

ARTÍCULOS

Análisis, predicción y prevención de accidentes: un camino a la creación de trenes inteligentes

Analysis, prediction and prevention of accidents: a path to the creation of smart trains

Tania Elizabeth Sandoval Valencia

ORCID: 0000-0002-2800-4797, al10020080@itsa.edu.mx

Investigadora posdoctoral, División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería (FI), Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)

Gerardo Hurtado-Hurtado

ghurtado09@alumnos.uaq.mx

División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería (FI), Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)

Juan C. Jáuregui-Correa

ORCID: 0000-0002-8961-103X, jc.jauregui@uaq.mx

División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería (FI), Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)

Recepción: 09/10/23. Aceptación: 15/01/24. Publicación: 16/05/24

RESUMEN

Los accidentes de trenes son eventos trágicos en los cuales ocurren pérdidas materiales y humanas. Estudiar a fondo estos siniestros permite conocer los factores que los originan, con lo cual es posible establecer una estrategia para reducir su aparición o evitarlos en su totalidad. En este artículo se exploran los estudios que se están realizando en este tema, a fin de analizar, predecir y prevenir accidentes. Asimismo, se da a conocer al lector la importancia de seguir estudiando los datos históricos de los accidentes y cómo las tecnologías emergentes cumplen un papel relevante en su disminución. El hallazgo más significativo es que las metodologías, algoritmos y tecnologías creadas en este campo van encaminadas hacia la creación de trenes inteligentes.

PALABRAS CLAVE

accidentes, prevención, predicción, trenes inteligentes

ABSTRACT

Train accidents are tragic events in which material and human losses occur. Studying these tragedies in depth allows us to know the factors that cause them, making it possible to establish a strategy to reduce their occurrence or avoid them entirely. This article reviews the studies that are being carried out on this topic, to analyze, predict and prevent accidents. Likewise, the reader is made aware of the importance of continuing to study historical accident data and how emerging technologies play a relevant role in reducing them. The most significant finding is that the methodologies, algorithms, and technologies created in this field are aimed towards the creation of intelligent trains.

KEYWORDS

accidents, prevention, prediction, smart trains

Introducción

Los trenes son uno de los medios de transporte más utilizados en el mundo. La finalidad de este sistema es satisfacer la necesidad de movilidad tanto de personas como de mercancías. El correcto funcionamiento de los trenes depende del estado de su infraestructura, como son las ruedas, rieles, frenos, entre otros, así como de los operadores humanos y de la gestión de mantenimiento y movilidad (Kyriakidis et al., 2015). Algún problema en cualquiera de estos componentes, así como el mal clima, puede terminar en un fatal accidente.

Un siniestro o accidente es “cualquier suceso o evento corto, repentino e inesperado que concluye en un resultado no deseado” (Salmon et al., 2020). Un accidente de tren tiene un gran impacto en la sociedad, pues causa pérdidas humanas y materiales, lesiones graves, daños a la propiedad y liberación de materiales peligrosos (Abioye et al., 2020; Liu et al., 2021). Distintos factores intervienen en la producción de los accidentes de trenes, por lo cual es un tema de estudio fértil, que está siendo abordado de manera cualitativa y cuantitativa (Sánchez Lovell y Soto Rodríguez, 2022).

En este artículo se resaltan los motivos por los cuales se deben realizar estudios relacionados con el análisis, prevención y predicción de este tipo de siniestros. En la primera parte se explican brevemente algunos registrados durante 2023. En la segunda parte se presenta lo que han realizado algunos investigadores respecto al tema del análisis, predicción y prevención de accidentes, y cómo el tema se va encaminando a una era de trenes inteligentes.

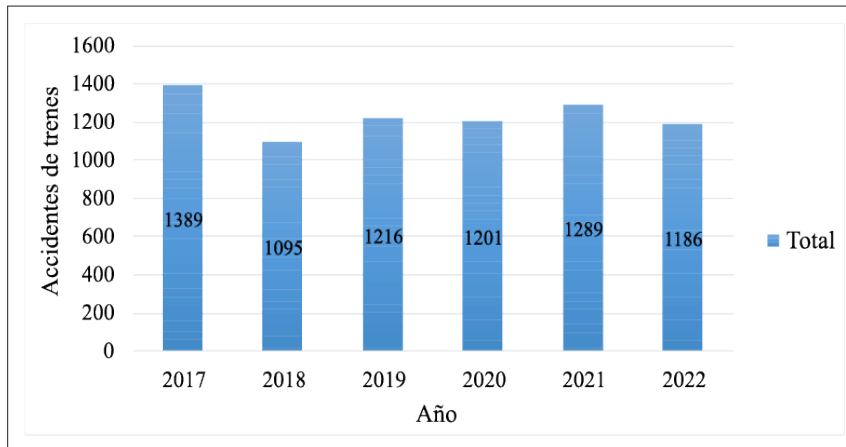
Accidentes de trenes

Por lo menos una vez al mes hay noticias de trágicos accidentes de trenes. Tan sólo en 2023 se reportó una gran variedad de siniestros de trenes que han tenido un gran impacto. En México chocaron dos trenes que dejaron una persona muerta y 57 heridas (Associated Press and Reuters in Mexico City, 2023). Otro ocurrió en este mismo país cuando un camión con 25 pasajeros fue embestido por un tren al intentar ganarle el paso. Este siniestro dejó seis personas fallecidas y dieciséis lesionados (Redacción La-Lista, 2023).

En Ohio, Estados Unidos, se descarriló un tren que transportaba materiales tóxicos. Los funcionarios detectaron que más de una docena de los vagones involucrados transportaban vinilo, un químico cancerígeno, por lo cual se tuvo que evacuar a los residentes en un radio de una milla (Aratani, 2023). En este mismo país, un tren que transportaba asfalto caliente y azufre fundido sufrió un accidente al derrumbarse un puente en el río Yellowstone. La causa del colapso está bajo investigación, pero se tiene presente que el río estaba creciendo por las fuertes lluvias. El estudio de este accidente está limitado, debido a que no se tiene el registro de cuándo se construyó e inspeccionó por última vez el puente (Associated Press, 2023).

En Grecia colisionaron dos trenes, uno de ellos llevaba 350 pasajeros y el otro era un tren de carga. Este lamentable accidente dejó 57 personas sin vida y decenas de heridos

Figura 1
Accidentes de trenes en los últimos seis años en México



Fuente: elaboración propia.

(Redacción, 2023). En la India ocurrió un accidente que ha sido catalogado como uno de los más mortíferos de ese país en las últimas dos décadas, ya que dejó 275 personas muertas y 1,200 heridas. La causa fue un fallo en la señalización, lo que provocó que un tren de pasajeros chocara de frente con uno de mercancías (France 24, 2023).

En el norte de Italia se registró el arrollamiento de cinco trabajadores mientras realizaban trabajos de mantenimiento nocturnos. La policía dijo que el tren, que transportaba vagones en la línea Milán-Turín, no estaba en servicio comercial y viajaba a 160 km/h cuando, poco antes de la medianoche, colisionó contra el equipo que cambiaba partes de las vías (Tondo, 2023). La recuperación de estas noticias sobre accidentes de trenes que ocurren en todo el mundo permite resaltar la importancia de seguir apoyando el estudio de temas de seguridad.

La base de datos pública de accidentes de trenes en el Sistema Ferroviario Mexicano 2016-2022 (Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, 2018) muestra la cantidad de accidentes registrados en los últimos seis años. Los datos correspondientes a 2016 inician en noviembre, por lo que se decidió no considerarlos en este análisis. De igual forma se filtró el mes de diciembre, debido a que el reporte no lo incluía en 2022, y respecto a 2023, sólo se registra hasta marzo, por lo cual también se omitió.

En la figura 1 se puede observar que los accidentes de trenes no han disminuido de forma significativa en los últimos años; aquí radica la importancia de estudiar las bases de datos del registro de accidentes, con la finalidad de identificar las causas y, con ello, establecer estrategias que lleven a la predicción y prevención de accidentes y, mejor aún, a reunir todas las herramientas estudiadas por los investigadores para la creación de trenes inteligentes.

En el ámbito de la seguridad, los estudios han enfocado sus esfuerzos en el análisis, predicción y prevención de accidentes de trenes, por lo cual es un tema que sigue en constante crecimiento, debido a que mes con mes se registran siniestros que tienen un gran impacto en la sociedad. También se pueden encontrar publicaciones encaminadas a la creación de trenes inteligentes, en los que la seguridad es su máxima prioridad.

Análisis, prevención y predicción de accidentes

Los accidentes de trenes pueden ocurrir por diferentes factores, como se observó en la sección anterior. Entre los más comunes están las deficiencias en la planeación de viajes, problemas de señalización, colisiones con otros trenes, fallas en los cruces, deterioro de las vías, diferentes problemas dentro del mismo tren, malas condiciones climáticas, peatones y conductores distraídos, entre otros más. Estas investigaciones van encaminadas a la creación de trenes inteligentes.

El análisis de accidentes tiene una función importante, ya que, si se examinan las causas de los siniestros registrados, se pueden diseñar métodos para predecir y prevenir que se repitan en el futuro. Las agencias de transporte de trenes y el gobierno comparten las características de los accidentes mediante bases de datos públicas para que las personas estén informadas. Sin embargo, esta información no siempre está completa como para hacer un análisis a detalle, pero hay universidades y centros de investigación vinculados a estas agencias que sí tienen acceso. A continuación se muestran algunos estudios destacados que utilizaron bases de datos para analizar diferentes problemas ferroviarios:

1. Dindar et al. (2018) utilizaron el registro de diez años de accidentes de una base de datos de Estados Unidos para analizar los que han ocurrido en los cruces de vía en particular. Posteriormente, disminuyeron la cantidad de información filtrando aquellos que fueron provocados por condiciones climáticas extremas. Estos resultados permitirán predecir la probabilidad de que ocurra un descarrilamiento provocado por una alteración climática y, basándose en ello, la industria de transporte de trenes puede decidir si se debe o no permitir que sus vehículos se usen durante adversidades climáticas.
2. Con el registro de datos almacenados en la base de accidentes de trenes iraníes, Kaeeni et al. (2018) construyeron modelos matemáticos que predicen de forma eficiente el descarrilamiento de trenes con características particulares en su diseño. Estos modelos pueden ser aplicados a otros tipos de siniestros, sustituyendo la información con la de otros accidentes que se desee predecir.

Tal como se observó en la sección anterior, algunos accidentes son causados por la estructura de la vía o por componentes dañados en el mismo tren, por lo cual, para poder llevar a cabo un mantenimiento preventivo o correctivo, se han realizado los siguientes estudios:

1. Aldao et al. (2023) propusieron dos métodos que permiten inspeccionar de forma automática que las grapas y pernos del tren estén colocados correctamente o detectar si hace falta alguno. Los resultados de este estudio tienen un gran impacto, debido a que estos métodos pueden ser utilizados para inspeccionar otros componentes de la vía, lo que hace más eficiente el mantenimiento preventivo o correctivo, debido a que los datos se estarían inspeccionando en tiempo real, sin necesidad de detener la operación del tren.
2. Appoh et al. (2021) desarrollaron una técnica para predecir con precisión fallas en los frenos debido al desgaste. Esta técnica puede ayudar a determinar cuándo debe aplicarse mantenimiento o cambio en los frenos para asegurar el correcto funcionamiento de este sistema, con la finalidad de prevenir accidentes por colisión e incluso descarrilamiento. Hasta este punto, se tiene claro que tener un sistema de frenado en buen estado, junto con la eliminación de otros factores, como peatones y conductores distraídos o una señalización errónea, disminuye significativamente el riesgo de colisiones entre trenes.
3. En cuanto a mantenimiento predictivo, Braga y Andrade (2021) se dieron a la tarea de predecir el desgaste de las ruedas ferroviarias. El objetivo primordial es reducir la complejidad a la hora de describir el nivel de desgaste. Los autores esperan que los hallazgos realizados respalden la mejora de las técnicas de monitoreo y la optimización del mantenimiento predictivo. Este modelo permitirá proporcionar información confiable a las agencias de transporte ferroviario para definir si se necesita reparar las ruedas o deben cambiarse.

Otro de los aspectos que se siguen estudiando es la mejora del servicio de transporte y el diseño de trenes inteligentes. Es por ello que:

1. Mediante el uso de datos de mediciones diarias de vibraciones en trenes, Peng et al. (2023) diseñaron un algoritmo para predecir las vibraciones del cuerpo de los trenes sin la necesidad de instalar nuevos sensores y otros equipos de monitoreo, con el propósito de asegurar la comodidad de los pasajeros. Esto permitirá a las empresas reducir los costos de operación y mantenimiento y mejorar con ello la seguridad, comodidad y eficiencia de la operación de los trenes.
2. Qin et al. (2022) determinaron que el sistema de trenes inteligentes es la clave para la innovación tecnológica en el transporte del futuro, y la seguridad es su primera consideración. En su revisión bibliográfica se puede destacar que nos encontramos en la era del tren inteligente 2.0, el cual todavía está en evolución para aplicarse en su totalidad en los próximos años. Este tren organiza, analiza y procesa recursos utilizando tecnologías emergentes, como:

- *Big data* (inteligencia de datos), para procesar la gran cantidad de datos de los sensores de operación de los trenes, así como las señales y alarmas que se van generando durante sus operaciones. Los sensores especiales pueden detectar anomalías en las vías y en el sistema de tracción del tren, alarmas de cruces de tráfico, registros de operación y de control de velocidad y de frenado, entre otros, los cuales permiten una mejora en el servicio.
 - El internet de las cosas (*internet of things*, IoT), para transferir información en tiempo real desde los sensores o dispositivos instalados para su monitoreo hasta los centros de análisis o estaciones mediante comunicación inalámbrica. Esta tecnología también permite que los trenes se comuniquen entre sí, lo cual ayudaría a disminuir los choques frontales.
 - Inteligencia artificial, para la toma de decisiones en el control y estabilidad de los trenes, así como para conocer la ubicación exacta de los trenes mediante sistemas de posicionamiento global (GPS). Esta tecnología analiza, a través de modelos especializados, todos los datos recopilados por los sensores y entrega una decisión como resultado, de acuerdo con la situación o percance que se presente. Por otro lado, los algoritmos de inteligencia artificial también se han aplicado al confort y optimización de rutas para ofrecer un buen servicio a los usuarios.
3. Ejemplos de aplicaciones, como las de De Donato, Dirnfeld et al. (2023) y Mirza et al. (2023), proponen el uso de inteligencia artificial para verificar que las señales en los cruces con carreteras funcionen correctamente, con lo que disminuye el número de siniestros con automóviles en estas zonas.

Estas y muchas aplicaciones más tienen las tecnologías emergentes, las cuales nos están aproximando a que, en un futuro cercano, los trenes inteligentes sean una realidad. El conjunto de estas tecnologías permite lograr una percepción, aprendizaje, toma de decisiones y ejecución autónomas e inteligentes. Los subsistemas físicos del tren inteligente incluyen trenes, líneas, estaciones, patios, seguridad, gestión de transporte, servicio y una plataforma de integración de información, todas con la característica de ser inteligentes.

La evolución de los estudios en conocimientos tecnológicos, informáticos y digitales permitirá visualizar trenes inteligentes (De Donato, Dirnfeld, et al., 2023; De Donato, Marrone et al., 2023; Karami et al., 2022; Mirza et al., 2023) con las siguientes características:

- Conducción autónoma.
- Capacidad de compartir información con otros trenes, estaciones o personas encargadas de su control.
- Sistemas con la capacidad de proporcionar información concreta a los pasajeros, conductores y áreas de mantenimiento.

- Reporte en tiempo real de anomalías en su infraestructura o en la vía, así como cambios ambientales bruscos u objetos varados en la vía, para frenado anticipado.
- Comunicación inteligente entre trenes para establecer velocidad y ubicación exacta para la prevención de colisiones.
- Aprendizaje automático con base en los datos antiguos y los que se están generando en tiempo real para una toma de decisiones avanzada.
- Autodiagnóstico para mantenimiento predictivo eficiente.
- Consumo inteligente de energía.

Estas características, hoy en día, son una realidad en la que la ciencia y la tecnología superan las expectativas humanas. Los datos son analizados con técnicas sofisticadas para determinar las causas de los accidentes, lo cual permite diseñar y construir trenes completamente autónomos en su ejecución y control para disminuir el número de accidentes.

Los estudios presentados son una pequeña muestra de lo que se está realizando para alcanzar un sistema ferroviario más seguro y, al mismo tiempo, proteger a los seres vivos y el medio ambiente, tener un impacto económico y proporcionar un traslado cómodo.

Conclusiones

La reducción de accidentes de trenes no sólo sería un triunfo para el sector de transporte, sino también un hito para el bienestar de la sociedad, ya que se obtendrían beneficios a corto y largo plazo en la salud y seguridad de los seres vivos. Si bien existe conciencia sobre las lesiones y la pérdida de vidas humanas como consecuencia de los accidentes, también existen otros rubros que se ven afectados, como el medio ambiente y la economía.

Los estudios realizados están permitiendo desarrollar técnicas clave para el monitoreo de seguridad, el análisis y el diagnóstico de fallas, predicción de riesgos operativos, inspección inteligente, mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo, entre otros, mediante el uso de trenes a escala, dispositivos que representan el funcionamiento del tren, simulaciones o análisis de grandes cantidades de datos y herramientas de inteligencia artificial, todo ello encaminado a la creación de trenes seguros e inteligentes.

Los trenes inteligentes permitirán prevenir accidentes mediante la inspección en tiempo real de todos sus componentes, ya que este tipo de trenes integran el conjunto de herramientas de análisis de datos, *big data*, *IoT*, inteligencia artificial y subsistemas físicos inteligentes, para hacer más eficiente, cómodo y seguro el transporte.

Referencias

- Abioye, O. F., Dulebenets, M. A., Pasha, J., Kavooosi, M., Moses, R., Sobanjo, J. y Ozguven, E. (2020). Accident and hazard prediction models for highway–rail grade crossings: A state-of-the-practice review for the USA. *Railway Engineering Science*, 28(3), 251-274. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00215-w>
- Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (2018). Siniestros en el Sistema Ferroviario Mexicano. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/siniestros-en-el-sistema-ferroviario-mexicano>
- Aldao, E., Fernández-Pardo, L., González-deSantos, L. M. y González-Jorge, H. (2023). Comparison of deep learning and analytic image processing methods for autonomous inspection of railway bolts and clips. *Construction and Building Materials*, 384, 131472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131472>
- Appoh, F., Yunusa-Kaltungo, A. y Kumar Sinha, J. (2021). Hybrid adaptive model to optimise components replacement strategy: a case study of railway brake blocks failure analysis. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105539. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105539>
- Aratani, L. (15 de febrero de 2023). What do we know about the Ohio train derailment and toxic chemical leak? *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2023/feb/15/ohio-train-derailment-palestine-toxic-chemical-leak>
- Associated Press (24 de junio de 2023). Montana bridge collapses causing train carrying toxic materials to fall into river. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/us-news/2023/jun/24/montana-bridge-collapse-train-toxic-materials-yellowstone-river>
- Associated Press and Reuters in Mexico City (7 de enero de 2023). At least one dead and 57 injured in collision on Mexico City's metro. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2023/jan/07/at-least-one-dead-and-22-injured-in-collision-on-mexico-citys-metro>
- Braga, J. A. P. y Andrade, A. R. (2021). Multivariate statistical aggregation and dimensionality reduction techniques to improve monitoring and maintenance in railways: the wheelset component. *Reliability Engineering & System Safety*, 216, 107932. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107932>
- De Donato, L., Dirnfeld, R., Somma, A., De Benedictis, A., Flammini, F., Marrone, S., Saman Azari, M. y Vittorini, V. (2023). Towards ai-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 9(3), 303-317. <https://doi.org/10.1007/s40860-023-00208-6>
- De Donato, L., Marrone, S., Flammini, F., Sansone, C., Vittorini, V., Nardone, R., Mazzariello, C. y Bernaudin, F. (2023). Intelligent detection of warning bells at level crossings through deep transfer learning for smarter railway maintenance. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, part. c, 106405. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106405>

- Dindar, S., Kaewunruen, S., An, M. y Sussman, J. M. (2018). Bayesian network-based probability analysis of train derailments caused by various extreme weather patterns on railway turnouts. *Safety Science*, 110, part. B, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.12.028>
- France 24 (4 de junio de 2023). El peor accidente ferroviario del siglo XXI en India, preguntas y respuestas. *France 24*. <https://www.france24.com/es/asia-pac/C3%ADfico/20230604-respuestas-y-preguntas-que-deja-el-peor-accidente-ferroviario-del-siglo-xxi-en-india>
- Kaeni, S., Khalilian, M. y Mohammadzadeh, J. (2018). Derailment accident risk assessment based on ensemble classification method. *Safety Science*, 110, part. B, 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.006>
- Karami, A., Karami, H. y Mehdizadeh, M. (2023). A world of fully autonomous mobility options: on long-distance travel mode choice. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122702. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122702>
- Kyriakidis, M., Majumdar, A. y Ochieng, W. Y. (2015). Data based framework to identify the most significant performance shaping factors in railway operations. *Safety Science*, 78, 60-76. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.04.010>
- Liu, J., Schmid, F., Li, K. y Zheng, W. (2021). A knowledge graph-based approach for exploring railway operational accidents. *Reliability Engineering & System Safety*, 207, 107352. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107352>
- Mirza, G. F., Junejo, Y. S., Shaikh, F. K., Chowdhry, B. S. y Shah, A. A. (2023). Smart railway level crossing system for avoiding accidents. *2023 International Conference on Robotics and Automation in Industry*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/ICRAI57502.2023.10089536>
- Peng, L., Zheng, S., Zhong, Q., Chai, X. y Lin, J. (2023). A novel bagged tree ensemble regression method with multiple correlation coefficients to predict the train body vibrations using rail inspection data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 182, 109543. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109543>
- Qin, Y., Cao, Z., Sun, Y., Kou, L., Zhao, X., Wu, Y., Liu, Q., Wang, M. y Jia, L. (2023). Research on active safety methodologies for intelligent railway systems. *Engineering*, 27, 266-2469. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.06.025>
- Redacción (1 de marzo de 2023). Choque de trenes en Grecia: al menos 57 muertos en un accidente ferroviario en el norte del país. *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-64807431>
- Redacción La-Lista (2 de agosto de 2023). Choque de tren y autobús deja 5 muertos y 16 heridos en El Marqués. *La-Lista*. <https://la-lista.com/mexico/2023/08/02/accidente-el-marques-queretaro-6-muertos-por-choque-con-tren>

- Salmon, P. M., Hulme, A., Walker, G. H., Waterson, P., Berber, E. y Stanton, N. A. (2020). The big picture on accident causation: a review, synthesis and meta-analysis of AcciMap studies. *Safety Science*, 126, 104650. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104650>
- Sánchez Lovell, A. y Soto Rodríguez, M. A. (2022). En la accidentada ruta del progreso: aportes a la historia de los accidentes ferroviarios en Costa Rica. Un análisis de casos ocurridos en la Northern Railway Company (1920-1940). *Diálogos. Revista Electrónica de Historia*, 24(1), 1-31. <https://doi.org/10.15517/dre.v24i1.51917>
- Tondo, L. (31 de agosto de 2023). Train hits and kills five track maintenance workers in northern Italy. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2023/aug/31/italy-train-accident-maintenance-workers-killed-brandizzo>