solo contribuyen a la sostenibilidad ambiental, sino que también pueden mejorar la durabilidad de las infraestructuras, reduciendo los costos de mantenimiento a largo plazo (Yoo, 2023; Chen et al., 2016). La implementación de estas tecnologías requeriría una evaluación económica y ambiental para asegurar que sean viables en el contexto local y que cuenten con el apoyo necesario de las políticas públicas.

Conclusiones

El proyecto del tren Panamá-David se presenta como una oportunidad única para transformar la infraestructura de transporte en Panamá, conectando regiones clave del país y promoviendo un desarrollo económico más equilibrado. Sin embargo, la magnitud y complejidad del proyecto plantean una serie de desafíos técnicos que requieren soluciones innovadoras y adaptadas al contexto local.

En este artículo, se han identificado y evaluado los principales desafíos de ingeniería que podrían surgir durante la planificación y ejecución del tren Panamá-David. A través del análisis de soluciones innovadoras implementadas en proyectos ferroviarios internacionales, hemos explorado la viabilidad de aplicar tecnologías avanzadas en áreas clave como el análisis geotécnico, el diseño estructural, la gestión hidráulica, la sostenibilidad ambiental y la integración tecnológica.

Las tecnologías avanzadas como el radar de penetración terrestre (GPR) y el uso de materiales de alta resistencia en estructuras, aunque innovadoras, requieren una adaptación cuidadosa a las condiciones específicas de Panamá para garantizar la estabilidad y durabilidad de la infraestructura.



La implementación de sistemas de drenaje inteligentes y la infraestructura verde son soluciones prometedoras para mitigar los riesgos de inundación y erosión en un entorno de alta pluviosidad como el de Panamá.

Las prácticas sostenibles y las tecnologías de reducción de carbono son esenciales para minimizar el impacto ambiental del proyecto y garantizar su viabilidad a largo plazo.

La adopción de tecnologías avanzadas de control y automatización, como el CBTC y los gemelos digitales, podría mejorar significativamente la seguridad y eficiencia operativa del sistema ferroviario, aunque su implementación presenta desafíos importantes en términos de costos y capacitación.

El tren Panamá-David no solo representa un avance significativo en la infraestructura de transporte, sino que también tiene el potencial de catalizar un desarrollo económico más equitativo y sostenible en Panamá. Sin embargo, la clave para el éxito de este proyecto radica en la capacidad de integrar soluciones técnicas avanzadas con un enfoque que considere las particularidades del entorno panameño. La ingeniería civil tiene un papel crucial en la creación de infraestructuras que no solo sean técnicamente sólidas, sino también sostenibles y resilientes frente a los desafíos ambientales y económicos.

Es fundamental adaptar las tecnologías avanzadas a las condiciones geológicas, climáticas y socioeconómicas específicas de Panamá. Esto podría implicar realizar estudios piloto y colaboraciones con expertos internacionales para transferir conocimientos y habilidades.





El proyecto debe integrar de manera proactiva prácticas sostenibles desde su fase de diseño, considerando el impacto a largo plazo en el medio ambiente y las comunidades locales. Esto incluye la implementación de tecnologías de construcción verde y la promoción de un enfoque basado en la economía circular.

Dado que muchas de las tecnologías discutidas requieren conocimientos técnicos especializados, es crucial invertir en la capacitación de profesionales locales. Esto no solo facilitará la implementación eficiente de las soluciones, sino que también fortalecerá el sector de la ingeniería civil en Panamá.

Se recomienda establecer un sistema de monitoreo y evaluación continua del proyecto, utilizando tecnologías como los gemelos digitales, para asegurar que las soluciones implementadas funcionen de manera óptima y se adapten según sea necesario durante el ciclo de vida del proyecto.

El tren Panamá-David tiene el potencial de convertirse en un modelo de innovación en infraestructura ferroviaria en América Latina, siempre que se aborden adecuadamente los desafíos técnicos identificados. La integración de soluciones avanzadas y sostenibles, combinada con un enfoque contextualizado y colaborativo, puede asegurar que este proyecto no solo cumpla con sus objetivos iniciales, sino que también contribuya al desarrollo a largo plazo de Panamá, fortaleciendo su infraestructura y su economía en un entorno global cada vez más interconectado.

Referencias Bibliográficas

ADASASystems. (11 de noviembre de 2023). *Detección de fugas de agua: FIDO IA*.
<https://www.adasasystems.com/es/caso-de-estudio/deteccion-de-fugas-de-agua-fido-ia.html>





- Asfaltos Modernos Panameños, S.A. [@AsfaltosMPI]. (19 de junio de 2020)
<https://twitter.com/AsfaltosMPI/status/1274387658157043713/photo/3>
- Cao, Y., Lan, H., y Li, L.-P. (2023). Evaluación de riesgos de desastres para ferrocarriles: Desafíos y una solución prometedora sostenible basada en BIM+GIS. *Sustainability*, 15(24), 16697.
<https://doi.org/10.3390/su152416697>
- Clarke, T., Hammond, J., y Schaul, P. (2024). Construcción ferroviaria eficiente y sostenible mediante materiales y tecnologías modernas de construcción. *Journal of Modern Construction*, 13(3), 95-102.
- Clavero, D. (5 de febrero de 2012). *Frenada regenerativa en ferrocarriles gracias al uso de ultracondensadores.*
<https://www.mundodeportivo.com/urbantecno/motor/audi-e-tron-quattro-autonomia-frenada-regenerativa>
- Chen, D.-H., Lam, C., y Liu, J.-Y. (2016). Special Issue on Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Technologies and Materials. *Journal of Bridge Engineering*, 21(2), 04015035. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000838](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000838)
- Dalai, D., y Enebish, N. (2024). Diseño en permafrost en Mongolia. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 41(1), 45-56.
- Dehormigon (2019). *Ventajas del hormigón autocompactante.* [JPG].
<https://dehormigon.com.ar/wp-content/uploads/2019/12/ventajas-del-hormigon-autocompactante.jpg>
- Fialho, J. C. (2020). Railway Station Buildings: An Architect Engineer Experience. *Advanced Structural Technologies*, 103(1), 1-15.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.103.1>
- Indraratna, B., Singh, M., y Nguyen, T. (2020). El mecanismo y los efectos de la fluidización del subsuelo bajo vías ferroviarias balastradas. *Springer*, 5(4), 210-225. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00210-1>
- Kaewunruen, S., Ishida, T., y Remennikov, A. (2024). Desempeño dinámico de traviesas de hormigón en desvíos ferroviarios y cruces. *Journal of Railway Engineering*, 45(2), 215-230.





- Kawalec, J., Kwiecień, S., Pilipenko, A., y Rybak, J. (2017). Application of crushed concrete in geotechnical engineering – Selected issues. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 95, 022057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/2/022057>
- Larsson-Kråik, P. (2024). Gestión de la interfaz rueda-carril: Mantenimiento de infraestructuras ferroviarias en un entorno severo: La experiencia sueca. *Procedia Engineering*, 45(2), 634-638. <https://doi.org/10.1533/9781845696788.2.634>
- Li, W.-H., Gu, Y., Zhao, W., Deng, Y., y Fan, X. (2024). Estudio aerodinámico de túneles ferroviarios de alta velocidad con sección transversal variable utilizando volumen de excavación equivalente. *Journal of Applied Physics*, 45(7), 123-134. <https://doi.org/10.1063/5.0217638>
- Nandi, B., Al Qaydi, F. M., Al Damasi, D. H., y Almazroei, R. S. (2022). *Estándar de oro en diseño de ingeniería interna a través de la optimización eficiente de procesos para lograr excelencia en ahorro operativo y una reducción del 40% en Capex*. Conferencia Técnica Anual y Exposición de SPE. <https://doi.org/10.2118/211239-ms>
- Negut, I., y Bitá, B. (2023). Explorando el potencial de la inteligencia artificial para el desarrollo de hidrogeles: Una revisión breve. *Journal of Applied Materials*, 11(9), 845-855. <https://doi.org/10.3390/gels9110845>
- Noakes, A. J. P., Mason-Jarvis, L. F., Taylor, G., y Evans, E. (2019). Métodos de evaluación geoespacial para la gestión de activos geotécnicos de terraplenes ferroviarios históricos. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 52(4), 345-355. <https://doi.org/10.1144/qjegh2018-092>
- Noviarti, D., Arliansyah, J., y Kadarsah, E. (2023). *Revisión sistemática de la literatura: Sistema de financiamiento en el transporte ferroviario*. E3S Web of Conferences, 429, 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342903008>
- Murashev, A. (2021). *Sustainability aspects of geotechnical engineering in New Zealand*. *Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Symposium*, Christchurch, New Zealand, 1056-1065. <https://doi.org/10.2749/CHRISTCHURCH.2021.1056>





- Mihai, B., Dobre, R., y Săvulescu, I. (2014). Mapa geomorfotécnico para la mejora de la infraestructura de la línea principal ferroviaria: Un estudio de caso en Rumania. *Geomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 20(1), 23-34. <https://doi.org/10.4000/GEOMORPHOLOGIE.10525>
- Optima Ingeniería. (2023). LMX200-back. *Sistema de Radar de Penetración Terrestre (GPR) LMX200 para Exploración Subterránea*. <https://optima-ingenieria.com/wp-content/uploads/2023/07/LMX200-back.png>
- Povoroznyuk, O., Vincent, W., Schweitzer, P., Laptander, R., Bennett, M., Calmels, F., Sergeev, D., Arp, C., Forbes, B., Roy-Léveillé, P., y Walker, D. (2022). Carreteras y ferrocarriles en el Ártico: Consecuencias sociales y ambientales de la infraestructura de transporte en el Norte Circumpolar. *Arctic Science*, 8(3), 340-356. <https://doi.org/10.1139/as-2021-0033>
- Raja, S. U., Landergren, H., y Thurner, R. (2023). Uso de diversas técnicas geotécnicas para condiciones desafiantes en el proyecto West Link. *Geotechnical Engineering Journal*, 23(11), 345-359. <https://doi.org/10.1002/geot.202300029>
- Ruiz-Cantisani, M., Lara-Prieto, V., Mourgues, C., Lima-Sagui, F., y Pinzón-Salcedo, L. (2021). Colaboración internacional entre universidades latinoamericanas hacia la innovación educativa en ingeniería: Estudio de caso. *Actas de la Conferencia Internacional sobre Educación en Ingeniería*, 12(4), 85-90. <https://doi.org/10.1145/3488466.3488478>
- Samuelsson, I., Spross, J., y Larsson, S. (2023). Integrating life-cycle environmental impact and costs into geotechnical design. *Journal of Environmental Sustainability*, 12(2), 45-59. <https://doi.org/10.1680/jensu.23.00012>
- Shah, J., Jefferson, I., Ghataora, G., y Hunt, D. (2014). Gestión resiliente de activos de infraestructura geotécnica. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(3), 365-375. <https://doi.org/10.1061/9780784413272.365>
- Yoo, C. (2023). Geosynthetic solutions for sustainable transportation infrastructure development. *Sustainability*, 15(22), 15772. <https://doi.org/10.3390/su152215772>

