

RESEARCH ARTICLE

Advanced human capital formation for the Digital and Sustainable Mining of the Future

Formación de Capital Humano Avanzado para la Minería Digital y Sostenible del Futuro

 Patricio Oportus Romero¹,  Fernando González-Ladrón-de-Guevara²

¹Departamento de Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar, Chile

²Instituto Universitario Mixto de Tecnología Informática (IUMTI), Universidad Politécnica de Valencia, España (fgonzal@omp.upv.es)

Corresponding author: patricio.oportus@usm.cl (Patricio Oportus Romero)

Key point:

Transformation of the mining industry towards digitization and sustainability.

Training of advanced human capital as a driver of innovation and productivity.

University-business alliance in the training of specialized talent.

ABSTRACT

The mining sector is undergoing profound transformations toward a digital and sustainable industry. In this scenario, it is essential to strengthen the training of professionals capable of leading the challenges of mining in the future, where specialized human resources are a key pillar for improving productivity, competitiveness, and innovation. However, there is still a gap between the demands of the sector and the training offered by Chilean universities, creating differences that require attention to technological, environmental, and social needs. This situation defines the formulation of the problem. On the other hand, the overall objective of this study is to identify the key curricular content that should be incorporated into the Civil Mining Engineering degree program in Chile. The research covered the period 2014-2023 and applied a methodology that combined a systematic literature review, documentary analysis, and guidelines for curriculum design in order to identify key content. The results showed significant discrepancies between academic offerings and industry demands, although the University of Chile and the University of Santiago de Chile showed fewer differences. The findings underscored the urgency of training human capital capable of leading Mining 4.0, integrating technological innovation, sustainability, and operational excellence. It is concluded that updating curricula to incorporate skills aligned with global trends is a priority in order to consolidate competitive, sustainable, resilient mining with a forward-looking vision of the mining business value chain. This research is relevant in that it provides clear criteria for closing the gap between academia and industry.

Keywords: Digital and sustainable mining; Professional training; Advanced human capital.

Article History:

Received: 25/06/2025

Accepted: 12/11/2025

Published: 16/01/2026

Puntos clave:

Transformación de la industria minera hacia la digitalización y la sostenibilidad.

Formación de capital humano avanzado como motor de la innovación y productividad.

Alianza universidad-empresa en la formación de talento especializado.

RESUMEN

El sector minero experimenta profundas transformaciones hacia una industria digital y sostenible. En este escenario, es esencial fortalecer la formación de profesionales capaces de liderar los desafíos de la minería del futuro, donde los recursos humanos especializados constituyen un pilar clave para mejorar la productividad, competitividad e innovación. Sin embargo, persiste un desfase entre las demandas del sector y la formación que ofrecen las universidades chilenas, generando diferencias que requieren atender necesidades tecnológicas, ambientales y sociales. Esta situación define la formulación del problema. Por otra parte, el objetivo general de este estudio es identificar los contenidos curriculares clave que deben incorporarse en la carrera de Ingeniería Civil de Minas en Chile. La investigación abarcó el período 2014-2023 y aplicó una metodología que combinó la revisión sistemática de literatura, el análisis documental y directrices para el diseño curricular, con el fin de identificar contenidos claves. Los resultados evidenciaron discrepancias relevantes entre la oferta académica y las demandas del sector, aunque la Universidad de Chile y la Universidad de Santiago de Chile presentaron menores diferencias. Los hallazgos subrayaron la urgencia de formar capital humano capaz de liderar la Minería 4.0, integrando innovación tecnológica, sostenibilidad y excelencia operacional. Se concluye que es prioritario actualizar los planes de estudio, incorporando competencias alineadas con las tendencias globales, para consolidar una minería

competitiva, sostenible, resiliente y con visión prospectiva de la cadena de valor del negocio minero. Esta investigación tiene relevancia al aportar criterios claros para cerrar la brecha entre academia e industria.

Palabras clave: Minería digital y sostenible; Formación profesional; Capital humano avanzado.

Historial del artículo:

Recibido: 25/06/2025

Aceptado: 12/11/2025

Publicado: 16/01/2026

Citation / Cómo citar este artículo: Oportus Romero, P., González-Ladrón-de-Guevara, F. (2025). Advanced human capital formation for the Digital and Sustainable Mining of the Future. *Boletín Geológico y Minero*, 136(4), 002. <http://doi.org/10.21701/bolgeomin/136.4/002>.

1. Introducción

En el transcurso de las últimas décadas, la industria minera a escala global ha experimentado grandes transformaciones, resultado de la convergencia de desafíos ambientales, tecnologías emergentes y marcos regulatorios más estrictos. La disminución progresiva de las leyes de los minerales, el incremento sostenido de los costos del acero, la energía, el agua, el transporte y la mayor profundización de los yacimientos junto a exigencias sociales, han generado la necesidad de adoptar sistemas operativos más eficientes, automatizados y sustentables (Wood *et al.*, 2021). El desarrollo de Chile está directamente correlacionado con la actividad minera, la que enfrenta el reto de modernizar los procesos productivos y preparar personas para responder a estos complejos escenarios.

Sin embargo, persiste una brecha considerable entre las competencias que demanda el sector productivo en áreas tan determinantes como la automatización, la robotización, el análisis de datos, la gestión ambiental y los contenidos impartidos en los planes y programas de la carrera de Ingeniería Civil de Minas de las universidades chilenas. Esta situación plantea una problemática central para este estudio: la falta de alineación entre la formación académica y las exigencias de un sector minero en constante transformación. Este desfase no solo limita la generación de valor agregado a lo largo de la cadena productiva, sino que también compromete la capacidad del país para promover la innovación en una industria estratégica para su desarrollo económico y social.

En este contexto, la presente investigación busca dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los contenidos clave que las universidades chilenas deben integrar en las mallas curriculares de la carrera de Ingeniería Civil de Minas, orientados a formar capital humano avanzado capaz de responder a las demandas técnicas, digitales y ambientales de la Minería 4.0?

Por otra parte, el objetivo general de este estudio es identificar los contenidos curriculares claves que deben incorporarse en la carrera de Ingeniería Civil de Minas en Chile, con el propósito de formar profesionales especializados, competentes y comprometidos con los desafíos de una minería digital, sustentada en tecnologías de punta y orientada a la protección del medio ambiente. En consecuencia, el objetivo específico consiste en analizar y definir los elementos técnicos, digitales, ambientales y de habilidades blandas que resultan fundamentales para incorporar en los programas académicos, considerando las tendencias globales y la minería del futuro (Oportus, 2022) y los estándares de calidad educativa.

Por lo tanto, la relevancia de esta investigación se fundamenta en varios aspectos. Por una parte, la competitividad de la minería depende en gran medida de contar con profesionales que, más allá del dominio de los procesos tradicionales, posean habilidades en tecnologías disruptivas, pensamiento crítico y gestión ambiental. Otro factor igualmente determinante es la sostenibilidad, la que trasciende su carácter accesorio para imponerse como una exigencia internacional. Adicionalmente, los marcos normativos, los compromisos asociados al cambio climático y las expectativas ciudadanas motivan a operar con el menor impacto posible desde la perspectiva de sustentabilidad ambiental. En este contexto, actualizar los programas formativos permitirá reducir las brechas de empleabilidad, estimular la innovación, crear y anticipar futuros para la industria y asegurar que inversiones tecnológicas de alto impacto.

Es preciso destacar, que la viabilidad de esta investigación es alta, dado a que se dispone de condiciones favorables al acceso de documentos curriculares de universidades chilenas, literatura académica actualizada, y un interés declarado del sector industrial por dinamizar iniciativas de minería digital y sostenible.

En el marco teórico de esta investigación se revisaron estudios recientes que abordan las competencias requeridas por la Minería 4.0, los impactos organizativos y su implementación. El manuscrito *Mining 4.0 and its effects on work environment, competence, organisation and society – a scoping review* (Lund *et al.*, 2024) analiza cómo la adopción de tecnologías de punta en minería impacta los entornos laborales, las estructuras organizacionales y las competencias requeridas. En este ámbito, se reconoce la necesidad de habilidades en digitalización, automatización y monitoreo de procesos en tiempo real. En efecto, el estudio señala la escasez de investigaciones empíricas centradas en competencias sociales, ética, liderazgo y cultura organizacional. De igual modo, se destaca la dificultad para incorporar personas jóvenes al sector, la desigualdad en el reclutamiento y el envejecimiento de la fuerza laboral.

A continuación, el estudio *“AI Driven Mining 4.0: A Systematic Review of Smart, Sustainable, and Autonomous Technologies across the Mining Lifecycle”* (Maaz *et al.*, 2025), los autores revisan tecnologías disruptivas -sistemas autónomos, gemelos digitales, sensores, internet de las cosas, monitoreo ambiental a lo largo del ciclo minero. El artículo resalta avances en eficiencia, seguridad y sostenibilidad, aunque también plantea limitantes de relevancia tales como los altos costos de implementación, regulaciones, brechas de habilidades digitales y la necesidad de enfoques integrados de sostenibilidad.

Es más, el estudio *“Competencies of the engineer in Industry 4.0 context: a systematic literature review”* (Rosas Quintero & Namuche Maldonado, 2024) identifica competencias clave que deben desarrollar los ingenieros ante los desafíos de la Minería 4.0, incluyendo programación, análisis de datos, trabajo en equipo, liderazgo, ética y comunicación efectiva entre los más sobresalientes. Sin embargo, los autores señalan caídas sostenidas en la literatura sobre el conjunto adecuado de competencias y ausencia de estrategias pedagógicas más efectivas para incorporarlas en los currículos académicos de las universidades.

Por su parte, *“Digital competences of the industrial engineer in Industry 4.0: a systematic vision”* (Rosas Quintero, 2022) pone el acento en las habilidades digitales requeridas en contextos de Industria 4.0, destacando el manejo de sensores, conectividad, análisis de datos entre las temáticas de mayor connotación. El estudio da cuenta que una amplia variedad de programas de ingeniería no ha incorporado contenidos relevantes y actualizados, sino más bien se ha actuado de forma dispersa y desorganizada.

Adicionalmente en *“A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization”* (Caitlin & Svetlana, 2024), se analiza la aplicación de inteligencia artificial en minería, subrayando tanto sus beneficios como los desafíos éticos. Los investigadores destacan la importancia de integrar dimensiones éticas, sociales y ambientales en los procesos de optimización tecnológica, y advierten que estos aspectos aún están poco presentes en las investigaciones y en las implementaciones reales.

Finalmente, *“Deep learning implementations in mining applications: a compact critical review”* (Azhari *et al.*, 2023) revisa el empleo de técnicas de *deep learning* en diversas etapas de la minería (exploración, explotación, procesamiento). Si bien los resultados muestran un gran potencial, también se identifican desafíos importantes: calidad de los datos, escasa interpretabilidad de los modelos, brechas entre la investigación académica y su aplicación práctica, y la necesidad de formar profesionales con sólidos conocimientos en ciencia de datos y aprendizaje automático.

A partir de estos antecedentes, se definen los conceptos centrales que orientan esta investigación en su marco conceptual:

Minería 4.0: Es un concepto que describe la transformación del sector de la minería e integra tecnologías digitales como la inteligencia artificial, computación cuántica, internet de las cosas, robótica, sensores y otros con la finalidad de optimizar los procesos productivos, incrementar la

eficiencia, reducir los costos operacionales, minimizar el impacto ambiental y alcanzar la excelencia operacional.

Minería digital: Comprende la incorporación de tecnologías digitales a lo largo de la cadena de valor del sector minero, mediante la captura, procesamiento, análisis y predicción de datos en tiempo real. Su propósito es optimizar las operaciones unitarias -como perforación, tronadura, carguío, transporte, fortificación y otras- abarcando todo el ciclo productivo, desde la exploración hasta la comercialización de los productos finales.

Minería sostenible: En el contexto de la actividad minera, constituye un modelo de desarrollo que integra la producción con la responsabilidad social, ambiental y económica. Lo que implica adoptar medidas para acotar los impactos ecológicos, el uso eficiente de recursos como agua y energía, la restauración de ecosistemas, la participación de las comunidades y el cumplimiento de estándares normativos que aseguren las actividades productivas de manera adecuada, responsable y duradera.

Capital humano avanzado: Hace referencia a el conjunto integrado de conocimientos profundos, habilidades específicas y actitudes proactivas sustentadas en un perfil de competencias exigente. Esta capacidad profesional requiere capacidad analítica, adaptabilidad, visión prospectiva y holística, de manera que permita liderar eficazmente en contextos de alta complejidad, turbulencia, ambigüedad y riesgo. En consecuencia, constituye un recurso esencial para desempeñarse con éxito en la industria minera, asegurando la creación de valor, la innovación, la sostenibilidad y el liderazgo (Society of Mining Professors, 2019; Marfan & Meller, 2019).

2. Métodos

El presente estudio utilizó un enfoque metodológico orientado a examinar la formación del capital humano avanzado, con énfasis en las dimensiones humana, tecnológica y ambiental. Para ello, se emplearon diversas fuentes textuales y digitales en la recolección de datos sobre las competencias esenciales de los profesionales de la minería del futuro, también denominada *Minería 4.0* (Oportus, 2022).

Dada la naturaleza teórica de la investigación, el diseño experimental se estructura principalmente en relación con el análisis cualitativo, que abarca la revisión sistemática de la literatura (RSL), el análisis documental y las indicaciones para el desarrollo curricular, es decir, la coherencia necesaria entre la oferta académica y la demanda de capital humano avanzado.

La Tabla 1 presenta el análisis cualitativo y la descripción de las actividades basado en la RSL, el análisis documental e indicaciones para el desarrollo curricular en la formación de capital humano avanzado.

Tabla 1. Análisis cualitativo y descripción.

Table 1. Qualitative analysis and description.

Análisis cualitativo	Descripción
Revisión Sistemática de la Literatura (RSL)	Fase inicial Desarrollo Final
Análisis documental	Planes de estudios (malla curricular) Perfil de egreso Competencias claves
Indicaciones para el desarrollo curricular	Integración de las dimensiones humana, tecnológica y ambiental Identificación de brechas.

2.1. Metodología RSL

Esta metodología se compone de tres fases claramente definidas, las cuales se detallan en la Tabla 2, cuyo protocolo buscar establecer los mejores resultados mediante un proceso que comienza con la preparación del estudio a llevar a cabo, seguido del desarrollo de una estrategia de búsqueda de datos. En esta etapa, es crucial el diseño de los criterios de inclusión y exclusión, así como la formulación de la ecuación canónica. La última fase corresponde a la presentación de los resultados. La RSL, se aplicó con la finalidad de abarcar una amplia variedad de artículos científicos haciendo hincapié en las habilidades blandas, la disrupción tecnológica y la sostenibilidad ambiental. Las fuentes consultadas incluyen revistas científicas indexadas a las plataformas Web of Science (WoS) y Scopus, además de publicaciones especializadas del sector minero correspondientes al período 2014-2023. La elección de este período de diez años responde a la disponibilidad de información, relevancia de la literatura y actualidad de esta.

Tabla 2. Fases de un protocolo para la Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) basado en Kitchenham & Charters (2007).

Table 2. Phases of a Systematic Literature Review (SLR) based on Kitchenham & Charters (2007).

Fase	Descripción
Inicial: Preparatoria	Propósito de la investigación Temporalidad de la investigación Planteamiento del problema Pregunta de la investigación y objetivos de la investigación
Desarrollo: Estrategia en la búsqueda de datos	Identificación de motores de búsqueda Diseño de criterios de búsqueda mediante inclusión y exclusión Formulación de la ecuación de búsqueda canónica
Final: Presentación y análisis de los resultados	Obtención de los datos e información Respuesta a la pregunta de la investigación Presentación de los resultados Análisis crítico de la investigación realizada Presentación de fuentes bibliográficas

En consecuencia, la metodología empleada para este estudio permite obtener los mejores resultados de la investigación científica, siguiendo el orden secuencial de las fases presentadas en la Tabla 2.

En definitiva, un aspecto importante del trabajo realizado es la búsqueda y selección de la literatura relevante, para lo cual se aplicó criterios específicos de inclusión y exclusión. Los criterios de inclusión fueron los siguientes: período 2014-2023, tipo de documento (artículo científico), palabras clave (capital humano avanzado, minería digital, minería del futuro, minería sostenible, Minería 4.0, perfil de competencias, competencias para la minería del futuro, educación en minería y transformación digital en minería), idioma (inglés, español). Por otra parte, los criterios de exclusión contemplaron: temas no relacionados con objeto de estudio, publicaciones sin base científica, trabajos presentados en conferencias, duplicidad de artículos y aquellos con insuficiente rigor científico.

En efecto, para la definición de la ecuación canónica se emplearon los operadores lógicos AND y OR combinados con palabras clave, junto a criterios de inclusión y exclusión. De este modo, la búsqueda de publicaciones científicas se realizó en las plataformas WoS y Scopus, mediante la siguiente expresión: Competences OR sustainable AND mining AND digital transformation.

2.1.1. Fase inicial o preparatoria

El propósito de la investigación define el objetivo general del estudio, explicando qué se quiere lograr con la investigación y cuál es su relevancia en el contexto del problema planteado. La temporalidad de la investigación especifica el marco temporal en el que se llevará a cabo la investigación, indicando si será un estudio transversal (en un solo momento) o longitudinal (a lo largo de un periodo). El planteamiento del problema consiste en describir y delimitar el problema de investigación, contextualizando el área de estudio y destacando la importancia de abordarlo. La pregunta de la investigación formula la interrogante principal que guiará el proceso de investigación, orientando el enfoque y la dirección del estudio. El objetivo de la investigación establece las metas específicas que se desean alcanzar a través de la investigación, tanto generales como particulares, para resolver el problema planteado.

2.1.2. Fase de desarrollo o estrategia de búsqueda de datos

Esta fase involucra el diseño de un proceso eficiente para recolectar información relevante. Los elementos clave en esta fase son la Identificación de motores de búsqueda, consistente en seleccionar las plataformas WoS y Scopus para indagar la información necesaria. Además, contempla el diseño de criterios de búsqueda mediante inclusión y exclusión lo que implica establecer parámetros claros que definan qué tipo de información se incluirá o se excluirá en la investigación. Los criterios de inclusión permiten seleccionar fuentes relevantes y específicas, mientras que los criterios de exclusión ayudan a filtrar aquellos datos que no aportan valor o no son pertinentes al tema de estudio. Análogamente, la formulación de la ecuación de búsqueda canónica: Se refiere a la creación de una estructura precisa y sistemática mediante el uso de operadores booleanos (AND, OR, NOT) y palabras clave. Esta ecuación permite realizar indagaciones más efectivas, asegurando que se obtengan resultados relevantes y específicos, ajustados al enfoque de la investigación.

2.1.3. Fase final o presentación y análisis de resultados

La fase final de una investigación es crucial para cerrar el proceso de recolección y análisis de datos, y para presentar los hallazgos de manera clara y crítica. Los elementos clave en esta fase son: la obtención de los datos e información lo que implica recopilar los datos relevantes según la estrategia de búsqueda definida previamente. La respuesta a la pregunta de la investigación empleando para ello los datos recolectados y analizados. La presentación de los resultados, cuyos hallazgos se organizan y presentan de forma comprensible, empleando tablas, gráficos. El análisis crítico de la investigación realizada en la cual se evalúa el proceso de investigación en su conjunto, observando posibles limitaciones e implicancias de este. Este análisis también puede incluir la comparación con investigaciones previas y presentación de fuentes bibliográficas.

2.2. El análisis documental

Se fundamenta en la revisión de los contenidos técnicos disponibles en línea, así como textos e informes elaborados por las universidades y empresas de la industria minera (Universidades chilenas, s.f.; Ministerio de Educación, s.f.; Consejo Minero, s.f.). Se abordaron temas relacionados con las competencias clave, planes de estudio y perfiles de egreso para la carrera ICM.

Además, se incorporaron los aportes de organismos vinculados al quehacer de la minería, cuyas entidades priorizan sus decisiones sustentadas en el análisis de necesidades específicas para la industria, principalmente lo referente a los perfiles de competencias (Consejo Minero, s.f.).

La formación de capital humano avanzado requiere la colaboración activa de las instituciones de educación superior (oferta académica) y de las compañías mineras (demanda de recursos humanos), con el propósito de avanzar hacia un desarrollo articulado, alineado y sostenible. Esta cooperación facilita anticipar acontecimientos futuros mediante la toma de decisiones respaldadas en información confiable, oportuna y precisa.

La Tabla 3, presenta el análisis documental, en el que se identificó la oferta académica de las universidades y los requerimientos de capital humano especializado declarado por las empresas mineras.

Tabla 3. Análisis documental.

Table 3. Documentary analysis.

Universidades Oferta académica	Empresas de la Minería Requerimientos de capital humano especializado
Planes de estudios Perfiles de egreso Competencias claves	Perfiles de competencias para cargos directivos

2.3. Indicaciones para el desarrollo curricular

Este enfoque abarca las dimensiones humana, tecnológica y ambiental, lo que permite identificar hallazgos relacionados con la malla curricular, perfil de egreso y las competencias clave. Además, las empresas mineras presentan exigencias específicas en cuanto a las competencias requeridas para su capital humano en roles directivos. En este contexto, las brechas emergen de la comparación entre el sistema educativo y los requerimientos del sector de la minería. Al analizar los hallazgos obtenidos y contrastarlos con el perfil profesional exigido por la industria, es posible clasificar las brechas en tres categorías: alta, media o baja (A, M o B). Este análisis no solo facilita una comparación más rigurosa con otras investigaciones relevantes, sino que también proporciona una visión integral y contextualizada del alineamiento entre la formación académica y las necesidades del sector productivo.

2.4. Procedimiento para el análisis documental y las directrices para el desarrollo curricular Secuencia de pasos y triangulación de datos.

1° Identificar las universidades que imparten la carrera de Ingeniería Civil de Minas (ICM) y que, además, cumplen con criterios basados en la calidad académica, investigación de vanguardia y vinculación con las empresas del sector minero, presentadas en la Tabla 5. En este análisis se consideraron los siguientes aspectos:

Calidad académica: Evaluada mediante la acreditación de los programas académicos otorgada por la Comisión Nacional de Acreditación.

Investigación: A través de la producción de publicaciones científicas y la implementación de proyectos de investigación (Universidades de chilenas, s.f.).

Vinculación con el medio: Se contemplan convenios con la Sociedad Nacional de Minería (SONAMI), la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO), Antofagasta Minerals, Anglo American y la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), este último está enfocado al financiamiento de proyectos de innovación.

2° Mostrar la información correspondiente a los planes de estudio (mallas curriculares), perfiles de egresos y competencias clave presentadas en la Tabla 5.

3° Incorporar la dimensión humana, tecnológica, y ambiental de la carrera de ICM, señalando el nivel alto (A), medio (M) o bajo (B), correspondiente a la existencia de los contenidos académicos mínimos fundamentales, lo que se ilustra en la Tabla 4.

4° Indicar el perfil de competencias requerido por las empresas del sector minero, con énfasis en las habilidades blandas, tecnológicas y enfoque en el desarrollo sostenible. Se presenta en Tabla 7.

5° Señalar el grado de integración de las tres dimensiones empleando la siguiente escala de evaluación, la que fluctúa entre 1 al 9, siendo 1,2 y 3 Insuficiente, 4 y 5 regular, 6 más que regular, 7 y 8 adecuado y 9 sobresaliente indicadas en las Tablas 4 y 6.

La incorporación de las tres dimensiones en la malla curricular tiene como objetivo lograr una formación de capital humano avanzado, que proporcione una base sólida para el desarrollo integral de las personas (Universidad de Chile, s.f.).

Tabla 4. Dimensión humana, tecnológica y desarrollo sostenible, grado de integración y hallazgos a detectar en la malla curricular, perfil de egreso y competencias clave.

Table 4. Human, technological and sustainable development dimension, degree of integration and findings to be detected in the curriculum, graduate profile and key competencies.

Humana A/M/B	Tecnológica A/M/B	Ambiental A/M/B	Integración Alta (A), Media (M), Baja (B) / Nivel 1 al 9	Hallazgos Malla curricular, perfil de egreso y competencias clave
A	A	A	9	Sobresaliente
A	A	M	8	Adecuado
A	A	B	7	Adecuado
A	M	M	6	Más que regular
A	M	B	5	Regular
M	M	M	4	Regular
M	M	B	3	Insuficiente
M	B	B	2	Insuficiente
B	B	B	1	Insuficiente

Tabla 5. Universidades, enlace a malla curricular, perfil de egreso y competencias clave.

Table 5. Universities, link to curriculum, graduate profile and key competencies.

Universidad	Enlace a Malla Curricular	Enlace a Perfil de Egreso	Enlace a Competencias Clave
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV)	Malla Curricular	Perfil Egreso	Competencias Clave
Universidad Católica del Norte (UCN)	Malla Curricular	Perfil Egreso	Competencias Clave
Universidad de Antofagasta (UA)	Malla Curricular	Perfil Egreso	Competencias Clave
Universidad de Atacama (UDA)	Malla Curricular	Perfil Egreso	Competencias Clave
Universidad de Chile (UCH)	Malla Curricular	Perfil Egreso	Competencias Clave
Universidad de Concepción (UdeC)	Malla Curricular	Perfil Egreso	Competencias Clave
Universidad de la Serena (ULS)	Malla Curricular	Perfil Egreso	Competencias Clave
Universidad de Santiago de Chile (USACH)	Malla Curricular	Perfil Egreso	Competencias Clave
Universidad Técnica Federico Santa María (USM)	Malla Curricular	Perfil Egreso	Competencias Clave

Tabla 6. Universidades, dimensión humana, tecnológica, ambiental, nivel de integración, hallazgos detectados en malla curricular, perfil de egreso y competencias clave.**Table 6.** Universities, human, technological and environmental dimensions, level of integration, findings detected in the curriculum, graduate profile and key competencies.

Universidad	Dimensiones humana, tecnológica y ambiental			Nivel de Integración H-T-A (1 al 9)	Hallazgos detectados en la malla curricular, perfil de egreso y competencias clave
	Humana (H) A / M / B	Tecnológica (T) A / M / B	Ambiental (A) A / M / B		
PUCV	Alta	Media	Media	6	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, Minería 4.0, Inteligencia artificial, Big Data, análisis predictivo, cambio climático. - Perfil de egreso: Nivel de alineamiento más que regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
UCN	Media	Media	Media	4	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, Minería 4.0, Inteligencia artificial, Big Data, análisis predictivo, cambio climático, energías renovables, minería circular. - Asignaturas tales como electivo profesional (8) y de formación general (4) no precisa el área temática a desarrollar. - Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
UA	Media	Media	Alta	6	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, Minería 4.0, Inteligencia artificial, Big Data, análisis predictivo, cambio climático, energías renovables y otras. - Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento más que regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
UDA	Media	Media	Media	4	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, Minería 4.0, Inteligencia artificial, Big Data, análisis predictivo, cambio climático, energías renovables, minería circular. - Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
UCH	Media	Alta	Alta	8	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, Inteligencia artificial (IA), cambio climático. - Perfil de Egreso: Nivel adecuado de alineamiento entre las necesidades de la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
UdeC	Media	Alta	Media	6	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, Inteligencia artificial, análisis predictivo, cambio climático, energías renovables y otras. - Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento más que regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
ULS	Media	Media	Media	4	Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, Minería 4.0, Inteligencia artificial, Big Data, análisis predictivo, cambio climático, energías renovables, minería circular.

Universidad	Dimensiones humana, tecnológica y ambiental			Nivel de Integración H-T-A (1 al 9)	Hallazgos detectados en la malla curricular, perfil de egreso y competencias clave
	Humana (H) A / M / B	Tecnológica (T) A / M / B	Ambiental (A) A / M / B		
					Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
USACH	Baja	Alta	Alta	7	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, manejo de conflictos, inteligencia artificial, cambio climático. - Perfil de Egreso: Existe un nivel adecuado de alineación entre las necesidades de la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
USM	Media	Alta	Media	6	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, resiliencia, manejo de conflictos, cambio climático, energías renovables. - Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento más que regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico

Tabla 7. Universidades, hallazgos detectados, perfil de competencias y brechas existentes.**Table 7.** Universities, detected findings, competency profile and existing gaps.

Universidad	Dimensiones humana, tecnológica y ambiental			Nivel de Integración H-T-A (1 al 9)	Hallazgos detectados en la malla curricular, perfil de egreso y competencias clave
	Humana (H) A / M / B	Tecnológica (T) A / M / B	Ambiental (A) A / M / B		
PUCV	Alta	Media	Media	6	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, Minería 4.0, Inteligencia artificial, Big Data, análisis predictivo, cambio climático. - Perfil de egreso: Nivel de alineamiento más que regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
UCN	Media	Media	Media	4	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, Minería 4.0, Inteligencia artificial, Big Data, análisis predictivo, cambio climático, energías renovables, minería circular. Asignaturas tales como electivo profesional(8) y de formación general (4) no precisa el área temática a desarrollar. - Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.

Universidad	Dimensiones humana, tecnológica y ambiental			Nivel de Integración H-T-A (1 al 9)	Hallazgos detectados en la malla curricular, perfil de egreso y competencias clave
	Humana (H) A / M / B	Tecnológica (T) A / M / B	Ambiental (A) A / M / B		
UA	Media	Media	Alta	6	• Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, Minería 4.0, Inteligencia artificial, Big Data, análisis predictivo, cambio climático, energías renovables y otras. • Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento más que regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
UDA	Media	Media	Media	4	• Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, Minería 4.0, Inteligencia artificial, Big Data, análisis predictivo, cambio climático, energías renovables, minería circular. • Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
UCH	Media	Alta	Alta	8	• Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, Inteligencia artificial (IA), cambio climático. • Perfil de Egreso: Nivel adecuado de alineamiento entre las necesidades de la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
UdeC	Media	Alta	Media	6	• Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, Inteligencia artificial, análisis predictivo, cambio climático, energías renovables y otras. • Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento más que regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
ULS	Media	Media	Media	4	• Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, Minería 4.0, Inteligencia artificial, Big Data, análisis predictivo, cambio climático, energías renovables, minería circular.

Universidad	Dimensiones humana, tecnológica y ambiental			Nivel de Integración H-T-A (1 al 9)	Hallazgos detectados en la malla curricular, perfil de egreso y competencias clave
	Humana (H) A / M / B	Tecnológica (T) A / M / B	Ambiental (A) A / M / B		
					Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
USACH	Baja	Alta	Alta	7	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, manejo de conflictos, inteligencia artificial, cambio climático. - Perfil de Egreso: Existe un nivel adecuado de alineación entre las necesidades de la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico.
USM	Media	Alta	Media	6	- Malla curricular: Ausencia de asignaturas tales como pensamiento crítico, visión prospectiva, resiliencia, manejo de conflictos, cambio climático, energías renovables. - Perfil de Egreso: Nivel de alineamiento más que regular entre las necesidades formuladas por la industria minera y las competencias desarrolladas en el ámbito académico

La justificación de utilizar una escala de evaluación del 1 al 9 está basada en varias razones fundamentales: en primer lugar, esta escala se ajusta a los estándares comúnmente empleados en las universidades chilenas; en segundo lugar, facilita la comparación entre proyectos; además, proporciona mayor claridad en la definición de las categorías de evaluación; contribuye a una mayor precisión en el proceso de calificación y, finalmente facilita una retroalimentación más detallada y constructiva.

6° Identificar las brechas existentes entre la oferta académica universitaria y los requerimientos formulados por la industria de la minería, cuyos hallazgos se basan en el grado de integración de las tres dimensiones, malla curricular y perfil de egreso. Las brechas se clasifican en alta (A), media (M) o baja (B). Tabla 4.

La brecha alta (A), corresponde a un bajo grado de integración, ausencia de contenidos fundamentales en la malla curricular, perfil de egreso y competencias claves no reflejan las exigencias de la industria. La brecha media (M), es aquella con grado intermedio de integración, contempla contenidos fundamentales en la malla curricular, perfil de egreso y competencias claves reflejan de manera parcial los requerimientos de la industria de la minería y la brecha baja (B), se caracteriza por un alto grado de integración, donde la mayoría de los contenidos claves están presentes en la malla curricular, perfil de egreso y competencias lo cual refleja lo exigido por las empresas del sector de la minería.

La Tabla 4 presenta la metodología empleada al incorporar las dimensiones humana, tecnológica y ambiental, el nivel de integración alcanzado y los hallazgos clave identificados para la carrera de ICM de las universidades chilenas, en tanto la Figura 1 presenta un diagrama de flujo que ilustra la relación entre la oferta académica y la demanda del sector empresarial, lo que permite identificar de manera clara las brechas existentes.

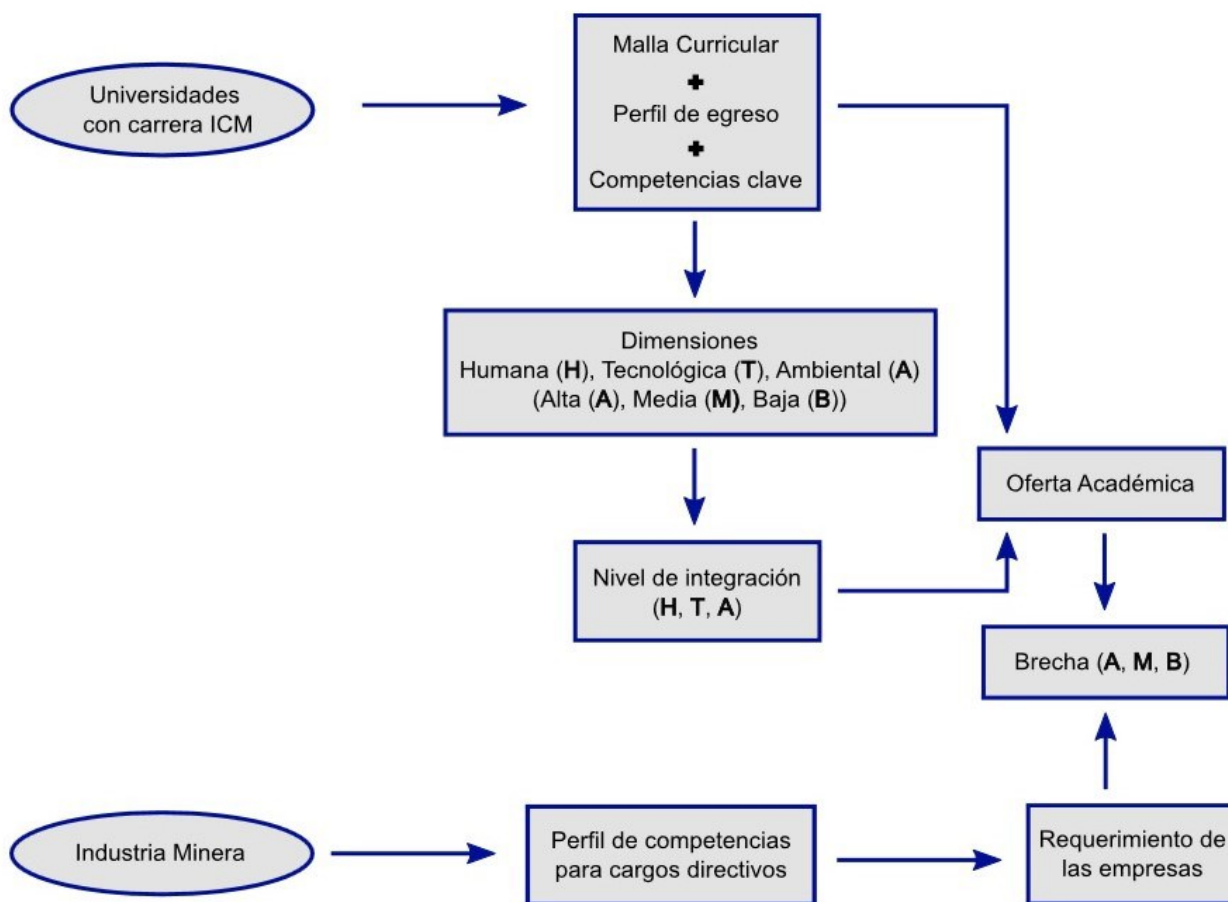


Figura 1. Diagrama de flujo en la identificación de brecha dada la oferta académica y los requerimientos formulados por las empresas mineras.

Figure 1. Flow chart in the identification of the gap between the academic offer and the requirements formulated by the mining companies.

Los materiales utilizados en este estudio incluyen bases de datos digitales Web of Science (WoS) y Scopus, sitios en Internet de las universidades chilenas (contenidos), Consejo Minero, y CODELCO.

3. Resultados

3.1. Principales hallazgos

3.1.1. Selección de artículos científicos

Para el análisis de este estudio, se incluyeron 19 artículos académicos, de los cuales 10 fueron publicados en revistas indexadas en Scopus y 9 en Web of Science.

A nivel internacional se destacan tres artículos, en el primero los autores investigaron el Modelo de Innovación Educativa Basado en la Evidencia Vinculado a la Competencia en Información Digital en el Contexto de la Educación 4.0, centrando su análisis en la relación entre las competencias digitales percibidas por los docentes universitarios y la adopción de prácticas innovadoras fundamentadas en evidencia. Los resultados evidencian que las competencias digitales son determinantes en la implementación de enfoques innovadores (Sarango-Lapo *et al.*, 2021). Asimismo, en el segundo estudio titulado Análisis de los Roles y la Demanda de Competencias para la Digitalización en la Era del Petróleo y Gas 4.0 examina la lenta adopción de tecnologías digitales en la industria del petróleo y

gas, subrayando la carencia de una fuerza laboral capacitada en estas tecnologías y en la sostenibilidad. Se exploran las oportunidades laborales emergentes y los roles digitales, destacando las competencias esenciales. Los resultados proporcionan una referencia crucial para comprender la demanda digital y las habilidades requeridas en este sector en transformación. Por otro lado, en la tercera investigación titulada Competencia Central: Un Factor Clave para un Modelo de Desarrollo Sostenible, Innovador y Resiliente Basado en la Industria 5.0 destaca la relevancia de las competencias básicas para facilitar la transición hacia la Industria 5.0 en el ámbito laboral. Se sugiere como estrategia esencial la preparación de recursos humanos para reducir la brecha entre la formación académica y las demandas del mercado (Suciu *et al.*, 2023).

3.1.2. Nivel de integración de las dimensiones humana, tecnológica y ambiental

La Universidad de Chile (UCH) y la Universidad de Santiago de Chile (USACH) sobresalen con un nivel de integración adecuado, alcanzando valores de 8 y 7 respectivamente. Las casas de estudios superiores Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Universidad de Antofagasta (UA), Universidad de Concepción (UdeC) y la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) presentan un nivel de integración más que regular con una valoración de 6 y por último, la Universidad Católica del Norte (UCN), Universidad de Atacama (UDA) y la Universidad de La Serena muestran un regular nivel de integración en las dimensiones humana, tecnológica y ambiental, cuyo valor es de 4. El gráfico 1 presenta los niveles de integración correspondientes a las dimensiones humana, tecnológica y ambiental de cada universidad.



Gráfico 1. Nivel de Integración dimensiones humana, tecnológica y ambiental.

Graph 1. Level of integration of human, technological and environmental dimensions.

3.1.3. Identificación de brechas

Esta se refiere a la disparidad entre la oferta académica y la demanda del sector empresarial. La Universidad de Chile y la Universidad de Santiago de Chile evidencian una brecha pequeña. En cambio, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, la Universidad de Antofagasta, la Universidad de Concepción y la Universidad Técnica Federico Santa María presentan brechas de nivel intermedio. Por último, la Universidad Católica del Norte, la Universidad de Atacama y la Universidad de La Serena exhiben las brechas más significativas. El gráfico 2 ilustra el número de universidades que presenta brecha alta, baja o media.

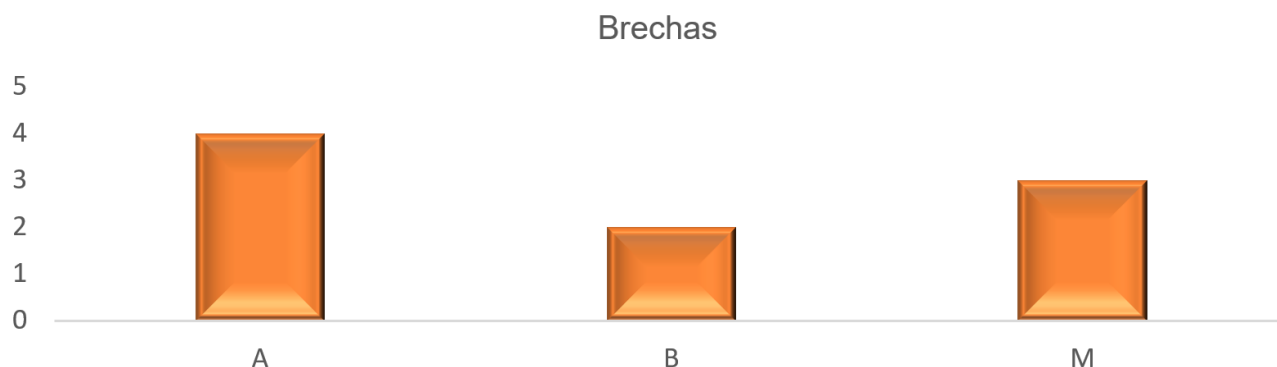


Gráfico 2. Número de universidades que presenta brechas alta, baja o media.

Graph 2. Number of universities with high, low and medium gaps.

3.1.4. Formación de capital humano avanzado para la minería digital y sostenible del futuro

En términos de avances en relación con el objeto de estudio, las universidades se clasifican de la siguiente manera, de mayor a menor relevancia: 1° Universidad de Chile, 2° Universidad de Santiago de Chile, 3° lugar, compartido por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Universidad de Antofagasta, Universidad de Concepción y Universidad Técnica Federico Santa María, y 4° lugar, que corresponde a la Universidad Católica del Norte, Universidad de Atacama y Universidad de La Serena.

3.2. Presentación de resultados

Para la recolección de datos se emplearon diversas metodologías, incluyendo la Revisión Sistemática de la Literatura (RSL), el análisis documental y las directrices para el desarrollo curricular. Esta combinación de técnicas permitió realizar una triangulación de datos, lo que robusteció la validez y confiabilidad de los hallazgos obtenidos. En primer lugar, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la oferta educativa universitaria para la carrera de Ingeniería Civil en Minas (ICM), mediante la revisión detallada de los programas académicos, el perfil de egreso y las competencias clave definidas por las universidades, cuyas referencias se presentan en la Tabla 5. Esta evaluación proporcionó una visión integral de los contenidos formativos y las habilidades que los egresados de dichas instituciones deberían poseer. Además, se incluyó un análisis de los requerimientos específicos de la industria minera, con un enfoque particular en la identificación de competencias relacionadas con las habilidades blandas, conocimientos tecnológicos y un enfoque creciente hacia la sostenibilidad ilustradas en la Tabla 7.

La Tabla 6 ofrece un análisis detallado de las dimensiones humana, tecnológica y ambiental, así como de los niveles de integración correspondientes. Los resultados obtenidos reflejan los enfoques adoptados por las instituciones de educación superior en relación con los contenidos académicos, el perfil de egreso y las competencias esenciales para formar profesionales en el ámbito minero.

En particular, en la dimensión humana se destaca el desarrollo de habilidades clave como el liderazgo, el pensamiento crítico, la ética profesional. Estas capacidades son fundamentales no solo para desempeñarse en aspectos técnicos de la profesión, sino también para gestionar equipos y operar en contextos organizacionales cada vez más complejos. El liderazgo, en particular, permite a los futuros egresados influir de manera positiva en su entorno laboral.

En tanto, la dimensión tecnológica enfatiza la necesidad de adquirir conocimientos profundos sobre herramientas y tecnologías emergentes, las cuales son esenciales para enfrentar los desafíos del sector minero contemporáneo. La continua evolución tecnológica en la minería exige que los profesionales estén preparados para utilizar innovaciones que optimicen procesos, mejoren la productividad y mantengan la competitividad de las empresas en el mercado. Esto abarca desde el

uso de software avanzado hasta la implementación de sistemas automatizados y la integración de soluciones tecnológicas en la gestión de recursos.

Así pues, la dimensión ambiental, se resalta la incorporación de principios de sostenibilidad en los planes de estudio, con un énfasis particular en la conciencia sobre el impacto ecológico derivado de las acciones profesionales. Dado el creciente enfoque en la responsabilidad ambiental en la minería, los egresados deben ser capaces de aplicar estrategias que reduzcan el daño ecológico, promuevan la eficiencia en el uso de los recursos y garanticen el cumplimiento de normativas ambientales. La formación en esta área no solo aborda aspectos técnicos, sino que también fomenta una mentalidad orientada al cuidado del medio ambiente en todas las intervenciones profesionales.

La Tabla 7 resalta tres aspectos clave: en primer lugar, los hallazgos relativos a la malla curricular (asignaturas) y el perfil de egreso de la carrera de ICM; en segundo lugar, el perfil de competencias para cargos directivos definido por la industria minera; y, finalmente, las brechas identificadas entre el sistema educativo y las necesidades del sector, clasificadas en niveles alto, medio o bajo. La inclusión de asignaturas clave en el plan de estudios y la alineación del perfil de egreso con las competencias requeridas se valoran como adecuadas cuando la mayoría de los contenidos solicitados por las empresas están presentes. En los casos donde algunos contenidos faltan, se clasifica como más que regular, y si la ausencia es considerable, se califica como regular.

4. Discusión de resultados

Los hallazgos de este estudio se fundamentan en las siguientes fuentes de información: literatura especializada publicada en revistas indexadas en las plataformas WoS y Scopus, documentación accesible en los sitios web de las universidades chilenas que ofrecen la carrera de Ingeniería Civil de Minas (ICM), el Consejo Minero (Consejo Minero, s.f.), organización que agrupa a las 20 empresas socias de la gran minería, y documentos técnicos vinculados al objeto de investigación.

4.1. Síntesis de los hallazgos detectados

4.1.1. Publicaciones científicas

El número de publicaciones científicas vinculadas al objeto de estudio es limitado, con 19 artículos. Estas investigaciones no abordan de manera integral las dimensiones humana, tecnológica y ambiental; en su lugar, se centran principalmente en aspectos aislados, como la educación profesional y el ámbito tecnológico (Pasko *et al.*, 2022; Suciú *et al.*, 2023; Sarango-Lapo *et al.*, 2021; Georgiou *et al.*, 2021). Una posible explicación para esta situación podría ser la desconexión existente entre las instituciones académicas y las empresas, lo que obstaculiza la adopción de estándares de calidad adecuados en la educación. Este desfase también dificulta la capacidad de responder a los desafíos de largo plazo en contextos caracterizados por alta complejidad y constantes cambios de diversa naturaleza.

4.1.2. Determinación de brechas

Las brechas identificadas en las universidades abordan tres materias de alta relevancia: las dimensiones humana, tecnológica y ambiental, por un lado, y, por otro, la estructura curricular y el perfil de egreso. Estos hallazgos sugieren la necesidad de incorporar contenidos vinculados al pensamiento crítico, la visión prospectiva, la capacidad de innovación, la Minería 4.0, la inteligencia artificial, el big data, la responsabilidad social empresarial, la gestión ambiental y el cambio climático, destacando al menos tres materias representativas de cada una de las dimensiones. Es fundamental que estos temas sean incluidos en los programas de estudio. En el caso de la Universidad de Chile y la Universidad de Santiago de Chile, las brechas observadas son mínimas y se relacionan principalmente con el grado de integración de estos enfoques.

El Gráfico 2 ilustra el número de universidades con nivel de brecha menor (UCH, USACH), brecha media (PUCV, UdeC y UTFS) y brecha alta (UCN, UA, UDA y Universidad de la Serena).

4.1.3. Formación de capital humano avanzado

Los datos recopilados y posteriormente analizados de las nueve universidades que imparten la carrera de Ingeniería Civil de Minas revelan aspectos fundamentales a destacar, en particular, algunas instituciones evidencian una considerable discrepancia entre los contenidos académicos y las exigencias del sector de la minería, además de una débil integración de los aspectos humanos, tecnológicos y ambientales. Este desajuste, sumado a perfiles de egreso que no responden completamente a las competencias solicitadas por las empresas, sugiere que estas casas de estudios superiores están alejadas de cumplir con los estándares necesarios para formar capital humano avanzado (casas de estudios superiores con brechas de nivel medio y bajo).

En particular, el papel de las universidades en la formación de profesionales con estas capacidades es determinante. Estos resultados coinciden con la identificación de desafíos persistentes en la creación de capital humano avanzado, lo que destaca la necesidad urgente de superar estas barreras para ofrecer una respuesta efectiva a la cuestión planteada en la investigación.

Los resultados obtenidos son consistentes en lo referido a la formación de capital humano avanzado el cual sigue enfrentando desafíos importantes, lo que resalta el imperativo de abordar estas limitaciones para proporcionar una respuesta adecuada a la pregunta de investigación.

4.2. Pregunta de investigación

¿Cuáles son los contenidos clave que las universidades chilenas deben incorporar en las mallas curriculares para la formación de capital humano avanzado en la carrera de Ingeniería Civil de Minas (ICM), orientados a satisfacer las demandas de las empresas líderes en la Minería 4.0?

Si bien, en habilidades blandas se destacan el pensamiento crítico, visión prospectiva, capacidad de innovación, adaptabilidad, resiliencia, trabajo en equipo, liderazgo, inteligencia emocional, conducta ética, manejo de conflictos (Oportus, 2022).

Aun así, las cualificaciones tecnológicas contemplan la Minería 4.0, la inteligencia artificial, el análisis predictivo, el análisis de grandes volúmenes de datos, la transformación digital, la robótica, la computación en la nube, la cadena de bloques, la ciberseguridad (Society of Mining Professors, 2019).

Aunque, el enfoque en la sostenibilidad incluye la responsabilidad social empresarial (RSE), gestión ambiental, cambio climático, economía circular, eficiencia energética, energías renovables, evaluación del impacto ambiental (Podgórska, 2022; SOMP, 2019).

4.3. Importancia e implicancia del estudio

La literatura científica subraya la importancia de contar con recursos humanos altamente capacitados para liderar la Minería 4.0, con énfasis en la formación del recurso humano, la disrupción tecnológica y la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, se identifica una notable carencia de estudios que examinen en profundidad a las universidades que imparten la carrera de Ingeniería Civil de Minas, un aspecto fundamental para garantizar que la educación esté alineada con las crecientes demandas y desafíos del sector minero. Esta falta de análisis representa una brecha crítica, ya que una formación adecuada es esencial para impulsar la innovación y el desarrollo sostenible en la industria minera.

Las implicaciones teóricas y prácticas de este estudio son de gran relevancia, dado que contar con capital humano avanzado permite a las empresas del sector anticiparse a los cambios tecnológicos y adaptarse a los nuevos desafíos. Además, facilita mejorar los estándares de seguridad, productividad y excelencia operacional. La adecuada formación de los profesionales es, por tanto, un factor clave para el éxito y la competitividad de la industria minera.

4.4. Restricciones y limitaciones del estudio

Restricciones del alcance: La investigación se enfoca en las universidades chilenas que imparten la carrera de Ingeniería Civil de Minas, centrada en las regulaciones de Chile.

Restricciones en el contenido: La investigación está centrada exclusivamente en los contenidos fundamentales de los planes de estudio de la carrera de ICM. Esto significa que aspectos ligados a la infraestructura académica y la calificación del profesorado no forman parte del análisis.

La limitación importante de este trabajo es la escasa cantidad de publicaciones científicas centradas en el objeto de estudio, lo que subraya la falta de investigación en este campo, con solo 19 artículos científicos en el ámbito de estudio.

Adicionalmente, otra limitante es la falta de actualización de los planes y programas académicos, los cuales son fundamentales para satisfacer las crecientes demandas presentes y futuras de un capital humano altamente especializado, requerido por las empresas mineras.

4.5. Dificultades encontradas

La principal dificultad en este estudio fue la limitada disponibilidad de información científica sobre la preparación de capital humano avanzado en Ingeniería Civil de Minas. La falta de fuentes actualizadas y homogéneas dificultó la realización de un análisis comparativo a nivel nacional e internacional sobre los avances y retrocesos en la alineación de los planes de estudio con las necesidades de la industria minera.

Por otra parte, los resultados obtenidos de esta investigación muestran que existen importantes brechas entre los contenidos curriculares actuales de la carrera de Ingeniería Civil de Minas (ICM) y las competencias requeridas por la industria minera, especialmente en el contexto de la Minería 4.0 (Oportus, 2022). Estos hallazgos son consistentes con estudios previos (Consejo Minero, s.f.) que señalan la falta de actualización en los planes de estudio de la carrera ICM en relación con las demandas cambiantes del sector productivo. La industria minera, en particular, está experimentando una transformación profunda debido a la digitalización, la automatización y la sostenibilidad, lo que requiere que los egresados de ICM estén mejor preparados para enfrentar estos desafíos.

4.6. Comparación con estándares internacionales

Con relación a los estándares internacionales establecidos por organismos con relación a la formación de capital humano avanzado algunas indicaciones son citadas en el International Council on Mining and Metals (ICMM) que define los principios sobre el desarrollo sostenible, la responsabilidad social y la mejora de la seguridad en las operaciones mineras. El Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME) proporciona guías sobre las mejores prácticas en minería, desde la ingeniería geotécnica hasta la gestión de la producción y la American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (AIME) establece principios de formación profesional en áreas técnicas específicas de la minería.

4.6.1. Oferta académica

La formación en minería para las carreras de pregrado abarca áreas clave como ingeniería de minas, geología, metalurgia, gestión de recursos naturales y sostenibilidad ambiental, a través de currículos multidisciplinarios. Universidades como el MIT, la Universidad de Queensland y la Universidad de Chile ofrecen programas que integran teoría y práctica. Los estudiantes adquieren conocimientos en geología, mecánica de rocas, sustentabilidad ambiental, habilidades blandas y tecnologías avanzadas en automatización minera. Además, participan en prácticas profesionales en las operaciones mineras y en proyectos de investigación aplicada, lo que les permite desarrollar competencias en equipos mineros, análisis de recursos y diseño de sistemas de extracción. Ante la creciente importancia de la sostenibilidad, numerosas universidades incorporan programas enfocados en minería responsable, gestión ambiental y el desarrollo de comunidades cercanas a las operaciones mineras.

4.6.2. Requisitos de las empresas vinculadas al sector de la minería

Las empresas mineras globales demandan profesionales con formación avanzada tanto técnica como en la gestión de los recursos. Los egresados deben contar con sólidos conocimientos en matemáticas, física y geología, así como en el manejo de software especializado (modelado geológico, simulación de minas, etc.). Además, buscan personas que conozcan las tecnologías emergentes, como la automatización minera, drones para el monitoreo de procesos e inteligencia artificial para optimizar producción y seguridad. Las habilidades de gestión y liderazgo son esenciales, incluyendo la capacidad para dirigir proyectos, liderar equipos multidisciplinarios y garantizar la seguridad laboral.

4.7. Validez de los hallazgos

Los resultados obtenidos evidencian, a través de los planes de estudios, los perfiles de egreso, las competencias definidas y los requerimientos de las empresas, la existencia de brechas significativas en las dimensiones humanas, tecnológicas y ambientales. Estos datos presentados en las Tablas 6 y 7 es el mecanismo empleado en muchas ocasiones por las casas de estudios superiores precisamente para detectar su actual nivel de oferta académica y son de enorme validez dado a que les permite saber si situación actual con relación al estado futuro al que se debería llegar teniendo presente el contexto caracterizado por la disrupción tecnológica, la pérdida de la biodiversidad y la necesidad de formar personas con un alto grado de especialización. Estos hallazgos resaltan la necesidad de una transformación curricular profunda y adaptada a las demandas del sector.

5. Conclusiones

En consecuencia, el estudio responde a la pregunta de investigación y cumple con los objetivos planteados, al mismo tiempo abre nuevas rutas para la exploración de temáticas vinculadas al objeto de estudio. Esta visión prospectiva es una clara invitación a mirar más allá de los enfoques tradicionales y a anticipar, imaginar y crear estrategias audaces e innovadoras en esta línea de investigación.

La conclusión más significativa de este estudio evidencia brechas notorias entre la formación académica y las demandas reales del sector minero-industrial. Esto subraya la urgencia de actualizar los actuales planes de estudio, incorporando contenidos de vanguardia que marque la diferencia en la formación minera y su vez definir competencias que estén alineadas a las tendencias globales y la minería del futuro (Oportus, 2022).

En efecto, la relevancia de las tecnologías disruptivas como inteligencia artificial, robótica, computación cuántica e Internet de las Cosas (IoT) radica en su papel decisivo para transformar la minería, mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la seguridad. Por ello, es clave integrar asignaturas que fomenten pensamiento crítico, conciencia social sobre la emergencia climática y gestión de energías alternativas. Implementar acciones orientadas a formar profesionales capaces de liderar una minería digital y sostenible, preparados para tomar decisiones difíciles y de alto riesgo, resulta esencial para garantizar el desarrollo del sector y su contribución al progreso social y ambiental.

No obstante, en la literatura científica destaca al autor Lund *et al.* (2024) quienes analizan el impacto de Minería 4.0 en entornos laborales, competencias y organización, señalando carencias en lo social, ético y cultural. En tanto, Ali *et al.* (2025) revisan tecnologías disruptivas, su aporte a la eficiencia y sostenibilidad, y limitaciones en materia de costos, regulación y habilidades humanas. Por otra parte, Rosas Quintero & Namuche Maldonado (2024) identifican competencias clave para ingenieros, pero sin estrategias pedagógicas integrales. En efecto, Rosas Quintero (2022) enfatiza la necesidad de habilidades digitales actualizadas en ingeniería. Es preciso destacar a Caitlin & Svetlana (2024) quienes reflexionan sobre la IA en minería, considerando las dimensiones humanas, tecnológicas y ambientales. Este último, es el único autor que aborda de manera integral las tres dimensiones.

Al mismo tiempo, las instituciones de educación superior tienen la oportunidad histórica para transformar sus currículos y perfiles de egreso, asegurando que confluyan directrices educativas de excelencia y las necesidades de la industria. Este cambio no solo actualiza el modelo educativo

tradicionalmente conocido y centrado en técnicas muchas de ellas desactualizadas, sino que más bien se debe potenciar la creatividad en el desarrollo de competencias digitales, ambientales y habilidades interpersonales, complementando la formación técnica (Ministerio de Educación, s.f.; Society of Mining Professors, 2019). Dichas propuestas deben adoptar una mirada holística, prospectiva, resiliente y sustentable (HPRS) en contextos marcados por la turbulencia, complejidad, volatilidad y cambio exponencial (TCVC) (Oportus, 2022).

Finalmente, se recomienda avanzar en este tipo de investigaciones científicas dada la trascendencia e implicancias de estudios de esta naturaleza para la academia, la industria y las instituciones públicas. Es más, resulta necesario establecer alianzas estratégicas entre estas instituciones y el sector productivo, con el fin de disponer de capital humano avanzado que contribuya al desarrollo de las personas y de la industria.

Agradecimientos

Expresamos nuestro profundo agradecimiento a la Dra. Paola Quiñones Arias, a la Srta. Karen Oportus Quiñones y al Sr. Ignacio Oportus Quiñones, quienes han sido una fuente constante de energía, inspiración, afecto y superación personal. Asimismo, reconocemos el valioso aporte de la Sra. Raquel Miranda y del Sr. Lucas Ossandón, ambos profesionales de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Authorship contribution statement

Patricio Oportus Romero: Investigation, Methodology, Validation, Writing – original draft.

Fernando González-Ladrón-de-Guevara: Investigation, Methodology, Validation, Writing – original draft.

Referencias

- Ali, M.A., Mohammed Ali, M.I., & Osman, A.A. (2025). AI-Driven Mining 4.0: A Systematic Review of Smart, Sustainable, and Autonomous Technologies across the Mining Lifecycle. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 44(6), 125-139. <https://doi.org/10.9734/cjast/2025/v44i64564>
- Azhari, F., Sennersten, C.C., Lindley, C. A., & Sellers, E. (2023). Deep learning implementations in mining applications: a compact critical review. *Artificial Intelligence Review*, 56, 14367-14402. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10500-9>
- Caitlin, C., & Svetlana, A. (2024). A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization. *The Extractive Industries and Society*, 17, Article 101440. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440>
- Consejo Minero (s.f.). www.consejominero.cl
- Kitchenham, B.A., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering* (EBSE Technical Report EBSE-2007-01). Keele University & Durham University. https://www.elsevier.com/_data/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf
- Kwiotkowska, A., Wolniak, R., Gajdzik, B., & Gebczynska, M. (2022). Configurational Paths of Leadership Competency Shortages and 4.0 Leadership Effectiveness: An fs/QCA Study. *Sustainability*, Vol. 14, 2795. <https://doi.org/10.3390/su14052795>
- Lund, E., Pekkari, A., Johansson, J., & Löw, J. (2024). Mining 4.0 and its effects on work environment, competence, organisation and society – a scoping review. *Mineral Economics*, 37(4), 827-840. <https://doi.org/10.1007/s13563-024-00427-0>
- Mahamud-López, M., & Menéndez-Aguado, J. (2005). Environmental engineering in mining engineering education. *European Journal of Engineering Education*, 30, 50-55. <https://doi.org/10.1080/03043790500114490>
- Marfán, M., & Meller, P. (2019). Estrategia 4.0: Diseñando el futuro de Chile. Consejo Minero, pp.11-34. <https://consejominero.cl/>

- Martins, P., & Soofastaei, A. (2020). Future skills requirements: Data analytics applied to the mining industry, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1201/9780429433368-10>
- Matheri, A.N., Mohamed, B., Ntuli, F., Nabadda, E., & Ngila, J.C. (2022). Sustainable circularity and intelligent data-driven operations and control of the wastewater treatment plant. *Physics and Chemistry of the Earth*, 126, Article. 103152.
- Ministerio de Educación (s.f.). <https://mineduc.cl>
- Oportus, P. (2022). Tendencias globales y la minería del futuro: Minería 4.0. Editorial Académica Española, pp-37-54. <https://www.morebooks.de/shop-ui/shop/product/9783659654565>
- Pasko, L., Madziel, M., Stadnicka, D., Dec, G., Carreras-Coch, A., Solé-Beteta, X., Pappa, L., Stylios, C., Mazzei, D., & Atzeni, D. (2022). Plan and Develop Advanced Knowledge and Skills for Future Industrial Employees in the Field of Artificial Intelligence, Internet of Things and Edge Computing. *Sustainability*, 14(6), 3312. <https://doi.org/10.3390/su14063312>
- Podgórska, M. (2022). Challenges and perspectives in innovative projects focused on sustainable Industry 4.0—a case study on Polish project teams. *Sustainability*, 14(9), 5334. <https://doi.org/10.3390/su14095334>
- PUCV (s.f.). Plan de estudios y perfil de egreso carrera de Ingeniería Civil de Minas. <https://www.pucv.cl/pucv/pregrado/ingenieria-civil-de-minas>
- Rosas Quintero, W., & Namuche Maldonado, J.E. (2024). Competencies of the engineer in Industry 4.0 context: a systematic literature review. *Production*, 34, e20230051. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20230051>
- Rosas Quintero, W. (2022). Digital competences of the industrial engineer in Industry 4.0: a systematic vision. *Production*, 32, e20220028. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20220028>
- Sarango-Lapo, C.P., Mena, J., & Ramírez-Montoya, M.S. (2021). Evidence-Based Educational Innovation Model Linked to Digital Information Competence in the Framework of Education 4.0. *Sustainability*, Vol. 13, 1-17. <https://doi.org/10.3390/su131810034>
- Schlezak, S., & Styer, J. (2023). Inclusive urban mining: An opportunity for engineering education. *Mining*, 3(2), 284-303. <https://doi.org/10.3390/mining3020018>
- Siddaway, A., Wood, A. & Hedges, L. (2019). How to do a systematic review: A best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses, *Annual Review of Psychology*, 70, 748-768. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>
- Sociedad Nacional de Minería (s.f.). Página principal. SONAMI. <https://www.sonami.cl/v2/>
- Society of Mining Professors (2019). Version 1.0, pp. 69-85. https://miningprofs.org/Media/Default/Page/2019_SOMP_Mines_of_The_Future_Major_Findings_Report_V1.0.pdf
- Society for Mining, Metallurgy & Exploration (s.f.). <https://www.smenet.org/>
- Schlezak, S., & Styer, J. (2023). Inclusive urban mining: An opportunity for engineering education. *Mining*. <https://doi.org/10.3390/mining3020018>
- Suciu, M., Plesea, D., Petre, A. Simion, A., Mituca, M., Dumitrescu, D., Bocaneala, A., Moroianu, R. & Nasulea, D. (2023), Core Competence-As a Key Factor for a Sustainable Innovative and Resilient Development Model Based on Industry 5.0. *Sustainability*, 15(9), 7472. <http://dx.doi.org/10.3390/su15097472>
- UA (s.f.). Plan de estudios y perfil de egreso de la carrera de Ingeniería Civil de Minas. <https://www.uantof.cl/wp-content/uploads/2022/01/Ing.-Civil-en-Minas-1.pdf>
<https://www.uantof.cl/carreras/ingenieria-civil-en-minas/>
- UDA (s.f.). Malla curricular y perfil de egreso de la carrera de Ingeniería Civil de Minas. <https://admision.uda.cl/index.php/ingenieria-civil-en-minas/>
- UCN (s.f.). Plan de estudios y perfil del egreso carrera de Ingeniería Civil Minas. <https://admision.ucn.cl/content/uploads/2020/12/malla-ingenieria-civil-de-minas.pdf>
<https://admision.ucn.cl/carreras/mineria/ingenieria-civil-de-minas/#perfil-egresado>
- UCH (s.f.). Plan de formación y perfil de egreso de la carrera de Ingeniería Civil de Minas. <https://ingenieria.uchile.cl/carreras/4977/ingenieria-civil-de-minas>
- UDEC (s.f.). Malla curricular y perfil de egreso carrera de Ingeniería Civil de Minas. <https://admision.udec.cl/ingenieria-civil-de-minas/> <https://fi.udec.cl/pregrado/ingenieria->

- Universidad de La Serena (s.f.). Malla curricular y perfil de egreso de la carrera de ICM.
http://admision.userena.cl/media/attachments/2023/10/26/25003_ingenieria_civil_de_minas.pdf
- USACH (s.f.). Malla curricular y perfil de egreso de la carrera ICM.
<https://admision.usach.cl/carreras/ingenieria-civil-en-minas>
- UTFSM (s.f.). Malla curricular y perfil del egresado de la carrera de Ingeniería Civil de Minas.
<https://usm.cl/admision/carreras/ingenieria-civil-de-minas/>
- Wood, A., Jara, J., Rodriguez, A., Rivera, A. (2021). Revolución Tecnológica en la Gran Minería de la Región Andina. GIZ, IGF, CESCO, pp.12-26. <https://cesco.cl/cesco-presenta-resultados-de-su-estudio-revolucion-tecnologica-en-la-gran-mineria-en-la-region-andina/>

APÉNDICE

REPOSITORIO DE DATOS

Universidad Técnica Federico Santa María

Dataverse

Repositorio FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable)

A continuación, le compartimos los accesos correspondientes:

 Acceso al Dataset Completo**Cita sugerida:**

Oportus, Patricio; González-Ladrón-de-Guevara, Fernando, 2025, "Formación de Capital Humano Avanzado para la Minería Digital y Sostenible del Futuro", <https://doi.org/10.82172/utfsm/SG1JRZ>, Repositorio de datos - UTFSM, V1 DOI: <https://doi.org/10.82172/utfsm/SG1JRZ>

Este es el DOI principal del conjunto de datos y es el que debe utilizar en el proceso de publicación de su artículo científico.

 DOIs Específicos por Archivo

Además, cada archivo cuenta con un DOI individual. Estos permiten referenciar partes específicas del dataset y pueden ser útiles para quienes deseen citar datos concretos de su investigación. Aunque no es obligatorio presentarlos ante la revista, los compartimos para su conocimiento:

- FICHERO 1:

Oportus, Patricio; González-Ladrón-de-Guevara, Fernando, 2025, "1. Repositorio, Figura, Gráficos, Tablas de Datos.docx", *Formación de Capital Humano Avanzado para la Minería Digital y Sostenible del Futuro*, <https://doi.org/10.82172/utfsm/SG1JRZ/J9PADM>, Repositorio de datos - UTFSM, V1

- FICHERO 2:

Oportus, Patricio; González-Ladrón-de-Guevara, Fernando, 2025, "2. Gráficos 1 y 2.tab", *Formación de Capital Humano Avanzado para la Minería Digital y Sostenible del Futuro*, <https://doi.org/10.82172/utfsm/SG1JRZ/GDXHIT>, Repositorio de datos - UTFSM, V1

- FICHERO 3:

Oportus, Patricio; González-Ladrón-de-Guevara, Fernando, 2025, "3.0. Modelo búsqueda artículos científicos.tab", *Formación de Capital Humano Avanzado para la Minería Digital y Sostenible del Futuro*, <https://doi.org/10.82172/utfsm/SG1JRZ/SCGS6T>, Repositorio de datos - UTFSM, V1

- FICHERO 4:

Oportus, Patricio; González-Ladrón-de-Guevara, Fernando, 2025, "3.1. WoS, Art. 4, Parte 1.xls", *Formación de Capital Humano Avanzado para la Minería Digital y Sostenible del Futuro*, <https://doi.org/10.82172/utfsm/SG1JRZ/UQYSAR>, Repositorio de datos - UTFSM, V1

- FICHERO 5:

Oportus, Patricio; González-Ladrón-de-Guevara, Fernando, 2025, "3.2. Scopus, Art 4, Parte 1.tab", *Formación de Capital Humano Avanzado para la Minería Digital y Sostenible del Futuro*, <https://doi.org/10.82172/utfsm/SG1JRZ/QXGRWL>, Repositorio de datos - UTFSM, V1

LICENCIA: CC-BY 4.0