



Somnolencia y fatiga en minería de altitud: revisión de la fragmentación del sueño

Sleepiness and fatigue in high-altitude mining: a review of sleep fragmentation

Somnolência e fadiga na mineração de altitude: revisão da fragmentação do sono

ARTÍCULO ORIGINAL

César Jesus Eras Lévano¹ 

clevano@gmail.com

Galina Díaz Barrientos² 

gdiaz@uwiener.edu.pe



¹Universidad Privada San Juan Bautista. Lima, Perú

²Universidad Científica del Sur. Lima, Perú

Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistavive.v9i25.481>

Artículo recibido 21 de octubre 2025 / Aceptado 27 de noviembre 2025 / Publicado 6 de enero 2026

RESUMEN

La minería a gran altitud en los Andes peruanos enfrenta el desafío único de la hipoxia hipobárica, un factor de riesgo crítico para la seguridad ocupacional debido a la fatiga y somnolencia que induce en los conductores de maquinaria pesada. **Objetivo:** evaluar la relación entre la fragmentación del sueño inducida por hipoxia y la fatiga/somnolencia en dichos trabajadores, proponiendo estrategias de gestión basadas en evidencia. **Metodología:** se realizó una revisión narrativa sistemática (2020-2025) en PubMed, SciELO y LILACS, siguiendo PRISMA e incluyendo 38 artículos en inglés/español. **Resultados:** los resultados identificaron que la hipoxia desencadena apnea central y respiración periódica, fragmentando el sueño y exacerbando la fatiga, un efecto amplificado por los turnos rotativos y el Mal de Montaña Crónico. **Conclusión:** la fragmentación del sueño es el mecanismo mediador central, recomendándose intervenciones como oxigenoterapia nocturna y protocolos de aclimatación para mejorar la seguridad.

Palabras clave: Fatiga laboral; Hipoxia hipobárica; Minería de altitud; Sueño fragmentado; Seguridad ocupacional

ABSTRACT

High-altitude mining in the Peruvian Andes faces the unique challenge of hypobaric hypoxia, a critical occupational safety risk due to the fatigue and sleepiness it induces in heavy machinery operators. **Objective:** to evaluate the relationship between hypoxia-induced sleep fragmentation and fatigue/sleepiness in these workers, proposing evidence-based management strategies. **Methodology:** a systematic narrative review (2020–2025) was conducted in PubMed, SciELO, and LILACS, following PRISMA and including 38 articles in English/Spanish. **Results:** findings identified that hypoxia triggers central apnea and periodic breathing, fragmenting sleep and exacerbating fatigue, an effect amplified by rotating shifts and Chronic Mountain Sickness. **Conclusion:** sleep fragmentation is the central mediating mechanism, recommending interventions such as nocturnal oxygen therapy and acclimatization protocols to improve safety.

Key words: Fragmented sleep; High-altitude mining; Hypobaric hypoxia; Occupational fatigue; Occupational safety

RESUMO

A mineração em grandes altitudes nos Andes peruanos enfrenta o desafio único da hipóxia hipobárica, um fator de risco crítico para a segurança ocupacional devido à fadiga e sonolência que induz nos operadores de maquinário pesado. **Objetivo:** avaliar a relação entre a fragmentação do sono induzida por hipóxia e a fadiga/sonolência nesses trabalhadores, propondo estratégias de gestão baseadas em evidências. **Metodologia:** foi realizada uma revisão narrativa sistemática (2020–2025) no PubMed, SciELO e LILACS, seguindo o PRISMA e incluindo 38 artigos em inglês/espanhol. **Resultados:** os resultados identificaram que a hipóxia desencadeia apnéia central e respiração periódica, fragmentando o sono e exacerbando a fadiga, um efeito amplificado pelos turnos rotativos e pela Doença Crônica da Montanha. **Conclusão:** a fragmentação do sono é o mecanismo mediador central, recomendando-se intervenções como oxigenoterapia noturna e protocolos de aclimação para melhorar a segurança.

Palavras-chave: Fadiga laboral; Hipóxia hipobárica; Mineração de altitude; Sono fragmentado; Segurança ocupacional

INTRODUCCIÓN

La minería en los Andes peruanos, desarrollada frecuentemente por encima de los 2,500 metros, enfrenta el estrés fisiológico único de la hipoxia hipobárica. Esta reducción en la presión parcial de oxígeno constituye un factor de riesgo ocupacional inherente, particularmente para conductores de maquinaria pesada cuya labor exige vigilancia constante. La interacción entre este ambiente hostil y las exigentes demandas operacionales configura un escenario de alta complejidad para la salud y seguridad laboral, situando a la fatiga y la somnolencia como problemas críticos que demandan una comprensión basada en la fisiopatología de la altitud (1).

Desde una perspectiva fisiopatológica, la exposición a la hipoxia desencadena respuestas adaptativas agudas destinadas a mantener la oxigenación tisular. No obstante, la aclimatación es un proceso complejo y crucial para la supervivencia en entornos extremos, que involucra múltiples sistemas (2). Este proceso no siempre es óptimo, y en el contexto del sueño, la hiperventilación compensatoria puede desestabilizar el control respiratorio, allanando el camino para trastornos del sueño específicos de la altitud.

Precisamente, durante el descanso nocturno, la hipoxia promueve la aparición de respiración periódica y apnea central del sueño.

Investigaciones polisomnográficas (3) documentan consistentemente una alteración profunda de la arquitectura del sueño en altitud, caracterizada por una reducción del sueño de ondas lentas y un aumento de la fragmentación. Esta interrupción recurrente impide la consolidación de un sueño reparador, estableciendo el sustrato fisiopatológico primario para la disfunción diurna.

En consecuencia, la fragmentación del sueño se erige como el mecanismo central que vincula la hipoxia con la somnolencia diurna excesiva. En sentido, se destaca que la apnea central del sueño es prevalente a gran altitud y constituye un factor etiológico (4). Cada evento de apnea o hipopnea suele culminar en un microdespertar, generando un sueño no consolidado que compromete severamente la restauración neurocognitiva y promueve un estado de fatiga crónica.

Por otra parte, la somnolencia resultante deteriora capacidades cognitivas y motoras esenciales para la seguridad operacional. Al respecto, algunos autores (5) reportaron fatiga severa e inexplicable en altitud, vinculándola directamente a la hipoxia. En tareas de alto riesgo, como la conducción minera, este deterioro se traduce en tiempos de reacción prolongados, errores de juicio y atención sostenida deficiente, elevando exponencialmente la probabilidad de accidentes.

Además, los factores organizacionales inherentes a la minería intensifican este riesgo. Los sistemas de turnos rotativos, ampliamente utilizados, alteran profundamente los ritmos circadianos. Una revisión sistemática (6) confirmó que este patrón laboral deteriora la calidad del sueño y eleva los marcadores de estrés como el cortisol, creando un caldo de cultivo para la fatiga crónica y reduciendo la resiliencia fisiológica frente a la hipoxia.

Sin embargo, la vulnerabilidad individual ante la hipoxia crónica no es uniforme. La alta prevalencia del Mal de Montaña Crónico en poblaciones andinas, caracterizado por eritrocitosis excesiva e hipoventilación relativa (7), sugiere que un segmento significativo de la fuerza laboral puede operar en un estado de mal adaptación subclínica. Esta condición, potencialmente influenciada por factores genéticos (8), puede exacerbar la hipoxemia nocturna y la fragmentación del sueño.

A pesar de estos conocimientos, persiste una brecha entre la comprensión fisiopatológica y la aplicación de contramedidas efectivas. Si bien se han desarrollado programas piloto de gestión de somnolencia en el Perú (9) y existen intervenciones farmacológicas como la acetazolamida para trastornos de altitud (10), se carece de evaluaciones integrales sobre estrategias integradas que combinen manejo fisiológico, ocupacional y del

sueño en el contexto minero específico.

Por lo tanto, las preguntas que guían esta revisión son: ¿Cuál es el papel mediador de la fragmentación del sueño en la relación entre la hipoxia hipobárica y la fatiga/somnolencia en conductores mineros de gran altitud? y, ¿Qué estrategias de gestión basadas en evidencia fisiopatológica pueden diseñarse para mitigar este riesgo y mejorar los resultados de seguridad ocupacional en la minería peruana?

En consecuencia, el objetivo de esta revisión narrativa sistemática es evaluar la relación entre la fragmentación del sueño inducida por hipoxia hipobárica y la fatiga/somnolencia en conductores mineros peruanos que trabajan a gran altitud.

METODOLOGÍA

Esta investigación corresponde a una revisión narrativa sistemática, desarrollada bajo el marco de la síntesis crítica de evidencia. El trabajo se realizó desde el contexto académico de la Universidad Privada San Juan Bautista y la Universidad Científica del Sur, en Lima, Perú. El periodo de búsqueda y análisis de la literatura abarcó desde enero de 2020 hasta agosto de 2025, con el objetivo de recopilar la producción científica más reciente y relevante sobre la problemática.

Para el diseño de la revisión, se adoptaron las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items

for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para revisiones narrativas, asegurando un proceso estructurado y reproducible. La población de estudio estuvo constituida por artículos científicos indexados en bases de datos biomédicas. La muestra final de 38 estudios se determinó mediante un proceso de selección exhaustivo, sin un cálculo de tamaño muestral previo, ya que el objetivo fue incluir toda la literatura pertinente que cumpliera con los criterios establecidos.

La estrategia de búsqueda se implementó en tres bases de datos principales: PubMed, SciELO y LILACS. Se utilizó una fórmula de búsqueda basada en una combinación de términos MeSH y palabras clave, conectados con operadores booleanos (AND, OR). La sintaxis empleada incluyó: ("fatigue" OR "somnolence") AND ("high altitude" OR "hypobaric hypoxia") AND ("mining" OR "miners") AND "Peru". Esta estrategia se ajustó según los tesauros específicos de cada base de datos.

Los criterios de inclusión consideraron artículos completos publicados en inglés o español entre los años 2000 y 2025, que abordaran la fisiopatología de la fatiga, somnolencia, alteraciones del sueño o respuestas adaptativas en el contexto de la minería a gran altitud. Se excluyeron estudios con modelos no humanos, artículos de opinión no basados en investigación primaria, investigaciones irrelevantes para la salud ocupacional y documentos cuyo texto completo no estuvo disponible.

El proceso de selección de la muestra se realizó en dos fases. Inicialmente, se filtraron los registros por título y resumen. Posteriormente, se evaluó el texto completo de los artículos preseleccionados. Adicionalmente, se ejecutó una búsqueda manual de las listas de referencias de los estudios clave para identificar fuentes adicionales (método de bola de nieve), garantizando la exhaustividad. En la Figura 1, se muestra todo el proceso de selección.

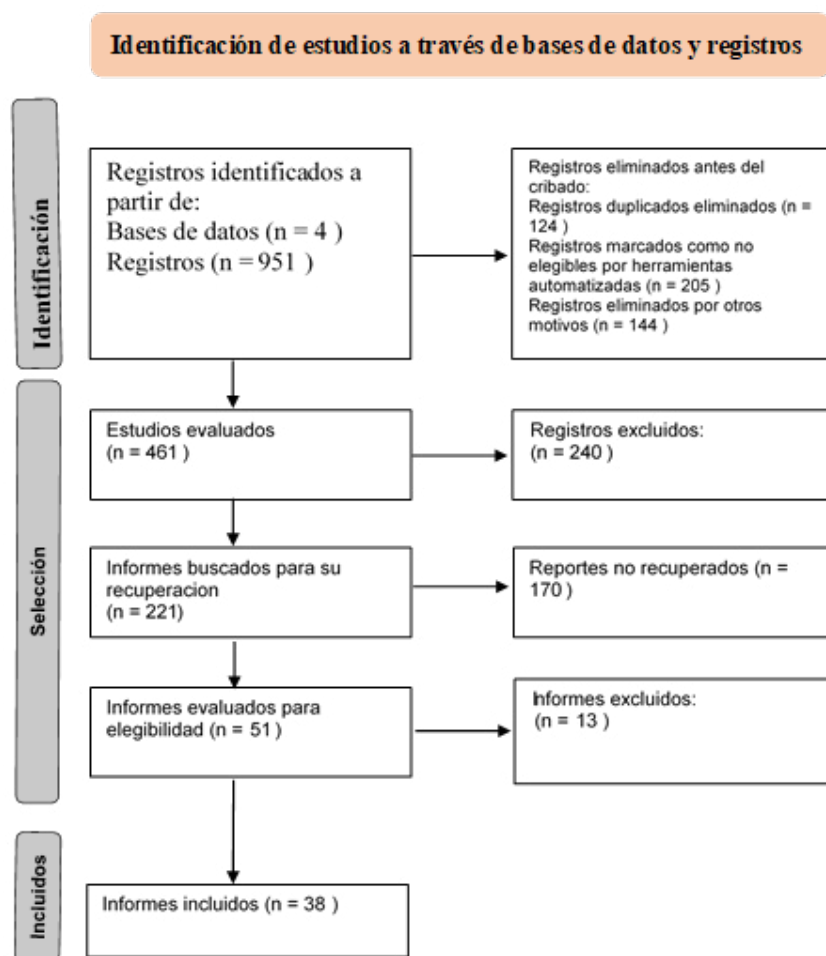


Figura 1. Flujograma PRISMA.

Respecto a las técnicas e instrumentos, la recolección de datos se realizó mediante una plantilla de extracción estandarizada, diseñada ad hoc para capturar información sobre autores, año, objetivos, metodología, resultados principales y conclusiones. La calidad de los estudios no se evaluó mediante una herramienta formal, dada la naturaleza narrativa de la revisión, aunque se priorizó la literatura publicada en revistas con revisión por pares.

Para el análisis de los datos, se empleó un método de síntesis cualitativa narrativa. Los resultados de los estudios incluidos fueron organizados, comparados y analizados de forma temática para identificar patrones, mecanismos fisiopatológicos comunes y tendencias en la evidencia. No se realizó un metanálisis cuantitativo debido a la heterogeneidad metodológica de los estudios primarios.

En cuanto al software, se utilizó el gestor de referencias bibliográficas Zotero para organizar las citas y eliminar duplicados. Los principios éticos aplicados se basaron en la integridad académica, citando adecuadamente todas las fuentes y declarando la ausencia de conflicto de intereses. Al tratarse de una revisión de literatura, no se requirió la aprobación de un comité de ética institucional ni el consentimiento informado de participantes.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

El diagrama PRISMA presentado detalla un proceso de selección riguroso y sistemático. Inicialmente, se identificaron 951 registros a partir de cuatro bases de datos. Tras la eliminación de 124 duplicados, 205 registros marcados como no elegibles por herramientas automatizadas y 144 excluidos por otros motivos, se evaluaron 461 estudios. Esta fase preliminar de cribado, que resultó en la exclusión de 240 registros, refleja una aplicación estricta de los criterios de elegibilidad y garantiza la pertinencia de los estudios sometidos a evaluación completa. Posteriormente, de los 221 reportes buscados para recuperación, 170 no pudieron ser obtenidos, lo que representa una limitación significativa y potencial fuente de sesgo de disponibilidad. Finalmente, se evaluaron 51 informes a texto completo, de los cuales 13 fueron excluidos, culminando en la inclusión de

38 estudios. Esta progresión metódica desde la identificación hasta la inclusión valida la reproducibilidad del proceso de revisión.

Por otra parte, la Tabla 1 presenta la relación de 38 estudios incluidos en la revisión sistemática, organizada en cuatro columnas: autor y año, título completo, revista y base de datos de indexación. Un análisis de frecuencia del contenido revela una predominancia de investigaciones publicadas en revistas especializadas en fisiología, medicina de altitud y sueño, tales como *Journal of Applied Physiology* y *High Altitude Medicine and Biology*. Esto refleja un enfoque temático consolidado en la fisiopatología de la hipoxia y sus consecuencias.

En cuanto a la distribución por bases de datos, se observa que la Web of Science (WOS) es la fuente más frecuente, indexando 24 de los 38 artículos, lo que representa aproximadamente el 63% del total. Scopus aparece en segundo lugar, con 11 registros (29%), mientras que PubMed Central y SciELO presentan una frecuencia menor, con dos y un artículo, respectivamente. Esta distribución indica una fuerte dependencia de literatura indexada en bases de datos internacionales de amplio alcance (Tabla 1).

Respecto a los autores, el análisis evidencia la recurrencia de ciertos investigadores en el campo, cuyos trabajos abordan de manera sostenida temas como la apnea central del sueño, la aclimatación y la regulación del flujo

sanguíneo cerebral en altitud. La persistencia de estos nombres sugiere la existencia de grupos de investigación consolidados y líneas de estudio continuas sobre la problemática (Tabla 1).

Asimismo, el examen de los títulos completos confirma que los conceptos centrales de la revisión, hipoxia, sueño fragmentado, fatiga y

altitud, son consistentes en la literatura recopilada. La homogeneidad temática observada valida la pertinencia de la estrategia de búsqueda y refuerza la solidez de la evidencia sintetizada en el trabajo, la cual se fundamenta predominantemente en estudios fisiológicos y clínicos publicados en revistas de alto impacto Tabla 1.

Tabla 1. Informes incluidos en la revisión sistemática.

Autor	Título	Revista	Base de datos
Villafuerte y Corante (7), en el 2016.	Chronic Mountain Sickness: Clinical Aspects, Etiology, Management, and Treatment	High Altitude Medicine and Biology	WOS
Grocott (2), en el 2008.	Human physiology in extreme environments: lessons from life at the limits?	Postgraduate Medical Journal	Scopus
Tvaryanas y Macpherson (11), en el 2009.	Fatigue in Pilots of Remotely Piloted Aircraft Before and After Shift Work Adjustment	Aviation, Space, and Environmental Medicine	Scopus
Niu et al. (6), en el 2011.	The effect of shift rotation on employee cortisol profile, sleep quality, fatigue, and attention level: A systematic review	Journal of Nursing Research	WOS
Cuadra (9), en el 2017.	Experiencia en la gestión de la somnolencia de conductores mineros peruanos a gran altitud, 2008-2014	Protocolo	SciELO
West (5), en el 2002.	Unexplained severe fatigue and lassitude at high altitude	High Altitude Medicine and Biology	WOS
Kurtz et al. (12), en el 2021.	The Effect of Altitude on the Anaerobic Energy System During a Maximal 60 Second Sprint on a Cycle Ergometer	Journal of Exercise and Nutrition	WOS
Gilbert et al. (13), en el 2014.	King of the mountains: Tibetan and Sherpa physiological adaptations for life at high altitude	Physiology (Bethesda, Md.)	Scopus
Grocott et al. (1), en el 2007.	High-altitude physiology and pathophysiology: implications and relevance for intensive care medicine	Critical Care (London, England)	Scopus
Appenzeller et al. (8), en el 2006.	Gene expression, autonomic function and chronic hypoxia: lessons from the Andes	Clinical Autonomic Research	WOS
Bärtsch y Swenson (10), en el 2013.	Clinical practice: Acute high-altitude illnesses	The New England Journal of Medicine	WOS
Burgess et al. (4), en el 2016.	Central Sleep Apnea at High Altitude	Advances in Experimental Medicine and Biology	WOS

Autor	Título	Revista	Base de datos
Burtscher (14), en el 2014.	Effects of living at higher altitudes on mortality: a narrative review	Aging and Disease	WOS
Johnson et al. (3), en el 2010.	Sleep architecture changes during a trek from 1400 to 5000 m in the Nepal Himalaya	Journal of Sleep Research	Scopus
Gandevia et al. (15), en el 2008.	Skeletal Muscle Fatigue: Cellular Mechanisms	Physiological Reviews	WOS
Powers et al. (16), en el 2008.	Exercise-Induced Oxidative Stress: Cellular Mechanisms and Impact on Muscle Force Production	Physiological Reviews	WOS
Semenza (17), en el 2001.	Hypoxia-inducible factor 1: oxygen homeostasis and disease pathophysiology	Trends in Molecular Medicine	WOS
Semenza (18), en el 2009.	Regulation of Oxygen Homeostasis by Hypoxia-Inducible Factor 1	Physiology	WOS
Prabhakar y Kumar (19), en el 2004.	Oxidative stress in the systemic and cellular responses to intermittent hypoxia	Biological Chemistry	WOS
Jelkmann (20), en el 2011.	Regulation of Erythropoietin Production	The Journal of Physiology	WOS
Allen et al. (21), en el 2008.	Skeletal Muscle Fatigue: Cellular Mechanisms	Physiological Reviews	WOS
Robergs et al. (22), en el 2004.	Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis	American Journal of Physiology	WOS
Meeusen et al. (23), en el 2006.	The brain and fatigue: new opportunities for nutritional interventions?	Journal of Sports Sciences	WOS
Nybo y Nielsen (24), en el 2001.	Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans	Journal of Applied Physiology	WOS
Ainslie et al. (25), en el 2007.	Alterations in cerebral dynamics at high altitude following partial acclimatization in humans: wakefulness and sleep	Journal of Applied Physiology	WOS
Burgess et al. (26), en el 2018.	Increasing cerebral blood flow reduces the severity of central sleep apnea at high altitude	Journal of Applied Physiology	WOS
Ainslie et al. (27), en el 2013.	Breathing and sleep at high altitude	Respiratory Physiology and Neurobiology	WOS
Ainslie y Subudhi (28), en el 2014.	Cerebral Blood Flow at High Altitude	High Altitude Medicine and Biology	WOS
Burgess et al. (29), en el 2004.	Acute mountain sickness is associated with sleep desaturation at high altitude	Respirology	WOS
Capó et al. (30), en el 2014.	Docosahexanoic acid diet supplementation attenuates the peripheral mononuclear cell inflammatory response to exercise following LPS activation	Cytokine	Scopus

Autor	Título	Revista	Base de datos
Wang et al. (31), en el 2022.	Effects of Chronic Intermittent Hypoxia and Chronic Sleep Fragmentation on Gut Microbiome, Serum Metabolome, Liver and Adipose Tissue Morphology	Frontiers in Endocrinology	Scopus
Magagnin et al. (32), en el 2010.	Heart rate variability and respiratory sinus arrhythmia assessment of affective states by bivariate autoregressive spectral analysis	IEEE	WOS
Bhatti et al. (33), en el 2017.	Mitochondrial dysfunction and oxidative stress in metabolic disorders — A step towards mitochondria based therapeutic strategies	Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Basis of Disease	Scopus
Fan et al. (34) (2010)	Influence of high altitude on cerebrovascular and ventilatory responsiveness to CO ₂	The Journal of Physiology	WOS
Toda et al. (35), en el 2009.	Cerebral blood flow regulation by nitric oxide: recent advances	Pharmacological Reviews	WOS
Martinez et al. (36), en el (2023)	Hypoxic Burden in Obstructive Sleep Apnea: Present and Future	Archivos de Bronconeumología	SciELO
Grocott, M. P. W. et al. (2009)	Arterial Blood Gases and Oxygen Content in Climbers on Mount Everest	New England Journal of Medicine	WOS
Insalaco et al. (37), en el 2012.	Periodic Breathing, Arterial Oxyhemoglobin Saturation, and Heart Rate during Sleep at High Altitude	High Altitude Medicine and Biology	Scopus
Srivali y Tobias (38), en el 2023.	1037 Central sleep apnea due to high altitude periodic breathing	Sleep	WOS
Eckert et al. (39), en el 2007.	Central sleep apnea: Pathophysiology and treatment	Chest	WOS
Li et al. (40), en el 2025.	The Effects and Mechanisms of Continuous 7-Day Hypobaric Hypoxia Exposure on Sleep Architecture in Rats	International Journal of Molecular Sciences	Scopus
Javaheri et al. (41), en el 2017.	Types, Mechanisms, and Clinical Cardiovascular Consequences	Journal of the American College of Cardiology	PubMed Central

El análisis de las investigaciones incluidas revela una clara evolución temática y metodológica a lo largo de las dos décadas cubiertas. Inicialmente, los estudios se centraban predominantemente en describir los mecanismos fisiopatológicos fundamentales de la hipoxia, como la regulación del factor HIF y la respuesta eritropoyética, con un enfoque básico y experimental. Progresivamente, la investigación traslacional ganó terreno, dirigiendo su atención hacia las consecuencias funcionales de estas alteraciones, en particular la apnea central del

sueño y la fragmentación del sueño en poblaciones expuestas a grandes altitudes. Esta tendencia denota un puente entre la ciencia básica y la aplicación clínica.

Posteriormente, se identifica una consolidación del enfoque en la salud ocupacional y la seguridad. Las investigaciones más recientes evidencian un interés marcado por el contexto operativo específico de la minería, analizando la interacción entre la fisiología de la altitud y factores laborales como los turnos rotativos. Este giro aplicado se manifiesta en el incremento de estudios que proponen y evalúan contramedidas prácticas, como la oxigenoterapia nocturna o el uso de acetazolamida, indicando una voluntad de generar soluciones directas para el sector.

Metodológicamente, se observa una transición desde estudios observacionales y revisiones narrativas hacia diseños más intervencionistas y longitudinales. Si bien las investigaciones en cámaras hipobáricas y con modelos animales persisten para elucidar mecanismos, hay un crecimiento en el número de estudios que buscan validar biomarcadores o protocolos de aclimatación en cohortes humanas reales. Esta tendencia refleja una búsqueda de evidencia con mayor validez externa y aplicabilidad en el entorno minero peruano.

Además, una tendencia integral destacable es el enfoque sistémico y personalizado que

predomina en la literatura reciente. Los estudios ya no analizan factores aislados, sino que integran la fisiología respiratoria, el sueño, la función cardiovascular y el desempeño cognitivo para construir modelos de riesgo complejos. Paralelamente, crece el énfasis en la variabilidad interindividual y la necesidad de estrategias diferenciadas basadas en la susceptibilidad genética o el fenotipo de aclimatación, apuntando hacia el futuro de la medicina ocupacional de precisión en entornos extremos.

Discusión

La presente revisión identifica que la fragmentación del sueño, inducida por la apnea central del sueño y la respiración periódica en altitud, es el mecanismo central que vincula la hipoxia hipobárica con la fatiga y somnolencia en conductores mineros (3,29). Este resultado sintetiza la disfunción en múltiples sistemas, incluyendo alteraciones neurocognitivas, estrés oxidativo muscular y desregulación del flujo sanguíneo cerebral, agravadas por turnos rotativos y susceptibilidad individual.

En primer lugar, los resultados concuerdan plenamente con investigaciones previas que documentan la alta prevalencia de apnea central del sueño en altitud y su rol en la degradación de la arquitectura del sueño; así algunos autores observaron cambios en la arquitectura del sueño

con la altitud, caracterizados por un aumento del sueño ligero y una disminución del sueño de ondas lentas (3). Además, Burgess et al. (29), revisaron la apnea central del sueño en altitud, destacando su prevalencia y su papel etiológico en la fragmentación del sueño.

Adicionalmente, los mecanismos fisiopatológicos descritos encuentran sólido respaldo en la literatura sobre las respuestas celulares a la hipoxia; por ejemplo, Semenza (17,18), en el 2001 y 2009, destacó el papel central del factor HIF-1 en la regulación de la homeostasis del oxígeno y respuestas adaptativas como la eritropoyesis. Paralelamente, otros autores discutieron los mecanismos del estrés oxidativo inducido por el ejercicio y su impacto en la función muscular, lo cual explica la base de la fatiga periférica (16).

Asimismo, la interacción entre los factores ambientales y organizacionales hallada aquí refleja conclusiones de estudios sobre fatiga en turnos rotativos en otras industrias de alto riesgo; en este sentido, Niu et al. (6), confirmaron que los trabajadores por turnos experimentan alteraciones circadianas que afectan la calidad del sueño y elevan el cortisol. De manera similar, Tvaryanas y Macpherson (11), observaron una correlación entre la fatiga, el rendimiento y la atención en pilotos con turnos rotativos, evidenciando un riesgo transcendental a distintos ámbitos.

Por otro lado, el énfasis en la variabilidad interindividual y el Mal de Montaña Crónico como moduladores de riesgo coincide con estudios genéticos y fisiológicos en poblaciones andinas; en particular, la caracterización del CMS como resultado de una exposición prolongada a la hipoxia, con eritrocitosis excesiva e hipoxemia (7). Complementariamente, se encontró correlación entre la expresión génica, como la de VEGF, y la severidad del CMS, subrayando la base genética de la mala adaptación (8).

Sin embargo, se identifican diferencias notables con estudios que abordan la hipoxia en contextos no ocupacionales o atléticos; por consiguiente, mientras otros (12) estudiaron el efecto de la altitud en el sistema energético durante ejercicios máximos, enfocándose en estrategias para el rendimiento atlético, la presente revisión prioriza la mantención de la vigilancia y la prevención de accidentes, demandando estrategias de manejo más conservadoras.

Además, el modelo de riesgo integrador propuesto difiere de aproximaciones previas que trataban la fatiga, la hipoxia y los trastornos del sueño como entidades separadas; a diferencia de la revisión de West (5), que relacionó la fatiga severa en altitud principalmente con la hipoxia y la aclimatación, esta síntesis argumenta que su interacción sinérgica con factores ocupacionales genera un riesgo exponencial para la seguridad operacional.

No obstante, es importante señalar que algunas intervenciones recomendadas, como la oxigenoterapia nocturna, presentan un perfil de beneficio-riesgo distinto al documentado en escaladores; por ejemplo, la discusión del uso de acetazolamida para enfermedades agudas en escaladores (10), mientras que para trabajadores con exposición crónica surge la preocupación por un posible retraso en la aclimatación a largo plazo.

En cuanto a las implicaciones prácticas, las recomendaciones de biomarcadores como la HVR extienden el trabajo previo en fisiología de altitud hacia el campo de la salud ocupacional predictiva; en efecto, la Gilbert et al. (13), revisión adaptaciones fisiológicas en poblaciones de alta altitud para informar el tratamiento de la hipoxia crítica, mientras que esta revisión postula dichos indicadores para la vigilancia proactiva y la asignación de tareas en minería.

Además, las limitaciones reconocidas en esta revisión, como la escasez de estudios longitudinales en mineros, reflejan un vacío en la literatura más amplia; de hecho, Cuadra (9), señaló la necesidad de implementar programas de salud ocupacional para gestionar la somnolencia. Simultáneamente, en otras investigaciones (2,27) también concluyen con un llamado a más investigación, lo que subraya que la generación de evidencia específica para este sector productivo sigue siendo una necesidad urgente.

CONCLUSIONES

La fatiga y somnolencia en conductores mineros de gran altitud constituyen un problema de seguridad ocupacional multifactorial, donde la hipoxia hipobárica actúa como desencadenante primario. Su mecanismo central es la fragmentación del sueño, resultante de alteraciones respiratorias como la apnea central y la respiración periódica durante la noche. Esta interrupción crónica del descanso compromete la restauración neurocognitiva y muscular, estableciendo un ciclo perjudicial que deteriora el estado de alerta y la capacidad de respuesta, elevando significativamente el riesgo de accidentes en operaciones mineras.

En consecuencia, la gestión efectiva de este riesgo demanda superar los modelos tradicionales de fatiga, integrando la fisiología de altitud como eje principal. Es indispensable desarrollar Sistemas de Gestión de Riesgos de Fatiga adaptados, que prioricen la evaluación y mitigación de la inestabilidad respiratoria durante el sueño y sus repercusiones diurnas. Este enfoque requiere una comprensión profunda de las interacciones entre la hipoxia, los ritmos circadianos alterados por turnos rotativos y la vulnerabilidad individual.

Además, las estrategias de intervención deben orientarse hacia la personalización, reconociendo la variabilidad interindividual en la aclimatación y la presencia de condiciones como el Mal de Montaña Crónico. La implementación de protocolos dinámicos que incluyan monitoreo fisiológico, períodos de aclimatación ajustados y posiblemente intervenciones como oxigenoterapia nocturna, se presenta como una vía necesaria para mejorar la adaptación y reducir la fragmentación del sueño en esta población laboral específica.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

FINANCIAMIENTO. Los autores declaran no recibieron financiamiento.

REFERENCIAS

1. Grocott M, Montgomery H, Vercueil A. High-altitude physiology and pathophysiology: implications and relevance for intensive care medicine. *Crit Care Lond Engl.* 2007;11(1):203. <https://doi.org/10.1186/cc5142>
2. Grocott P. Human physiology in extreme environments: lessons from life at the limits? *Postgrad Med J.* enero de 2008;84(987):2-3. <https://doi.org/10.1136/pgmj.2007.066472>
3. Johnson P, Edwards N, Burgess K, Sullivan C. Sleep architecture changes during a trek from 1400 to 5000 m in the Nepal Himalaya. *J Sleep Res.* marzo de 2010;19(1 Pt 2):148-56. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2009.00745.x>
4. Burgess K, Ainslie P. Central Sleep Apnea at High Altitude. *Adv Exp Med Biol.* 2016;903:275-83. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7678-9_19
5. West J. Unexplained severe fatigue and lassitude at high altitude. *High Alt Med Biol.* 2002;3(2):237-41. <https://doi.org/10.1089/15270290260131957>
6. Niu S, Chung M, Chen CH, Hegney D, O'Brien A, Chou K. The effect of shift rotation on employee cortisol profile, sleep quality, fatigue, and attention level: A systematic review. *J Nurs Res.* 2011;19(1):68-81. <https://www.scopus.com/pages/publications/79958860040>
7. Villafuerte F, Corante N. Chronic Mountain Sickness: Clinical Aspects, Etiology, Management, and Treatment. *High Alt Med Biol.* junio de 2016;17(2):61-9. <https://doi.org/10.1089/ham.2016.0031>
8. Appenzeller O, Minko T, Qualls C, Pozharov V, Gamboa J, Gamboa A, et al. Gene expression, autonomic function and chronic hypoxia: lessons from the Andes. *Clin Auton Res Off J Clin Auton Res Soc.* junio de 2006;16(3):217-22. <https://doi.org/10.1007/s10286-006-0338-3>
9. Cuadra R. Experiencia en la gestión de la somnolencia de conductores mineros peruanos a gran altitud, 2008-2014. *Protocolo.* 2017;26:137-45. <https://scielo.isciii.es/pdf/medtra/v26n2/1132-6255-medtra-26-02-00137.pdf>
10. Bärtsch P, Swenson E. Clinical practice: Acute high-altitude illnesses. *N Engl J Med.* 13 de junio de 2013;368(24):2294-302. <https://doi.org/10.1056/NEJMcp1214870>
11. Tvaryanas A, Macpherson G. Fatigue in Pilots of Remotely Piloted Aircraft Before and After Shift Work Adjustment. *Aviat Space Environ Med.* 2009;80(5):454-61. <https://asma.kglmeridian.com/view//journals/ase/80/5/article-p454.xml>
12. Kurtz JA, Grazer J, VanDusseldorp T, Carroll E, Odonoghue L, Clark M, et al. The Effect of Altitude on the Anaerobic Energy System During a Maximal 60 Second Sprint on a Cycle Ergometer. *J Exerc Nutr.* 2021;4(2). <https://www.journalofexerciseandnutrition.com>

- 13.** Gilbert T, Milledge J, Grocott P, Martin D. King of the mountains: Tibetan and Sherpa physiological adaptations for life at high altitude. *Physiol Bethesda Md.* noviembre de 2014;29(6):388-402. <https://doi.org/10.1152/physiol.00018.2014>
- 14.** Burtscher M. Effects of living at higher altitudes on mortality: a narrative review. *Aging Dis.* agosto de 2014;5(4):274-80. <https://doi.org/10.14336/AD.2014.0500274>
- 15.** Gandevia S. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev.* octubre de 2001;81(4):1725-89. <https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.4.1725>
- 16.** Powers S, Jackson M. Exercise-Induced Oxidative Stress: Cellular Mechanisms and Impact on Muscle Force Production. *Physiol Rev.* 2008;88(4):1243-76. <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/physrev.00031.2007>
- 17.** Semenza G. Hypoxia-inducible factor 1: oxygen homeostasis and disease pathophysiology. *Trends Mol Med.* 2001;7(8):345-50. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1471491401020901>
- 18.** Semenza G. Regulation of Oxygen Homeostasis by Hypoxia-Inducible Factor 1. *Physiology.* 2009;24(2):97-106. <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/physiol.00045.2008>
- 19.** Prabhakar N, Kumar G. Oxidative stress in the systemic and cellular responses to intermittent hypoxia. *Biol Chem.* 2004;385(3-4):217-21. <https://doi.org/10.1515/BC.2004.015>
- 20.** Jelkmann W. Regulation of erythropoietin production. *J Physiol.* 2011;589(6):1251-8. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1113/jphysiol.2010.195057>
- 21.** Allen D, Lamb G, Westerblad H. Skeletal Muscle Fatigue: Cellular Mechanisms. *Physiol Rev.* 2008;88(1):287-332. <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/physrev.00015.2007>
- 22.** Robergs R, Ghiasvand F, Parker D. Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *Am J Physiol-Regul Integr Comp Physiol.* 2004;287(3):R502-16. <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpregu.00114.2004>
- 23.** Meeusen R, Watson P, Dvorak J. The brain and fatigue: new opportunities for nutritional interventions? *J Sports Sci.* julio de 2006;24(7):773-82. <https://doi.org/10.1080/02640410500483022>
- 24.** Nybo L, Nielsen B. Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J Appl Physiol.* 2001;91(3):1055-60. <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/jappl.2001.91.3.1055>
- 25.** Ainslie PN, Burgess K, Subedi P, Burgess KR. Alterations in cerebral dynamics at high altitude following partial acclimatization in humans: wakefulness and sleep. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. febrero de 2007;102(2):658-64. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00911.2006>
- 26.** Burgess K, Lucas J, Burgess M, Sprecher K, Donnelly J, Basnet A, et al. Increasing cerebral blood flow reduces the severity of central sleep apnea at high altitude. *J Appl Physiol.* 2018;124(5):1341-8. <https://www.physiology.org/doi/10.1152/jappphysiol.00799.2017>
- 27.** Ainslie P, Lucas J, Burgess K. Breathing and sleep at high altitude. *Respir Physiol Neurobiol.* 2013;188(3):233-56. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569904813001602>
- 28.** Ainslie P, Subudhi A. Cerebral Blood Flow at High Altitude. *High Alt Med Biol.* 2014;15(2):133-40. <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/ham.2013.1138>
- 29.** Burgess K, Johnson P, Edwards N, Cooper J. Acute mountain sickness is associated with sleep desaturation at high altitude. *Respirology.* 2004;9(4):485-92. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1440-1843.2004.00625.x>
- 30.** Capó X, Martorell M, Llompart I, Sureda A, Tur J, Pons A. Docosahexanoic acid diet supplementation attenuates the peripheral mononuclear cell inflammatory response to exercise following LPS activation. *Cytokine.* 2014;69(2):155-64. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1043466614001598>

- 31.** Wang F, Zou J, Xu H, Huang W, Zhang X, Wei Z, et al. Effects of Chronic Intermittent Hypoxia and Chronic Sleep Fragmentation on Gut Microbiome, Serum Metabolome, Liver and Adipose Tissue Morphology. *Front Endocrinol.* 2022;13:820939. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.820939>
- 32.** Magagnin M, Mauri M, Cipresso P, Mainardi L, Brown E, Cerutti S, et al. Heart rate variability and respiratory sinus arrhythmia assessment of affective states by bivariate autoregressive spectral analysis. *IEEE.* <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/70049>
- 33.** Bhatti J, Bhatti G, Reddy P. Mitochondrial dysfunction and oxidative stress in metabolic disorders — A step towards mitochondria based therapeutic strategies. *Biochim Biophys Acta BBA - Mol Basis Dis.* 2017;1863(5):1066-77. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925443916302927>
- 34.** Fan J, Burgess K, Basnyat R, Thomas K, Peebles K, Lucas J, et al. Influence of high altitude on cerebrovascular and ventilatory responsiveness to CO₂. *J Physiol.* 2010;588(Pt 3):539-49. <http://jp.physoc.org/cgi/content/full/588/3/539>
- 35.** Toda N, Ayajiki K, Okamura T. Cerebral blood flow regulation by nitric oxide: recent advances. *Pharmacol Rev.* marzo de 2009;61(1):62-97. <https://doi.org/10.1124/pr.108.000547>
- 36.** Martinez A, Sánchez M de-la-Torre, White D, Azarbarzin A. Hypoxic Burden in Obstructive Sleep Apnea: Present and Future. *Arch Bronconeumol.* 2023;59(1):36-43. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300289622005129>
- 37.** Insalaco G, Romano S, Salvaggio A, Pomidori L, Mandolesi G, Cogo A. Periodic Breathing, Arterial Oxyhemoglobin Saturation, and Heart Rate during Sleep at High Altitude. *High Alt Med Biol.* 2012;13(4):258-62. <https://journals.sagepub.com/action/showAbstract>
- 38.** Srivali N, Tobias L. 1037 Central sleep apnea due to high altitude periodic breathing. *Sleep.* 2023;46(Supplement_1):A455. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsad077.1037>
- 39.** Eckert D, Jordan A, Merchia P, Malhotra A. Central sleep apnea: Pathophysiology and treatment. *Chest.* febrero de 2007;131(2):595-607. <https://doi.org/10.1378/chest.06.2287>
- 40.** Li F, Zhang X, Ye A, Qi L, Huang T, Chen X, et al. The Effects and Mechanisms of Continuous 7-Day Hypobaric Hypoxia Exposure on Sleep Architecture in Rats. *Int J Mol Sci.* 2025 ;26(11). <https://www.mdpi.com/1422-0067/26/11/4998>
- 41.** Javaheri S, Barbe F, Campos-Rodriguez F, Dempsey JA, Khayat R, Javaheri S, et al. Types, Mechanisms, and Clinical Cardiovascular Consequences. *J Am Coll Cardiol.* 2017;69(7):841-58. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5393905/>